

TORLON® 聚酰胺-酰亚胺树脂

设计指南

version 11/05

SOLVAY
Advanced Polymers



MORE PLASTICS WITH MORE PERFORMANCE

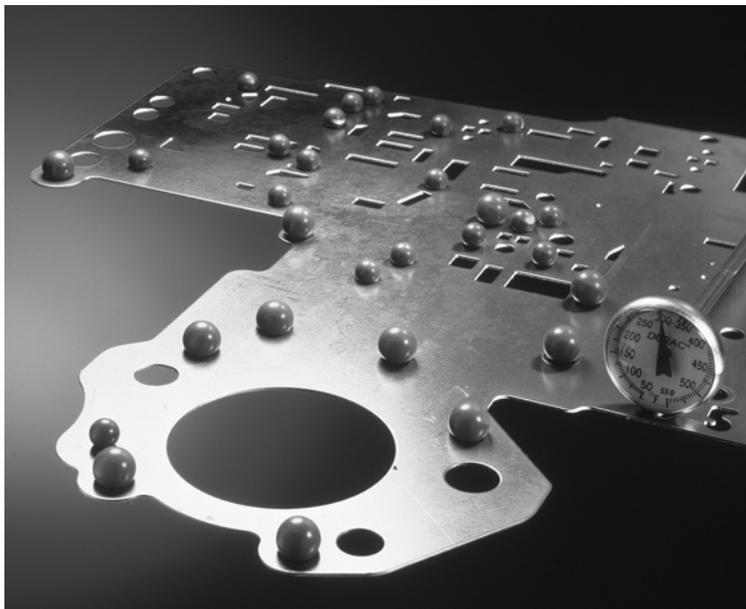
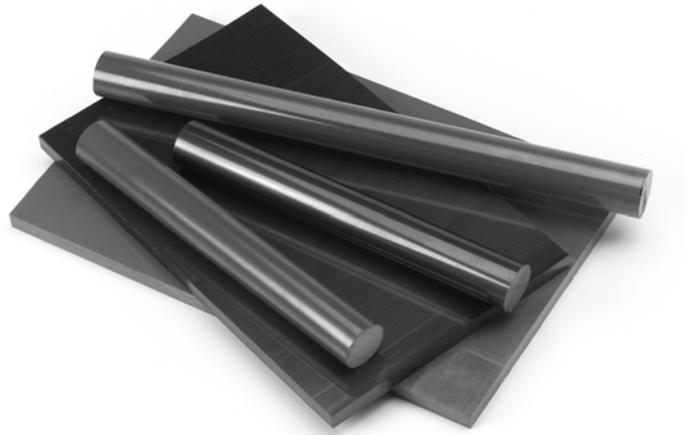


飞机夹紧螺母

由 TORLON 树脂制成的夹紧螺母，不会在安装时划破保护涂层并刮伤金属，也不会在使用过程中发生腐蚀。这将显著减少替换被腐蚀的金属部件所需的工时以及昂贵的工序。它们可以经受住超过 100 英寸磅的扭力，而同时又有足够的伸长率使其能轻易被夹在位置上。

TORLON 树脂的坯料

可通过注塑成型、压塑成型或挤塑将 TORLON® 树脂制成在原型加工中非常有用的坯料。可制得外径大到 900 mm，长达 150 mm，重达 54 kg 的各种坯料。



四轮驱动汽车变速器的逆止球

克莱斯勒公司的产品开发工程师指定使用 Torlon® 聚酰胺-酰亚胺树脂制造逆止球，使高转矩自动变速器的耐用性得到了巨大的改进。其 Magnum 发动机产品系列中的多种三档和四档变速器型号都采用了这种树脂。这种逆止球可经受系统压力，并具有优异的密封面，不会对金属造成损坏，而且在接近 150°C 的高温下也不会对润滑油产生任何不利的反应。

目录

引言	1	行业和机构认证	32
TORLON® 高性能成型聚合物	1	结构设计	33
高性能的 TORLON 聚合物	2	材料效率 — 比强度和比模量	33
物理特性	3	几何形状和载荷考虑	34
性能特性	6	应力和挠曲公式的应用实例	34
机械特性	6	例 1: 短期载荷	34
极限温度下的拉伸强度和挠曲强度	6	例 2: 稳定载荷	34
超高温	6	例 3: 循环载荷	35
根据美国材料试验协会 (ASTM) 的试验方法 D 638 得到的拉伸特性	7	应力集中	35
超低温	7	TORLON 树脂的最大工作应力	36
挠曲模量 — 高温下的刚度	7	采用 TORLON® 树脂的设计	37
应力 — 应变关系	8	加工方式	37
耐循环应力性	9	注塑成型	37
疲劳强度	9	挤塑	37
耐冲击性	10	压塑成型	37
断裂韧度	11	TORLON 部件的后固化处理	38
热稳定性	12	TORLON 部件的设计原则	38
热重分析	12	壁部	38
长时间受热的影响	12	壁厚的转变	38
UL 相对热指数	12	脱模角度	38
热老化后的特性保持	12	模芯	39
比热	13	筋	39
导热率	13	凸台	39
线性热膨胀系数 (CLTE)	13	咬边	39
抗蠕变性	14	模塑嵌入件	39
可燃性	16	螺纹	39
氧指数	16	孔	39
美国国家标准局 (NBS) 烟气密度	16	二次加工	40
点燃特性	16	接合	40
UL 94 可燃性标准	17	机械接合技术	40
水平燃烧试验	17	拉扣配合: 既经济又简单	40
20 MM 垂直燃烧试验	17	螺纹紧固件	40
联邦航空管理局 (FAA) 可燃性	18	自动攻丝螺钉	40
UL 57 电气照明器材	18	模塑嵌入件	40
各种环境中的性能	19	螺纹机械嵌入件	40
耐化学性	19	模塑螺纹	40
耐汽车和航空工作液的能力	20	过盈配合	41
应力下的耐化学性	20	超声嵌入件	41
水的影响	21	其它的机械接合技术	41
吸收速度	21	用粘合剂粘合	42
恒定湿度下的平衡吸收	21	粘合剂的选择	42
尺寸变化	22	TORLON PAI 牌号	42
尺寸和特性的恢复	22	表面的准备	42
机械特性和电特性的变化	22	粘合剂的应用	42
骤然高温暴露的约束条件	23	固化处理步骤	42
日晒色牢度 (Weather-Ometer®) 试验	24	各种粘合剂的粘合强度	42
抗伽马辐射性	24	TORLON 部件与金属的粘合	43
电特性	25	TORLON 树脂部件的机加工原则	44
用于绝缘的 TORLON 聚合物	25	应对机加工部件进行再固化	44
在需要耐磨损场合的应用	26	技术服务	45
TORLON PAI 耐磨损牌号的介绍	26		
轴承设计方案	26		
磨损率的关系式	26		
计算压力和速度	26		
PV 极限值概念	27		
测量耐磨损性	27		
TORLON 耐磨损牌号	27		
接触面对磨损率的影响	29		
有润滑的耐磨损性	29		
耐磨损性与后固化处理	30		
轴承设计	31		

表

TORLON 工程聚合物	1
牌号和应用	2
典型特性 * — 美制单位	4
典型特性 * — 国际制单位	5
按照 ASTM D638 方法得到的室温拉伸特性	7
TORLON 模塑树脂在 -200°C 下的特性	7
3.2 mm 试棒的耐伊佐德 (Izod) 冲击	10
聚酰胺—酰亚胺兼顾了断裂韧度和高的玻璃转化温度	11
TORLON 树脂的相对热指数	12
TORLON 4203L 热老化后的特性保持	13
TORLON 聚合物的比热	13
TORLON 树脂的导热率	13
TORLON 树脂和部分金属的线性热膨胀系数 (CLTE)*	13
氧指数, ASTM D2863	16
美国国家标准局 (NBS) 烟气密度	16
联邦航空管理局 (FAA) 毒气排放试验	16
TORLON 4203L 的点燃特性	17
UL 对 V-0、V-1 或 V-2 材料分类的标准	17
由保险商实验所制定的垂直可燃性标准 (UL 94)	17
联邦航空管理局 (FAA) 垂直可燃性	18
UL 57 对电气照明器材的可燃性要求	18
TORLON 4203L 在 90°C 的温度下, 24 小时后的耐化学性	19
在 150°C 的汽车润滑油中浸渍后的特性保持率	20
在 150°C 的福特自动变速器油中 1,500 小时后的影响	20
在飞机液压液中浸渍后的拉伸强度	20
吸水量为 2% 时 TORLON 4203L 的特性变化	22
重要的电指标	25
TORLON 树脂的电特性	25
磨损系数和磨损率	28
采用不同金属接触面时 TORLON 4301 PAI 的磨损特征	29
TORLON 4301 有润滑的耐磨损性	29
TORLON 聚合物及部分金属的比强度和比模量	33
注塑成型 TORLON 树脂的最大工作应力	36
壁厚与嵌入件外径之间的关系	39
HeliCoil 嵌入件的强度	40
TORLON 螺栓的强度	40
TORLON PAI 螺纹的螺钉咬合强度	41
TORLON PAI 与 TORLON PAI 之间粘合的剪切强度	42
TORLON PAI 与金属之间粘合的剪切强度	43
TORLON 树脂部件的机加工原则	44

图

聚酰胺—酰亚胺的结构	1
TORLON 树脂具有出色的拉伸强度	6
TORLON 树脂在宽广的温度范围内具有高的挠曲强度	6
在 200°C, 增强 TORLON 树脂的拉伸强度超过竞争性的增强塑料	6
在 200°C, 增强 TORLON 树脂的挠曲强度超过竞争性的增强塑料	6
TORLON 聚合物的挠曲模量	7
在 200°C, 增强的 TORLON 牌号的挠曲模量超过竞争性的增强塑料	8
在 23°C 受张力的应力—应变曲线	8
在 23°C 的局部应力—应变曲线	8
TORLON 树脂在 135°C 时受张力的应力—应变曲线	8
TORLON 树脂在 30Hz 下的挠曲疲劳强度	9
TORLON 7130 和 4203L 在 30Hz 下的拉伸/拉伸疲劳强度, A 比值为: 0.90	9
TORLON 7130 在 2Hz 下的拉伸/拉伸低循环疲劳强度, A 比值为: 0.90	9
TORLON 树脂在 180°C, 30Hz 下的高温挠曲疲劳强度	10
TORLON 树脂与竞争性材料的耐伊佐德 (Izod) 冲击比较	10
紧凑拉伸试样	11
TORLON 4203L 的热重分析	12
TORLON 树脂在 250°C 下热老化后仍保持强度	13
TORLON 4203L 在 23°C 下的应变与时间的关系	14
TORLON 4275 在 23°C 下的应变与时间的关系	14
TORLON 4301 在 23°C 下的应变与时间的关系	14
TORLON 5030 在 23°C 下的应变与时间的关系	14
TORLON 7130 在 23°C 下的应变与时间的关系	14
TORLON 4203L 在 200°C 下的应变与时间的关系	15
TORLON 4275 在 200°C 下的应变与时间的关系	15
TORLON 4301 在 200°C 下的应变与时间的关系	15
TORLON 5030 在 200°C 下的应变与时间的关系	15
TORLON 7130 在 200°C 下的应变与时间的关系	15
TORLON 聚合物在 23°C, 50% 相对湿度时的吸水性	21
TORLON 聚合物在 40°C, 90% 相对湿度时的吸水性	21
平衡水分吸收与相对湿度的关系	21
TORLON 聚合物在 23°C, 50% 相对湿度时的尺寸变化	22
TORLON 聚合物在 40°C, 90% 相对湿度时的尺寸变化	22
TORLON 4203L 的热骤变温度与水分含量的关系	23
TORLON 4203L 的热骤变温度与暴露时间的关系	23
暴露于模拟天候环境下, TORLON 4203L 的伸长率基本恒定	24
暴露于模拟天候环境下, TORLON 4203L 的拉伸强度变化	24
由于伽马辐射导致的 TORLON 4203L 特性变化	24
计算轴承的投影面积	26
止推垫圈的计算实例	26
材料的磨损率是压力速度乘积 (PV) 的函数	27
止推垫圈试样	27
低速时的耐磨损性	29
中速时的耐磨损性	29
高速时的耐磨损性	29
在 260°C 下长时间固化可改善耐磨损性	30
基本轴间隙	31
高环境温度下的间隙系数	31
压配干涉	31
TORLON 树脂与金属之比强度的对比	33
实例中所用的梁	34
圆形应力集中源的应力集中因子 (弹性应力, 轴向拉伸)	35
不同壁厚之间的逐渐过渡	38
脱模角度	38

TORLON® 高性能成型聚合物

欲在极高温度和应力条件下获得可靠的性能，请采用 TORLON 聚合物。由 TORLON 工程聚合物制成的部件超乎一般热可塑塑料所能考虑的使用状况。这正是为什么航天飞机的零部件、汽车变速器以及许多其它关键部件都是采用 TORLON 聚合物注塑成型的。经过许多工业的考验，如电气和电子工业、商用设备、航空航天、交通运输、加工制程以及重工业等，TORLON 部件都能面对设计的挑战。

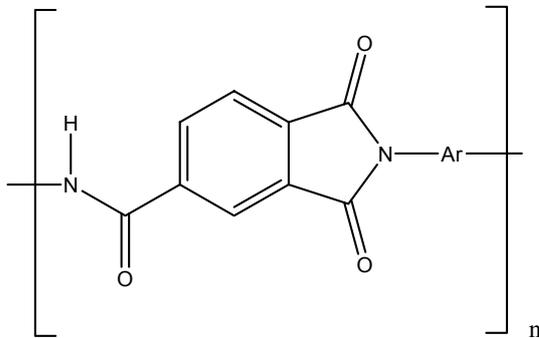
或许其它的一些工程塑料可以在 260°C 的条件下工作，但 TORLON 聚合物在这样的严苛温度下仍能保持其优异的强度。在高温塑料中，TORLON 聚合物具有可注塑成型的优势。这意味着精确的复制功能和低单位成本，使 TORLON 聚合物能低成本的解决困难设计问题。

本手册将向读者介绍 TORLON 聚合物产品系列。通过大量的图形和列表，展现了 TORLON 聚合物的物理特性和承载能力。设计原则的研讨和二次加工的说明主要集中在高性能 TORLON 部件的实际制作方面。通过使用本手册，设计者可以将这些优异性能的塑料应用于各自的特定需求中。

苏威高性能塑料公司的 TORLON 高性能聚合物是一种聚酰胺-酰亚胺树脂，其一般结构为：

图 1

聚酰胺-酰亚胺的结构



多变化的应用对材料的耐高温、高强度以及具有经济性的注塑成型的要求不同，引导出多种 TORLON 商品级产品，其可分为两大类：高强度牌号和耐磨损牌号。

高强度牌号在高温下，甚至在相当大的应力下，具有和金属差不多的性能。

这类牌号适用于制造需要反复使用的精密机械和承载部件。

耐磨损牌号中的添加剂，使 TORLON 聚酰胺-酰亚胺树脂的内在润滑性得到了进一步的提高。无论是在有润滑还是无润滑的环境中，由 TORLON 聚合物制成的运动部件都能可靠地工作。

表 1

TORLON 工程聚合物

高强度	耐磨损
4203L	4275
5030	4301
7130	4435

只有 TORLON 工程聚合物才能提供下列的综合性能：

- 从低温到 260°C 都能正常工作
- 出色的机械强度
- 易加工
- 低可燃性和低生烟性
- 疲劳强度
- 冲击强度
- 抗蠕变性
- 耐磨损性
- 低膨胀系数
- 优异的热稳定性
- 耐航空和汽车工作液的能力

高性能的 TORLON 聚合物

TORLON 聚酰胺-酰亚胺树脂是一类能真正提供优异性能，并可注塑成型的热可塑性材料。由于产品的最终用途各种各样，因而开发了多种不同牌号的产品，每个牌号都有各自的最佳特性。

如果您的应用需要一种特殊的改性牌号，我们可以调配生产出符合您要求的 TORLON 聚合物。

本页描述了 TORLON 产品系列并列出了其建议的通常的应用领域。有关特殊应用的具体建议，请与苏威高性能塑料公司的代表联系。

表 2

牌号和应用

TORLON 牌号	添加成分	特性描述	应用
高强度			
4203L	TiO ₂	最佳耐冲击性、最大伸长率以及良好的脱模性和电特性。	连接器、开关、继电器、止推垫圈、花键衬、阀座、单向球、提动阀芯、机械连接件、轴衬、耐磨环、绝缘体、凸轮、采摘机爪、滚珠轴承、辊子及热绝缘体
5030	30% 玻璃纤维	高刚性、高温下良好的刚性保持性、非常低的蠕变性和高强度。	内嵌插座、齿轮、阀板、整流罩、管夹、叶轮、转子、壳体、保护垫圈、端子板、绝缘体及托架
7130	30% 碳纤维	与 5030 类似，但刚性更高。高温下的刚性保持性最好，耐疲劳性最好。导电。	代替金属、壳体、机械连接件、齿轮、紧固件、花键衬、货物辊、托架、阀、迷宫式密封件、整流罩、管夹、支座绝缘子、叶轮、护罩、潜在的电磁干扰屏蔽
耐磨损			
4301	石墨粉 含氟聚合物	具有高压缩强度、通用性、高性能、低摩擦系数和耐磨损的复合物。	轴承、止推垫圈、耐磨垫、条板、活塞环、密封件、叶片及阀座
4275	石墨粉 含氟聚合物	与 4301 类似，在高速时具有更好的耐磨损性。	轴承、止推垫圈、耐磨垫、条板、活塞环、密封件、叶片及阀座
4435	石墨粉 含氟聚合物及 其它添加剂	在较高压力和速度下 (105 Mpa•m/min) 具有非常好的耐磨损性和低的摩擦系数。	线圈骨架、叶片、止推垫圈、密封圈及活塞

物理特性

高冲击强度、优异的机械强度以及在高温环境中保持这些特性的出色能力，是所有 TORLON 树脂的共有特征。

在室温下，TORLON 4203L 的拉伸强度和挠曲强度为聚碳酸酯和尼龙的两倍。在 260°C，TORLON 4203L 的拉伸强度和挠曲强度与这些工程树脂其在室温下的值几乎一样。即使长期暴露于高温下仍能保持优良的物理特性。

所有注塑成型、经过后固化处理的试样通常都具有这样的物理特性。



第 4 和第 5 页的典型特性表中的脚注。

- (1) 按照 ASTM D638 方法所得到的拉伸特性列在第 7 页。
- (2) 注意：为获得这些数据而采用的试验方法仅测量材料在受控实验室条件下对热和火焰的反应，不可能准确反映实际燃烧条件下该材料的火灾危害程度。

表 3

典型特性 * — 美制单位

特性	ASTM 试验方法	单位	4203L	4301	4275	4435	5030	7130
机械性能								
拉伸强度 ⁽¹⁾	D1708	kpsi						
-321°F			31.5		18.8		29.5	22.8
73°F			27.8	23.7	19.0	16.0	29.7	29.4
275°F			16.9	16.3	16.9	13.0	23.1	22.8
450°F			9.5	10.6	8.1	7.5	16.3	15.7
拉伸伸长率	D1708	%						
-321°F			6		3		4	3
73°F			15	7	7	6	7	6
275°F			21	20	15	4	15	14
450°F			22	17	17	3	12	11
拉伸模量	D1708	kpsi						
73°F			700	950	1,130	1,410	1,560	3,220
挠曲强度	D790	kpsi						
-321°F			41.0		29.0		54.4	45.0
73°F			34.9	31.2	30.2	22.0	48.3	50.7
275°F			24.8	23.5	22.4	18.7	35.9	37.6
450°F			17.1	16.2	15.8	13.2	26.2	25.2
挠曲模量	D790	kpsi						
-321°F			1,140		1,390		20,400	3,570
73°F			730	1,000	1,060	2,150	1,700	2,880
275°F			560	790	810	1,630	1,550	2,270
450°F			520	720	740	1,500	1,430	1,900
压缩强度	D695	kpsi	32.1	24.1	17.8	20.0	38.3	36.9
压缩模量	D695	kpsi	580	770	580	1,240	1,150	1,430
剪切强度	D732	kpsi						
73°F			18.5	16.1	11.1	8.7	20.1	17.3
伊佐德 (Izod) 冲击强度 (1/8 in)	D256	ft•lbs/in						
缺口			2.7	1.2	1.6	0.8	1.5	0.9
无缺口			20.0	7.6	4.7	4.1	9.5	6.4
泊松比			0.45	0.39	0.39	0.42	0.43	0.39
热性能								
变形温度	D648	°F						
264 psi			532	534	536	532	539	540
线性热膨胀系数	D696	ppm/°F	17	14	14	8	9	5
导热率	C177	Btu in/hr ft ² °F	1.8	3.7	4.5	5.6	2.5	3.6
可燃性 ⁽²⁾ , 保险商实验所 (UL)			94 V-0	94 V-0				
极限氧指数 ⁽²⁾	D2863	%	45	44	45		51	52
电性能								
介电常数	D150							
10 ³ Hz			4.2	6.0	7.3		4.4	
10 ⁶ Hz			3.9	5.4	6.6		4.2	
损耗因子	D150							
10 ³ Hz			0.026	0.037	0.059		0.022	
10 ⁶ Hz			0.031	0.042	0.063		0.050	
体积电阻率	D257	ohm-cm	2 × 10 ¹⁷	8 × 10 ¹⁵	8 × 10 ¹⁵	2 × 10 ¹⁷	2 × 10 ¹⁷	
表面电阻率	D257	ohm	5 × 10 ¹⁸	8 × 10 ¹⁷	4 × 10 ¹⁷	6 × 10 ⁶	1 × 10 ¹⁸	
介电强度 (0.040 in)	D149	V/mil	580				840	
一般性能								
密度	D792	lb/in ³	0.051	0.053	0.054	0.057	0.058	0.054
硬度, 洛氏 E	D785		86	72	70	62	94	94
吸水性, 24 小时	D570	%	0.33	0.28	0.33	0.12	0.24	0.26

* 典型特性—各批次产品的实际特性会在规格所要求的范围内有所变化。

表 4

典型特性 * — 国际制单位

特性	ASTM 试验方法	单位	4203L	4301	4275	4435	5030	7130
机械性能								
拉伸强度 ⁽¹⁾	D1708	MPa						
-200°C			218		130		204	157
23°C			192	163	131	110	205	203
135°C			117	112	117	90	159	157
230°C			66	73	56	52	112	108
拉伸伸长率	D1708	%						
-200°C			6		3		4	3
23°C			15	7	7	6	7	6
135°C			21	20	15	4	15	14
230°C			22	17	17	3	12	11
拉伸模量	D1708	GPa						
23°C			4.9	6.6	7.8	9.7	10.8	22.2
挠曲强度	D790	MPa						
-200°C			283		200		375	310
23°C			241	215	208	152	333	350
135°C			171	162	154	129	248	259
230°C			118	112	109	91	181	174
挠曲模量	D790	GPa						
-200°C			7.9		9.6		14.1	24.6
23°C			5.0	6.9	7.3	14.8	11.7	19.9
135°C			3.9	5.4	5.6	11.2	10.7	15.7
230°C			3.6	5.0	5.1	10.3	9.9	13.1
压缩强度	D695	MPa	220	166	123	138	264	248
压缩模量	D695	GPa	4.0	5.3	4.0	8.5	7.9	9.9
剪切强度	D732	MPa						
23°C			128	112	77	60	139	119
伊佐德 (Izod) 冲击强度 (3.2 mm)	D256	J/m						
缺口			143	64	85	42	80	48
无缺口			1,062	404	250	218	504	340
泊松比			0.45	0.39	0.39	0.42	0.43	0.39
热性能								
变形温度	D648	°C						
1.8 MPa			278	279	280	278	282	282
线性热膨胀系数	D696	ppm/°C	30.6	25.2	25.2	14.4	16.2	9.0
导热率	C177	W/mK	0.26	0.54	0.65	0.80	0.37	0.53
可燃性 ⁽²⁾ , 保险商实验所 (UL)	UL94		94 V-0	94 V-0				
极限氧指数 ⁽²⁾	D2863	%	45	44	45		51	52
电性能								
介电常数	D150							
10 ³ Hz			4.2	6.0	7.3		4.4	
10 ⁶ Hz			3.9	5.4	6.6		4.2	
损耗因子	D150							
10 ³ Hz			0.026	0.037	0.059		0.022	
10 ⁶ Hz			0.031	0.042	0.063		0.050	
体积电阻率	D257	ohm-cm	2 × 10 ¹⁷	8 × 10 ¹⁵	8 × 10 ¹⁵	2 × 10 ¹⁷	2 × 10 ¹⁷	
表面电阻率	D257	ohm	5 × 10 ¹⁸	8 × 10 ¹⁷	4 × 10 ¹⁷	6 × 10 ⁶	1 × 10 ¹⁸	
介电强度 (1 mm)	D149	kV/mm	23.6				32.6	
一般性能								
密度	D792	g/cm ³	1.41	1.47	1.49	1.58	1.61	1.49
硬度, 洛氏 E	D785		86	72	70	62	94	94
吸水性, 24 小时	D570	%	0.33	0.28	0.33	0.12	0.24	0.26

* 典型特性—各批次产品的实际特性会在规格所要求的范围内有所变化。

性能特性

TORLON 工程聚合物无以匹敌的特性能够满足那些要求最为苛刻的应用。在宽广的温度范围内和持续应力作用下，保持强度、低蠕变性、耐燃性、优异的电特性以及在恶劣环境下仍具有异常的完整性，使 TORLON 聚酰胺-酰亚胺成为工程塑料中的一枝独秀。

机械特性

极限温度下的拉伸强度和挠曲强度

超高温

因为具有出色的拉伸强度和挠曲强度，而且在超过 230°C 的温度下持续工作仍能保持这些特性，TORLON 聚酰胺-酰亚胺可用于那些对其它多数工程塑料而言非常苛刻的应用中。

虽然许多竞争性的塑料宣称其能够在高达 260°C 的温度下“短时工作”，但 TORLON 聚合物可在极高的温度下仍保持其完整的特性。如图 2 和 3 所示，TORLON 树脂在高温下保持其拉伸强度和挠曲强度的能力非常优异。

即使在 200°C，TORLON 工程聚合物在拉伸和挠曲状态下的强度都要胜过其它高性能工程塑料。图 4 和 5 将增强的 TORLON 聚合物与其它高性能增强树脂进行了比较。

图 3

TORLON 树脂在宽广的温度范围内具有高的挠曲强度

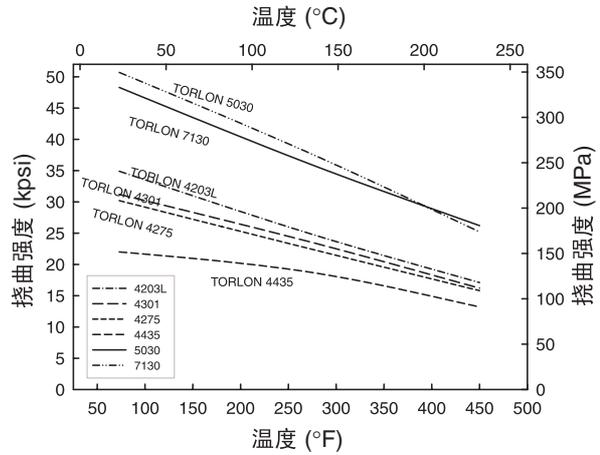


图 4

在 200°C，增强 TORLON 树脂的拉伸强度超过竞争性的增强塑料

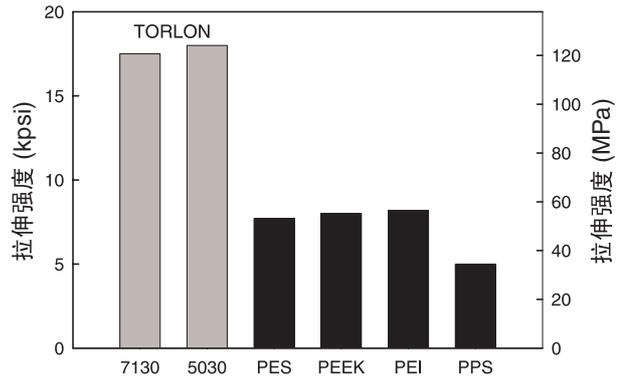


图 5

在 200°C，增强 TORLON 树脂的挠曲强度超过竞争性的增强塑料

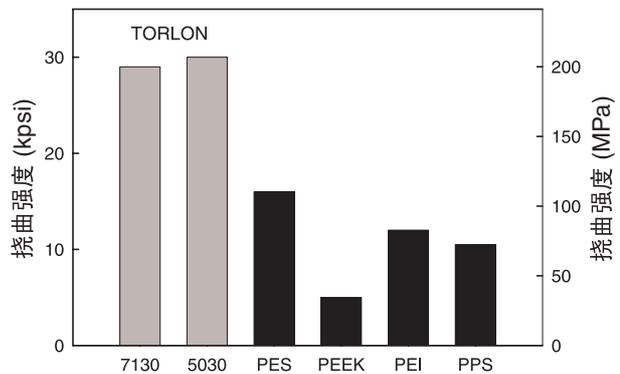
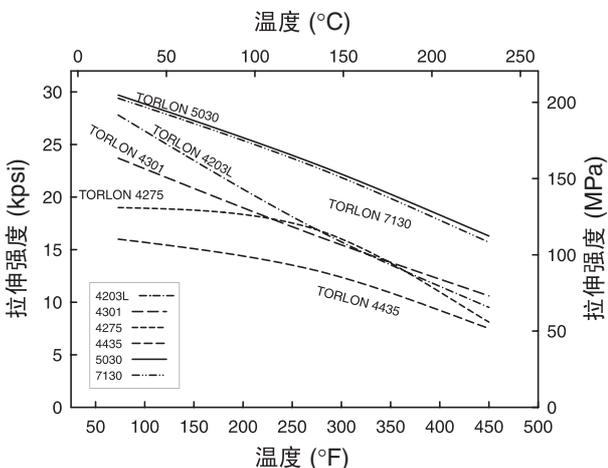


图 2

TORLON 树脂具有出色的拉伸强度



根据美国材料试验协会 (ASTM) 的试验方法 D 638 得到的拉伸特性

前述部分所报道的拉伸特性是按照美国材料试验协会 (ASTM) 的试验方法 D 1708 得到的。由于拉伸特性通常是采用美国材料试验协会 (ASTM) 的试验方法 D 638 进行测定的, 所以也按照该方法对 TORLON 聚合物进行了试验。所得数据见表 5。

表 5

按照 ASTM D638 方法得到的室温拉伸特性

特性	单位	TORLON 牌号					
		4203L	4301	4275	4435	5030	7130
拉伸强度	kpsi	22.0	16.4	16.9	13.6	32.1	32.0
	(MPa)	(152)	(113)	(117)	(94)	(221)	(221)
伸长率	%	7.6	3.3	2.6	1.0	2.3	1.5
拉伸模量	kpsi	650	990	1,280	2,100	2,110	2,400
	(GPa)	(4.5)	(6.8)	(8.8)	(14.5)	(14.5)	(16.5)



超低温

在低温端, TORLON 聚合物不像其它塑料那样会变脆。表 6 显示了 TORLON 树脂在低温条件下仍具有优异的特性。

表 6

TORLON 模塑树脂在 -200°C 下的特性

特性	单位	TORLON 牌号			
		4203L	4275	7130	5030
拉伸强度 ⁽¹⁾	MPa	217	130	157	203
断裂伸长率 ⁽¹⁾	%	6	3	3	4
挠曲强度 ⁽²⁾	MPa	283	200	310	375
挠曲模量 ⁽²⁾	GPa	7.9	9.6	24.6	14.1

⁽¹⁾ ASTM D 1708
⁽²⁾ ASTM D 790

挠曲模量 — 高温下的刚度

TORLON 聚酰胺—酰亚胺具有高模量, 在刚度非常关键的场合, 它是金属的良好替代品。TORLON 部件可用明显较轻的重量提供相同的刚度。如图 6 所示, TORLON 树脂的模量高而且基本恒定, 因此可以预测其部件具有优异的刚度保持性和抗蠕变性或抗冷流变性, 即使是在 230°C 也一样。如图 7 所示, TORLON 聚合物在高温下仍具有高的模量, 这是竞争性材料所无法比拟的, 它们在较高温度下会丧失刚度。

图 6

TORLON 聚合物的挠曲模量

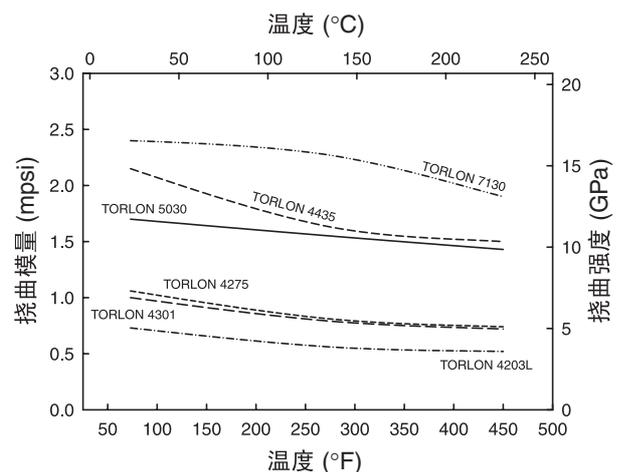
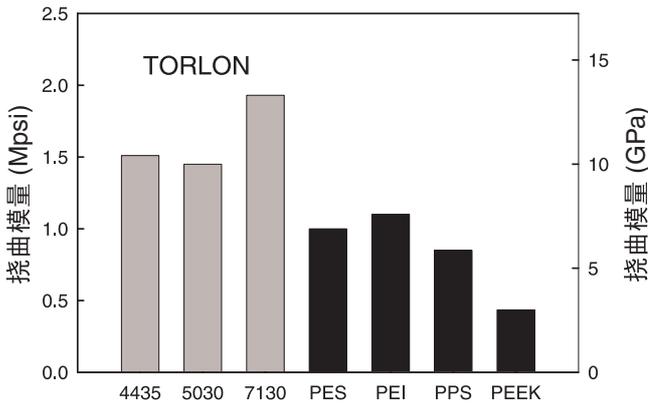


图 7

在 200°C，增强的 TORLON 牌号的挠曲模量超过竞争性的增强塑料

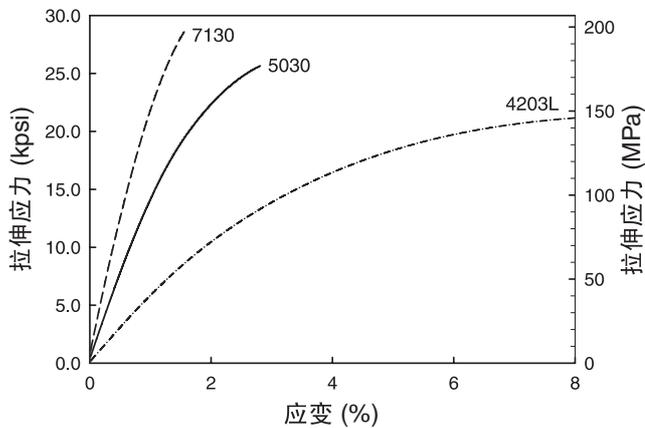


应力 — 应变关系

TORLON 聚酰胺—酰亚胺在室温下不会屈服，因此，其被破坏或断裂时的应变即记为伸长率。图 8 所示为几种 TORLON 牌号在室温下的应力—应变关系。图 9 所示的仅是最初的 1% 应变，即室温曲线几乎线性的（“虎克”）部分。图 10 所示为在 135°C 温度下测得的应力—应变曲线的最初部分。

图 8

在 23°C 受张力的应力—应变曲线



ASTM D 638 Type 1 试样

图 9

在 23°C 的局部应力—应变曲线

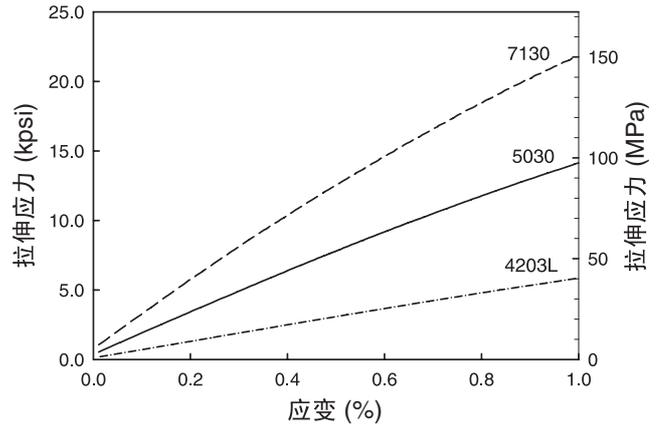
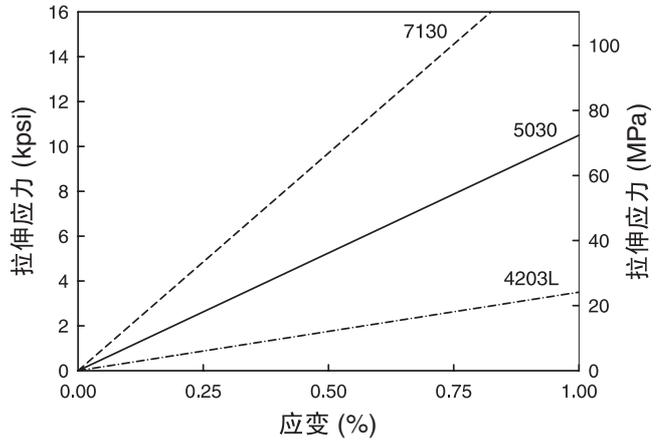


图 10

TORLON 树脂在 135°C 时受张力的应力—应变曲线



耐循环应力性

疲劳强度

当材料受循环应力作用时，材料会在低于其极限强度的应力水平下发生破坏。在循环载荷或振动作用下的抗破坏能力称为疲劳强度，它是设计中需要考虑的一个重要指标。TORLON 工程聚合物在拉伸状态以及极端严重的挠曲状态，即反向弯曲形式下，都具有极好的疲劳强度。

显示最大应力与达到破坏所需循环次数之间关系的 S-N 曲线图对预测产品的使用寿命非常有用。由预期的作用力、适当的应力集中因子以及断面模量即可确定最大应力。将最大应力与疲劳强度的 S-N 曲线进行比较，从而确定材料在所应用的环境中可望经受的最大循环应力。

疲劳试验所获得的值受试样和试验方法的影响，所以仅可作为参考值，而不能作为绝对值使用。TORLON 部件具有耐循环应力的能力。TORLON 7130 是一种由石墨纤维增强的牌号，它具有优异的疲劳强度，并且优于竞争性的工程塑料。图 11 所示为几种 TORLON 牌号的 S-N 曲线。从该图可以看出，即使经过 10,000,000 次循环后，TORLON 聚酰胺一酰亚胺在挠曲状态下仍具有优异的耐循环应力性。图 12 则显示了 TORLON 7130 在拉伸 / 拉伸循环应力作用下的性能完整性。在较低频率下，TORLON 7130 的疲劳强度甚至更高，如图 13 所示。

图 11

TORLON 树脂在 30Hz 下的挠曲疲劳强度

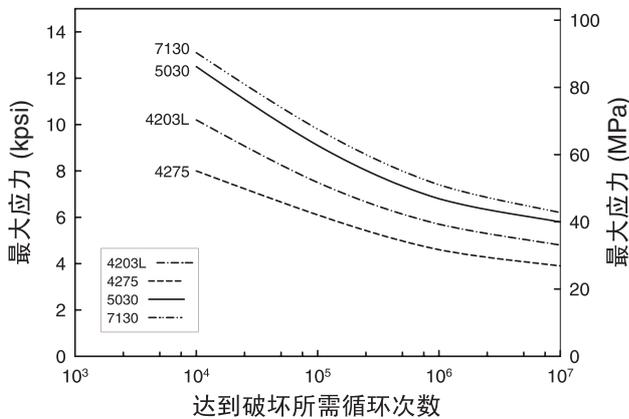


图 12

TORLON 7130 和 4203L 在 30Hz 下的拉伸 / 拉伸疲劳强度，A 比值为：0.90

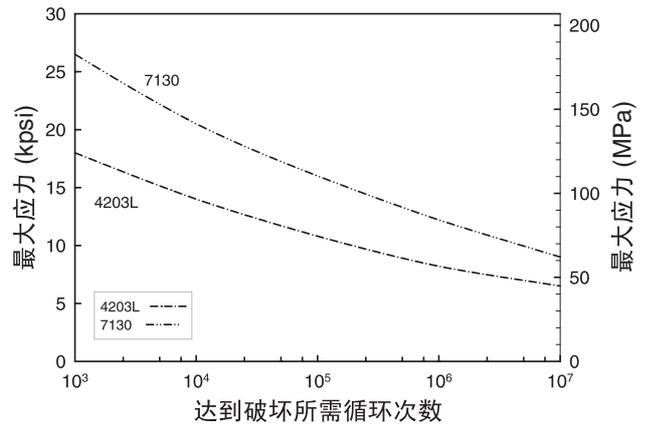
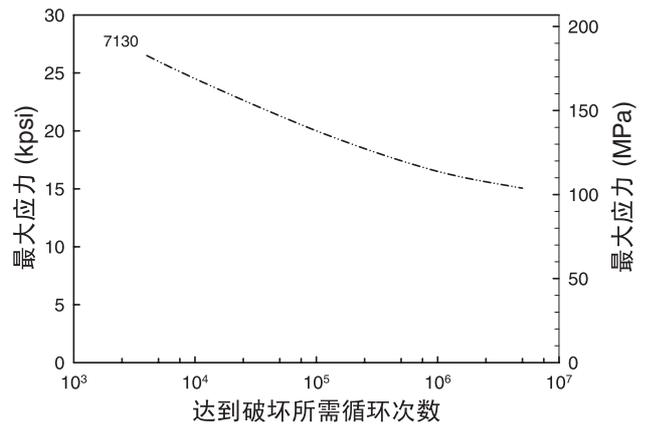


图 13

TORLON 7130 在 2Hz 下的拉伸 / 拉伸低循环疲劳强度，A 比值为：0.90



即使在高温下，TORLON 聚合物仍能保持循环应力作用下的强度。挠曲疲劳试验是在 180°C 进行的，试样在该温度下经过了预调节处理。如图 14 所示的结果表明，TORLON 聚合物适用于那些有高温耐疲劳性要求的应用。

图 14

TORLON 树脂在 180°C, 30Hz 下的高温挠曲疲劳强度

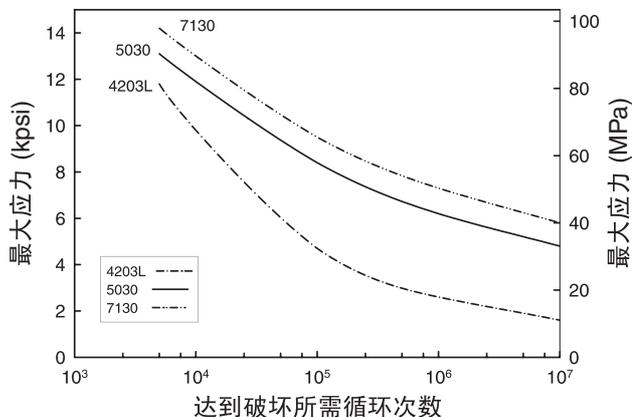
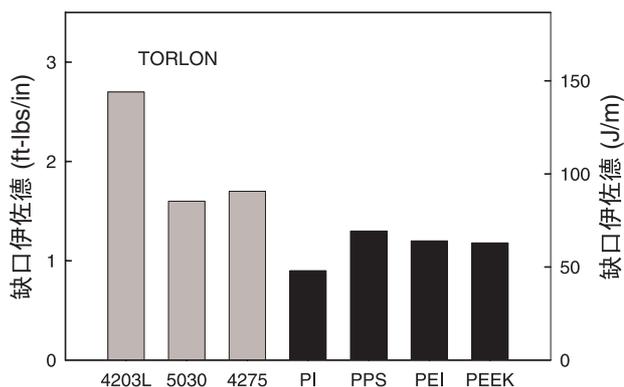


图 15

TORLON 树脂与竞争性材料的耐伊佐德 (Izod) 冲击比较



耐冲击性

TORLON 树脂吸收冲击能量的能力要优于大多数高模量的塑料。采用缺口伊佐德 (Izod) 方法 (ASTM D256) 对 TORLON 树脂所进行的试验表明，其结果要优于其它的高温塑料 (图 15)。表 7 总结出 TORLON 树脂的缺口和无缺口冲击试验数据。

表 7

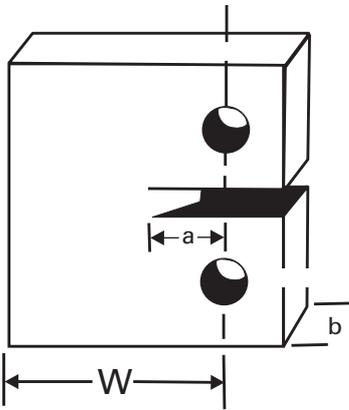
3.2 mm 试棒的耐伊佐德 (Izod) 冲击

TORLON 牌号	缺口		无缺口	
	ft•lb/in	J/m	ft•lb/in	J/m
4203L	2.7	143	20.0	1062
4301	1.2	64	7.6	404
4275	1.6	85	4.7	250
4435	0.8	42	4.1	218
5030	1.5	80	9.5	504
7130	0.9	48	6.4	340

断裂韧度

断裂韧度可以通过测量聚合物的断裂能 (G_{IC}) 来进行评估。断裂能 (G_{IC}) 是对聚合物吸收并耗散冲击能量而不断裂之能力的一种量度, 其值越大表明材料的断裂韧度越高。美国海军实验室 (NRL) 采用紧凑拉伸试样 (图 16) 来测量断裂能。表 8 列出了从美国海军实验室备忘录报告 5231 (1984 年 2 月 22 日) 中所选取的几组数据。正如所料, 热固性聚合物不能象热可塑性材料那样吸收并耗散冲击能量, 所以具有较低的断裂能。TORLON 聚酰胺-酰亚胺表现出优异的断裂韧度, 其断裂能 (G_{IC}) 为 3.4 kJ/m^2 。表中列出了玻璃转化温度 (T_g), 这是为了说明断裂韧度与有用温度范围之间的折衷关系。聚酰胺-酰亚胺具有兼顾韧度和高玻璃转化温度 (T_g) 的特点。

图 16
紧凑拉伸试样



$$G_{IC} = \frac{Y^2 P_C^2 a}{E W^2 b^2}$$

其中:

$$Y = 29.6 - 186 (a/w) + 656 (a/w)^2 - 1017 (a/w)^3 + 639 (a/w)^4$$

P = 临界断裂载荷

a = 裂缝长度

E = 试样的模量

表 8

聚酰胺-酰亚胺兼顾了断裂韧度和高的玻璃转化温度

	断裂能		T _g	
	ft•lb/in ²	kJ/m ²	°F	°C
热固性塑料				
聚酰亚胺-1	0.095	0.20	662	350
聚酰亚胺-2	0.057	0.12	680	360
四官能结构环氧树脂	0.036	0.076	500	260
热可塑性材料				
聚酰胺-酰亚胺	1.6	3.4	527	275
聚砜	1.5	3.2	345	174
聚醚砜	1.2	2.5	446	230
聚酰亚胺-4	1.0	2.1	689	365
聚酰亚胺-3	0.38	0.81	619	326
聚苯硫醚	0.1	0.21	—	—



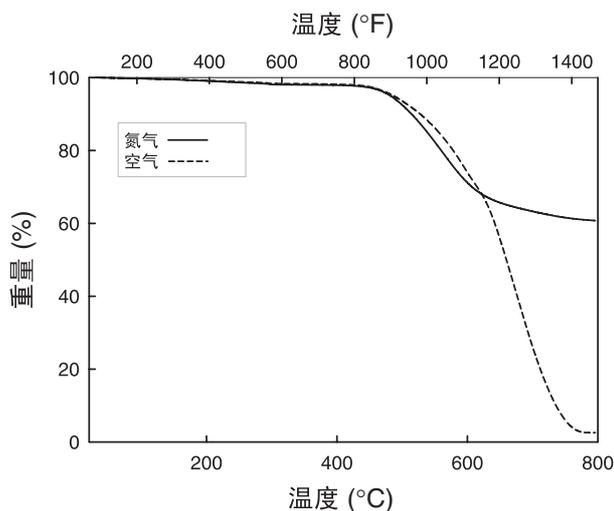
热稳定性

热重分析

TORLON 树脂在宽广的温度范围内极为稳定。如图 17 所示，当在空气或氮气中以每分钟 10°C 的速度加热时，TORLON 4203L 在其正常使用温度范围内以及更高的温度下完全没有失重现象。

图 17

TORLON 4203L 的热重分析



长时间受热的影响

UL 相对热指数

UL 相对热指数为最高连续使用温度提供了一个估计值，它是根据保险商实验所（UL）规定的方法进行确定的。

先要测定材料的初始特性，包括拉伸强度、冲击强度、介电强度、耐电弧性、尺寸稳定性以及可燃性。然后对每一特性和每个老化温度，都要记录所经过的时间以及相对于初始特性值的百分比变化率。特性的“寿命终止”时间就是该特性在老化温度下达到其初始值的 50% 所需的时间。将寿命终止点作图并进行回归处理，即可预测任意工作温度下的预期寿命。预期寿命为 100,000 小时的温度就是相对热指数。按照上述步骤，试验了 TORLON 聚合物的介电强度（电特性）、伊佐德（Izod）冲击（机械特性，冲击）以及拉伸强度（机械特性，无冲击）降低 50% 时的情况。其它特性并无明显变化。

表 9

TORLON 树脂的相对热指数

	最小厚度		机械					
			电		有冲击		无冲击	
			in	mm	°F	°C	°F	°C
TORLON 4203L	0.031	0.81	428	220	*	*	410	210
	0.047	1.2	428	220	*	*	410	210
	0.096	2.4	428	220	*	*	410	210
	0.118	3.0	428	220	392	200	428	220
TORLON 4301	0.118	3.0	*	*	392	200	392	200
TORLON 5030	0.062	1.5	428	220	*	*	*	*
	0.096	2.4	428	220	*	*	*	*
	0.118	3.0	428	220	392	200	428	220

* 未试验

根据 UL 相对热指数预测，其在指数温度下的有效寿命至少为 100,000 小时。TORLON 聚合物的 UL 相对热指数高达 220°C，相当于在 220°C 下持续使用十一年以上。这明显高于大多数的高温工程塑料。表 9 总结了 TORLON 聚酰胺—酰亚胺（PAI）的 4203L、4301 和 5030 牌号的相对热指数。有关最新的信息请查阅保险商实验所（UL）的网站：www.ul.com。

热老化后的特性保持

TORLON 聚酰胺—酰亚胺在长时间受热后仍具有耐化学破坏性并保持高强度。测定聚合物热稳定性的方法之一，是测量样品在高温下进行老化后的机械特性。

将注塑成型并经过后固化处理的拉伸试棒（按照 ASTM D1708 的构型，3.2 mm 厚）在 250°C 强制空气循环的烘箱中进行老化。定期从烘箱中取出试样，在 23°C 和 50% 的相对湿度下调节处理后进行拉伸强度试验。

如图 18 所示，TORLON 树脂在高温下长时间老化后仍能保持强度。经过 10,000 小时后，TORLON 聚合物的拉伸强度仍高于许多竞争性塑料的极限强度。例如，TORLON 4203L 仍具有超过 170 MPa 的拉伸强度。值得注意的是，试样的拉伸强度在最初一段时间内实际上是增大的，这是由于其在标准的后固化处理之后还能获得更大的强度。

TORLON 聚合物在长时间热老化后仍能保持其优异的电和机械特性以及 UL 可燃性等级。表 10 表明，TORLON 4203L 即使长时间暴露在 250°C 的温度下仍能满足要求苛刻的应用。

图 18

TORLON 树脂在 250°C 下热老化后仍保持强度

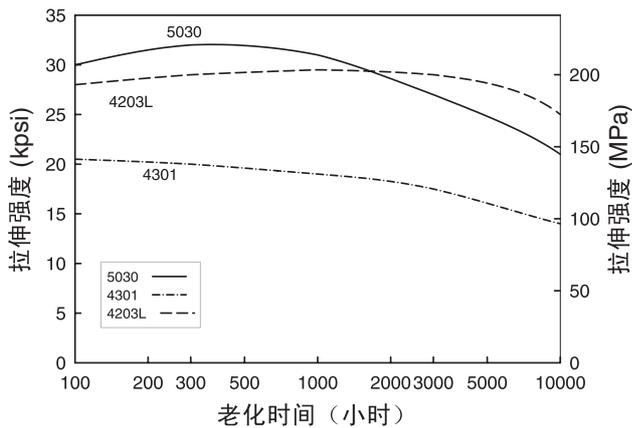


表 10

TORLON 4203L 热老化后的特性保持

特性	在 250°C 的小时数		
	2,000	12,000	17,000
介电强度 *, V/mil			654
可燃性 **, UL 94	94 V-0	94 V-0	94 V-0
尺寸变化 **, %	0.0	0.5	0.9
拉伸强度保持率 **, %	110	86	67
伊佐德 (Izod) 冲击强度保持率 **, %	101	67	38

* 试样厚度为 0.9 mm

** 试样厚度为 3.2 mm

比热

比热随温度的变化数据是采用差示扫描量热仪进行测定的。

表 11 列出了四种 TORLON 牌号在四个不同温度下的数据。

表 11

TORLON 聚合物的比热

TORLON 牌号	比热 (cal/gm°C)			
	4203L	4301	5030	7130
温度, °F (°C)				
77 (25)	0.242	0.240	0.229	0.230
212 (100)	0.298	0.298	0.276	0.285
392 (200)	0.362	0.359	0.327	0.346
482 (250)	0.394	0.385	0.353	0.375

导热率

TORLON 树脂的导热率低, 适用于那些有隔热要求的应用。TORLON 的热屏蔽作用可保护关键的密封元件免受高温影响, 并能防止敏感仪器元件的热损失。表 12 所示为采用 ASTM C177 方法, 在冷板和热板温度分别为 50°C 和 100°C 的条件下, 由 1.6 mm 厚的 TORLON 树脂试样所测得的导热率。

表 12

TORLON 树脂的导热率

TORLON 牌号	导热率	
	Btu•in/hr•ft ² •°F	W/m•K
4203L	1.8	0.26
4301	3.7	0.54
4275	4.5	0.65
4435	5.6	0.80
5030	2.5	0.37
7130	3.6	0.53

线性热膨胀系数 (CLTE)

如表 13 所示, 填充的 TORLON 聚酰胺-酰亚胺的热膨胀与金属非常近似。

表 13

TORLON 树脂和部分金属的线性热膨胀系数 (CLTE)*

	线性热膨胀系数 (CLTE)	
	ppm/°F	ppm/°C
TORLON 7130	5.0	9.0
退火的铬镍铁合金 X	6.7	12.1
普通碳钢 AISI-SAE 1020	6.7	12.1
钛 6-2-4-2	7.0	12.6
TORLON 5030	9.0	16.2
铜	9.3	16.7
不锈钢, 304 型	9.6	17.3
商用青铜合金, 90%, C2200	10.2	18.4
退火的铝合金 2017, ASTM B221	12.7	22.9
TORLON 4275	14.0	25.2
TORLON 4301	14.0	25.2
铝合金 7075	14.4	26.0
TORLON 4203L	17.0	30.6

*TORLON 树脂的线性热膨胀系数 (CLTE) 是按照 ASTM D 696 方法在 23-150°C 的温度范围内测量得到的。金属的线性热膨胀系数 (CLTE) 摘自 CRC 化学和物理手册第 54 版 (CRC Handbook of Chemistry and Physics, 54th ed.) 和 1983 年 12 月出版的 1984 材料选择手册 — 材料工程分册 (Materials Engineering, 1984 Materials Selector edition, Dec. 1983)。

抗蠕变性

大多数塑料的局限性在于其受应力作用时会发生形变，这种形变通常被称为蠕变。TORLON 聚酰胺-酰亚胺具有抗蠕变性，在应力作用下更象是金属而不是塑料。要获得可测量的蠕变，必须使 TORLON 聚合物受到大于大多数其它塑料的极限强度的应力作用。设计者必须要考虑塑料在拟应用场合的预期应力和温度条件下的长期蠕变行为。图 19 至 23 总结了在室温下施加应力分别为 34.5、68.9 和 103.4 MPa 的拉伸蠕变试验 (ASTM D2990) 的部分数据。

图 19

TORLON 4203L 在 23°C 下的应变与时间的关系

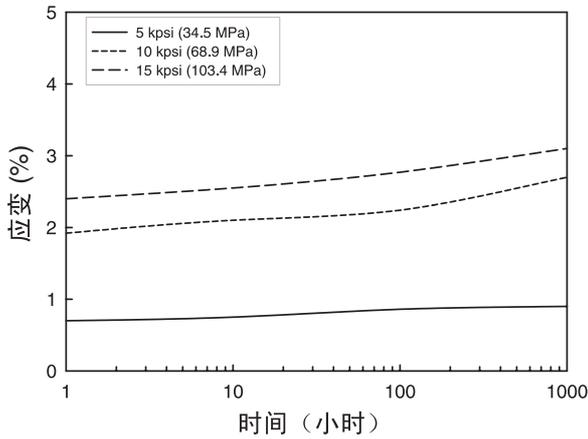


图 20

TORLON 4275 在 23°C 下的应变与时间的关系

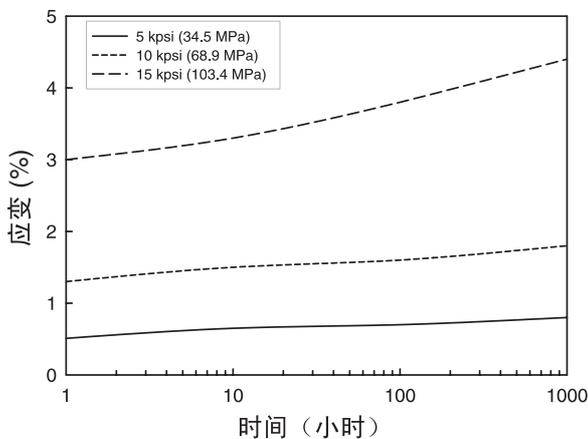


图 21

TORLON 4301 在 23°C 下的应变与时间的关系

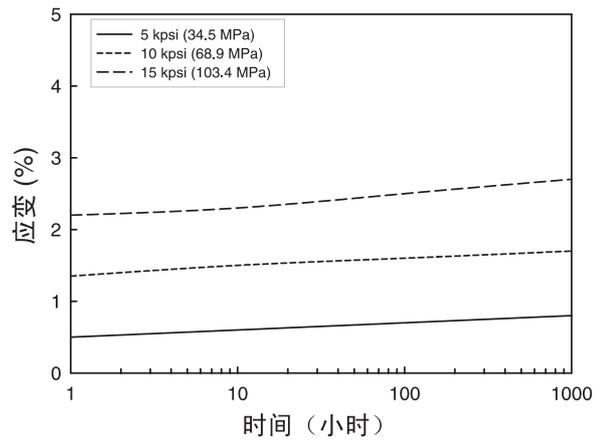


图 22

TORLON 5030 在 23°C 下的应变与时间的关系

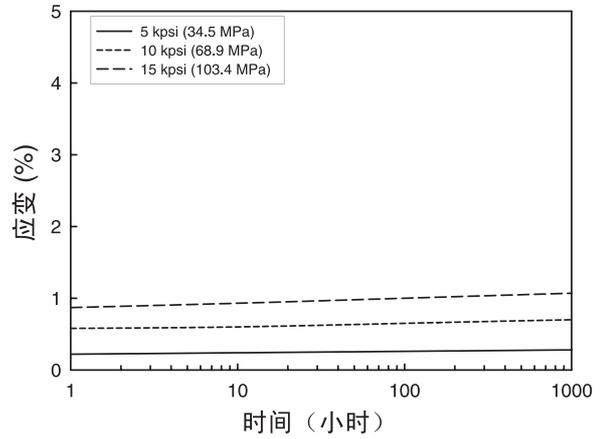


图 23

TORLON 7130 在 23°C 下的应变与时间的关系

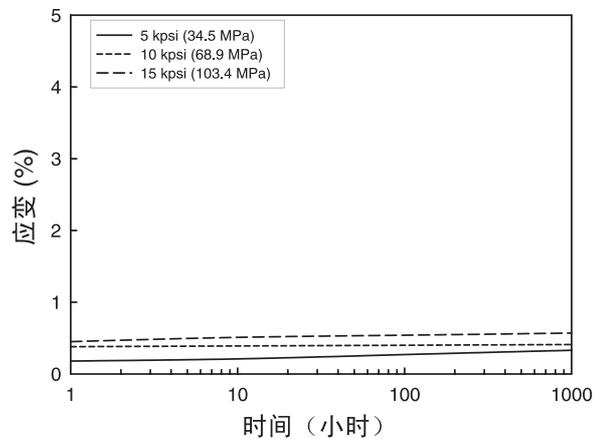


图 24 至 28 所示为在 200°C 的温度下进行试验的数据。

当应力超过 34.5 MPa 时，非增强牌号的 TORLON 在超过 200°C 的极高温度下可能会发生蠕变或断裂。对于这些应用，建议采用增强牌号。

图 26

TORLON 4301 在 200°C 下的应变与时间的关系

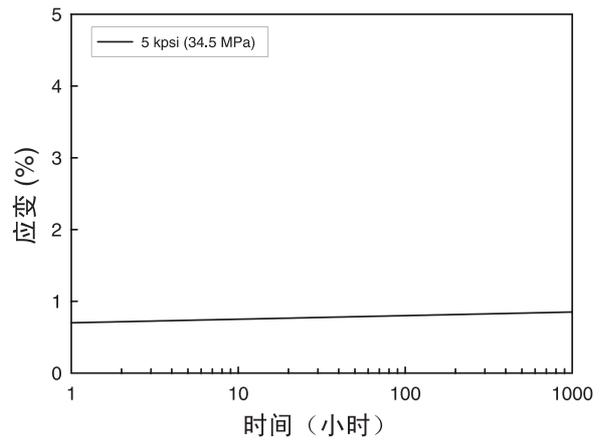


图 24

TORLON 4203L 在 200°C 下的应变与时间的关系

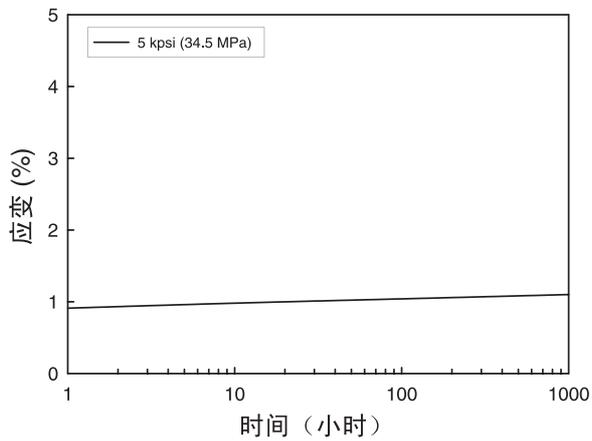


图 27

TORLON 5030 在 200°C 下的应变与时间的关系

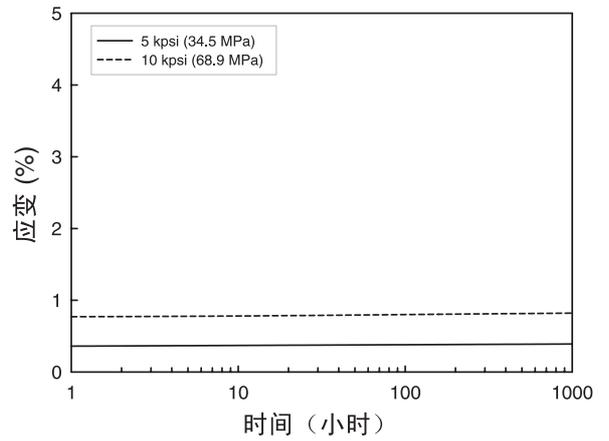


图 25

TORLON 4275 在 200°C 下的应变与时间的关系

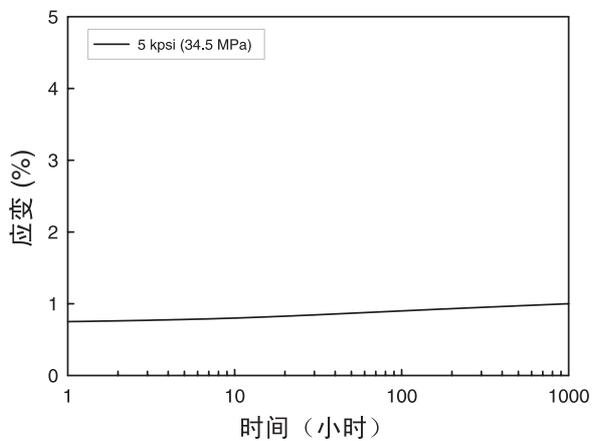
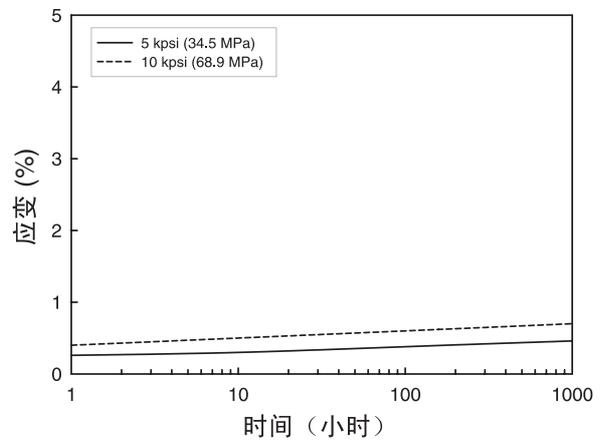


图 28

TORLON 7130 在 200°C 下的应变与时间的关系



可燃性

试验数据表明，TORLON 部件非常适用于电气、电子、航空航天以及其它对材料的可燃性要求非常高的应用。TORLON 5030 和 7130 超过了联邦航空管理局（FAA）对可燃性、烟气密度和毒气排放的要求，并且大大超过了所建议的对飞机内饰使用的要求。

氧指数

ASTM D 2863 将氧指数定义为：在该试验方法所规定的条件下，支持最初处于室温下的材料有焰燃烧的氧氮混合气中氧气的最低浓度（以体积百分比表示）。

由于平常的空气中含有大约 21% 的氧气，如果一种材料的氧指数略高于 21，那么就可以认为这种材料具有耐燃性，因为它只能在富氧的气氛中燃烧。表 14 所示为几种 TORLON 树脂的氧指数。氧指数高表明材料的耐燃烧性高。

美国国家标准局（NBS）烟气密度

表 14

氧指数，ASTM D2863

TORLON 牌号	氧指数 (%)
4203L	45
4301	44
4275	45
5030	51
7130	52

材料在燃烧时会产生烟气。在许多应用中，所产生烟气的量和密度都是很重要的。

美国材料试验协会（ASTM）的试验方法 E 662 提供了一种评估相对烟气密度的标准方法。该试验最初是由美国国家标准局（NBS）开发的，因而常常被称为 NBS 烟气密度试验。

按熏烧和燃燃两种方式对 TORLON 树脂进行了试验。所得结果见表 15。

表 15

美国国家标准局（NBS）烟气密度

NFPA 258，试样厚度为 1.3–1.5 mm

Sm= 熏烧, Fl = 燃燃

	TORLON 4203L		TORLON 5030		TORLON 7130	
	Sm	Fl	Sm	Fl	Sm	Fl
最低透光率 TM (%)	92	6	96	56	95	28
最大比光密度 (D _m)	5	170	2	35	3	75
达到 90% 的时间 D _m (分钟)	18.5	18.6	10.7	15.7	17.0	16.0

毒气排放试验

表 16

联邦航空管理局（FAA）毒气排放试验

美国国家标准局，NFPA 258

试样厚度为 1.3–1.5 mm

Sm= 熏烧, Fl = 燃燃

	TORLON 5030		TORLON 7130	
	Sm ppm	Fl ppm	Sm ppm	Fl ppm
盐酸	0	<1	0	<1
氢氟酸	0	0	0	0
一氧化碳	<10	120	<10	100
氮氧化物	<2	19	0	14
氢氰酸	0	4	0	5
二氧化硫	0	0	0	4

点燃特性

TORLON 4203L 树脂的点燃特性采用美国材料试验协会（ASTM）的试验方法 D 1929 进行测量，结果如表 17 所示。

骤燃温度是指：能让试样释放出足量的可燃气体，以使在最小的外部引燃火焰的作用下可立刻点燃的最低周围空气温度。

自燃温度是指：在没有点火源的情况下，由试样的自热特性引起点火或引起自身起火（表现为爆炸、火焰或持续发光）的最低周围空气温度。

可根据这些数据将材料按其易点燃性进行归类。

表 17

TORLON 4203L 的点燃特性

ASTM D1929	°F	°C
骤燃温度	1058	570
自燃温度	1148	620

UL 94 可燃性标准

由 UL 公司所制定的 UL 94 可燃性标准是一个可根据塑料材料的耐燃烧性能进行分类的体系。一种塑料材料的可燃性等级取决于该材料在受控实验室条件下对热和火焰的反应情况，可作为判定其可燃性是否适合某项特殊应用的初步指示。热可塑性材料对热与火焰的实际反应情况还取决于其产品的大小、形状以及其最终用途等其它因素。另外，诸如易点燃性、燃烧速度、火焰扩散、燃料贡献、燃烧强度以及所燃烧的产品等最终用途的应用特性，都会影响该材料的燃烧反应。

UL 94 标准由三种主要试验方法组成。它们分别为**水平燃烧试验**、**20 MM 垂直燃烧试验**及**500 MW 垂直燃烧试验**。

水平燃烧试验

对于 94HB 分类等级，注塑试样的尺寸限制为长 125 mm，宽 13 mm，厚度为该等级所要求的最小厚度。把试样夹在水平位置，用 20 mm 的蓝火焰以 45 度角去接触未被夹住的试样另一端约 30 秒钟左右，直到燃烧锋面到达距离预先画好的离试条边缘 25 mm 处为止。移开火焰后，就可以计算出燃烧锋面从 25 mm 处燃烧到预先画好的 100 mm 处的燃烧速度。至少要用该方法测试三个试样。若一种塑料在试样厚度大于 3 mm 时的燃烧速度不超过 40 mm/min，或者采用厚度小于 3 mm 的试棒时不超过 75 mm/min，则其就属于 94HB 等级。该等级也包括无法燃烧到 100 mm 参考标记的产品。

20 MM 垂直燃烧试验

根据对夹在垂直位置试样的试验结果，可将材料分类为 94V-0、94V-1 或 94V-2 级。

20 MM 垂直燃烧试验比 94HB 试验更严格。该试验采用长 125 mm，宽 13 mm 以及该等级所要求的最小厚度（一般为 0.8 mm 或 1.6 mm）的试样。

把试样夹在垂直位置，用 20 mm 高的蓝火焰去接触所夹试样的底边。在接触了 10 秒钟后把火焰移开。当试样停止燃烧时，再次用火焰去接触 10 秒，然后移开。用该方法测试总共五个试样。表 18 列出了采用该试验对材料进行分类的标准。

表 18

UL 对 V-0、V-1 或 V-2 材料分类的标准

标准条件	94V-0	94V-1	94V-2
每种独立试样的余焰时间，(t ₁ 或 t ₂)	≤ 10s	≤ 30s	≤ 30s
任何条件下的总余焰时间 (5 种试样的 t ₁ + t ₂)	≤ 50s	≤ 250s	≤ 250s
再次用火点燃后，每种独立试样的余焰加余烬时间 (t ₂ + t ₃)	≤ 30s	≤ 60s	≤ 60s
任何试样的余焰或余烬到达夹具	否	否	否
棉花指示物被火焰颗粒或掉落物点燃	否	否	是

表 19 列出了所选牌号 TORLON 树脂的燃烧等级。TORLON 树脂的最新等级情况可以在保险商实验所 (UL) 的网站 <http://data.ul.com/iqlink/index.asp> 中找到。

表 19

由保险商实验所制定的垂直可燃性标准 (UL 94)

牌号	厚度		UL 94 等级
	in.	mm	
4203, 4203L	0.047	1.2	V-0
	0.094	2.4	V-0
	0.118	3.0	V-0
4301	0.047	1.2	V-0
	0.094	2.4	V-0
	0.118	3.0	V-0
5030	0.047	1.2	V-0
	0.059	1.5	V-0
	0.094	2.4	V-0
	0.118	3.0	V-0

联邦航空管理局（FAA）可燃性

TORLON 5030 和 7130 的试验是按照 25.853(a) 和 附录 F 中所述的针对运输类飞机的联邦航空管理局（FAA）垂直可燃性试验进行的。其结果如表 20 所示。

还对 TORLON 5030 和 7130 试样进行了水平可燃性试验 [FAA 运输类飞机，见 25.853(b-3) 和 附录 F] 和 45 可燃性试验 [FAA 货物和行李舱，见 25.855(1-a)]。在上述两种情况下，试样都不被点燃。基于这些结果，表明 TORLON 5030 和 7130 符合这些规范的要求。

表 20

联邦航空管理局（FAA）垂直可燃性

牌号	平均燃烧长度	
	in.	mm
TORLON 5030	0.6	15.2
TORLON 7130	0.6	15.2

UL 57 电气照明器材

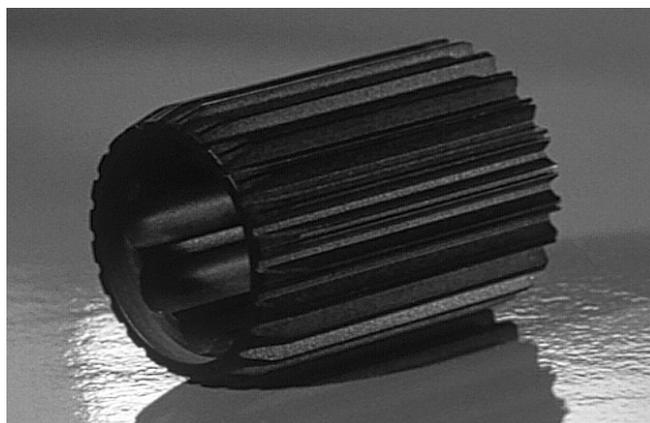
就 Torlon 4203L 树脂是否符合该标准可燃性要求进行了试验。表 21 所列的结果显示，该材料满足这些要求。

表 21

UL 57 对电气照明器材的可燃性要求

牌号	试验结果
TORLON 4203L	根据该规范第 81.12 节，厚度为 (1.2, 3.2 和 5 mm) 的试样是不燃的。

注意： 获得本部分所列数据而采用的试验方法仅测量材料在这些试验方法所规定的受控实验室条件下对热和火焰的响应，不可能准确反映实际燃烧条件下该材料的火灾危害程度。此外，由于苏威高性能塑料公司既无法掌控这些塑料用户的最终配方，包括其内部添加或外部添加的组分，也无法掌控其加工条件或最终的物理形态或形状，这些试验结果对最终使用目的可能并不直接适用。



各种环境中的性能

耐化学性

在中等温度下，TORLON 聚酰胺-酰亚胺几乎不受脂肪烃和芳香烃、氯代烃和氟代烃以及大多数酸的影响。然而，该聚合物可能会受到饱和蒸汽、强碱以及一些高温酸性体系的侵蚀。多种特殊化学品对 TORLON 4203L 的拉伸强度影响如表 22 所示。要获得最佳的耐化学性，对 TORLON 部件进行适当的后固化处理是有必要的。



表 22

TORLON 4203L 在 90°C 的温度下，24 小时后的耐化学性

(另有说明的除外)

化学品	等级	化学品	等级
酸类		吗啉	A
醋酸 (10%)	A	吡啶	F
冰醋酸	A	醛和酮	
醋酸酐	A	苯乙酮	A
乳酸	A	苯甲醛	A
苯磺酸	F	环己酮	A
铬酸 (10%)	A	甲醛 (37%)	A
蚁酸 (88%)	C	糠醛	C
盐酸 (10%)	A	丁酮	A
盐酸 (37%)	A	含氯有机物	
氢氟酸 (40%)	F	乙酰氯 (50°C)	A
磷酸 (35%)	A	苯基氯 (50°C)	A
硫酸 (30%)	A	四氯化碳	A
碱类		氯苯	A
氢氧化铵 (28%)	C	2-氯乙醇	A
氢氧化钠 (15%)	F	氯仿 (50°C)	A
氢氧化钠 (30%)	F	表氯醇	A
水溶液 (10%)		氯乙烯	A
硫酸铝	A	酯类	
氯化铵	A	乙酸戊酯	A
硝酸铵	A	乙酸丁酯	A
氯化钡	A	邻苯二甲酸丁酯	A
溴 (饱和溶液, 50°C)	A	乙酸乙酯	A
氯化钙	A	醚类	
硝酸钙	A	丁基醚	A
氯化铁	A	纤维素溶剂	A
氯化镁	A	P-二恶烷 (50°C)	A
高锰酸钾	A	四氢呋喃	A
碳酸氢钠	A	烃类	
氯化银	A	环己烷	A
碳酸钠	A	柴油	A
氯化钠	A	汽油 (50°C)	A
铬酸钠	A	庚烷	A
次氯化钠	A	矿物油	A
硫酸钠	A	机油	A
硫化钠	A	干洗溶剂油	A
亚硫酸钠	A	甲苯	A
醇类		腈类	
2-氨基乙醇	F	乙腈	A
正戊醇	A	苯基氰	A
正丁醇	A	硝基复合物	
环己醇	A	硝基苯	A
乙二醇	A	硝基甲烷	A
胺		其它	
苯胺	A	磷酸甲苯基二苯酯	A
正丁胺	A	环丁酮	A
二甲基苯胺	A	亚磷酸三苯酯	A
二溴化乙烯	F		

适用性等级的符号说明

- A — 优异 — 无侵蚀，对机械特性的影响可忽略不计。
- B — 良好 — 轻微侵蚀，机械特性有少量降低。
- C — 一般 — 中等侵蚀，材料的寿命有限。
- F — 差 — 材料会在短时间内破坏、分解或溶解。

耐汽车和航空工作液的能力

航空航天和汽车工程师对聚合物经受通常使用的工作液后保持其特性的能力特别看重。全浸渍试验表明，TORLON 聚酰胺-酰亚胺不受 150°C 的普通润滑油和低温的飞机液压液的影响；也不受汽轮机油的影响，即使在高温的应力作用下也一样。在 135°C，飞机液压液会使强度稍有降低。表 23 和 25 总结了特定流体浸渍试验的方法和结果。

汽车润滑油

按照 ASTM D790 规定的试样于 150°C 的润滑油中浸渍一个月后，在室温下进行试验。TORLON 4203L 和 4275 在这些条件下具有优异的特性保持能力（见表 23）。

表 23

在 150°C 的汽车润滑油中浸渍后的特性保持率

在室温下试验

润滑油	TORLON 4203L		TORLON 4275	
	重量变化 %	挠曲强度 保持率， %	重量变化 %	挠曲强度 保持率， %
机油 ¹	0.0	99.4	0.0	95.5
变速器油 ²	0.0	100.3	0.0	94.2
齿轮润滑油 ³	+0.2	102.7	+0.2	100.6
¹ Valvoline SAE 20W	² Exxon 11933		³ Penzoil 80W-90	

在一项单独的试验中，将 TORLON 4301 和 TORLON 4275 在 150°C 的温度下暴露于 3 种不同型号的福特自动变速器油中 1,500 小时。经过暴露后，对材料的拉伸强度和挠曲模量进行了测量，并与暴露之前的数值进行了比较。表 24 所示的结果表明，材料对这些工作液具有优异的耐分解性。

表 24

在 150°C 的福特自动变速器油中 1,500 小时后的影响

工作液	拉伸强度保持率 (%)		挠曲模量保持率 (%)	
	TORLON 4301	TORLON 4275	TORLON 4301	TORLON 4275
1	87	95	97	93
2	89	88	93	96
3	85	97	94	92

飞机液压液（SKYDROL 500B）

将 TORLON 的轴承牌号 4301 和 4275 浸渍在 -80°C 和 135°C 的飞机液压液中 41 天。拉伸特性的变化如表 25 所示。

在 135°C，工作液对两种牌号的 TORLON 都略有影响，表现为拉伸强度损失了大约 10%。值得注意的是，该损失不是脆化的结果，因为伸长率仍保持不变。试验表明，飞机液压液中的 TORLON 4203L 试棒试样在高应力作用下也不会开裂、软化及破裂。而在低温试验中，两种牌号都未受到明显的影响。

飞机汽轮机油，有应力和无应力作用

TORLON 部件在高温和受应力作用下，仍具有优异的耐 Aeroshell[®] 500 汽轮机油⁵ 的能力。汽轮机油对 TORLON 4203L 和 7130 的影响非常轻微：4203L 在应力下浸渍 100 小时后，在高达 200°C 的温度下仍保持其极限拉伸强度的 80% 以上，不会断裂；而石墨纤维增强牌号 7130 的情况则更好，在高达 230°C 的温度下仍可耐受 80% 水平的极限应力。

表 25

在飞机液压液中浸渍后的拉伸强度

Skydrol [®] 500B		
牌号	拉伸强度 保持率 (%)	伸长率 保持率 (%)
TORLON 4301		
在 275°F (135°C) 下 1,000 小时	89.6	94.1
在 -108°F (-80°C) 下 1,000 小时	94.0	95.8
TORLON 4275		
在 275°F (135°C) 下 1,000 小时	92.7	119.3
在 -108°F (-80°C) 下 1,000 小时	101.3	129.8

Skydrol 是 Monsanto 公司的注册商标
在室温下试验

在另一项无应力作用的试验中，TORLON 4203L 和 4301 在 150°C 的 Aeroshell[®]* 500 中浸渍 1000 小时之后，基本没有观察到拉伸强度的变化。

*Aeroshell 是壳牌石油公司的注册商标。

应力下的耐化学性

对经过彻底后固化处理的 TORLON 部件进行了应力下的耐化学性试验。尺寸为 12.7×1.3×0.3 cm 的试样被夹在曲面半径为 12.7 cm 的夹具上。用需要试验的化学品在每一试样的中部涂抹一分钟。分别在一小时和两小时之后重复上述操作。24 小时后，检查试样是否断裂、开裂、膨胀及软化。

试验了对下列化学环境的耐化学性：航空汽油、汽轮机燃料（喷气机 A/A-1）、液压液、丁酮、二氯甲烷、1,1,1 三氯乙烷和甲苯。没有一种 TORLON 试样出现任何断裂、开裂、膨胀或软化。

水的影响

和其它高温工程塑料和复合材料一样，TORLON 部件会吸收水分。但其吸收速度慢，而且经过干燥后部件能迅速恢复其原始尺寸和特性。

吸收速度

只有将 TORLON 聚酰胺-酰亚胺长时间暴露于高湿度的条件下，才有可能让其吸收显著的水分。其吸收速度取决于聚合物的牌号、温度、湿度以及部件的几何形状。

图 29 和 30 显示了对尺寸为 $127 \times 13 \times 3$ mm 的均匀试棒的试验结果。吸水性取决于水在部件内的扩散，因而与部件的厚度成反比。

恒定湿度下的平衡吸收

在恒定的湿度下，TORLON 部件吸收的水分为平衡量。采用尺寸为 $127 \times 13 \times 3$ mm 的均匀板条所测得的吸水量与相对湿度的关系如图 31 所示。

图 29

TORLON 聚合物在 23°C, 50% 相对湿度时的吸水性

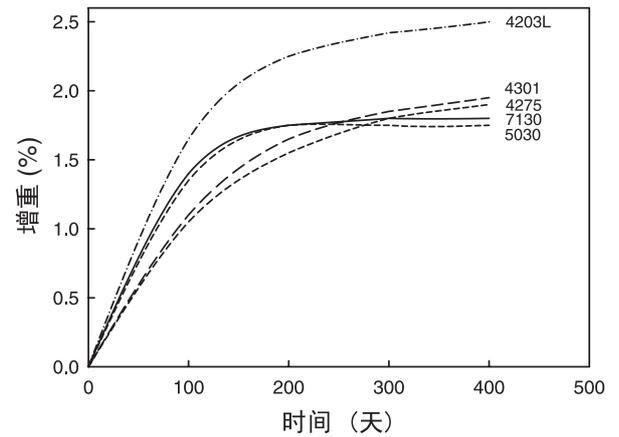


图 30

TORLON 聚合物在 40°C, 90% 相对湿度时的吸水性

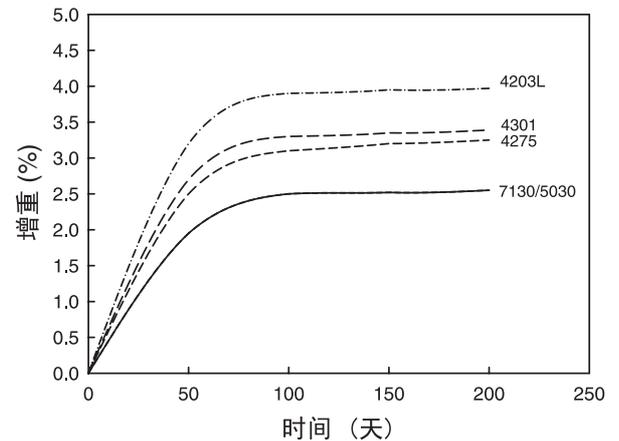
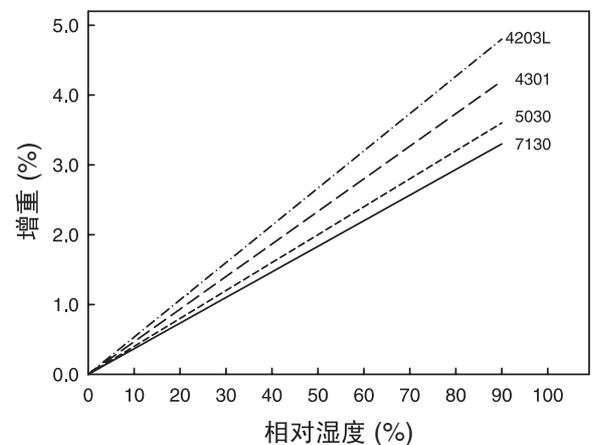


图 31

平衡水分吸收与相对湿度的关系



尺寸变化

当 TORLON 部件吸收水分时，其尺寸会发生轻微的变化。图 32 和 33 显示了标准试验部件在特定温度下暴露于大气湿度的尺寸变化。与吸收速度的情况一样，填料最少或增强最少的 TORLON 4203L 牌号树脂的尺寸变化最大。

尺寸和特性的恢复

通过干燥，TORLON 部件能够恢复到其原始尺寸和特性。所需温度和时间取决于部件的大小和几何形状。对于上述的试验板条，在 150°C 加热 16 小时后即恢复到其原始尺寸。

机械特性和电特性的变化

为了说明吸水引起的机械特性变化，试样被浸泡在水中直至其重量增加 2%。表 26 列出了将上述试样的特性与在 23°C 和 50% 的相对湿度下调节处理 40 小时的试样特性进行比较的结果。最明显的变化是刚度有轻微的降低。

水的吸收使 TORLON 树脂的电阻减小，轻微地改变了其介电特性。当水分为 2% 时，TORLON 试样的体积电阻率和表面电阻率分别为 3×10^{14} ohm/m 和 1×10^{17} ohm，介电强度为 24 kV/mm。

图 32

TORLON 聚合物在 23°C, 50% 相对湿度时的尺寸变化

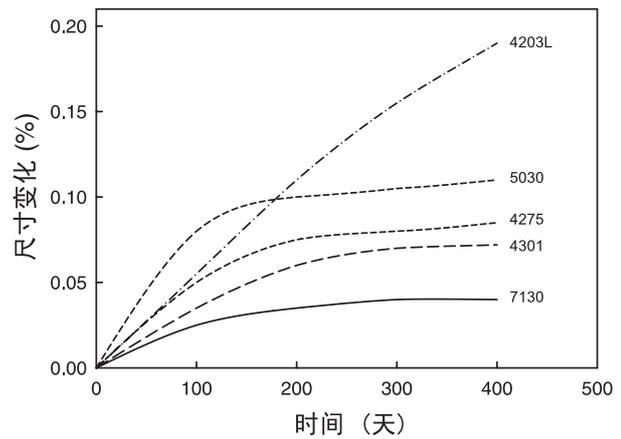


图 33

TORLON 聚合物在 40°C, 90% 相对湿度时的尺寸变化

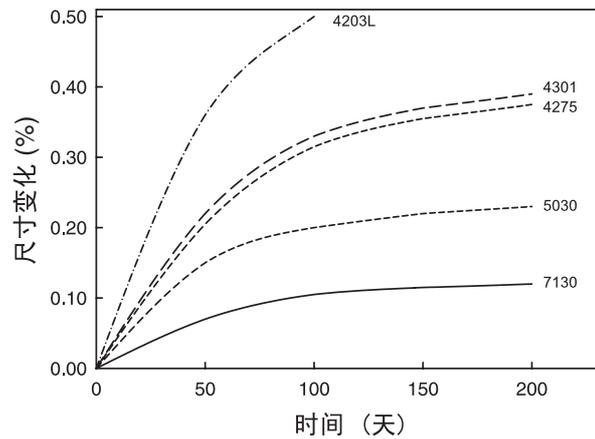


表 26

吸水量为 2% 时 TORLON 4203L 的特性变化

特性	变化 (%)
拉伸强度	-7
拉伸模量	-11
伸长率	13
剪切强度	1
伊佐德 (Izod) 冲击强度	20
介电常数	18
损耗因子	53

骤然高温暴露的约束条件

水分的吸收限制了 TORLON 部件能够被加热的速度。除非允许所吸收的水分从部件内向外扩散，否则骤然暴露于高温会使部件变形或起泡。苏威高性能塑料公司采用术语“热骤变温度”来表示骤然暴露于热而导致变形的温度。

为了测定热骤变温度，将 $127 \times 13 \times 3$ mm 的试样在相对湿度为 58% 和温度为 23°C 的环境中暴露一段特定的时间。TORLON 树脂会吸收水分。所吸收的量取决于暴露时间和 TORLON 树脂的牌号。测量并记录试棒的尺寸。

然后将试棒置于已预热至试验温度的空气循环烘箱中。一小时后取出样品，检查外观并进行测量。如果出现水泡或起泡，或者尺寸增大 0.025 mm 以上，则发生了破坏。发生可见破坏的最低温度就确定为热骤变温度。

图 34 给出了对吸水最敏感的 TORLON 4203L 牌号的热骤变温度与水分含量的关系。在吸水量为 2.5% 时（即在相对湿度为 50% 和室温条件下的平衡量），热骤变温度远远超过 200°C 。图 35 给出了热骤变温度与暴露时间的关系。即使暴露在相对湿度为 58% 和温度为 23°C 的条件下超过 200 小时，由 TORLON 4203L 制成的试验部件也不会发生变形，只有骤然暴露于 200°C 以上的温度时才会变形。其它牌号的 TORLON 树脂的平衡吸水量较低（参见图 31），因而它们的热骤变温度较高。通过在 150°C 的温度下进行干燥，可以将热骤变温度恢复到材料的最高水平，所需的干燥时间为每增加 3 mm 的部件厚度增加 24 小时的干燥时间。

图 34

TORLON 4203L 的热骤变温度与水分含量的关系

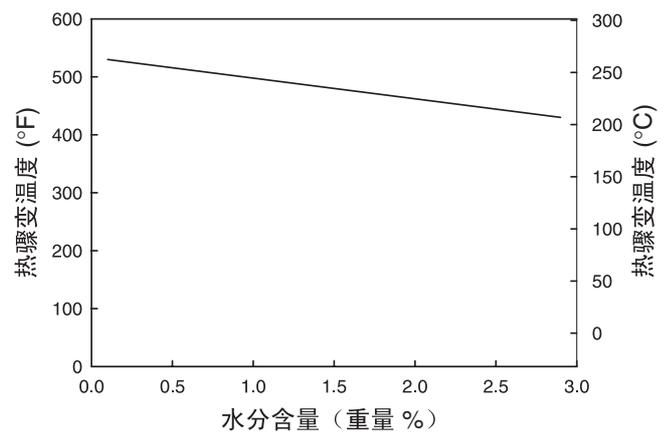
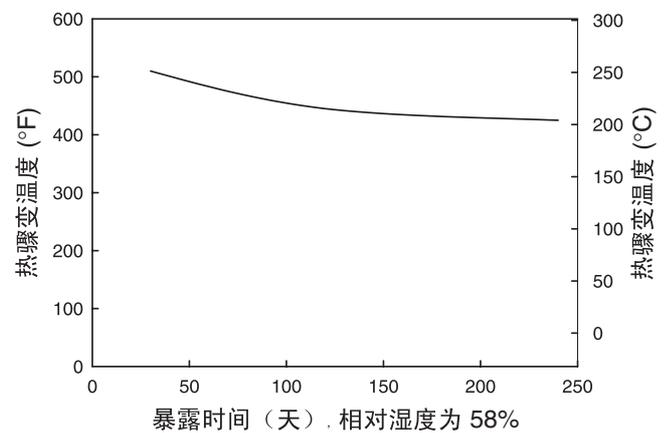


图 35

TORLON 4203L 的热骤变温度与暴露时间的关系



日晒色牢度 (Weather-Ometer®) 试验

TORLON 注塑成型聚合物具有优异的抗紫外线分解能力。TORLON 4203L 树脂经过 6,000 小时的气候老化后没有发生分解 (见图 36 和 37), 这相当于在室外暴露五年。轴承牌号的树脂, 如 4301 中含有石墨粉, 它使材料呈黑色并能屏蔽紫外线。这些牌号对室外暴露具有更好的耐分解性。

根据美国材料试验协会 (ASTM) 的试验方法 D 1708 制成的拉伸棒被暴露在 Atlas 日光碳弧日晒色牢度试验机中进行试验。经过各种不同的暴露时间后将试棒取出并进行拉伸强度和伸长率测定。试验条件为: 60°C 的黑板温度, 50% 的相对湿度以及每 102 分钟一次的 18 分钟喷洒水。

抗伽马辐射性

图 38 显示了伽马辐射对 TORLON 聚酰胺-酰亚胺的影响可以忽略不计, 经过 10^9 拉德的辐射后, 拉伸强度的损失仅为 5%。



图 36

暴露于模拟气候环境下, TORLON 4203L 的伸长率基本恒定

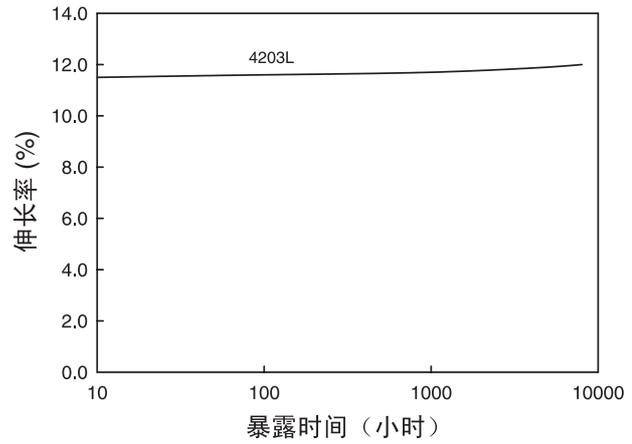


图 37

暴露于模拟气候环境下, TORLON 4203L 的拉伸强度变化

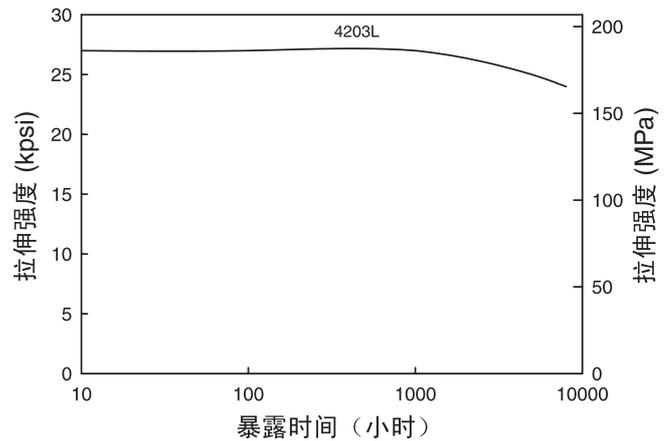
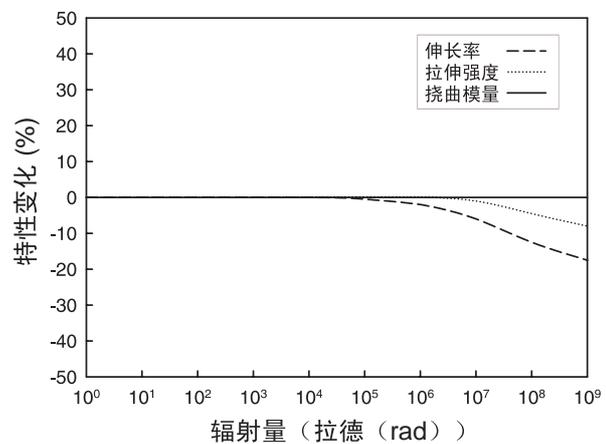


图 38

由于伽马辐射导致的 TORLON 4203L 特性变化



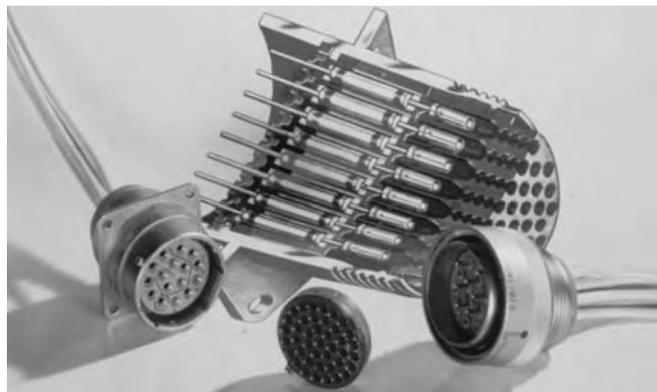
电特性

大多数 TORLON 牌号具有电绝缘性。TORLON 聚酰胺—酰亚胺可为复杂的电气和电子部件提供高温工作和易注塑成型能力的完美结合。特殊牌号的 TORLON 工程聚合物具有导电性。TORLON 7130 是一种导电的牌号，可有效屏蔽电磁干扰。设计工程师应该考虑材料的重要电特性，例如表 27 中所列的各种电特性。

表 27

重要的电指标

特性	ASTM 试验方法	意义
介电常数	D150	用该材料填充的电容器电容与抽真空的电容器电容之间的比率。它表示其分子在电场下可被极化的能力。低介电常数表示可极化性低；该材料便可作为绝缘体使用。
损耗因子	D150	表示交流电能被转换为热能的介电损耗（耗散的能量）。损耗因子低表示介电损耗低，而损耗因子高则表示能量在材料中的损耗大，继而材料在高频下使用时会变热。
体积电阻率	D257	将立方体两个面之间的电阻乘以这两个面的面积得到每单位立方体的电阻，它以欧姆为单位。体积电阻率越高，材料的绝缘效果就越好。
表面电阻率	D257	电流通过一平方厘米的材料试样表面时的电阻。表面电阻率越高表示绝缘特性越好。
介电强度	D149	表示绝缘材料在受到破坏（介电击穿）之前所能承受的电压。高的介电强度表示该材料是好的绝缘体。



用于绝缘的 TORLON 聚合物

TORLON 聚酰胺—酰亚胺（PAI）树脂具有优异的电绝缘特性，并能在各种环境中保持这些特性。如表 28 所示，TORLON 的 4203L 和 5030 牌号的介电强度及体积和表面电阻率高。

而适合在需要耐磨损场合应用的 TORLON 聚酰胺—酰亚胺牌号，4301、4275 及 4435，则含有石墨，在一定条件下可以导电。尽管采用美国材料试验协会（ASTM）的试验方法 D 257 所测得的结果表明这些材料具有高的电阻，但由于该试验方法使用直流电进行测量，所以这些材料在较高的频率和电压下仍可表现出一定的导电性。

表 28

TORLON 树脂的电特性

	TORLON 牌号				
	4203L	4301*	4275*	4435*	5030
体积电阻率 (ASTM D257)					
ohm•cm	2×10^{17}	8×10^{15}	8×10^{15}	2×10^7	2×10^{17}
表面电阻率 (ASTM D257)					
ohm	5×10^{18}	8×10^{17}	4×10^{17}	6×10^{10}	1×10^{18}
介电强度, 1 mm (ASTM D 149)					
V/mil	580				840
kV/mm	24				33
介电常数 (ASTM D150)					
10^3 Hz	4.2	6.0	7.3		4.4
10^6 Hz	3.9	5.4	6.6		4.2
损耗因子 (ASTM D150)					
10^3 Hz	0.026	0.037	0.059		0.022
10^6 Hz	0.031	0.042	0.063		0.023

* 含有石墨粉。在这些试验中，它们表现为绝缘体。但在高电压或高频条件下，它们可能会成为导体。

在需要耐磨损场合的应用

TORLON PAI 耐磨损牌号的介绍

TORLON 的耐磨损牌号, 4301、4275 和 4435, 为运动部件的设计提供了新的可能。这些材料具有高的压缩强度和模量、优异的抗蠕变性以及在高温下保持强度和模量的突出能力, 同时还具有自润滑性和低的热膨胀系数, 使它们成为在严酷工作环境中使用的耐磨损表面的首选材料。在有润滑、无润滑以及少量润滑的使用状况下, TORLON PAI 轴承都能可靠地工作。适合这些独特特性的典型应用有: 普通轴承、止推垫圈、密封圈、叶片、阀座、轴衬以及耐磨垫。

轴承设计方案

只要两种固体相互摩擦, 磨损是不可避免的。将两个滑移面挤压在一起的作用力 (压力) 和发生滑移的速度影响磨损率。

磨损率的关系式

可按下列的经验方程, 将磨损率与压力和速度联系在一起。

$$t = KPVT$$

其中:

t = 磨损

K = 在给定的 P 和 V 值下测得的磨损系数

P = 轴承表面的压力

V = 轴承的表面速度

T = 时间

该方程似乎表明磨损程度直接与压力和速度成正比。如果磨损系数 K 为常数, 这样的结论就应该是正确的。然而对于聚合物材料, 磨损系数并不是常数, 而是要随着压力和速度的变化而改变。该方程仅在特定的压力速度 (PV) 值下从磨损率和预期使用寿命, 并对负载比进行校正后, 计算该 PV 值下的磨损深度是有用的。

计算压力和速度

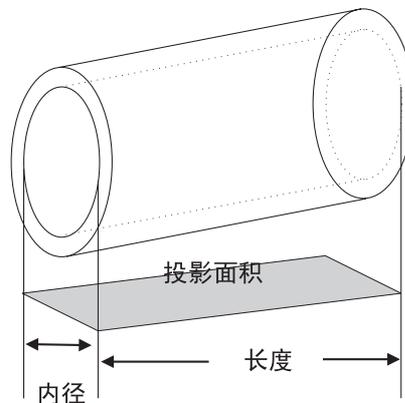
轴承

典型的普通轴承由套筒轴承围绕转轴而构成。要计算以每秒钟米数为单位的滑移速度, 可将以毫米为单位的轴径乘以每分钟转数 (rpm), 再乘以 0.003144。例如, 13 mm 的轴以 1200 rpm 的转速旋转, 将具有 49 米 / 分钟或 (除以 60) 0.8 米 / 秒钟的速度。

将总载荷除以面积即可得到压力。对于套筒轴承, 常采用投影面积, 由套筒的长度乘以轴承的内径, 如图 39 所示。压力通常标识为帕斯卡 (Pa), 等同于牛顿 / 平方米。

图 39

计算轴承的投影面积

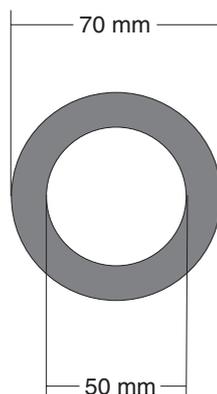


止推垫圈

计算止推垫圈的滑移速度时, 通常采用平均直径来确定每转的长度。例如, 外径和内径分别为 70 mm 和 50 mm 的止推垫圈, 其平均直径为 60 mm, 将该直径乘以 π 或 3.14 就得到每转的滑移距离。单位为毫米的平均直径应该乘以 3.14 和每分钟转数 (rpm), 再除以 60000, 便得到单位为米 / 秒的速度。继续示例, 假定每分钟转数为 100, 速度应该是 $60 \times 3.14 \times 100 \div 60000$, 或 0.31 米 / 秒。

图 40

止推垫圈的计算实例



国际制单位

$$\text{面积} = \pi \times (70/2)^2 - \pi \times (50/2)^2$$

$$\text{面积} = 3.14 \times (1225 - 625)$$

$$\text{面积} = 3.14 \times 600$$

$$\text{面积} = 1884 \text{ mm}^2$$

$$\text{面积} = 0.001884 \text{ m}^2$$

要想计算压力，将总载荷除以承载面积即可。图 40 描述了该示例中所用的止推垫圈，并详细介绍了承载面积的计算。如果垫圈上的载荷为 445 牛顿，压力应该由 445 牛顿除以 0.001884 m^2 而得到。该结果（236200）的单位应该是 N/m^2 ，也称为帕斯卡（Pa）。将该值除以 10^6 即得到 0.24 MPa。

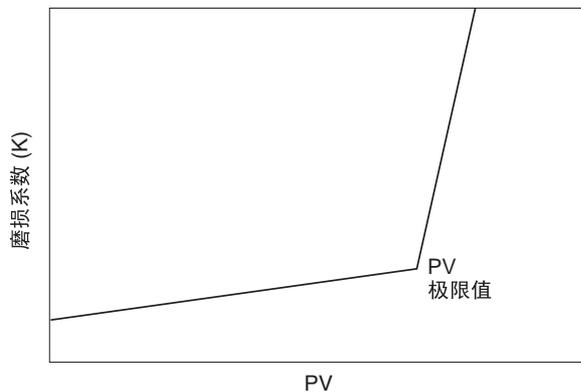
对于该示例，其 PV 值应该是 0.074 MPa·m/s。

PV 极限值概念

无论是增大压力或是增大速度都会导致额外的摩擦和随之而来的额外摩擦热。由于聚合物材料的特性随温度变化，所以压力和速度的乘积对预测聚合物轴承材料的性能非常有用。如果在各种不同的压力和速度条件下对聚合物轴承材料进行试验，并将所得结果对压力速度乘积（PV）作图，其典型的行为如图 41 所示。对低到中等的 PV 值，磨损低。随着 PV 值的增加，磨损会在某个点开始加快。这个发生转变时的 PV 值通常被称为 PV 极限值或者极限 PV 值。由于会产生摩擦热，在材料 PV 极限值以上使用的轴承的磨损非常迅速，并可能会熔融。

图 41

材料的磨损率是压力速度乘积（PV）的函数



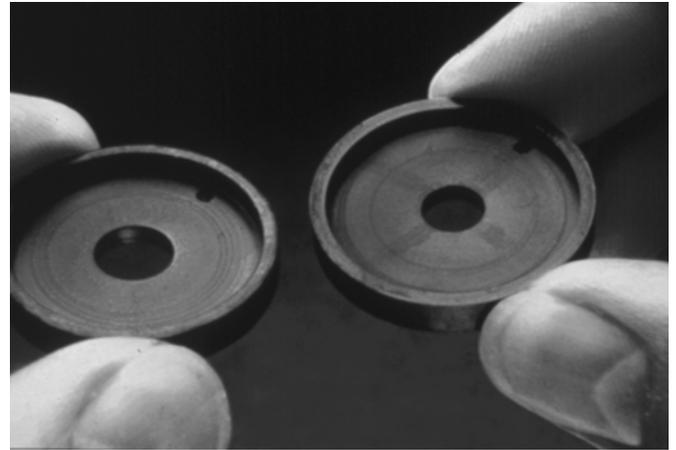
测量耐磨损性

评估相对耐磨损性的方法有许多种。因为存在大量的独立变数，所以各种方法之间几乎没有相关性。

本文中测量耐磨损性数据的方法是 ASTM D 3702，该方法采用手动止推轴承，3 轴销机。它采用注塑成型将试样制成圆片，然后通过机加工制成最终的构型，如图 42 所示。

图 42

止推垫圈试样



试样由表面光泽度为 $0.4 \mu\text{m}$ 的 AISI C-1018 钢制的固定垫圈进行试验。试验是在环境温度和湿度下进行的，而且没有任何外部润滑。先将止推垫圈试样在 60 m/min 的速度和 8.5 巴的压力下打磨 20 小时，以除去表面缺陷。然后在特定的速度和压力下对每一试样试验 20 小时。试验前和试验后，在止推垫圈圆片的 4 个等距点进行高度测量，从而得到单位为毫米的平均磨损深度，并用于磨损系数的计算。

TORLON 耐磨损牌号

有三种牌号的 TORLON PAI 通过混合添加剂来提高它们在无润滑使用时的耐磨损性。这些牌号为：4301、4275 和 4435。

耐磨材料的特征是磨损系数（K）低。摩擦系数低的含氟聚合物具有非常低的磨损系数，但其机械特性有限而且抗蠕变性差。PV 值低时，TORLON 耐磨损牌号的磨损系数与填充的聚四氟乙烯（PTFE）相当，这是一种含氟聚合物。但是，TORLON 聚合物具有更好的抗蠕变性和强度。

TORLON 聚合物的磨损系数与较昂贵的聚酰胺树脂相似，而选用 TORLON 聚酰胺-酰亚胺则具有明显的成本优势。此外，TORLON 树脂可注塑成型，而聚酰胺则不行。

TORLON PAI 的三种耐磨牌号在各种 PV 值下测得的磨损系数如表 29 所示。

表 29

磨损系数和磨损率

美制单位

速度 — 50 ft/min		磨损系数, 10^{-10} in ³ min/ft-lb-hr					磨损率, 10^{-6} in/hr				
		TORLON			Vespel [®]	PEEK [™]	TORLON			Vespel [®]	PEEK [™]
压力 (psi)	PV	4301	4275	4435	SP-21	X50FC30	4301	4275	4435	SP-21	X50FC30
200	10000	17	8	NT	19	45	17	8	NT	19	45
500	25000	42	49	NT	52	129	105	122.5	NT	130	322
1000	50000	82	55	27	38	249	410	275	135	190	1245
1500	75000	NT	28	20	28	熔融	NT	210	150	210	熔融
2000	100000	NT	24	20	开裂	NT	NT	240	200	开裂	NT
速度 — 200 ft/min											
50	10000	17	18	NT	18	74	17	18	NT	18	74
125	25000	83	39	98	104	69	208	98	245	260	172
250	50000	156	74	33	47	168	780	370	165	235	840
375	75000	NT	222	21	36	168	NT	1665	158	270	1260
500	100000	NT	熔融	20	28	熔融	NT	熔融	200	280	熔融
速度 — 800 ft/min											
12.5	10000	95	13	NT	52	21	95	13		52	21
31.25	25000	385	69		69	154	962	172		172	385
62.5	50000	896	118	92	63	1419	4480	590	460	315	7095
93.75	75000	NT	214	77	52	熔融	NT	1605	578	390	熔融
125	100000	NT	熔融	52	40	NT	NT	熔融	520	400	NT

国际制单位

速度 — 0.25 m/s		磨损系数, 10^{-10} mm-s/mPa-hr					磨损率, 10^{-6} m/hr				
		TORLON			Vespel [®]	PEEK [™]	TORLON			Vespel [®]	PEEK [™]
压力 (MPa)	PV	4301	4275	4435	SP-21	X50FC30	4301	4275	4435	SP-21	X50FC30
1.379	0.350	8	6	NT	14	33	0.3	0.2	NT	0.5	1.1
3.447	0.876	30	36	NT	38	94	2.7	3.1	NT	3.3	8.2
6.895	1.751	59	40	20	28	181	10.4	7.0	3.4	4.8	31.6
10.342	2.627	NT	20	15	20	熔融	NT	5.3	3.8	5.3	熔融
13.790	3.503	NT	17	15	开裂	NT	NT	6.1	5.1	开裂	NT
速度 — 1.02 m/s											
0.345	0.350	12	13	NT	13	54	0.4	0.5	NT	0.5	1.9
0.862	0.876	60	28	71	75	50	5.3	2.5	6.2	6.6	4.4
1.724	1.751	113	54	24	34	122	19.8	9.4	4.2	6.0	21.3
2.586	2.627	NT	126	15	26	122	NT	33.1	4.0	6.9	32.0
3.447	3.503	NT	熔融	15	20	熔融	NT	熔融	5.1	7.1	熔融
速度 — 4.06 m/s											
0.086	0.350	69	9	NT	38	15	2.4	0.3	NT	1.3	0.5
0.215	0.876	102	50	NT	50	112	8.9	4.4	NT	4.4	9.8
0.431	1.751	135	86	67	46	1030	23.6	15.0	11.7	8.0	180.2
0.646	2.627	NT	155	56	38	熔融	NT	40.8	14.7	9.9	熔融
0.862	3.503	NT	熔融	38	29	NT	NT	熔融	13.2	10.2	NT

图 43 至 45 中的曲线数据清楚地表明，TORLON 4435 在宽广 PV 值范围内具有优异的耐磨损性。

图 43

低速时的耐磨损性

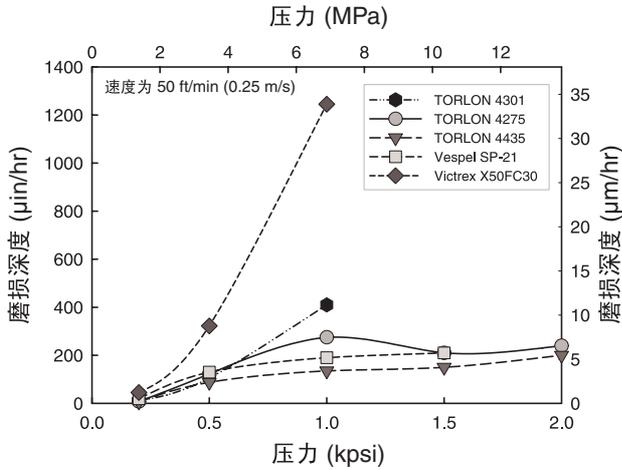


图 44

中速时的耐磨损性

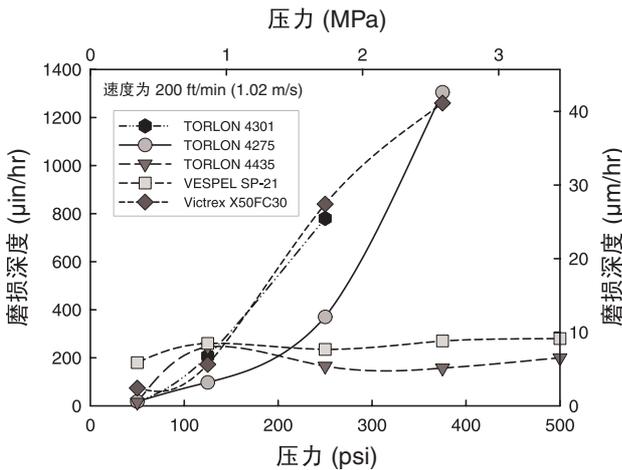
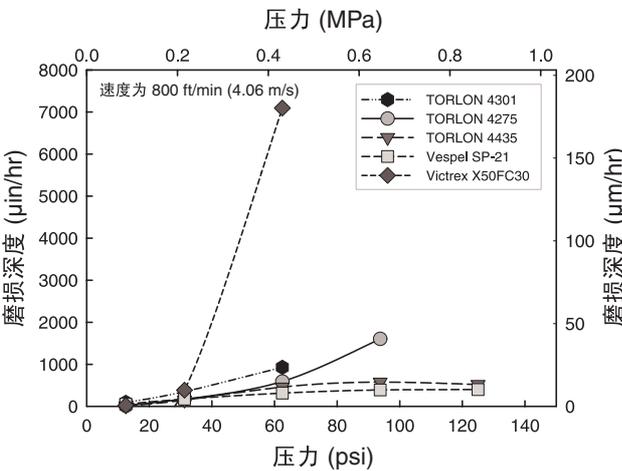


图 45

高速时的耐磨损性



接触面对磨损率的影响

表 29 以及图 43 至 45 中所提供的磨损数据是采用淬硬至洛氏 C 尺度 24 的 C1018 钢进行测定的。为了评估接触面对耐磨损性的影响，也采用了其它金属对 TORLON 4301 进行试验。所得结果见表 30。

表 30

采用不同金属接触面时 TORLON 4301 PAI 的磨损特征

作为 TORLON 4301 的接触面使用的金属					
C1018 (标准)	C1018 软	316 不锈钢	黄铜	铝压铸 合金	
				A360	A380
洛氏硬度, C 尺度					
24	6	17	-15	-24	-28
高速时的相对磨损系数					
1.0	1.4	7.5	2.1	1.3	1.2
低速时的相对磨损系数					
1.0	1.2	1.2	1.5	1.5	0.9

有润滑的耐磨损性

TORLON 的轴承牌号在无润滑环境中的非凡性能是避免在通常有润滑环境中由于润滑油失缺而导致灾难性部件破坏或咬粘的根本保证。在烃类油润滑的变速器中，TORLON 止推垫圈在 PV 值为 2700 MPa·m/min 的条件下表现良好。在水润滑的液压马达叶片中，当 PV 值超过 2,000,000 时仍具有非常好的性能。表 31 总结了浸渍于液压力中的 TORLON 4301 的磨损特征。

表 31

TORLON 4301 有润滑的耐磨损性

PV (P/V = 50/900)	45,000
磨损系数, K ($10^{-10} \text{ in}^3 \cdot \text{min} / \text{ft} \cdot \text{lb} \cdot \text{hr}$)	1.0
静态摩擦系数	0.08
动态摩擦系数	0.10
1,000 小时的磨损深度 (mm)	0.0045 (0.11 mm)

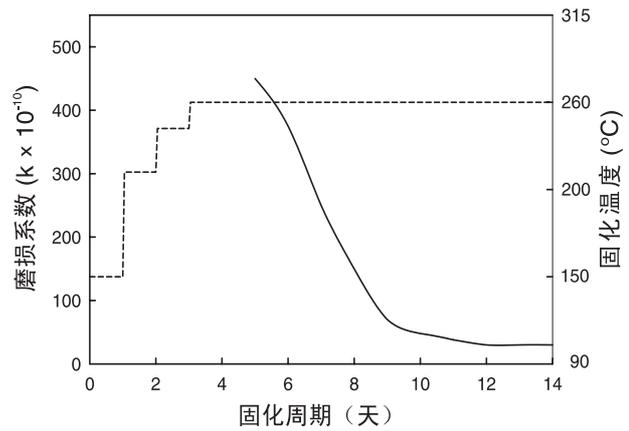
耐磨损性与后固化处理

TORLON 部件的耐磨损性取决于适当的后固化处理。彻底而完全的后固化处理对获得最大的耐磨损性是必要的。为了说明耐磨损性对后固化处理的依赖性，将 TORLON 4301 试样进行特定周期的后固化处理，然后测定不同时间点的耐磨损性。试验结果及固化周期如图 46 所示。在该试验中，磨损系数 K 在十一天后达到最小值，表明已获得最大的耐磨损性。

所需后固化处理的时间长短取决于部件的构型和厚度，并在一定程度上依赖于注塑成型的条件。长期暴露于 260°C 的温度下不会对 TORLON 部件产生损害。较短周期下的适用性必须由实验来证实。

图 46

在 260°C 下长时间固化可改善耐磨损性



固化周期由部件的几何形状所决定。



轴承设计

设计由 TORLON PAI 制成的轴承时，保持适当的轴间隙是关键。对于金属轴承，大的间隙易引起轴振动和划伤。PAI 轴承具有非常高的弹性，可阻尼振动并且不会划伤或卡死。轴承内径由总的转动间隙加上轴外径来确定。总的转动间隙是基本间隙、高环境温度的校正值以及如果轴承是压配时的压配干涉校正值的总和。

图 47 显示了基本间隙与轴径的函数关系。如果轴承是用在高于室温的环境温度下，则应该使用图 48 所示的系数。图 49 给出了使用压配轴承的建议公差。

为了举例说明如何正确选择 PAI 轴承的尺寸，可考虑在 65°C 环境温度下轴径和轴承壁厚分别为 50 mm 和 5 mm 的假定情况。PAI 轴承是压配到钢套中的。由图 47 得到的基本间隙为 0.23 mm。由图 48 中的系数 (0.0085) 乘以壁厚可得到高环境温度下的额外间隙为 0.04 mm。所建议的压配干涉校正值为 0.13 mm。由于轴承的内径将减少所相应的干涉值，该减少量要加到间隙上。因而，基本间隙 0.23 mm + 温度校正间隙 0.04 mm + 干涉校正 0.13 mm 便得到总间隙 0.40 mm。所以，PAI 轴承的内径应当是 50.4 mm。

图 47

基本轴间隙

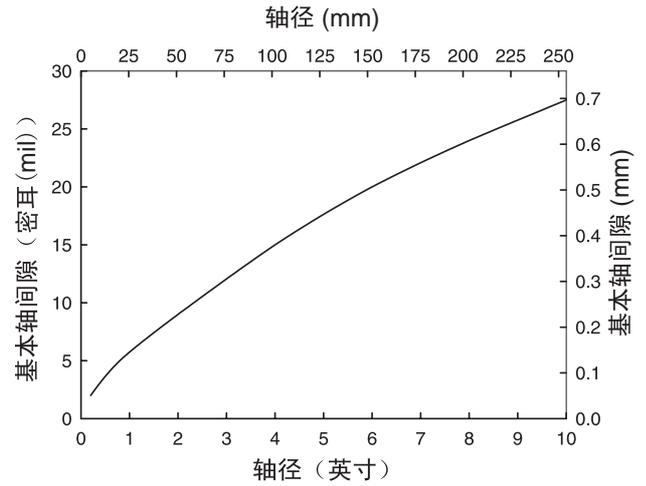


图 48

高环境温度下的间隙系数

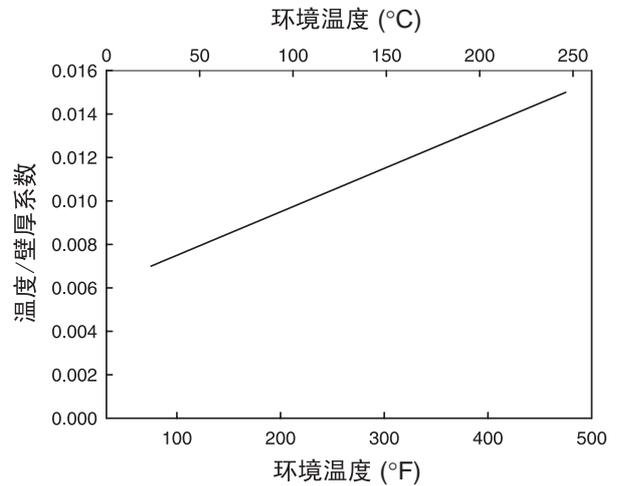
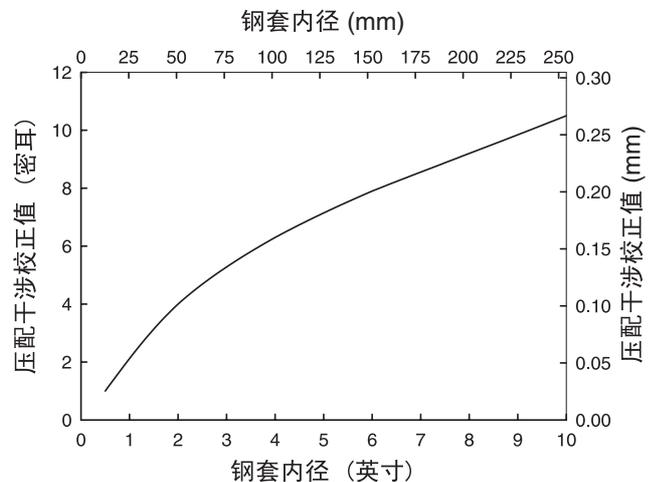


图 49

压配干涉



行业和机构认证

TORLON 工程聚合物已成功通过了多项行业标准和规范的试验。以下清单是最新认证的概略，但并非全部，因为针对 TORLON 聚酰胺-酰亚胺的更多实际应用工作还在继续进行。

ASTM D 5204 聚酰胺-酰亚胺树脂 (PAI) 注塑和挤塑成型材料的标准分类体系

TORLON 牌号 ASTM D 5204 编号

4203L	PAI000R03A56316E11FB41
或者	PAI011M03
或者	PAI021M03
4301	PAI000L15A32232E12FB42
或者	PAI012L15
或者	PAI022L15
4275	PAI000L23A22133E13FB42
或者	PAI012L23
或者	PAI022L23
4435	PAI0120
或者	PAI0220
5030	PAI000G30A61643E15FB46
或者	PAI013G30
或者	PAI023G30
7130	PAI000C30A51661FB47
或者	PAI013C30
或者	PAI023C30

联邦航空管理局

TORLON 5030 和 7130 通过了联邦航空管理局 (FAA) 对可燃性、烟气密度和毒气排放的要求。

MIL-P-46179A 军用规范

美国国防部已于 1994 年 7 月 27 日取消了该规范，并采纳了 ASTM D 5204 标准。下面对照表包括在采纳说明中。

TORLON 牌号	类型	级别	ASTM D 5204
4203L	I		PAI000R03A56316E11FB41
4301	II	1	PAI000L15A32232E12FB42
4275	II	2	PAI000L23A22133E13FB42
5030	III	1	PAI000G30A61643E15FB46
7130	IV		PAI000C30A51661FB47

美国航空和航天管理局

NHB8060.1 “材料在支持燃烧环境中的可燃性、气味和废气处理的要求及试验方法”。TORLON 4203L 和 4301 已经通过了 NASA NHB8060.1 对宇宙飞船材料的非真空暴露的要求。

汽车工程师协会的航空航天材料规范

AMS 3670 是适用于 TORLON 材料的规范。该规范提出了要求在温度高达 250°C 时具有低的摩擦系数、热稳定性和韧度的应用情况。具体的规范中包括了 TORLON 4203L, 4275, 4301, 5030 和 7130 材料:

AMS 3670/1-TORLON 4203L
AMS 3670/2-TORLON 4275
AMS 3670/3-TORLON 4301
AMS 3670/4-TORLON 5030
AMS 3670/5-TORLON 7130

保险商实验所 (UL)

垂直可燃性

所有 TORLON 牌号均已定为 94 V-0 级。参见第 17 页的表 19。

连续使用

TORLON 4203L、4301 和 5030 的相对热指数列在第 12 页的表 9 中。

结构设计

材料效率 — 比强度和比模量

减轻重量是降低成本、减小摩擦和降低能源消耗的关键。当使用 TORLON 工程聚合物代替金属时，重量明显较轻的 TORLON 部件能承受相同的载荷。

材料拉伸强度与其密度之比（即比强度）可提供有关“材料效率”的信息。例如，TORLON 5030 的比强度为 $1.3 \times 10^5 \text{ J/kg}$ ，而对应的不锈钢为 $0.8 \times 10^5 \text{ J/kg}$ 。因此，相同强度的 TORLON 5030 部件比不锈钢部件的重量会轻大约 40%。同样，当部件的刚度对其性能表现至关重要时，材料的比模量就值得关注。

表 32 所列及图 50 所示的材料效率对比数据表明，TORLON PAI 材料在重量上优于许多金属部件。

表 32

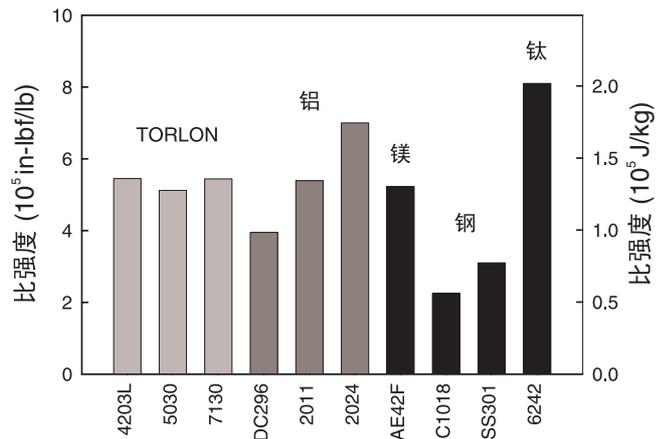
TORLON 聚合物及部分金属的比强度和比模量

	比强度		比刚度	
	10^5 in-lbf/lb	10^5 J/kg	10^7 in-lbf/lb	10^6 J/kg
TORLON 4203L	5.45	1.36	1.37	3.42
TORLON 5030	5.12	1.28	2.43	6.06
TORLON 7130	5.44	1.36	5.96	14.85
铝合金, 经过热处理				
压铸, 296	3.95	0.98	9.90	24.66
2011	5.39	1.34	10.00	24.91
2024	7.00	1.74	10.50	26.15
镁 AE42-F	5.23	1.30	10.05	25.02
碳钢, C1018	2.25	0.56	10.05	25.02
不锈钢, 301	3.10	0.77	9.66	24.05
钛 6-2-4-2	8.10	2.02	10.43	25.98



图 50

TORLON 树脂与金属之比强度的对比



几何形状和载荷考虑

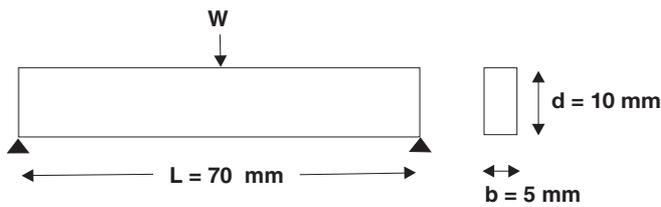
在部件设计初期，应使用标准的应力和挠曲公式，以确保最大工作应力不会超过建议限度。

应力和挠曲公式的应用实例

TORLON 工程聚合物的建议最大工作应力列在第 36 页的表 33 中。为了举例说明如何使用这些数值，我们将计算一根用 TORLON 5030 制成的梁在室温和不同载荷条件下的最大载荷。图 51 所示为梁的尺寸和惯性矩 (I) 的计算。

图 51

实例中所用的梁



W = 载荷 (kg)

L = 支撑点之间梁的长度 (mm)

c = 从受张力的最外点到轴中心的距离 (mm)

b = 梁宽 (mm)

d = 梁高 (mm)

I = 惯性矩 (mm⁴)

在此实例中：

L = 70 mm

c = 5 mm

b = 5 mm

d = 10 mm

$$I = \frac{bd^3}{12} = \frac{0.005 \text{ m} \times (0.01 \text{ m})^3}{12} = 0.42 \cdot 10^{-9} \text{ m}^4$$

M = 载荷 × 到支撑的距离 (m•kg)

例 1：短期载荷

最大弯曲应力 S_{\max} 出现在

$$L/2 \text{ 位置, 且 } M = \frac{WL}{4}$$

$$S_{\max} = \frac{WLc}{4I}$$

解出 W 并将 TORLON 5030 在室温下受短期载荷的建议最大工作应力代入：

$$W_{\max} = \frac{4S_{\max}I}{Lc} = \frac{(4)(122.7 \text{ MPa})(0.42 \cdot 10^{-9} \text{ m}^4)}{(0.07 \text{ m})(0.005 \text{ m})} = 59 \text{ kg}$$

所以，TORLON 5030 梁在室温下的最大短期载荷大约为 59 kg。

该梁的最大挠曲为：

$$Y_{\max} = \frac{WL^3}{48EI} \left(\frac{L}{2}\right)$$

其中 E 为从表 3 中查到的 TORLON 5030 的挠曲模量。

$$Y_{\max} = \frac{(59 \text{ kg})(0.07 \text{ m})^3}{(48)(10.76 \text{ GPa})(0.42 \cdot 10^{-9} \text{ m}^4)} = 0.93 \text{ mm}$$

因而，预计的最大挠曲为 0.93 mm。

例 2：稳定载荷

在此例中，载荷是长期的。蠕变是被考虑的限制因素。可以施加在 TORLON 5030 梁上的最大载荷为：

$$W_{\max} = \frac{4S_{\max}I}{Lc} = \frac{(4)(117 \text{ MPa})(0.42 \cdot 10^{-9} \text{ m}^4)}{(0.07 \text{ m})(0.005 \text{ m})} = 56.3 \text{ kg}$$

要计算在稳定载荷下梁的最大挠曲，应使用外观（蠕变）模量 (Ea) 而不用挠曲模量。由于材料的特性与时间有关，应选择一个有限的时间周期。在此例中，我们将计算 100 小时之后的最大挠曲。

在 100 小时后的表现模量可通过将从表 33 中查到的稳定载荷的建议最大工作应力除以假设的最大应变（1.5%）进行估算。

$$E_a = \frac{117 \text{ MPa}}{0.015} = 7,814 \text{ MPa}$$

代入后：

$$Y_{\max} = \frac{WL^3}{48E_a I} = \frac{(56.3 \text{ kg})(0.07 \text{ m})^3}{(48)(7,814 \text{ GPa})(0.42 \cdot 10^{-9} \text{ m}^4)} = 1.2 \text{ mm}$$

在 L/2 位置的最大挠曲预计为 1.2 mm。

例 3：循环载荷

当材料受循环应力作用时，会由于疲劳而在低于其极限强度的应力水平下发生破坏。使用下式可以计算此梁要承受最少 10,000,000 次循环的最大循环载荷：

$$W_{\max} = \frac{4S_{\max} I}{Lc} = \frac{(4)(31.4 \text{ MPa})(0.42 \cdot 10^{-9} \text{ m}^4)}{(0.07 \text{ m})(0.005 \text{ m})} = 15 \text{ kg}$$

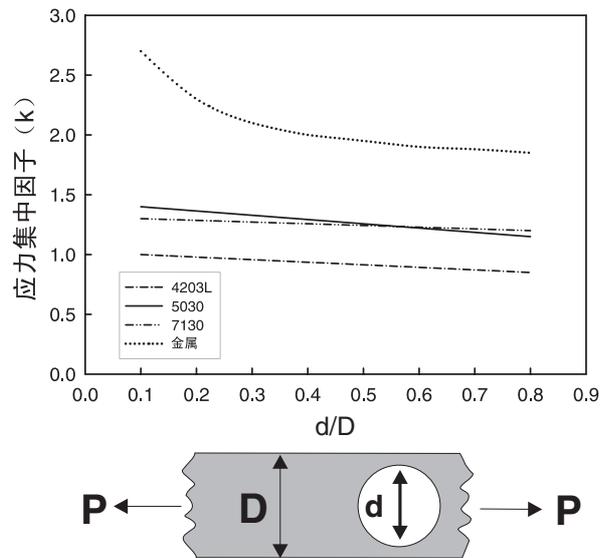
应力集中

部件的不连续部位，例如尖角和倒圆会引起应力集中，使材料在低于其建议最大工作应力的条件下发生破坏。因此，在设计部件时必须让应力场尽可能均匀分布，这一点非常关键。

圆形穿孔会导致应力集中，但如图 52 所示，TORLON 聚酰胺-酰亚胺树脂没有金属材料那样敏感。

图 52

圆形应力集中源的应力集中因子
(弹性应力，轴向拉伸)



TORLON 树脂的最大工作应力

最终使用条件对结构件的容许工作应力有所限制。原型评估是确定 TORLON 部件合适性的最好方法。表 33 中总结的数据在前期设计过程中对拟用部件的工程设计方程式计算很有用。

表 33

注塑成型 TORLON 树脂的最大工作应力

英制单位 (psi)	温度 (°F)	TORLON 牌号					
		4203L	4301	4275	4435	5030	7130
短期载荷	73	17,000	14,000	13,000	9,600	17,800	17,600
	275	10,000	9,800	9,800	7,800	13,900	13,700
	450	5,700	6,400	4,900	4,500	9,800	9,400
稳定载荷 (蠕变), <1.5% 应变, 100 小时	73	7,000	10,000	9,500		17,000	17,000
	200	6,500	7,500	7,900		15,000	15,000
	400	5,000	6,000	6,000		10,000	10,000
循环载荷, 10 ⁷ 次循环	73	3,850	3,000	2,800	2,000	4,550	5,250
	275	2,450	2,100	2,100	1,620	3,500	4,200
	450	1,400	1,350	1,050	950	2,450	2,800
国际制单位 (MPa)	温度 (°C)						
短期载荷	23	117	97	90	66	123	121
	135	69	68	68	54	96	94
	232	39	44	34	31	68	65
稳定载荷 (蠕变), <1.5% 应变, 100 小时	23	48	69	66		117	117
	90	45	52	54		103	103
	200	34	41	41		69	69
循环载荷, 10 ⁷ 次循环	23	27	21	19	14	31	36
	135	17	14	14	11	24	29
	230	10	9	7	7	17	19

采用 TORLON[®] 树脂的设计

加工方式

TORLON 聚酰胺-酰亚胺可使用三种传统成型技术中的任何一种：注塑成型、压塑成型和挤塑成型。每种技术都有其优点和局限性。

注塑成型

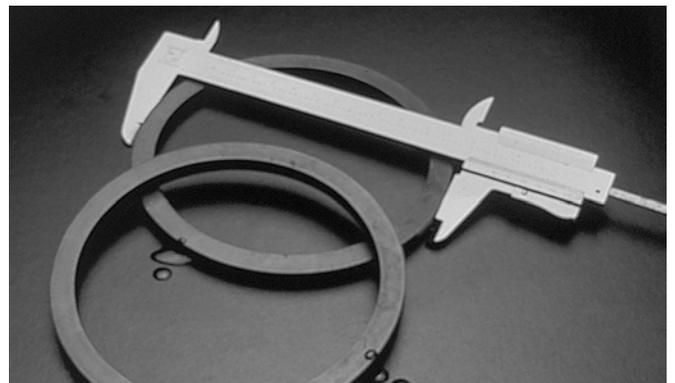
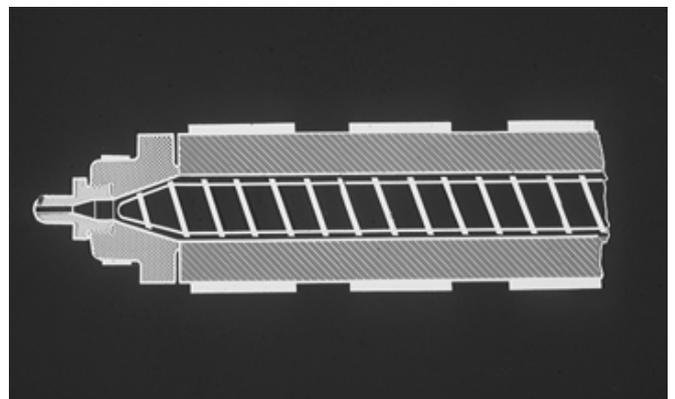
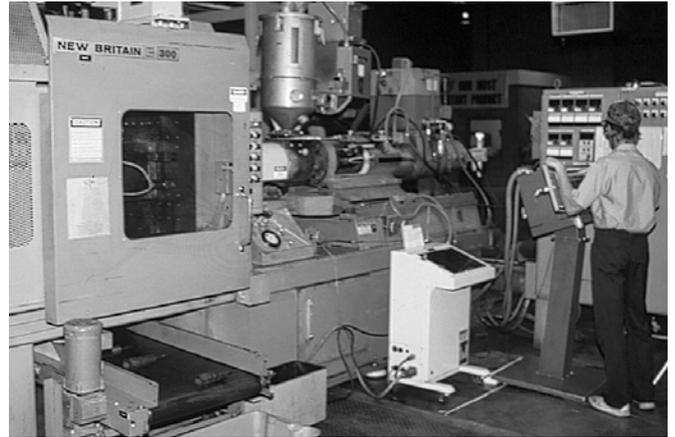
利用注塑成型技术可以生产出精细的 TORLON 部件。在这三种技术中，注塑成型的部件具有最高的强度。当需要生产大量的复杂部件时，注塑成型是最经济的技术，因其循环时间短且具有精准的重复性。部件的厚度受限于聚合物流程和厚度之间的关系。最大厚度被限制在 16 mm。

挤塑

TORLON 聚合物能挤塑成型为各种型条和型材，例如棒材、管材、薄片、薄膜及板材。几何形状简单的小部件可通过挤塑成型和自动螺杆机加工相结合来进行生产，这样可以节省成本。我们可提供各种尺寸的 TORLON 棒材和板材坯料。有关认可货源的信息，请与苏威高性能塑料公司的代表联系。

压塑成型

厚度超过 16 mm 的大部件必须使用压塑成型。与其它成型技术相比，其模具成本要低的多。压塑成型部件的强度通常比相应的注塑成型或挤塑成型部件低，但其应力也相对较低，所以更易于机加工。我们可提供各种尺寸的压塑成型棒材、不同内外径组合的压塑成型管材以及各种尺寸和厚度的压塑成型板材。有关认可货源的信息，请与苏威高性能塑料公司的代表联系。



TORLON 部件的后固化处理

TORLON 部件必须经过后固化处理。最佳特性，特别是耐化学性和耐磨损性，只有经过完全后固化处理才能达到。通过一个升温周期对 TORLON 部件进行固化处理，可获得最佳结果。固化周期参数由特定部件的大小和几何形状所决定。

TORLON 部件的设计原则

可采用多种加工技术对 TORLON 聚酰胺—酰亚胺进行精密模塑成型，生产出精细的部件。设计者不但可以选择性能优越的材料，而且所选择的材料还能给予其极大的设计自由空间。

以下部分将阐述 TORLON 聚酰胺—酰亚胺部件的设计原则。

壁部

只要可行，壁厚应该在最终用途所限定的范围内取最小值，以缩短循环时间并节省原料。当壁部的厚度必须大于 13 mm 时，可以结合模芯和筋结构或选用特殊牌号的 TORLON 来模塑部件。

对于用 TORLON 树脂成型的小部件，壁部一般在 0.8–13 mm 的范围内，但增强牌号或轴承牌号的厚度可达到 16 mm。

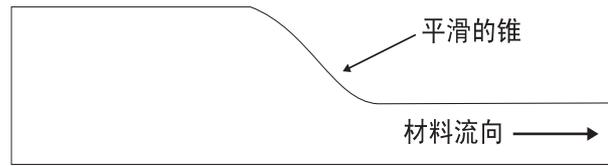
TORLON 聚酰胺—酰亚胺具有相对高的熔融粘度，对一定的壁厚会限制其流程。使用液压储力器和精确的过程控制可减小受该限制的影响。受多种因素的影响，如部件的几何形状、流动方向以及流道的变化程度等，对于厚度小于 1.3 mm 的截面，很难描述其流程与壁厚之间的关系。我们建议您与苏威高性能塑料公司的技术代表联系并研讨所要制造的部件。

壁厚的转变

当需要改变壁厚时，建议采用逐渐转变的方式以消除变形并减小内应力。图 53 显示了所期望的转变方法——平滑的锥度。材料最好是从厚截面流向薄截面，以避免出现诸如凹陷和内部真空等模塑问题。

图 53

不同壁厚之间的逐渐过渡



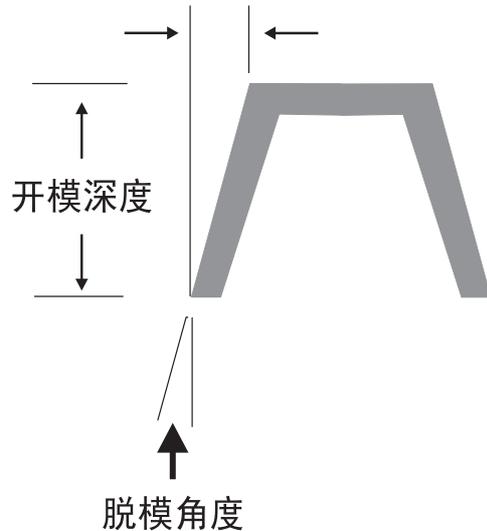
脱模角度

应允许有 0.5° 至 1° 的脱模角度，以使部件易于脱模。对于 TORLON 树脂，曾采用低达 0.125° 的脱模角度，但如此低的角度需要进行个例分析。脱模角度也取决于开模深度；开模深度越深，所需的脱模角度也就越大（见图 54）。部件的复杂程度和纹理装饰也都会影响对脱模角度的要求。对于纹理装饰，一般每增加 0.025 mm 的纹理深度，每侧便要增加 1° 的脱模角度。

图 54

脱模角度

由于脱模角度造成的尺寸变化



模芯

抽芯是减小壁厚厚度的一种有效方法。为了降低模具成本，模芯的退出方向应与压板的移动方向平行。

脱模角度应该纳入模芯的设计中。应避免使用暗芯，但如果有必要使用的话，一般的原则是：对于直径小于 4.8 mm 的模芯，其长度不应超过直径的两倍；如果直径大于 4.8 mm，其长度不应超过直径的三倍。对于抽芯通孔，当直径大于 4.8 mm，其长度不应超过直径的六倍；当直径小于 4.8 mm，其长度不应超过直径的四倍。

筋

筋可以提高 TORLON 部件的刚度而不增加截面厚度。底部的筋宽应该与邻近壁的厚度相等，以避免回填。加强筋应有锥度，以便脱模。

凸台

在装配时通常使用凸台来帮助定位，但也可以有其它功能。在一般情况下，凸台的外径应等于或大于其孔的内径的两倍，而凸台的壁厚应该小于或等于邻近的壁厚。

咬边

除非使用侧抽芯，否则不可能在 TORLON 部件中模塑咬边。为了降低模具成本，应避免采用咬边。如有必要，可采用侧抽芯模塑外部咬边；而内部咬边则需要折叠式或可卸式模芯。

模塑嵌入件

模塑在 TORLON 部件内的螺纹具有良好的拔脱强度，但如果需要更高的强度，可以将金属嵌入件模塑在部件内。TORLON 树脂的热膨胀系数低，是将塑料与金属集成在一起应用的极好材料。为便于模塑成型，嵌入件应与分模线垂直放置并受到支撑，以使其在注入熔融塑料时不发生移位。嵌入件应预热至模具温度。

对常用的嵌入件材料，表 34 详细规定了嵌入件周围的聚合物壁厚与嵌入件外径之间的比率关系。为了确保强度，嵌入件周围必须有足够的聚合物。

表 34

壁厚与嵌入件外径之间的关系

嵌入件材料	壁厚与嵌入件外径之比
钢	1.2
黄铜	1.1
铝	1.0

螺纹

螺纹可以模塑在部件内。具有 2 级公差的内外螺纹都可以用 TORLON 树脂通过一般成型方法模塑得到。采用精密度非常高的模具可实现 3 级公差。在一般情况下，对于小批量生产采用机加工螺纹会更经济一些。第 41 页的表 37 列出了 TORLON 螺纹的螺钉咬合强度。

孔

孔有多种功能。例如，电气连接器上有许多相互距离非常近的小孔。每个孔的周围都有熔合线，它是潜在的薄弱点。其薄弱程度与流程、部件几何形状以及孔周围的壁厚有关。由于 TORLON 树脂可模塑成型具有精密公差的部件，且其模塑成型的薄的截面也不会产生开裂，因此它是模塑这类部件的极好材料；但由于设计变数的复杂性，每一项应用都必须根据各自的情况进行考虑。

二次加工

接合

TORLON 部件能用机械方式或粘合剂进行接合。

机械接合技术

TORLON 聚酰胺-酰亚胺的尺寸稳定性和抗蠕变性使其能与金属部件进行接合，即使是转动或滑动的装配件。

拉扣配合：既经济又简单

拉扣配合是接合 TORLON 部件的一种既经济又简单的方法。由于拉扣配合的装配件会被反复装配和拆卸，因此必须考虑其应变极限，但聚酰胺-酰亚胺所具有的出色疲劳强度使得 TORLON 工程聚合物在这类应用中表现优异。TORLON 树脂的高模量、伸长率和低蠕变性也使得其非常适合用于拉扣配合设计。处于锁紧位置的弹力件应该无应变，或者处于材料能够承受的应力水平之下。未填充牌号的 TORLON 树脂能承受高达 10% 的应变，填充牌号为 5%。石墨纤维增强牌号的树脂不适合用于拉扣配合的装配件。

螺纹紧固件

自动攻丝螺钉

TORLON 聚酰胺-酰亚胺太坚韧，一般不能配用自动攻丝螺钉。建议采用螺纹孔。

模塑嵌入件

可将金属嵌入件模塑在 TORLON 部件内。欲获得最佳效果，须将嵌入件预热至模具温度。虽然聚酰胺-酰亚胺的收缩率低，但还是应当在嵌入件的周围留有足够的材料以分散由于收缩引起的应力，这一点非常重要。

螺纹机械嵌入件

自动攻丝并自锁的嵌入件为接合 TORLON 部件提供了高强度、低应力方案。这些金属嵌入件具有外部“锁定”机构，使其能固定在 TORLON 部件内，而通过其内置螺纹则可以反复进行装配和拆卸。这类嵌入件的实例包括 Mite 公司的下属企业 HeliCoil Products 公司生产的 HeliCoil® 嵌入件和 Rexnord 股份有限公司下属的 Tridair Fasteners 生产的 SpeedSerts® 嵌入件。

表 35 列出了 HeliCoil 嵌入件在 TORLON 4203L 和 5030 中的拉伸强度。它是指把嵌入件从 TORLON 试样中拉出至少 0.50 mm 所需的轴向力。

表 35

HeliCoil 嵌入件的强度

螺纹尺寸	拉伸强度				
	#4-40	#6-32	#8-32	#10-32	1/4"-20
啮合 (in)	0.224	0.276	0.328	0.380	0.500
(mm)	5.7	7.0	8.3	9.7	12.7
TORLON 4203L					
lb-f	870	1,470	1,840	2,200	2,830
N	3,870	6,550	8,190	9,790	12,590
TORLON 5030					
lb-f	970	1,700	2,140	2,940	5,200
N	4,310	7,560	9,520	13,080	23,130

模塑螺纹

内、外螺纹都能用 TORLON 聚合物进行模塑成型，并达到 2 级公差。由于 TORLON 聚酰胺-酰亚胺的热膨胀性与金属相近，因而金属与塑料界面的热应力就相对较低，所以用金属紧固件与 TORLON 螺纹相结合来装配部件非常合适。由于模具成本会增加，所以对于小批量生产一般建议采用机加工螺纹。

TORLON 树脂制成的螺栓强度

由于 TORLON 工程聚合物具有高强度、高模量和高承载力的特点，由 TORLON 工程聚合物模塑成型的螺纹紧固件非常可靠。采用 TORLON 4203L 和 5030 注塑成型得到螺栓，然后对其进行拉伸强度、伸长率和转矩极限的试验（表 36）。螺栓的直径为 6.4 mm，型号为 28TPI，螺纹为 2A 级。

表 36

TORLON 螺栓的强度

	拉伸强度		伸长率	剪切转矩	
	psi	MPa	%	in-lb	N-m
TORLON 4203L	18,200	125	9.5	28.6	3.2
TORLON 5030	18,400	127	6.6	27.2	3.1

* 拉伸强度的计算是基于 0.235 cm² 的截面积。转矩试验是采用钢垫圈和螺母在钢板上紧固螺栓进行的。最大剪切转矩是采用标有英寸磅刻度的转矩扳手测量的。

螺钉咬合强度

金属螺钉能将带螺纹的 TORLON 部件牢固接合在一起。在 5 mm 厚的 TORLON 薄板上打出供 4-40 号螺钉使用的螺孔并攻丝。根据 ASTM D1761* 所测得的螺钉拔脱强度如表 37 所示。

过盈配合

过盈配合或压配能以最低的成本达到很好的接合强度。TORLON 工程聚合物具有抗蠕变性，是这种接合技术的理想选择。为了确定应力是否在设计极限之内，应对径向干涉、实际使用温度和载荷条件进行评估。

表 37

TORLON PAI 螺纹的螺钉咬合强度

	拔脱强度		啮合
	lb	kg	每孔螺纹数
TORLON 4203L	540	245	7.5
TORLON 4275	400	180	7.7
TORLON 4301	460	210	7.8

* 筋滑动速度为每分钟 2.5 mm。薄板与螺钉固定件之间的跨度为 27 mm。

超声嵌入件

通过超声嵌入法能将金属嵌入件嵌入到未固化的 TORLON 部件中。嵌入件可被迅速安装到位，其强度与采用模塑技术所得到的相当。模塑一个尺寸略小于嵌入件的孔。将金属嵌入件与 TORLON 部件接触。给金属嵌入件施加 18 kHz 以上的振动之后，所产生的摩擦热会使塑料熔融。如果有足够的塑料流到滚花、螺纹等周围，即可获得高的强度。

其它的机械接合技术

因为经过后固化处理的 TORLON 部件非常坚韧，因此有些接合技术将不再适用。一般不建议采用膨胀嵌入件；但每一项应用都应根据各自的情况进行考虑。

用粘合剂粘合

TORLON 聚酰胺—酰亚胺部件可以用商品粘合剂进行粘合，从而扩大了设计方面的选择。有关的应用要求，您最好咨询粘合剂供应商。

粘合剂的选择

许多品种的粘合剂都可用于 TORLON 部件的粘合，包括酰胺—酰亚胺、环氧树脂和氰基丙烯酸酯。氰基丙烯酸酯的耐环境性低，不建议使用。除非由于环境条件的原因排除了其它的选择，一般不推荐使用硅树脂、丙烯酸和聚氨酯粘合剂。酰胺—酰亚胺粘合剂是将 35 份的 TORLON 4000T PAI 粉末溶于 65 份的 N-甲基吡咯烷酮中制得的**。

**警告！N-甲基吡咯烷酮（NMP）为易燃的有机溶剂，应遵守美国环保局（EPA）、美国国立职业安全与健康研究所（NIOSH）和美国职业安全与卫生管理局（OSHA）建议的正确操作程序。使用溶剂时必须通风良好。

TORLON PAI 牌号

TORLON 树脂的 4203L、5030 和 7130 牌号相对容易粘合。轴承牌号的 4301、4275 和 4435 具有内在固有的润滑性，因而较难粘合。表 38 比较了用环氧树脂、氰基丙烯酸酯和酰胺—酰亚胺粘合剂所粘合的这些牌号的剪切强度。

尺寸为 64 × 13 × 3 mm、经过后固化处理的 TORLON 试棒，轻微打磨后用丙酮擦拭，然后以 13 mm 的搭接进行粘合。根据粘合剂制造商的建议对所夹住的部件进行固化处理。在室温下放置七天之后，用拉伸试验机以每分钟 1.3 mm 的筋滑动速度将粘合部拉开。如果粘合区域之外的部分出现破裂，则逐渐缩小粘合区域并重复该操作，直到最小搭接为 3 mm。

表面的准备

粘合表面应无任何污染物，如油、液压液和灰尘。进行粘合之前，应将 TORLON 部件在温度为 150°C 的除湿烘箱内干燥至少 24 小时（厚度超过 6.0 mm 的部件需要更长的干燥时间），以除去所吸附的水分。TORLON 表面应通过机械打磨和溶剂擦拭，或者用等离子弧处理以增加粘附力。

粘合剂的应用

除酰胺—酰亚胺以外的粘合剂，请按照制造商的说明书使用。酰胺—酰亚胺粘合剂请按下列步骤操作：在每个接触面均匀涂上一层粘合剂薄膜。用最小的压力，大约 1.7 KPa，将涂有粘合剂的表面夹在一起。多余的粘合剂可以用 N-甲基吡咯烷酮（NMP）清除**。

**警告！N-甲基吡咯烷酮（NMP）为易燃的有机溶剂，应遵守美国环保局（EPA）、美国国立职业安全与健康研究所（NIOSH）和美国职业安全与卫生管理局（OSHA）建议的正确操作程序。使用溶剂时必须通风良好。

固化处理步骤

酰胺—酰亚胺粘合剂应在空气循环的排气式烘箱中固化。建议的固化周期为：23°C 温度下 24 小时，150°C 温度下 24 小时，200°C 温度下 2 小时。部件应保持夹紧直至冷却到 65°C 以下。

各种粘合剂的粘合强度

采用商品粘合剂进行 TORLON 部件的粘合。测量了粘合处的剪切强度，结果如表 38 所示。

根据“易用程度”对粘合剂的固化方法、操作和工作寿命进行了排序。使用温度范围在制造商的印刷品资料上能查到，但会随诸如载荷和化学环境等因素的不同而有所变化。

表 38

TORLON PAI 与 TORLON PAI 之间粘合的剪切强度

PAI 牌号	环氧树脂 ⁽¹⁾		氰基丙烯酸酯 ⁽²⁾		酰胺—酰亚胺	
	psi	MPa	psi	MPa	psi	MPa
TORLON 4203L	6,000+	41.4	2,780	19.2	5,000+	34.5
TORLON 4301	2,250	15.5	1,740	12.0	2,890	19.9
TORLON 4275	3,500	24.1	1,680	11.6	3,400	23.4
TORLON 5030	4,780	33.0	3,070	21.2	5,140	35.4
TORLON 7130	6,400+	44.1	3,980	27.4	4,750	32.8
易用程度 1= 最容易	2		1		3	
有用温度范围，						
°F	-67 至 160		-20 至 210		-321 至 500	
°C	-55 至 70		-30 至 100		-200 至 260	

⁽¹⁾ Hysol EA 9330, Hysol 是 Dexter 公司的注册商标。

⁽²⁾ CA 5000, Lord 公司。

TORLON 部件与金属的粘合

可用粘合剂将 TORLON 部件与金属部件粘合在一起。只要采用正确的表面准备和粘合操作，所形成粘合的强度会非常高。此外，温度变化所产生的界面应力会非常小。这是因为 TORLON 树脂和许多其它高温塑料不同，其膨胀系数和金属的膨胀系数相近。

如前述部分所讲，粘合强度取决于粘合剂的选择、TORLON 的牌号以及粘合的准备和固化处理技术是否正确。表 39 列出了 TORLON PAI 粘合铝以及 TORLON PAI 粘合钢的剪切强度数据。单靠机械打磨进行钢表面的准备有时可能会不够。当使用温度要求采用酰胺—酰亚胺粘合剂时，建议对钢进行化学处理。

表 39

TORLON PAI 与金属之间粘合的剪切强度

铝 2024 与 TORLON PAI 之间粘合的剪切强度

	环氧树脂 ⁽¹⁾		氰基丙烯酸酯 ⁽²⁾		酰胺—酰亚胺	
	psi	MPa	psi	MPa	psi	MPa
TORLON 4203L	4,000	27.6	1,350	9.3	5,050+	34.8+
TORLON 4301	2,500	17.2	1,450	10.0	4,950+	34.1+
TORLON 4275	2,450	16.9	750	5.2	4,350+	30.0+
TORLON 5030	3,900	26.9	3,250	22.4	6,050+	41.7+
TORLON 7130	4,000	27.6	3,750	25.9	6,400+	44.1+

冷轧钢与 TORLON PAI 之间粘合的剪切强度

	环氧树脂 ⁽¹⁾		氰基丙烯酸酯 ⁽²⁾		酰胺—酰亚胺	
	psi	MPa	psi	MPa	psi	MPa
TORLON 4203L	3,050	21.0	2,200	15.2	1,450	10.0
TORLON 4301	3,700	25.5	2,050	14.1	1,850	12.8
TORLON 4275	3,150	21.7	2,450	16.9	1,900	13.1
TORLON 5030	4,650	32.1	2,100	14.5	2,400	16.5
TORLON 7130	4,550	31.4	2,450	16.9	1,100	7.6

易用程度 1= 最容易

有用温度范围，

°F

-67 至 160

-20 至 210

-321 至 500

°C

-55 至 70

-30 至 100

-200 至 260

* 本试验采用尺寸为 64 × 13 × 3 mm 的 TORLON 试棒，相近尺寸的钢条取自冷轧钢的无光泽板，铝条取自 2024 合金板。

⁽¹⁾ Hysol EA 9330，Hysol 是 Dexter 公司的注册商标。

⁽²⁾ CA 5000，Lord 公司。

TORLON 树脂部件的机加工原则

由 TORLON 聚酰胺—酰亚胺制成的模塑型材和挤塑试棒可以采用低碳钢或丙烯酸树脂常用的机加工技术进行加工。表 40 列出了一些典型操作的机加工参数。

由 TORLON 树脂制成的部件具有稳定的尺寸，在切削刀具通过时不会挠曲或屈服。所有的 TORLON 牌号对标准刀具都容易磨损，不要使用高速刀具。

可以使用硬质合金刀具，但强烈推荐使用金钢石刀具或者嵌入式切削刀具。尽管这些刀具的初期成本较高，但要比硬质合金刀具经久耐用，因而对于生产而言具有更大的经济效益。薄断面或者尖角部位一定要小心处理，以避免产生断裂和碎屑。在修饰阶段采用浅切削可以最大程度地减少对易碎部件的损坏。建议使用喷雾冷却液冷却刀头并帮助清除工作面的切屑。可通过喷射空气或真空吸尘来保持工作面的清洁。

用注塑成型的胚料进行机加工制成的部件会有内部应力。为将变形减至最小，这些部件应采用对称机加工，以释放反向应力。

应对机加工部件进行再固化

设计用于摩擦和高磨损的部件或在腐蚀性化学环境中使用的部件，应在机加工之后进行再固化，以保证其具有最佳性能。如果这种部件的机加工深度大于 1.6 mm，强烈建议进行再固化。

表 40

TORLON 树脂部件的机加工原则

车削

切削速度 (m/min)	90–240
进料速度 (mm/rev)	0.1–0.6
后角 (度)	5–15
刀面角 (度)	7–15
切削深度 (mm)	0.6

圆锯切

切削速度 (m/min)	1,800–2,400
进料速度 (mm/rev)	快和稳
后角 (度)	15
锯齿偏向	轻微
刀面角 (度)	15

铣

切削速度 (m/min)	150–240
进料速度 (mm/rev)	0.2–0.9
后角 (度)	5–15
刀面角 (度)	7–15
切削深度 (mm)	0.9

钻孔

切削速度 (m/min)	90–240
进料速度 (mm/rev)	0.1–0.4
后角 (度)	0
顶角 (度)	118

扩孔

慢速 (m/min)	150
------------	-----

技术服务

我们的专业技术人员可随时为您解答有关 TORLON 部件的设计、模塑、修饰或试验等问题。我们尊重您的专利信息，会在保密的基础上为您提供咨询。

我们的服务工程师不仅具有多年 TORLON 聚合物应用的实际工作经验，而且还有最新的设计、加工和试验设备的支持。利用计算机辅助设计工作站，我们的工程师可以预测您拟用部件的成本和性能，并就如何进行有效成型提出建议。苏威高性能塑料公司也能提供用于制作原型部件的各种棒材、薄片、薄膜、板材、球形、圆片和管材坯料。

当您根据自己对工程塑料的需求进行 TORLON 聚酰胺-酰亚胺的性能评估时，以上这些服务能为您提供极大的帮助。

不论您考虑何种加工类型，我们的专业人员和设备可帮助您取得始终如一的高质量和制造盈利更高的产品。请致电苏威，让我们来一同研讨您的构想。

索引

数字

20 MM 垂直燃烧试验 17

A

ASTM D 638 7

ASTM D 5204 32

B

保险商实验所 (UL) 32

壁部 38

壁厚的转变 38

比模量 33

比强度 33

比热 13

变形温度 4, 5

表面电阻率 4, 5

泊松比 4, 5

不锈钢 13, 33

C

CLTE 13

材料效率 33

超声嵌入件 41

尺寸变化 22

冲击强度 4, 5

垂直可燃性 32

D

D 638 7

导热率 4, 5, 13

低温 7

点燃特性 16, 17

电特性 22, 25

典型特性 4, 5

毒气排放试验 16

断裂韧度 11

E

二次加工 40

G

高温 6, 7

国际制单位 5

过盈配合 41

H

航空工作液 20

行业和机构认证 32

恒定湿度 21

后固化处理 38

化学结构 1

J

几何形状和载荷考虑 34

机加工 44

挤塑 37

机械接合 40, 41

机械特性 6

技术服务 45

加工 37

伽马辐射 24

剪切强度 4, 5

间隙 31

接触面 29

介电常数 4, 5

介电强度 4, 5

结构设计 33

接合 40, 41

介绍 26

筋 39

紧固件 40

军用规范 32

K

抗蠕变性 14

可燃性 4, 5, 13, 16, 17, 18, 32

孔 39, 41

L

拉扣配合 40

拉伸模量 4, 5

拉伸强度 4, 5, 6, 7, 20, 24

拉伸伸长率 4, 5

拉伸特性 7

联邦航空管理局 (FAA) 可燃性 18

铝合金 13, 33

洛氏硬度 4, 5

螺纹 39, 40, 41

M

镁 33

美国国家标准局 (NBS) 烟气密度 16

美国航空和航天管理局 32

美制单位 4

密度 4, 5

摩擦和磨损 26

模塑嵌入件 40

磨损率 28

磨损系数 28

模芯 39

N

耐冲击性 10

耐化学性 19, 20

耐磨损 1

耐磨损牌号 26

耐磨损性与后固化处理 30

耐循环应力性 9

挠曲模量 4, 5, 7

挠曲强度 4, 5, 6, 7

粘合 42, 43

粘合剂 42

粘合强度 42

P

PV 极限值 27

牌号 2

疲劳强度 9

Q

汽车 20, 32

汽车工程师协会 32

嵌入件 39, 40, 41

R

RTI 12

热变形温度 4, 5

热老化 12

热稳定性 12

热重分析 12

热骤变 23

日晒色牢度 (Weather-Ometer) 试验 24

S

设计 37, 38

水的影响 21

水平燃烧试验 17

损耗因子 4, 5

T

TGA 12

钛 13, 33

碳钢 13, 33

体积电阻率 4, 5

铜 13

凸台 39

脱模角度 38

U

UL 57 18

UL 94 13, 17

UL 相对热指数 12

W

物理特性 3

X

吸收速度 21

吸水性 4, 5

线性热膨胀系数 4, 5

相对热指数 12

性能特性 6

Y

压塑成型 37

压缩模量 4, 5

压缩强度 4, 5

氧指数 4, 5, 16

咬边 39

伊佐德 (Izod) 冲击强度 4, 5

引言 1

应力 — 应变关系 8

应力集中 35

有润滑的耐磨损性 29

Z

止推垫圈 26

轴承设计 26

轴间隙 31

注塑成型 37

自动攻丝螺钉 40

最大工作应力 36

离心压缩机迷宫式密封件

TORLON® 聚酰胺-酰亚胺树脂制成的迷宫式密封件的耐腐蚀性优于铝，而且能实现较小的装配间隙。较小的间隙意味着更高的效率，以及无须增加能量输入就能获得更大产出。更好的耐腐蚀性意味着更长的停机维护间隔、更多的生产时间。



汽车动力传动系统止推垫圈

TORLON® 聚酰胺-酰亚胺树脂动力传动系统止推垫圈在汽车应用上具有非常好的冲击强度、耐磨损性和耐化学性。

柴油发动机止推垫圈

TORLON® 聚酰胺-酰亚胺止推垫圈吸收并耗散卡车发动机的冲击能量。它们具有低的摩擦和磨损，高的压力和速度极限以及优异的机械特性和耐热性。



Solvay Advanced Polymers, L.L.C.

4500 McGinnis Ferry Road
Alpharetta, GA 30005-3914
美国

电话: +1.770.772.8200
+1.800.621.4557 (仅限美国)
传真: +1.770.772.8454

中国上海

Solvay Shanghai Co Ltd.
Building 7, No. 899, Zuchongzhi Road,
ZhangJiang Hi-Tech Park,
Shanghai, China
苏威(上海)有限公司
上海市张江高科技园区祖冲之路 899 号 7 号楼
邮政编码: 201203
电话: +86-21-50805080
传真: +86-21-50805398

苏威高性能塑料公司及其下属机构还在美洲、欧洲及亚洲都设有办事处。要确定离您最近的办事处地址, 请访问我们的网站: www.solvayadvancedpolymers.com

产品和技术资料

据我们所知, 此处所包含的信息在编写本文件的当日是正确无误的。但是, 无论是苏威高性能塑料公司还是其任何下属机构均不对这些信息作出任何明示或暗示的保证, 也不承担与这些信息或其使用有关的任何赔偿责任。这些信息适合那些对技术熟悉的人员使用, 并由他们根据自己的判断进行使用及承担风险, 同时这些信息并没有涉及将本产品与任何其它物质或任何其它加工过程结合使用。这不是任何专利权或其它所有权的许可证。用户必须自己确定此处的任何信息或材料对其所预期的使用是否适合、应采取何种使用方式以及是否侵犯了任何专利权。

健康及安全信息

苏威高性能塑料公司备有其产品的材料安全数据表(MSDS), 请给本文档中所述地址写信或向销售代表索取。在使用我们的产品之前, 应先参阅适当的材料安全数据表。

TORLON 是苏威高性能塑料公司的注册商标。

Solvay
Advanced Polymers

