

Torlon®



SOLVAY

asking more from chemistry®

Torlon® PAI

设计指南

**SPECIALTY
POLYMERS**

引言.....	1	毒气排放试验.....	17
Torlon® 聚酰胺—酰亚胺树脂 (PAI)	1	点燃特性.....	17
高性能的 Torlon 聚合物	2	UL 94 可燃性标准.....	18
物理特性.....	2	水平燃烧试验	18
性能特性.....	5	20 MM 垂直燃烧试验.....	18
机械特性.....	5	联邦航空管理局 (FAA) 可燃性.....	19
极限温度下的拉伸强度和挠曲强度	5	UL 57 电气照明器材.....	19
超高温	5	各种环境中的性能.....	20
根据美国材料试验协会 (ASTM) 的试验方法		耐化学性.....	20
D638 得到的拉伸特性.....	6	耐航空和汽车工作液的能力	21
超低温	6	汽车润滑油	21
挠曲模量 - 高温下的刚度	6	飞机液压液 (Skydrol® 500B)	21
应力—应变关系.....	7	飞机汽轮机油, 有应力和无应力作用	22
压缩特性.....	8	应力下的耐化学性.....	22
耐循环应力性.....	9	水的影响.....	22
疲劳强度.....	9	吸收速度	22
耐冲击性.....	10	恒定湿度下的平衡吸收	23
断裂韧度.....	11	尺寸变化	23
热稳定性.....	12	尺寸和特性的恢复	23
热重分析.....	12	机械特性和电特性的变化	23
长时间受热的影响.....	12	骤然高温暴露的约束条件	24
UL 相对热指数.....	12	日晒色牢度 (Weather-Ometer®) 试验	25
热老化后的特性保持.....	12	抗伽马辐射性.....	25
比热.....	13	电特性.....	26
导热率.....	13	用于绝缘的 Torlon 聚合物	26
线性热膨胀系数 (CLTE)	14	在需要耐磨损场合的应用.....	27
线性热膨胀系数 (CLTE) 测试方法.....	14	Torlon PAI 耐磨损牌号的介绍	27
影响线性热膨胀系数 (CLTE) 的因素.....	14	轴承设计方案.....	27
部件厚度	14	磨损率的关系式	27
温度范围和相变化	14	计算压力和速度	27
加工参数	14	轴承	27
增强	14	止推垫圈	28
部件的几何形状	14	PV 极限值概念.....	28
抗蠕变性.....	15	测量耐磨损性	29
可燃性.....	17	Torlon 耐磨损牌号	29
氧指数.....	17	接触面对磨损率的影响.....	31
NBS 烟气密度.....	17	有润滑的耐磨损性.....	31
		耐磨损性与后固化处理.....	32
		轴承设计.....	33

行业 and 机构认证..... 34

ASTM D5204 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.....	34
联邦航空管理局.....	34
MIL-P-46179A 军用规范.....	34
美国航空和航天管理局.....	34
汽车工程师协会的航空航天材料规范.....	34
保险商实验所.....	34
垂直可燃性	34
连续使用	34

结构设计..... 35

材料效率—比强度和比模量.....	35
几何形状和载荷考虑.....	36
应力和挠曲公式的应用实例.....	36
例 1: 短期载荷	36
例 2: 稳定载荷	36
例 3: 循环载荷	37
应力集中.....	37
Torlon 树脂的最大工作应力	38

采用 Torlon 树脂的设计..... 39

加工方式.....	39
注塑.....	39
挤塑.....	39
压塑成型.....	39
Torlon 部件的后固化处理	40
Torlon 部件的设计原则	40
壁部	40
壁厚的转变	40
脱模角度	40
模芯	41
加强筋结构	41
凸台	41
咬边	41
模塑嵌入件	41
螺纹	41
孔	41

二次加工..... 42

接合.....	42
机械接合技术.....	42
拉扣配合: 既经济又简单	42
螺纹扣固件.....	42
自动攻丝螺钉	42
模塑嵌入件	42
螺纹机械嵌入件	42
模塑螺纹	42
Torlon 树脂制成的螺栓强度.....	42
螺钉咬合强度	43
过盈配合	43
超声嵌入件	43
其它的机械接合技术	43
用粘合剂粘合.....	43
粘合剂的选择	43
各种 Torlon PAI 牌号的粘合	44
表面的准备	44
粘合剂的应用	44
固化处理步骤	44
各种粘合剂的粘合强度	44
Torlon 部件与金属的粘合	44
Torlon 树脂部件的机加工原则	46
应对机加工部件进行再固化	46

索引..... 47

表

表 1: Torlon 工程聚合物	1	表 23: Torlon 4203L 在 93°C 的温度下， 24 小时后的耐化学性.....	20
表 2: 牌号和说明.....	2	表 24: 在 149°C 的汽车润滑液中浸渍后的特性 保持率.....	21
表 3: 典型特性 - 国际制单位	3	表 25: 在 150°C 的福特自动变速器油中 1,500 小时后的影响.....	21
表 4: 典型特性 - 美制单位	4	表 26: 在飞机液压液中浸渍后的拉伸强度	21
表 5: 按照 ASTM D1708 方法得到的拉伸特性.....	6	表 27: 吸水量为 2% 时 Torlon 4203L 的特性变化 ..	23
表 6: Torlon 模塑树脂在 -196°C 下的特性	6	表 28: 重要的电指标.....	26
表 7: 按照 ASTM D695 方法得到的压缩特性.....	8	表 29: Torlon 树脂的电特性	26
表 8: 3.2 mm 试棒的耐伊佐德 (Izod) 冲击	10	表 30: 磨损系数和摩擦系数，干燥环境.....	30
表 9: 聚酰胺-酰亚胺兼顾了断裂韧度和高的 玻璃转化温度.....	11	表 31: 采用不同金属接触面时 Torlon 4301 的 磨损特征.....	31
表 10: Torlon 树脂的相对热指数	12	表 32: Torlon 4301 有润滑的耐磨损性	31
表 11: Torlon 4203L 热老化后的特性保持	13	表 33: 磨损系数和摩擦系数，有润滑环境.....	31
表 12: Torlon 聚合物的比热	13	表 34: Torlon 聚合物及部分金属的比强度和比 模量.....	35
表 13: Torlon 树脂的导热率	13	表 35: 注塑成型 Torlon 树脂的最大工作应力	38
表 14: Torlon 树脂和部分金属的线性热膨胀系 数 (CLTE)	14	表 36: 壁厚与嵌入件外径 (OD) 之间的关系.....	41
表 15: 根据 ASTM D2863 得到的氧指数.....	17	表 37: HeliCoil 嵌入件的强度.....	42
表 16: NBS 烟气密度.....	17	表 38: Torlon 螺栓的强度	43
表 17: 联邦航空管理局 (FAA) 毒气排放试验.....	17	表 39: Torlon PAI 螺纹的螺钉咬合强度	43
表 18: Torlon 4203L 的点燃特性.....	18	表 40: Torlon PAI 与 Torlon PAI 之间粘合的剪 切强度.....	45
表 19: UL 对材料分类的标准.....	18	表 41: Torlon PAI 与金属之间粘合的剪切强度	45
表 20: 由保险商实验所制定的垂直可燃性标准 (UL 94)	19	表 42: Torlon 树脂部件的机加工原则	46
表 21: 联邦航空管理局 (FAA) 垂直可燃性.....	19		
表 22: 电气照明器材的可燃性要求 (UL 57)	19		

图

图 1: 聚酰胺—酰亚胺的结构.....	1	图 26: Torlon 4275 在 204°C 下的应变与时间的关系.....	16
图 2: Torlon 树脂具有出色的拉伸强度.....	5	图 27: Torlon 4301 在 204°C 下的应变与时间的关系.....	16
图 3: Torlon 树脂在宽广的温度范围内具有高的挠曲强度.....	5	图 28: Torlon 5030 在 204°C 下的应变与时间的关系.....	16
图 4: 在 204°C, 增强 Torlon 树脂的拉伸强度超过其它竞争对手的增强塑料.....	5	图 29: Torlon 7130 在 204°C 下的应变与时间的关系.....	16
图 5: 在 204°C, 增强 Torlon 树脂的挠曲强度超过竞争对手的增强塑料.....	5	图 30: Torlon 聚合物在 23°C, 50% 相对湿度时的吸水性.....	22
图 6: Torlon 聚合物的挠曲模量.....	6	图 31: Torlon 聚合物在 43°C, 90% 相对湿度时的吸水性.....	22
图 7: 在 204°C, 增强 Torlon 的挠曲模量超过其它竞争对手的增强塑料.....	7	图 32: 平衡水分吸收与相对湿度的关系.....	23
图 8: 在 23°C 受张力的应力—应变曲线, 采用 ASTM D638 Type 1 试样.....	7	图 33: Torlon 聚合物在 23°C, 50% 相对湿度时的尺寸变化.....	23
图 9: 图 8 在 23°C 的局部应力—应变曲线.....	7	图 34: Torlon 聚合物在 43°C, 90% 相对湿度时的尺寸变化.....	23
图 10: 各种 Torlon 树脂在 200°C 时受张力的应力—应变曲线.....	7	图 35: Torlon 4203L 的热骤变温度与水分含量的关系.....	24
图 11: Torlon 4203LF 在各种温度时受张力的应力—应变曲线.....	7	图 36: Torlon 4203L 的热骤变温度与暴露时间的关系.....	24
图 12: Torlon 树脂在 30 Hz 下的挠曲疲劳强度.....	9	图 37: 暴露于模拟气候环境下, Torlon 4203L 的伸长率基本恒定.....	25
图 13: Torlon 7130 和 4230L 在 30 Hz 下的拉伸/拉伸疲劳强度, A 比值为: 0.90.....	9	图 38: 暴露于模拟气候环境下, Torlon 4203L 的拉伸强度变化.....	25
图 14: Torlon 7130 在 2 Hz 下的拉伸/拉伸低循环疲劳强度, A 比值为: 0.90.....	10	图 39: 由于伽马辐射导致的 Torlon 4203L 特性变化.....	25
图 15: Torlon 树脂在 177°C, 30 Hz 下的高温挠曲疲劳强度.....	10	图 40: 计算轴承的投影面积.....	27
图 16: Torlon 树脂与竞争对手的材料耐伊佐德 (Izod) 冲击比较.....	10	图 41: 止推垫圈的计算实例.....	28
图 17: 紧凑拉伸试样.....	11	图 42: 材料的磨损率是压力速度乘积 (PV) 的函数.....	29
图 18: Torlon 4203L 的热重分析.....	12	图 43: 止推垫圈试样.....	29
图 19: Torlon 树脂在 250°C 下热老化后仍保持强度.....	13	图 44: 在 260°C 下长时间固化可改善耐磨损性.....	32
图 20: Torlon 4203L 在 23°C 下的应变与时间的关系.....	15	图 45: 基本轴间隙.....	33
图 21: Torlon 4275 在 23°C 下的应变与时间的关系.....	15	图 46: 高环境温度下的间隙系数.....	33
图 22: Torlon 4301 在 23°C 下的应变与时间的关系.....	15	图 47: 压配干涉.....	33
图 23: Torlon 5030 在 23°C 下的应变与时间的关系.....	15	图 48: Torlon 树脂与金属之比强度的对比.....	35
图 24: Torlon 7130 在 23°C 下的应变与时间的关系.....	15	图 49: 实例中所用的梁.....	36
图 25: Torlon 4203L 在 204°C 下的应变与时间的关系.....	16	图 50: 圆形应力集中源的应力集中因子 (弹性应力, 轴向拉伸).....	37
		图 51: 不同壁厚之间的逐渐过渡.....	40
		图 52: 需要考虑的脱模因素.....	40

Torlon® 聚酰胺—酰亚胺树脂 (PAI)

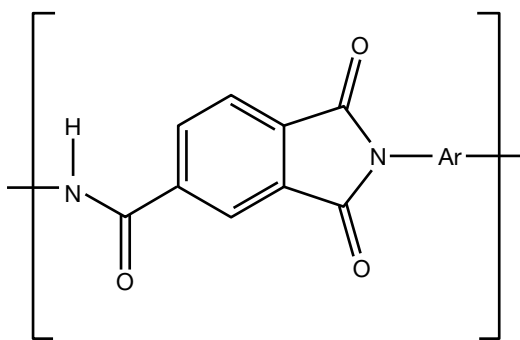
欲在极高温度和应力条件下获得可靠的性能，请采用 Torlon 聚合物。由 Torlon 工程聚合物制成的部件超乎一般热可塑塑料所能考虑的使用状况。这正是为什么航天飞机的零部件、汽车变速器以及许多其它关键部件都是采用 Torlon 聚合物注塑成型的。经过许多行业的考验，如电气和电子工业、商用设备、航空航天、交通运输、加工制程以及重工业等，Torlon 部件都能面对设计的挑战。

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 聚合物能低成本地解决困难设计问题。

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。

Solvay Specialty Polymers 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，因此需要多种 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 ⁽¹⁾
4203L ⁽²⁾	4301
5030	4275
7130	4630
	4435
	4645

⁽¹⁾ 产品按耐磨损性增大的顺序列出

⁽²⁾ 4203 具有与 4203L 相同的特性

只有 Torlon 工程聚合物才能提供下列综合性能：

- 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 Solvay 的代表联系。

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。



表 2: 牌号和说明

牌号	说明
高强度	
4203L ⁽¹⁾	通用型、未填充牌号，具有最佳耐冲击性、最大伸长率以及良好的脱模性和电特性。
5030	30% 玻璃纤维、高刚性、高强度、高温下良好的刚性保持性、非常低的蠕变性。
7130	30% 碳纤维、刚性最好、高温下的刚性保持性最好、耐疲劳性最好、导电。
耐磨损	
4301	通用耐磨损型，含有 PTFE 和石墨。
4275	高速时具有良好的耐磨损性，含有 PTFE 和石墨。
4630	干燥环境下具有优异的耐磨损性，含有 PTFE 和石墨。
4435	高速和高压下具有良好的耐磨损性，含有 PTFE 和石墨。
4645	有润滑环境下具有优异的耐磨损性，含有 PTFE 和碳纤维。

⁽¹⁾ 4203 具有与 4203L 相同的特性

表 3: 典型特性⁽¹⁾ - 国际制单位

	ASTM		高强度牌号			耐磨损牌号				
特性	试验方法	单位	4203L	5030	7130	4301	4275	4435	4630	4645
机械										
拉伸强度 ⁽²⁾	D638	MPa	152	221	221	113	117	94	81.4	114
断裂伸长率	D638	%	7.6	2.3	1.5	3.3	2.6	1.0	1.9	0.8
拉伸模量	D638	GPa	4.5	14.6	16.5	6.8	8.8	14.5	7.45	18.6
挠曲强度	D790	MPa								
-196°C			282	374	310		200			
23°C			244	338	355	219	212	152	131	154
135°C			174	251	263	165	157	129		
232°C			120	184	177	113	111	91		
挠曲模量	D790	GPa								
-196°C			7.9	14.1	24.6		9.6			
23°C			5.0	11.7	19.9	6.9	7.3	14.8	6.8	12.4
135°C			3.9	10.7	15.6	5.5	5.6	11.2		
232°C			3.6	9.9	13.1	4.5	5.1	10.3		
压缩强度	D695	MPa	220	260	250	170	120	138	99	157
压缩模量	D695	GPa	4.0	7.9	9.9	5.3	4.0	8.5	4.7	5.2
剪切强度	D732	MPa	128	140	120	112	77	60		85
伊佐德（Izod）冲击强度 （3.2 mm）	D256	J/m								
缺口			142	79	47	63	84	43	48	37
无缺口			1,062	504	340	404	250	219	160	107
泊松比			0.45	0.43	0.39	0.39	0.39	0.42		
热										
变形温度	D648	°C								
1.82 MPa			278	282	282	279	280	278	279	281
线性热膨胀系数	D696	ppm/°C	30.6	16.2	9.0	25.2	25.2	14.4	11.5	4.5
导热率	C177	W/mK	0.26	0.37	0.53	0.54	0.65	0.80		
可燃性 ⁽³⁾ ，保险商实验所 （UL）	UL94		94 V-0	94 V-0	94 V-0	94 V-0	94 V-0	94 V-0		
极限氧指数 ⁽³⁾	D2863	%	45	51	52	44	45			
电										
介电常数	D150									
10 ³ Hz			4.2	4.4		6.0	7.3			
10 ⁶ Hz			3.9	4.2		5.4	6.6			
损耗因子	D150									
10 ³ Hz			0.026	0.022		0.037	0.059			
10 ⁶ Hz			0.031	0.050		0.042	0.063			
体积电阻率	D257	ohm-cm	2 × 10 ¹⁷	2 × 10 ¹⁷		8 × 10 ¹⁵	8 × 10 ¹⁵	2 × 10 ⁷		
表面电阻率	D257	ohm	5 × 10 ¹⁸	1 × 10 ¹⁸		8 × 10 ¹⁷	4 × 10 ¹⁷	6 × 10 ⁶		
介电强度（1 mm）	D149	kV/mm	23.6	32.6						
一般性能										
密度	D792	g/cm ³	1.42	1.61	1.48	1.46	1.51	1.59	1.56	1.56
硬度（洛氏 E）	D785		86	94	94	72	70	62		
吸水性（24 小时）	D570	%	0.33	0.24	0.26	0.28	0.33	0.12	0.2	0.3

⁽¹⁾ 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。

⁽²⁾ 按照 ASTM D1708 方法所得到的拉伸特性列在第 6 页的表 5。

⁽³⁾ 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, 可能未准确反映实际燃烧条件下该材料的火灾危害程度。

表 4: 典型特性⁽¹⁾ - 美制单位

	ASTM 试验		高强度牌号			耐磨损牌号				
特性	方法	单位	4203L	5030	7130	4301	4275	4435	4630	4645
机械										
拉伸强度 ⁽²⁾	D638	kpsi	22.0	32.1	32.0	16.4	16.9	13.6	11.8	16.6
断裂伸长率	D638	%	7.6	2.3	1.5	3.3	2.6	1.0	1.9	0.8
拉伸模量	D638	kpsi	650	2,110	2,400	990	1,280	2,100	1,080	2,700
挠曲强度	D790	kpsi								
-321°F			41.0	54.4	45.0		29.0			
73°F			34.9	48.3	50.7	31.2	30.2	22.0	19.0	22.4
275°F			24.8	35.9	37.6	23.5	22.4	18.7		
450°F			17.1	26.2	25.2	16.2	15.8	13.2		
挠曲模量	D790	kpsi								
-321°F			1,140	2,040	3,570		1,390			
73°F			730	1,700	2,400	1,000	1,060	2,150	990	1,800
275°F			560	1,550	2,270	790	810	1,630		
450°F			520	1,430	1,900	720	740	1,500		
压缩强度	D695	kpsi	32.1	38.3	36.9	24.1	17.8	20.0	14.4	22.8
压缩模量	D695	kpsi	580	1,150	1,430	770	580	1,240	683	760
剪切强度	D732	kpsi	18.5	20.1	17.3	16.1	11.1	8.7		12.4
伊佐德（Izod）冲击强度 （1/8 英寸）	D256	ft-lbs/in								
缺口			2.7	1.5	0.9	1.2	1.6	0.8	0.9	0.7
无缺口			20.0	9.5	6.4	7.6	4.7	4.1	3	2
泊松比			0.45	0.43	0.39	0.39	0.39	0.42		
热										
变形温度	D648	°F								
264 psi			532	539	540	534	536	532	535	538
线性热膨胀系数	D696	ppm/°F	17	9	5	14	14	8	20	8
导热率	C177	Btu in/hr ft²°F	1.8	2.5	3.6	3.7	4.5	5.6		
可燃性 ⁽³⁾ ，保险商实验所 （UL）			94 V-0	94 V-0	94 V-0	94 V-0	94 V-0	94 V-0		
极限氧指数 ⁽³⁾	D2863	%	45	51	52	44	45			
电										
介电常数	D150									
10³ Hz			4.2	4.4		6.0	7.3			
10⁶ Hz			3.9	4.2		5.4	6.6			
损耗因子	D150									
10³ Hz			0.026	0.022		0.037	0.059			
10⁶ Hz			0.031	0.050		0.042	0.063			
体积电阻率	D257	ohm-cm	2×10¹⁷	2×10¹⁷		8×10¹⁵	8×10¹⁵	2×10⁷		
表面电阻率	D257	ohm	5×10¹⁸	1×10¹⁸		8×10¹⁷	4×10¹⁷	6×10⁶		
介电强度（1 mm）	D149	V/mil	580	840						
一般性能										
密度	D792	lb/in³	0.051	0.058	0.054	0.053	0.054	0.057	0.056	0.056
硬度（洛氏 E）	D785		86	94	94	72	70	62		
吸水性（24 小时）	D570	%	0.33	0.24	0.26	0.28	0.33	0.12	0.2	0.3

⁽¹⁾ 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。

⁽²⁾ 按照 ASTM D1708 方法所得到的拉伸特性列在第 6 页的表 5。

⁽³⁾ 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, 可能未准确反映实际燃烧条件下该材料的火灾危害程度。

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 232°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。

虽然许多竞争对手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 204°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 2: Torlon 树脂具有出色的拉伸强度

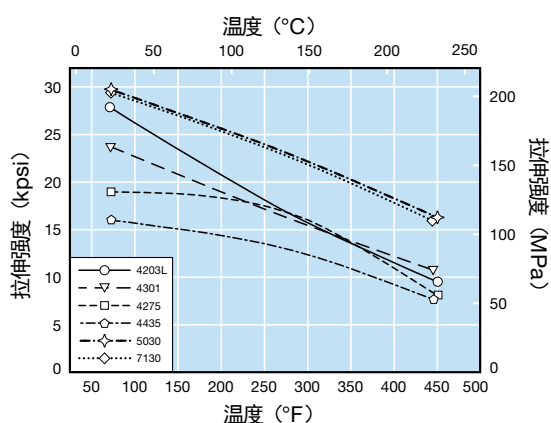


图 3: Torlon 树脂在宽广的温度范围内具有高的挠曲强度

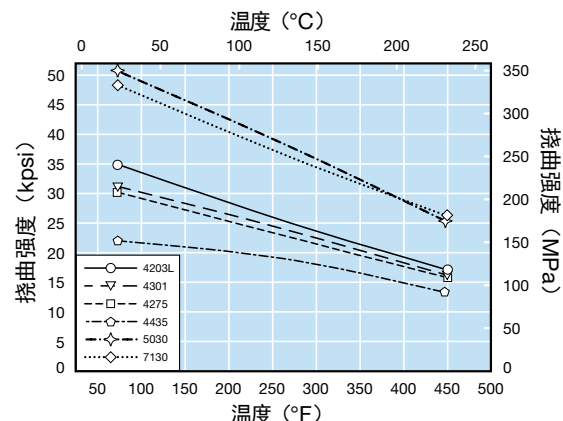


图 4: 在 204°C，增强 Torlon 树脂的拉伸强度超过其它竞争对手的增强塑料

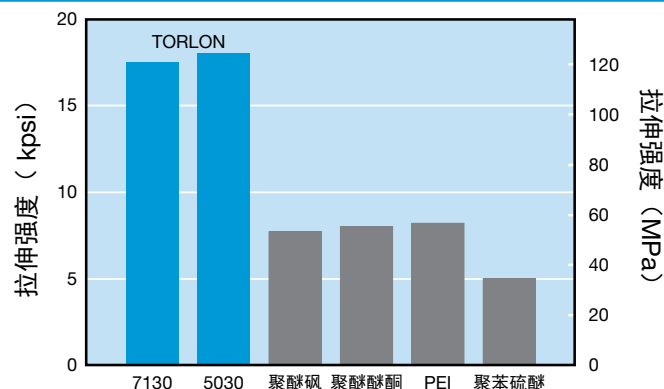
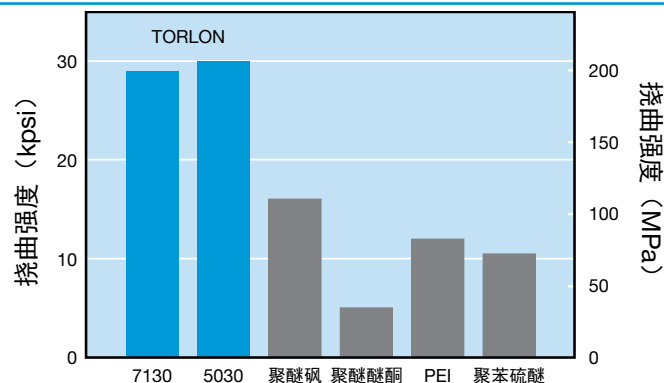


图 5: 在 204°C，增强 Torlon 树脂的挠曲强度超过竞争对手的增强塑料



根据美国材料试验协会（ASTM）的试验方法 D638 得到的拉伸特性

上述拉伸特性是按照美国材料试验协会（ASTM）的试验方法 D638 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 D1708 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。

超低温

在低温条件下，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 5: 按照 ASTM D1708 方法得到的拉伸特性

特性	牌号					
	4203L	4301	4275	4435	5030	7130
国际制单位						
拉伸强度 (MPa)						
23°C	192	164	131	110	205	203
135°C	117	113	116	90	160	158
232°C	66	73	56	52	113	108
断裂伸长率 (%)						
23°C	15	7	7	6	7	6
135°C	21	20	15	4	15	14
232°C	22	17	17	3	12	11
拉伸模量 (GPa)						
23°C	4.5	6.8	8.8	14.5	14.6	16.5
美制单位						
拉伸强度 (kpsi)						
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
断裂伸长率 (%)						
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 (kpsi)						
73°F	700	950	1,130	1,410	1,560	3,220

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 232°C 也一样。如图 7 所示，Torlon 聚合物在高温下仍具有高的模量，这是其它竞争对手的材料所无法比拟的，它们在较高温度下会丧失刚度。

表 6: Torlon 模塑树脂在 -196°C 下的特性

特性	单位	牌号			
		4203L	4275	5030	7130
拉伸强度 ⁽¹⁾	kpsi	31.5	18.8	29.5	22.8
	MPa	216	129	203	157
断裂伸长率 ⁽¹⁾	%	6	3	4	3
挠曲强度 ⁽²⁾	kpsi	41.0	29.0	54.4	45.0
	MPa	282	200	374	310
挠曲模量 ⁽²⁾	kpsi	1,140	1,390	2,040	3,570
	GPa	7.8	9.6	14.0	24.6

⁽¹⁾ ASTM D1708

⁽²⁾ ASTM D790

图 6: Torlon 聚合物的挠曲模量

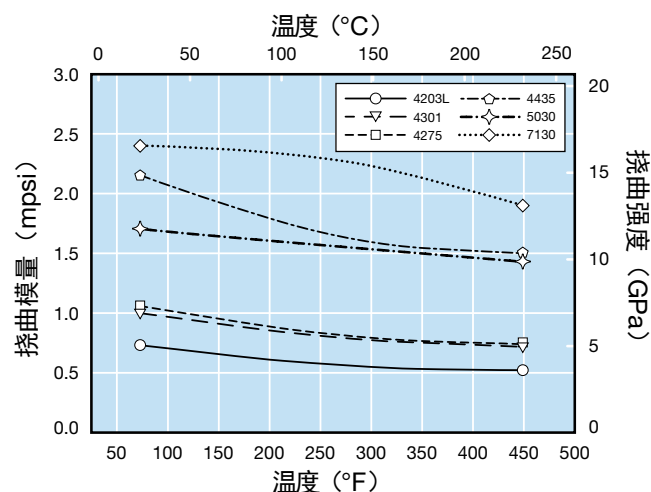


图 7：在 204°C，增强 Torlon 的挠曲模量超过其它竞争对手的增强塑料

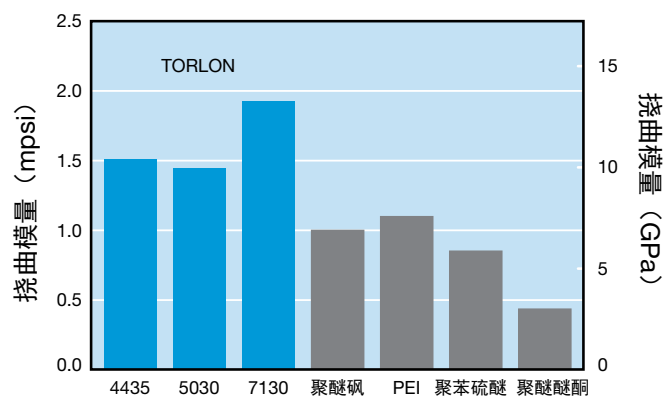
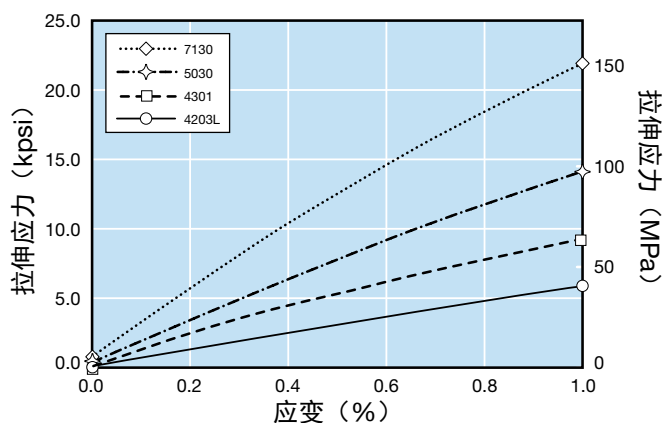


图 9：图 8 在 23°C 的局部应力—应变曲线



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 200°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，采用 ASTM D638 Type 1 试样

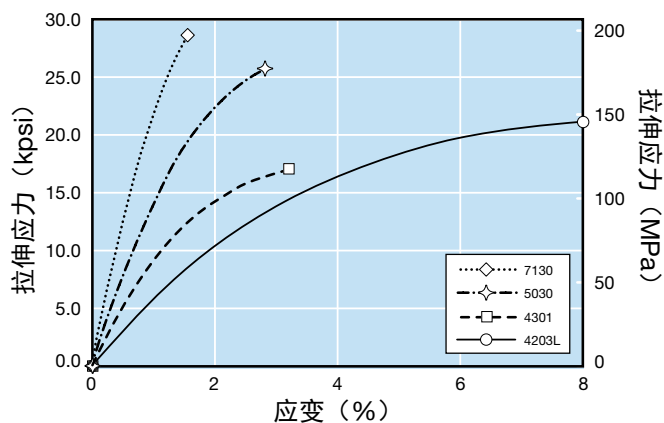


图 10：各种 Torlon 树脂在 200°C 时受张力的应力—应变曲线

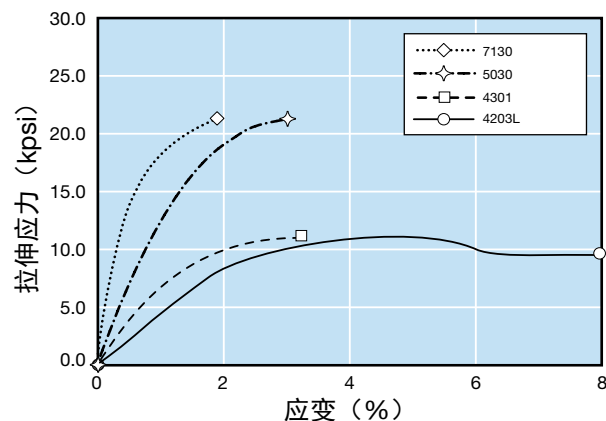
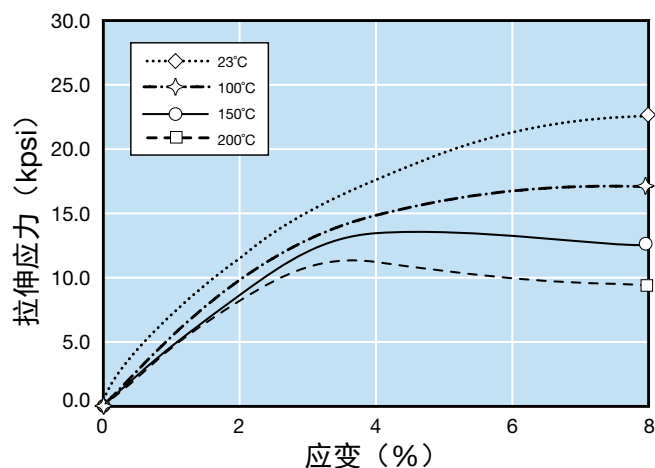


图 11：Torlon 4203LF 在各种温度时受张力的应力—应变曲线



压缩特性

除了可在高温下保持其拉伸强度之外，Torlon 聚酰胺-酰亚胺树脂还可在高温下保持其压缩强度。未增强 Torlon 的压缩强度与玻璃纤维和碳纤维增强的高性能聚合物相当。由于 Torlon 具有出色的弹性恢复能力，因而能够提供没有屈服或蠕变的弹性压缩，不会导致压缩变形。对于需要较高强度和耐磨损性的应用，有玻璃和碳纤维增强牌号以及耐磨损牌号可供选用。

Torlon 的压缩特性与其优异的抗蠕变性和耐疲劳性结合在一起，使其成为诸如密封圈、液压阀芯、制动挺杆、逆止球、止推垫圈和压缩机阀板等应用的优越密封材料。

表 7: 按照 ASTM D695 方法得到的压缩特性

特性	4203L	4601	4630	4645	5030	7130
国际制单位						
压缩强度 (MPa)						
23°C	172	165	96	124	214	234
100°C	131	124	83	124	165	186
150°C	103	103	76	110	138	158
200°C	83	83	62	90	110	124
压缩模量 (MPa)						
23°C	3,163	3,114	4,706	5,236	4,892	6,139
100°C	2,191	2,122	2,026	3,645	3,273	3,803
150°C	2,136	2,067	2,115	3,149	3,087	3,790
200°C	2,067	2,046	2,019	3,383	3,121	3,645
美制单位						
压缩强度 (kpsi)						
73°F	25	24	14	18	31	34
212°F	19	18	12	18	24	27
302°F	15	15	11	16	20	23
392°F	12	12	9	13	16	18
压缩模量 (kpsi)						
73°F	459	452	683	760	710	891
212°F	318	308	294	529	475	552
302°F	310	300	307	457	448	550
392°F	300	297	293	491	453	529

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，并且优于竞争对手的工程塑料。从图 12 中的几种 Torlon 牌号的 S-N 曲线可以看出，即使经过 10,000,000 次循环后，Torlon 聚酰胺-酰亚胺在挠曲状态下仍具有优异的耐循环应力性。图 13 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 14 所示。

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 177°C 进行的，试样在该温度下经过了预调节处理。图 15 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 12: Torlon 树脂在 30 Hz 下的挠曲疲劳强度

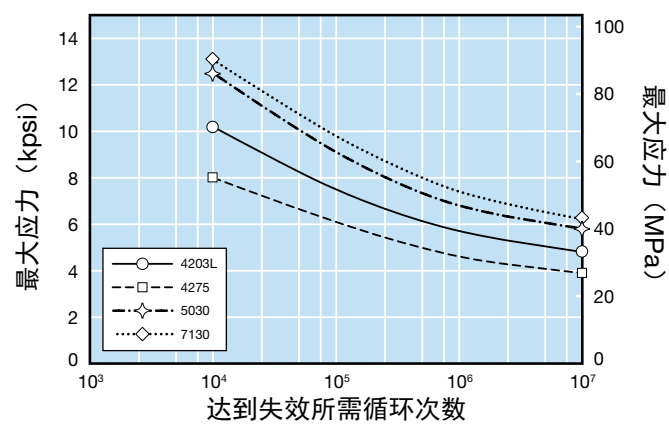


图 13: Torlon 7130 和 4203L 在 30 Hz 下的拉伸/拉伸疲劳强度，A 比值为：0.90

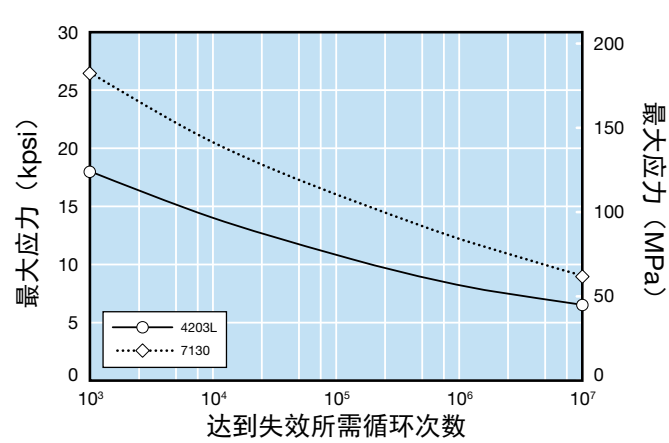


图 14: Torlon 7130 在 2 Hz 下的拉伸/拉伸低循环疲劳强度, A 比值为: 0.90

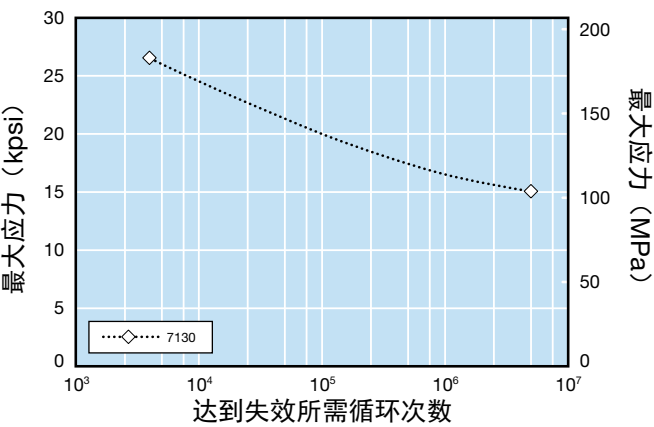


图 15: Torlon 树脂在 177°C, 30 Hz 下的高温挠曲疲劳强度

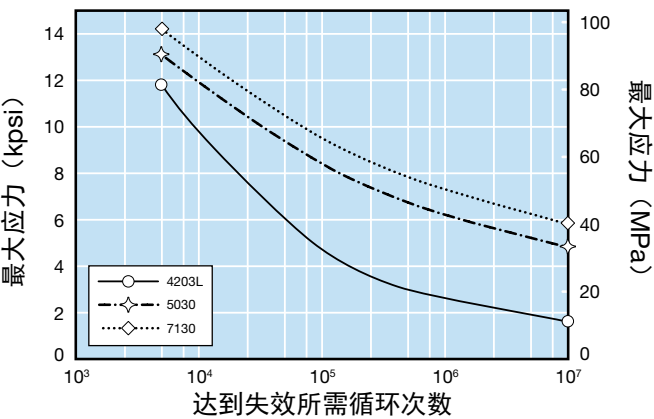
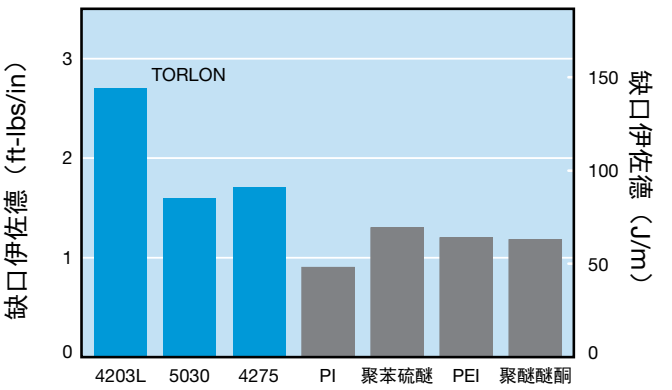


表 8: 3.2 mm 试棒的耐伊佐德 (Izod) 冲击

牌号	缺口		无缺口	
	ft-lb/in	J/m	ft-lb/in	J/m
4203L	2.7	142	20.0	1,062
4301	1.2	63	7.6	404
4275	1.6	84	4.7	250
4435	0.8	42	4.1	220
5030	1.5	79	9.5	504
7130	0.9	47	6.4	340

图 16: Torlon 树脂与竞争对手的材料耐伊佐德 (Izod) 冲击比较



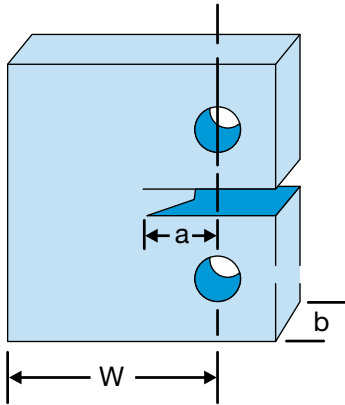
耐冲击性

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 16)。表 8 总结出 Torlon 树脂的缺口和无缺口冲击试验数据。

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 17）来测量断裂能。表 9 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/m²。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 17：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 9：聚酰胺-酰亚胺兼顾了断裂韧度和高的玻璃转化温度

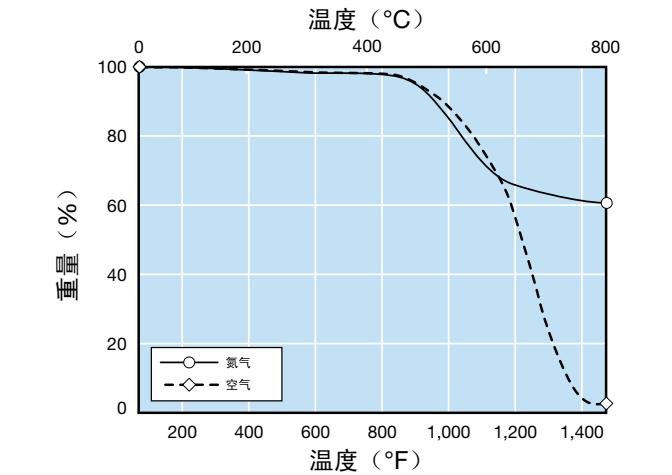
	断裂能		T _g	
	ft-lb/in ²	kJ/m ²	°C	°F
热固性塑料				
聚酰胺-1	0.095	0.20	350	662
聚酰胺-2	0.057	0.12	360	680
四官能结构环氧树脂	0.036	0.076	260	500
热可塑性材料				
聚酰胺-酰亚胺	1.6	3.4	275	527
聚砒	1.5	3.1	174	345
聚醚砒	1.2	2.6	230	446
聚酰胺-4	1.0	2.1	365	689
聚酰胺-3	0.38	0.81	326	619
聚苯硫醚	0.10	0.21	—	—

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 18 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 18: 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 10: Torlon 树脂的相对热指数

	机械							
	最小厚度		电		有冲击		无冲击	
	mm	英寸	°C	°F	°C	°F	°C	°F
4203L	0.81	0.031	220	428	*	*	210	410
	1.2	0.047	220	428	*	*	210	410
	2.4	0.096	220	428	*	*	210	410
	3.0	0.118	220	428	200	392	220	428
4301	3.0	0.118	*	*	200	392	200	392
5030	1.5	0.062	220	428	*	*	*	*
	2.4	0.096	220	428	*	*	*	*
	3.0	0.118	220	428	200	392	220	428
*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 10 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，3.125 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 19 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者塑料的极限强度。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。

图 19: Torlon 树脂在 250°C 下热老化后仍保持强度

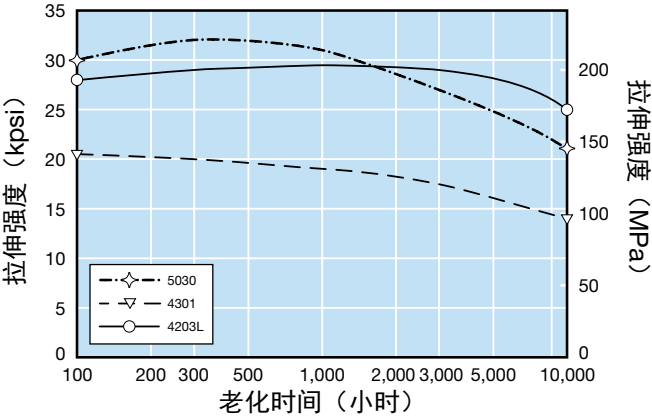


表 11: Torlon 4203L 热老化后的特性保持

特性	在 250°C 的小时数		
	2,000	12,000	17,000
介电强度 ⁽¹⁾ , kV/mm			25.7
可燃性 ⁽²⁾ , UL 94	V-0	V-0	V-0
尺寸变化 ⁽²⁾ , %	0.0	0.5	0.9
拉伸强度保持率 ⁽²⁾ , %	110	86	67
伊佐德 (Izod) 冲击强度保持率 ⁽²⁾ , %	101	67	38

⁽¹⁾ 试样厚度为 0.9 mm

⁽²⁾ 试样厚度为 3.2 mm

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 11 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。

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 12 列出了四种 Torlon 牌号在四个不同温度下的数据。

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 13 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 聚合物的比热

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

表 13: Torlon 树脂的导热率

牌号	导热率	
	Btu-in/hr-ft²-°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)

线性热膨胀系数 (或 CLTE) 是固态物体在温度升高时的膨胀率度量指标。材料的线性热膨胀系数 (CLTE) 越高, 其随温度变化而发生膨胀和收缩的程度就越大。

线性热膨胀系数 (CLTE) 可以影响精密公差装配部件或表面的实现能力。它也可以影响涂覆或叠塑基材的粘附力, 并可影响在较宽的温度范围内使用的部件或涂层中的应力。

线性热膨胀系数 (CLTE) 测试方法

有多种测试方法可用于测量线性热膨胀系数 (CLTE)。ASTM D696 (-30°C 至 30°C) 和 ASTM E228 (-180°C 至 900°C) 都采用膨胀测定法进行测量, 该方法使用固定在测量装置上的透明石英推杆和石英外管。ASTM E831 (-120°C 至 900°C) 测试方法和 ISO 11359-2 均采用热机械分析法进行测量, 该方法使用一个线性运动传感器和一个探头测量位移。

影响线性热膨胀系数 (CLTE) 的因素

一定要认识到, 线性热膨胀系数 (CLTE) 会随试样的大小和准备的不同而异。因此, 若要全面评估线性热膨胀系数 (CLTE) 数据, 必须考虑以下几个因素。

部件厚度

热膨胀与厚度没有线性关系。厚部件内部的热流和温差可导致其线性热膨胀系数 (CLTE) 升高或降低。

温度范围和相变化

跨越玻璃转化温度时, 聚合物可发生相转变。在玻璃转化温度 (T_g) 以上, 分子的流动性增加, 因而其膨胀率增大。

加工参数

诸如模具温度和退火等因素可影响部件内的结晶度和应力, 从而影响其线性热膨胀系数 (CLTE)。为了尽量降低线性热膨胀系数 (CLTE), 一定要对 Torlon 树脂进行适当的固化处理。

增强

诸如玻璃纤维和碳纤维等高长径比填料, 可导致材料在不同方向上具有不同的线性热膨胀系数 (CLTE)。加工参数和模具设计可影响填料的取向。

表 14: Torlon 树脂和部分金属的线性热膨胀系数 (CLTE) ⁽¹⁾

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

⁽¹⁾ Torlon 树脂的线性热膨胀系数 (CLTE) 是按照 ASTM D696 方法在 24°C—149°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)。

部件的几何形状

取决于材料的导热率, 不同厚度的试样可产生不同的结果。使用与实际应用的尺寸类似的厚度并采用与其类似的方法制备的部件, 可获得最有用的线性热膨胀系数 (CLTE) 测量结果。

一般情况下, 部件的设计应使其在最终使用温度下具有合适的大小。设计模具时也要相应考虑温度膨胀对间隙和公差的影响。

请注意, 线性热膨胀系数 (CLTE) 数据反映的是流动方向或垂直于流动方向上的膨胀情况, 而在实际应用中通常需要考虑其在所有方向上的影响。

由于 Torlon PAI 的无定形本质, 因而其具有高度各向同性的线性热膨胀系数 (CLTE), 而且在宽广的温度范围内具有非常好的一致性。如表 14 所示, 填充的 Torlon 树脂的热膨胀与金属非常近似。

抗蠕变性

当材料受到应力时，就会变形或发生应变。瞬时应变可根据合适的模量计算出来。如果长时间持续施加该应力，将导致额外的应变，称为蠕变应变。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 20 至 24 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 25 至 29 所示为在 204°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 204°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 20: Torlon 4203L 在 23°C 下的应变与时间的关系

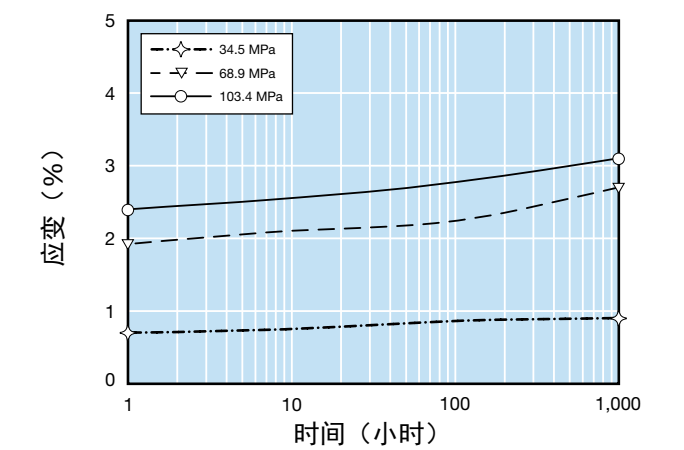


图 21: Torlon 4275 在 23°C 下的应变与时间的关系

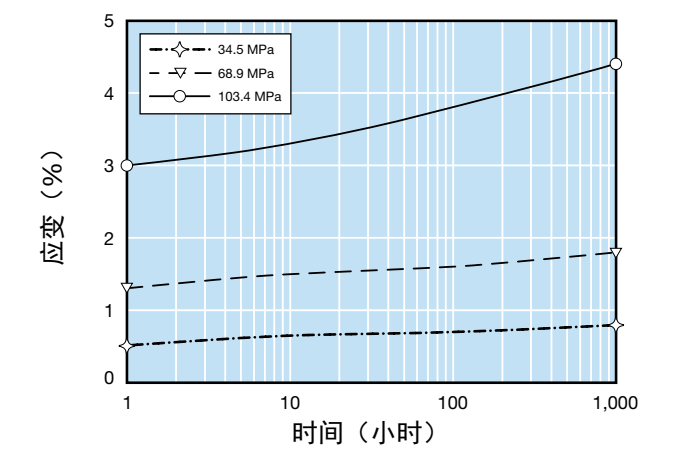


图 22: Torlon 4301 在 23°C 下的应变与时间的关系

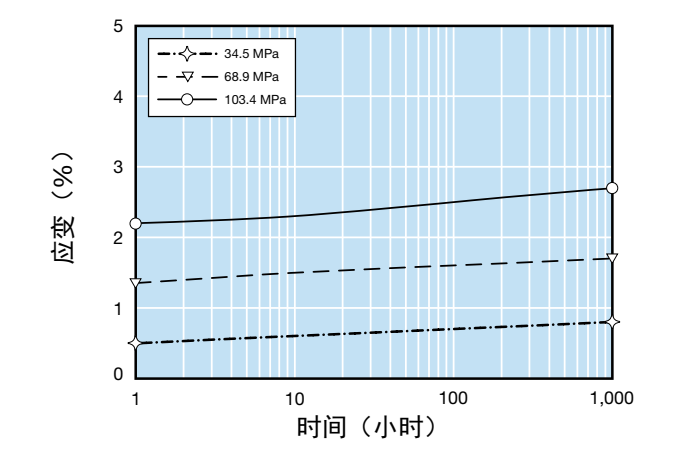


图 23: Torlon 5030 在 23°C 下的应变与时间的关系

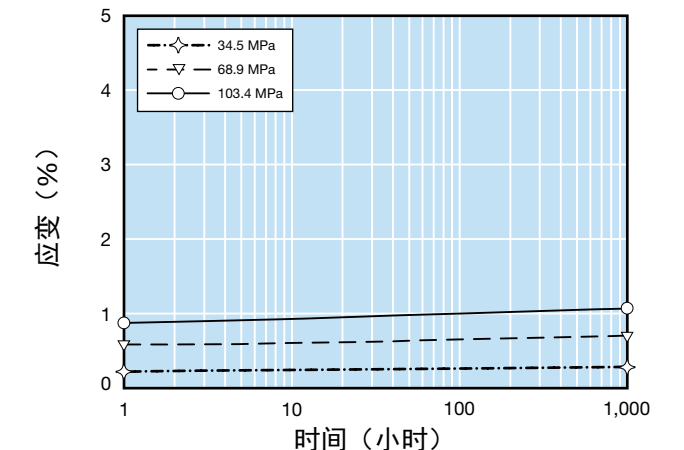


图 24: Torlon 7130 在 23°C 下的应变与时间的关系

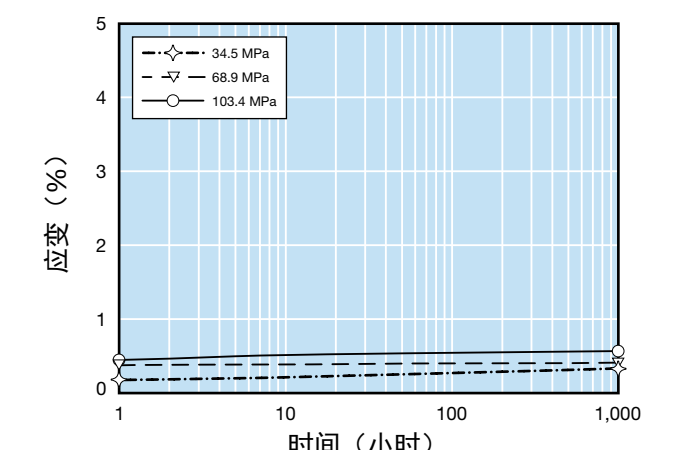


图 25: Torlon 4203L 在 204°C 下的应变与时间的关系

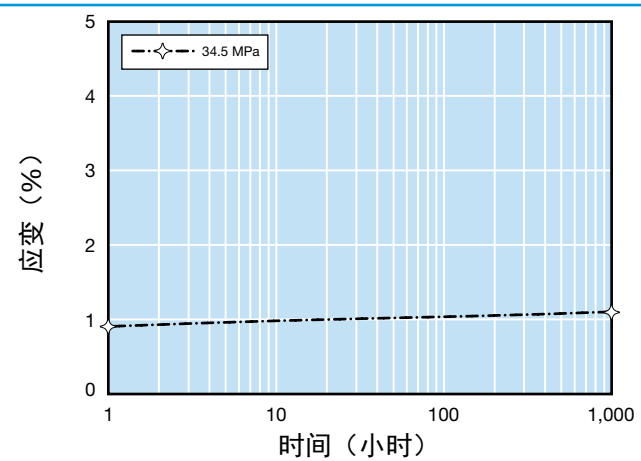


图 28: Torlon 5030 在 204°C 下的应变与时间的关系

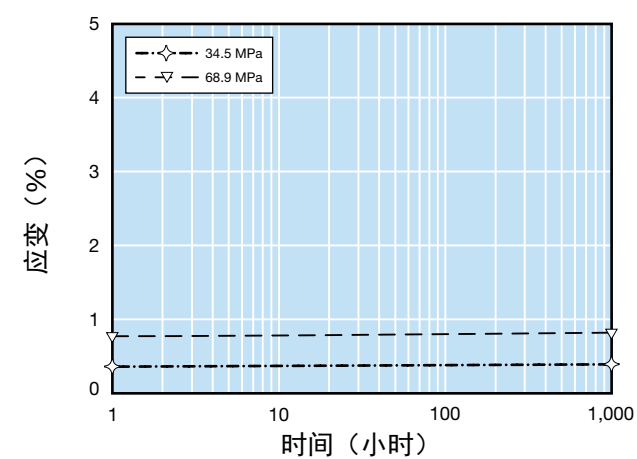


图 26: Torlon 4275 在 204°C 下的应变与时间的关系

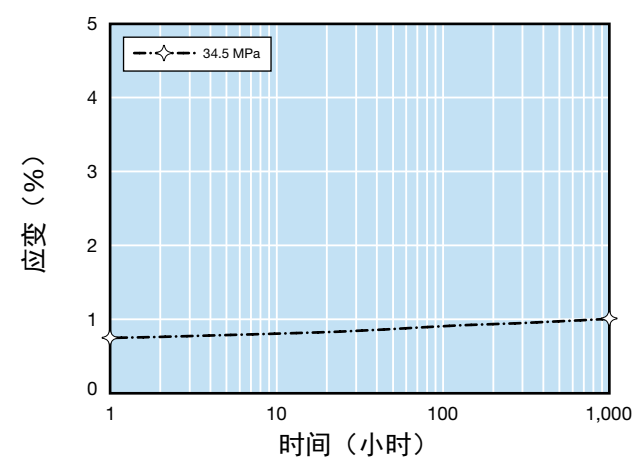


图 29: Torlon 7130 在 204°C 下的应变与时间的关系

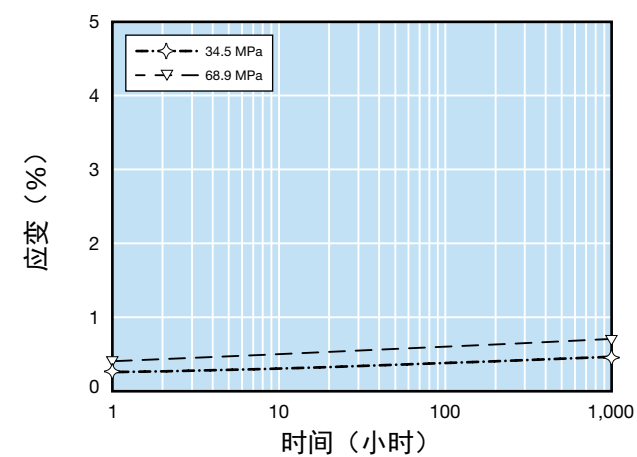
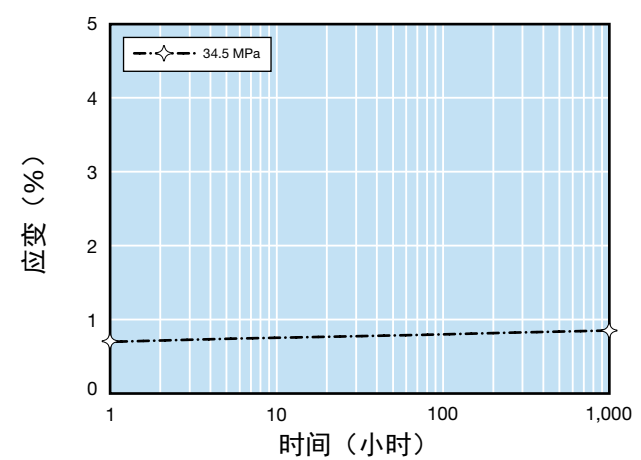


图 27: Torlon 4301 在 204°C 下的应变与时间的关系



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 D2863 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 15 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。

表 15: 根据 ASTM D2863 得到的氧指数	
牌号	氧指数 (%)
4203L	45
4301	44
4275	45
5030	51
7130	52

NBS 烟气密度

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 E662 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。

按照 NFPA 258 程序并使用厚度为 1.3 mm 至 1.5 mm 的试样，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 16。

表 16: NBS 烟气密度

特性	4203L		5030		7130	
	Sm ⁽¹⁾	FI ⁽²⁾	Sm	FI	Sm	FI
最低透光率 (%)	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

⁽¹⁾ Sm = 熏烧
⁽²⁾ FI = 燃燃

毒气排放试验

表 17: 联邦航空管理局（FAA）毒气排放试验

化学品	5030		7130	
	Sm ⁽¹⁾	FI ⁽²⁾	Sm	FI
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

⁽¹⁾ Sm = 熏烧 (ppm)
⁽²⁾ FI = 燃燃 (ppm)

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 D1929 进行测量，结果如表 18 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爆或引起自身起火（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燃点燃性进行归类。

表 18: Torlon 4203L 的点燃特性

ASTM D1929	°C	°F
骤燃温度	570	1,058
自燃温度	620	1,148

UL 94 可燃性标准

由保险商实验所制定的 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 HB 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 的试条时不超过 75 mm/min，则其就属于 HB 等级。该等级也包括无法燃烧到 100 mm 参考标记的产品。

表 19: UL 对材料分类的标准

标准条件	V-0	V-1	V-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

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 V-0、V-1 或 V-2 级。

20 MM 垂直燃烧试验比 HB 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 1.57 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 19 列出了采用该试验对材料进行分类的标准。

表 20 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 www.ul.com 中找到。

表 20: 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
	mm	英寸	
4203, 4203L	1.2	0.047	V-0
	2.4	0.094	V-0
	3.0	0.118	V-0
4301	1.2	0.047	V-0
	2.4	0.094	V-0
	3.0	0.118	V-0
5030	1.2	0.047	V-0
	1.5	0.059	V-0
	2.4	0.094	V-0
	3.0	0.118	V-0

表 21: 联邦航空管理局 (FAA) 垂直可燃性

牌号	平均燃烧长度	
	mm	英寸
5030	15.2	0.6
7130	15.2	0.6

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 21 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 22: 电气照明器材的可燃性要求 (UL 57)

牌号	试验结果
4203L	根据该规范第 81.12 节, 厚度为 1.02 mm、3.18 mm 和 5.08 mm 的试样是不燃的。

UL 57 电气照明器材

就 Torlon 4203L 树脂是否符合该标准的可燃性要求进行试验。表 22 所列的结果显示, 该材料满足这些要求。

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, 可能未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 Solvay 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 23 所示。要获得最佳的耐化学性，有必要对 Torlon 部件进行适当的后固化处理。

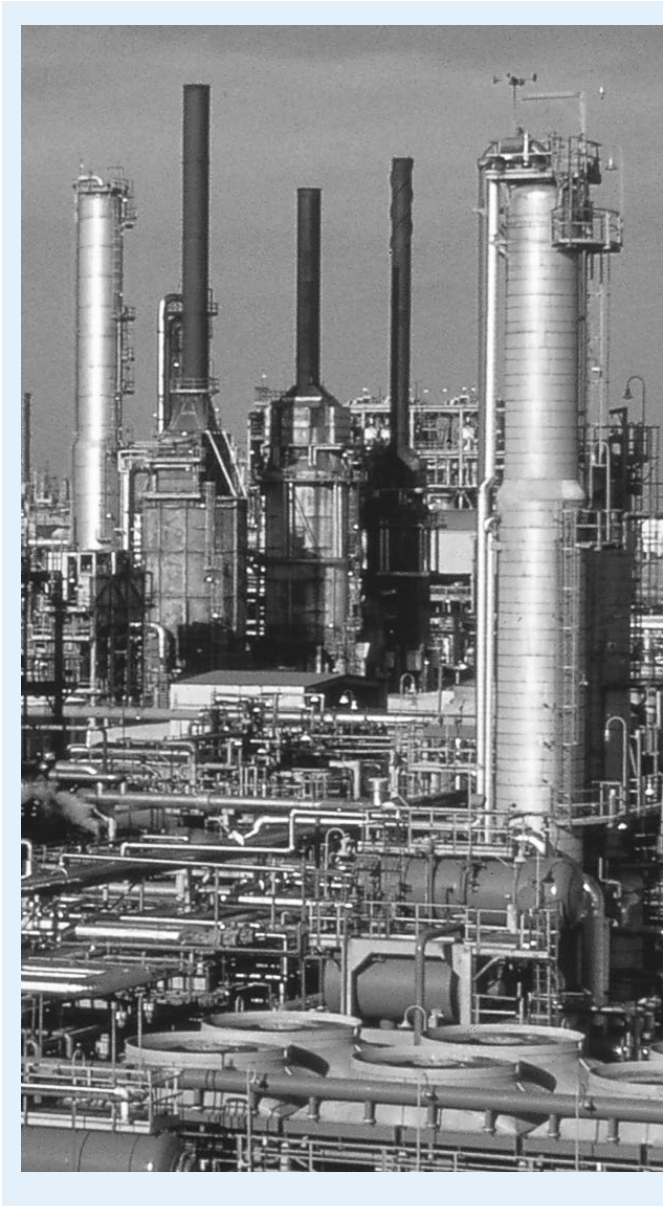


表 23: Torlon 4203L 在 93°C 的温度下，24 小时后的耐化学性

化学品	等级	化学品	等级
酸类			
醋酸（10%）	A	吗啉	A
冰醋酸	A	吡啶	F
醋酸酐	A	醛和酮	
乳酸	A	苯乙酮	A
苯磺酸	F	苯甲醛	A
铬酸（10%）	A	环己酮	A
蚁酸（88%）	C	甲醛（37%）	A
盐酸（10%）	A	糠醛	C
盐酸（37%）	A	丁酮	A
氢氟酸（40%）	F	含氯有机物	
磷酸（35%）	A	乙酰氯（49°C）	A
硫酸（30%）	A	苄基氯（49°C）	A
碱类		四氯化碳	A
氢氧化铵（28%）	C	氯苯	A
氢氧化钠（15%）	F	2-氯乙醇	A
氢氧化钠（30%）	F	氯仿（49°C）	A
水溶液（10%）		表氯醇	A
硫酸铝	A	氯乙烯	A
氯化铵	A	酯类	
硝酸铵	A	乙酸戊酯	A
氯化钡	A	乙酸丁酯	A
溴（饱和溶液，49°C）	A	邻苯二甲酸丁酯	A
氯化钙	A	乙酸乙酯	A
硝酸钙	A	醚类	
氯化铁	A	丁基醚	A
氯化镁	A	纤维素溶剂	A
高锰酸钾	A	P-二恶烷（49°C）	A
碳酸氢钠	A	四氢呋喃	A
氯化银	A	烃类	
碳酸钠	A	环己烷	A
氯化钠	A	柴油	A
铬酸钠	A	汽油（49°C）	A
次氯化钠	A	庚烷	A
硫酸钠	A	矿物油	A
硫化钠	A	机油	A
亚硫酸钠	A	干洗溶剂油	A
醇类		甲苯	A
2-氨基乙醇	F	腈类	
正戊醇	A	乙腈	A
正丁醇	A	苯基氰	A
环己醇	A	硝基复合物	
乙二醇	A	硝基苯	A
胺		硝基甲烷	A
苯胺	A	其它	
正丁胺	A	磷酸甲基苯基二苯酯	A
二甲基苯胺	A	环丁酮	A
二溴化乙烯	F	亚磷酸三苯酯	A

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

表 24: 在 149°C 的汽车润滑液中浸渍后的特性保持率

润滑剂	4203L		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⁾ Penzoi 80W-90

耐航空和汽车工作液的能力

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 149°C 的普通润滑液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 24 和 25 总结了特定流体浸渍试验的方法和结果。

汽车润滑液

按照 ASTM D790 规定的试样于 149°C 的润滑液中浸渍一个月后, 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, 如表 24 所示。

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 (ATF) 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 25 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 25: 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 (%)	
	4301	4275	4301	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 26 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。

表 26: 在飞机液压液⁽¹⁾中浸渍后的拉伸强度

牌号	拉伸强度保持率 (%)	伸长率保持率 (%)
4301		
在 135°C 下 1,000 小时	89.6	94.1
在 -80°C 下 1,000 小时	94.0	95.8
4275		
在 135°C 下 1,000 小时	92.7	119.3
在 -80°C 下 1,000 小时	101.3	129.8

⁽¹⁾ Skydrol® 500B

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 204°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 232°C 的温度下仍可耐受 80% 水平的极限应力。

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 1,000 小时之后，基本没有观察到拉伸强度的变化。

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 127 mm x 13 mm x 3 mm 的试样被夹在曲面半径为 127 mm 的夹具上。用需要试验的化学药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 30 和 31 显示了对尺寸为 127 mm x 13 mm x 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。

图 30: Torlon 聚合物在 23°C，50% 相对湿度时的吸水性

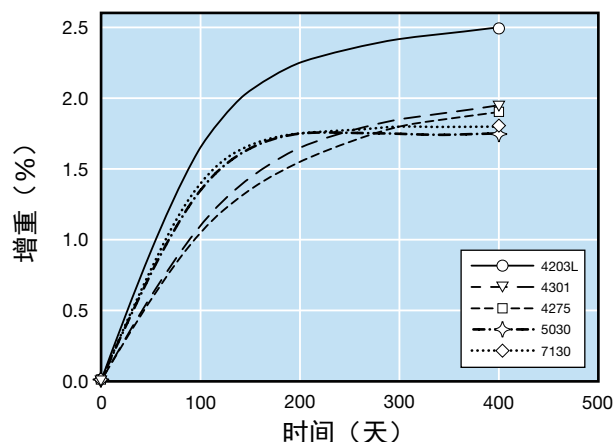


图 31: Torlon 聚合物在 43°C，90% 相对湿度时的吸水性

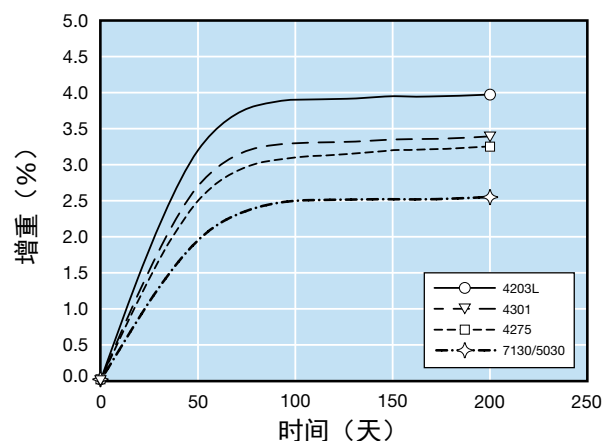
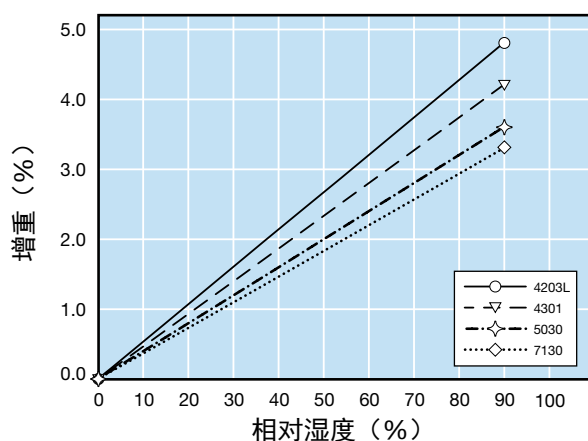


图 32: 平衡水分吸收与相对湿度的关系



恒定湿度下的平衡吸收

在恒定的湿度下，Torlon 部件吸收的水分分为平衡量。采用尺寸为 127 mm×13 mm×3 mm 的均匀板条所测得的吸水量与相对湿度的关系如图 32 所示。

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 33 和 34 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 149°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 27 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 33: Torlon 聚合物在 23°C，50% 相对湿度时的尺寸变化

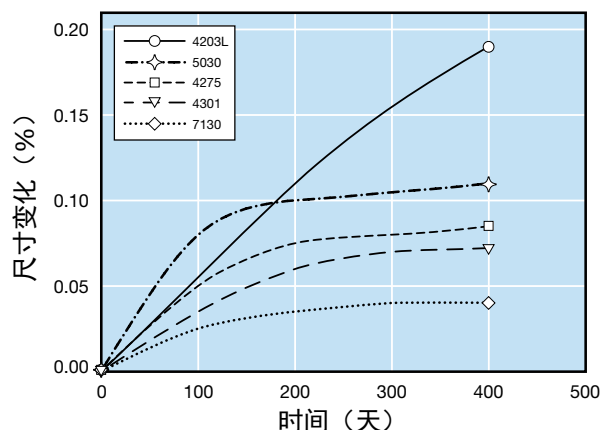


图 34: Torlon 聚合物在 43°C，90% 相对湿度时的尺寸变化

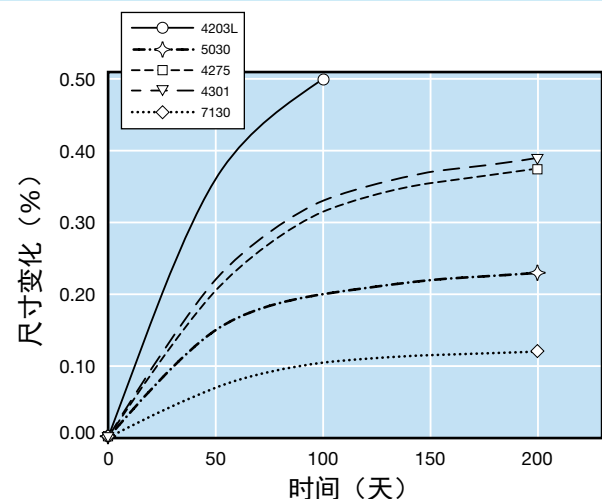


表 27: 吸水量为 2% 时 Torlon 4203L 的特性变化

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。Solvay 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 mm×13 mm×3 mm 的试样在相对湿度为 57.8% 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 35 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 204°C。图 36 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 57.8% 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 204°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（参见第 23 页的图 32），因而它们的热骤变温度较高。通过在 149°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 35: Torlon 4203L 的热骤变温度与水分含量的关系

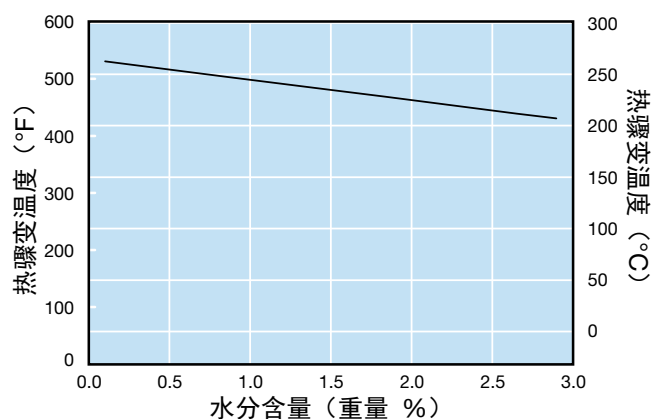


图 36: Torlon 4203L 的热骤变温度与暴露时间的关系

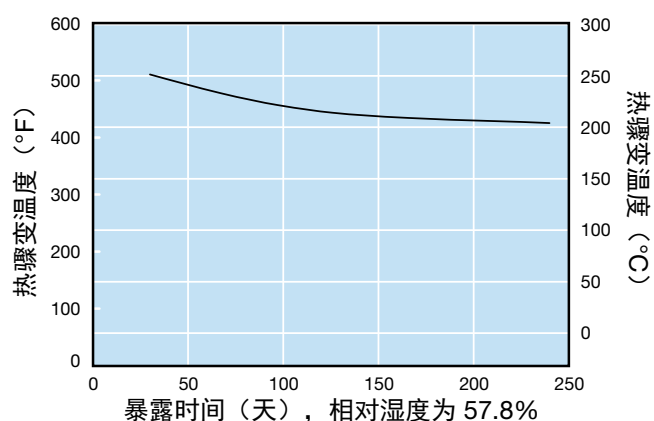


图 37: 暴露于模拟气候环境下, Torlon 4203L 的伸长率基本恒定

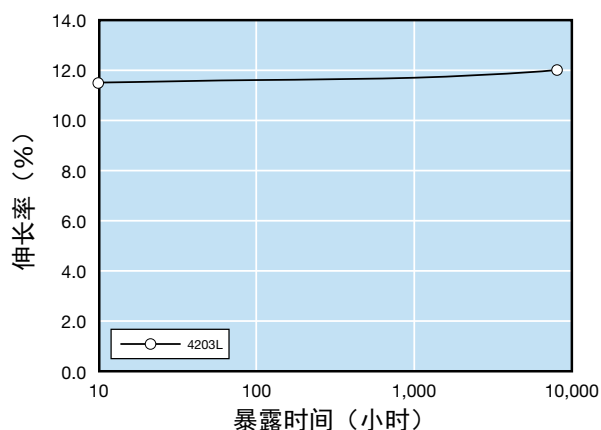
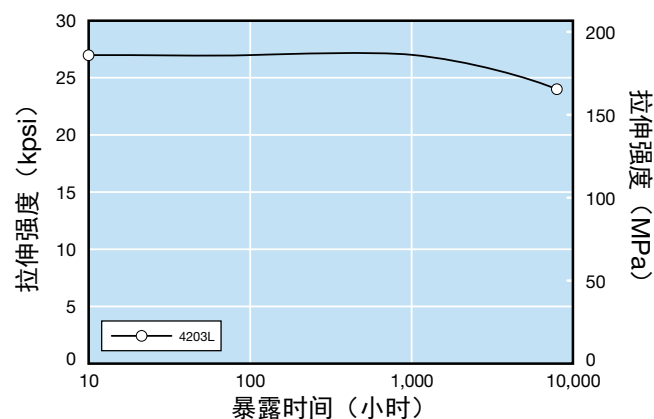


图 38: 暴露于模拟气候环境下, Torlon 4203L 的拉伸强度变化



日晒色牢度 (Weather-Ometer®) 试验

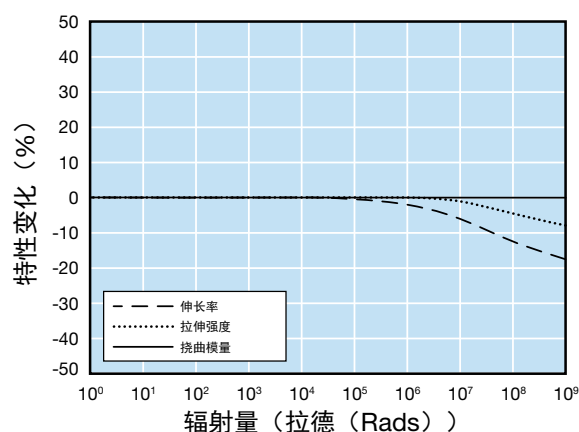
Torlon 注塑成型聚合物具有优异的抗紫外线分解能力。Torlon 4203L 树脂经过 6,000 小时的气候老化后没有发生分解 (见图 37 和 38), 这相当于在室外暴露五年。轴承牌号的树脂, 如 4301 中含有石墨粉, 它使材料呈黑色并能屏蔽紫外线。这些牌号对室外暴露具有更好的耐分解性。

根据美国材料试验协会 (ASTM) 的试验方法 D1708 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: 63°C 的黑板温度, 50% 的相对湿度以及每 102 分钟一次的 18 分钟喷水。

抗伽马辐射性

图 39 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 39: 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 28 中所列的各种电特性。

表 28: 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 29 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 D257 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 29: Torlon 树脂的电特性					
	牌号				
	4203L	4301 ⁽¹⁾	4275 ⁽¹⁾	4435 ⁽¹⁾	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 D149）					
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
⁽¹⁾ 含有石墨粉。在这些试验中，它们的表现象绝缘材料一样。但在高电压或高频条件下，它们可能会更象导体。					

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：滑动轴承、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

典型的滑动轴承由套筒轴承围绕转轴而构成。要计算以每分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，12.7 mm 的轴以 1,200 rpm 的转速旋转，将具有 47.9 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 40 所示。压力通常标识为帕斯卡（Pa），等同于牛顿/平方米。

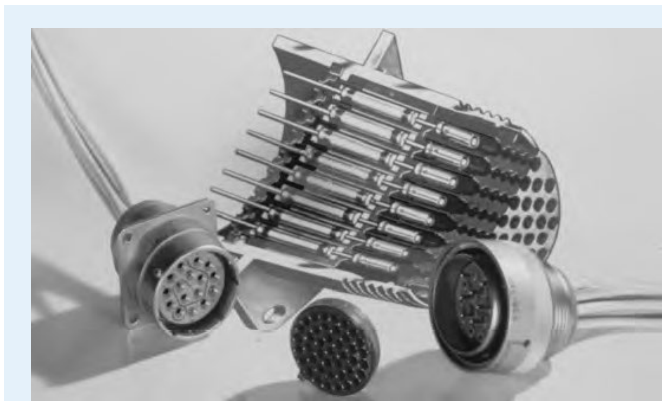
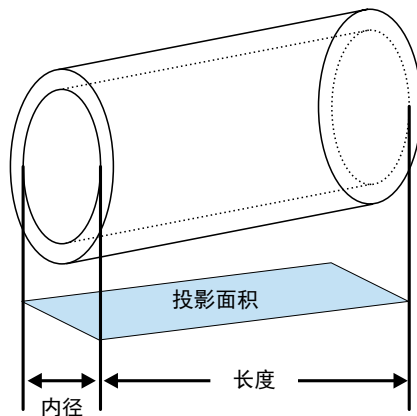


图 40：计算轴承的投影面积



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 76 mm 和 51 mm 的止推垫圈，其平均直径为 63.5 mm，将该直径乘以 π 或 3.14 就得到每转的滑移距离。将该值乘以每分钟转数 (rpm)，再除以 60,000，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 $63.5 \times 3.14 \times 100 \div 60,000$ ，或 0.33 米/秒。

要想计算压力，将总载荷除以承载面积即可。图 41 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 444.8 牛顿，压力应该由 444.8 牛顿除以 0.002531 m² 而得到。该结果 (175,740.8) 的单位应该是 N/m²，也称为帕斯卡 (Pa)。将该值除以 10⁶ 即得到 0.1757 MPa。

对于该示例，其 PV 值应该是 0.058 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 42 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：止推垫圈的计算实例

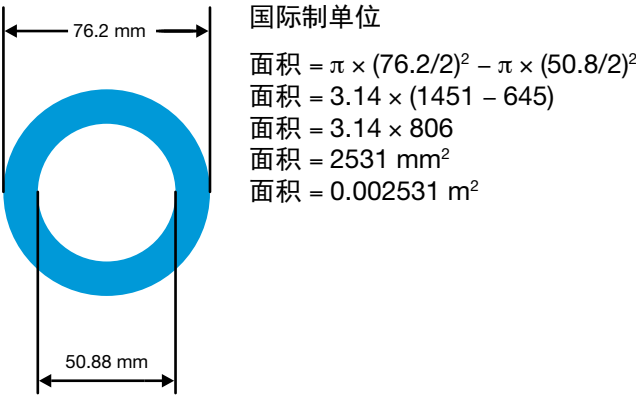


图 42: 材料的磨损率是压力速度乘积 (PV) 的函数

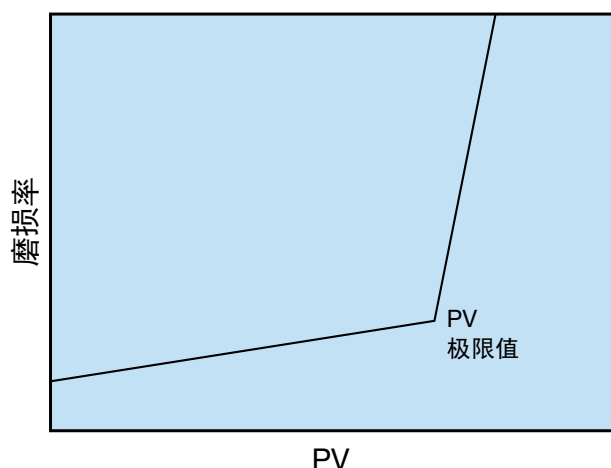
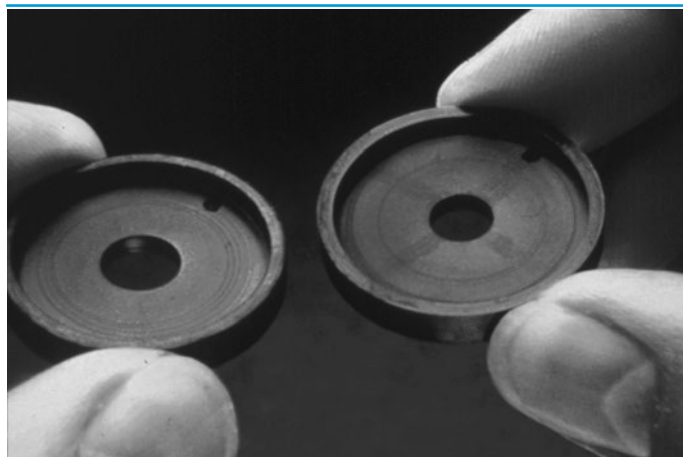


图 43: 止推垫圈试样



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 D3702，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 43 所示。

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 $60\ \text{m/min}$ 的速度和 $8.5\ \text{巴}$ 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，在止推垫圈圆片的四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

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亚胺树脂相似，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，而聚酰亚胺则不行。

Torlon PAI 的耐磨损牌号在各种 PV 值下测得的磨损系数和摩擦系数如表 30 所示。

表 30: 磨损系数和摩擦系数, 干燥环境

国际制单位

P (MPa)	PV (MPa-m/s)	4301		4275		4630	
		WF ⁽¹⁾ x10 ⁻⁸ mm ³ /N-m	COF ⁽²⁾	WF x10 ⁻⁸ mm ³ /N-m	COF	WF x10 ⁻⁸ mm ³ /N-m	COF
速度 - 0.25 m/s							
3.4	0.9	28.2	0.31	26.2	0.31	12.1	0.32
6.9	1.7	33.2	0.27	32.2	0.27	36.3	0.29
10.3	2.6	30.2	0.24	34.8	0.24	28.6	0.20
13.8	3.4	55.4	0.19	45.1	0.18	30.8	0.13
17.2	4.3	66.9	0.15	33.8	0.14	24.6	0.11
20.7	5.2	NT ⁽³⁾	NT	30.6	0.12	22.6	0.10
速度 - 1 m/s							
0.9	0.9	38.3	0.35	NT	NT	NT	NT
1.7	1.7	31.2	0.35	34.2	0.31	30.2	0.32
2.6	2.6	191.0	0.25	58.4	0.24	44.3	0.19
3.4	3.4	NT	NT	111.4	0.18	44.7	0.17
4.3	4.3	NT	NT	100.3	0.18	36.9	0.14
5.2	5.2	NT	NT	558.0	0.14	36.3	0.12
速度 - 4 m/s							
0.2	0.9	34.2	0.39	35.3	0.29	27.2	0.32
0.4	1.7	77.6	0.28	40.3	0.34	47.3	0.24
0.6	2.6	73.1	0.21	75.1	0.21	37.7	0.22
0.9	3.4	151.1	0.24	199.8	0.16	48.3	0.16
1.1	4.5	239.7	0.22	151.5	0.21	68.5	0.14
1.3	5.2	NT	NT	NT	NT	96.7	0.14

美制单位

P (psi)	PV (psi-ft/min)	4301		4275		4630	
		WF ⁽¹⁾ x10 ⁻¹⁰ in ³ min/ ft-lb-hr	COF ⁽²⁾	WF x10 ⁻¹⁰ in ³ min/ ft-lb-hr	COF	WF x10 ⁻¹⁰ in ³ min/ ft-lb-hr	COF
速度 - 50 ft/min							
500	25,000	14.0	0.31	13.0	0.31	6.0	0.32
1,000	50,000	16.5	0.27	16.0	0.27	18.0	0.29
1,500	75,000	15.0	0.24	17.3	0.24	14.2	0.20
2,000	100,000	27.5	0.19	22.4	0.18	15.3	0.13
2,500	125,000	33.2	0.15	16.8	0.14	12.2	0.11
3,000	150,000	NT	NT	15.2	0.12	11.2	0.10
速度 - 200 ft/min							
125	25,000	19.0	0.35	NT	NT	NT	NT
250	50,000	15.5	0.35	17.0	0.31	15.0	0.32
375	75,000	94.8	0.25	29.0	0.24	22.0	0.19
500	100,000	NT	NT	55.3	0.18	22.2	0.17
625	125,000	NT	NT	49.8	0.18	18.3	0.14
750	150,000	NT	NT	277.0	0.14	18.0	0.12
速度 - 800 ft/min							
31.25	25,000	17.0	0.39	17.5	0.29	13.5	0.32
62.5	50,000	38.5	0.28	20.0	0.34	23.5	0.24
93.75	75,000	36.3	0.21	37.3	0.21	18.7	0.22
125	100,000	75.0	0.24	99.2	0.16	24.0	0.16
162.5	125,000	119.0	0.22	75.2	0.21	34.0	0.14
187.5	150,000	NT	NT	NT	NT	48.0	0.14

(1) WF = 磨损系数, (2) COF = 摩擦系数, (3) NT = 未试验

表 31: 采用不同金属接触面时 Torlon 4301 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

接触面对磨损率的影响

表 31 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, 也采用了各种不同的金属对 Torlon 4301 进行试验。

表 32: Torlon 4301 有润滑的耐磨损性

PV (P/V = 50/900)	45,000
磨损系数, K ($10^{-8} \text{ mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}$)	2.1
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 (英寸)	0.11 (0.0045)

有润滑的耐磨损性

Torlon 的轴承牌号在干燥 (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缺失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 45.54 MPa-m/s 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 70.05 MPa-m/s 时仍具有非常好的性能。表 32 总结了浸渍于液压油中的 Torlon 4301 的磨损特征。

表 33 显示了有润滑条件下各种耐磨损牌号 Torlon 树脂的磨损系数和摩擦系数。

表 33: 磨损系数和摩擦系数, 有润滑环境

国际制单位

P (MPa)	V (m/s)	PV (MPa-m/s)	4301		4275		4630		4645	
			WF ⁽¹⁾	COF ⁽²⁾	WF	COF	WF	COF	WF	COF
6.9	0.25	1.7	18.1	0.18	14.1	0.15	22.2	0.15	3.2	0.09
5.2	4	20.7	0.7	0.03	1.3	0.05	2.0	0.03	0.7	0.07

美制单位

P (psi)	V (ft/min)	PV (psi-ft/min)	4301		4275		4630		4645	
			WF ⁽¹⁾	COF ⁽²⁾	WF	COF	WF	COF	WF	COF
1,000	75	75,000	9.0	0.18	7.0	0.15	11.0	0.15	1.6	0.09
750	800	600,000	0.4	0.03	0.7	0.05	1.0	0.03	0.3	0.07

⁽¹⁾ WF = 磨损系数, $10^{-8} \text{ mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}$, ⁽²⁾ COF = 摩擦系数

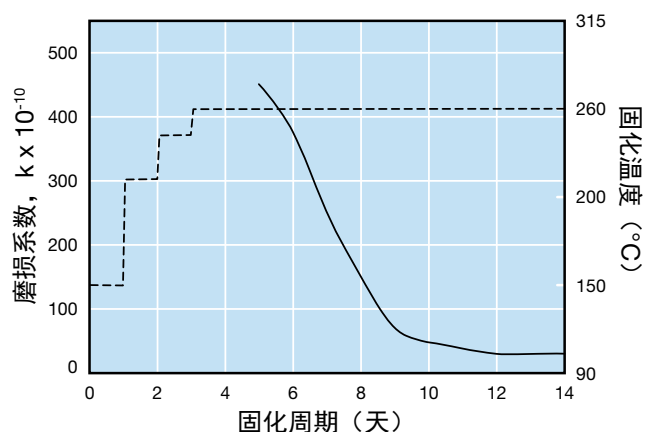
耐磨损性与后固化处理

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 44 所示。在该试验中，磨损系数 K 在 11 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 44: 在 260°C 下长时间固化可改善耐磨损性



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 45 显示了基本间隙与轴径的函数关系。如果轴承是用于高于室温的环境温度下，则应该使用图 46 所示的系数。图 47 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 51 mm 和 5 mm 的假定情况。PAI 轴承是压配到钢套中的。由图 45 得到的基本间隙为 0.23 mm。

由图 46 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 51.2 mm。

图 45：基本轴间隙

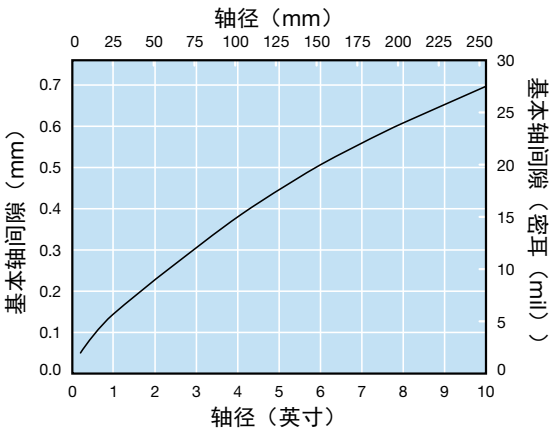


图 46：高环境温度下的间隙系数

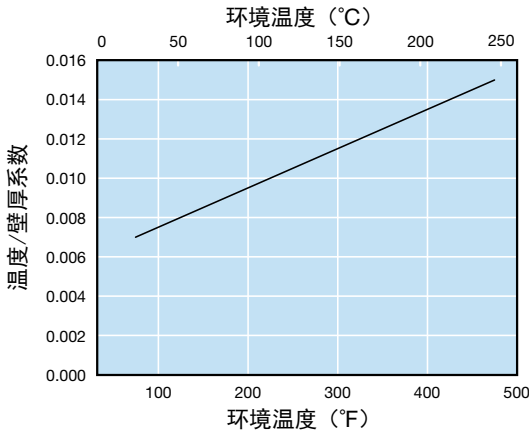
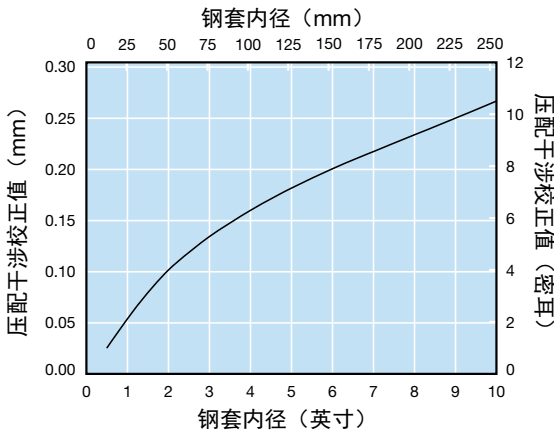


图 47：压配干涉



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 D5204 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

牌号	ASTM D5204 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	PAI0120R35 或者 PAI0220R35
4630	PAI0120R30 或者 PAI0220R30
4645	PAI0120R45 或者 PAI0220R45
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 D5204 标准。下面对照表包括在采纳说明中。

	类型	级别	ASTM D5204
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

垂直可燃性

所有 Torlon 牌号均已定为 V-0 级。参见 18 页的表 19。

连续使用

Torlon 4203L、4301 和 5030 的相对热指数列在 12 页的表 10 中。

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 34 所列及图 48 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 34: Torlon 聚合物及部分金属的比强度和比模量				
牌号	比强度		比刚度	
	10^5 in-lbf/lb	10^5 J/kg	10^7 in-lbf/lb	10^6 J/kg
4203L	5.5	1.4	1.4	3.4
5030	5.1	1.3	2.7	6.7
7130	5.4	1.4	6.0	15.0
经过热处理的铝合金				
压铸, A380	3.9	1.0	11.0	26.0
2011	5.4	1.3	10.0	25.0
2024	7.0	1.7	11.0	26.0
镁 AE42-F	5.2	1.3	9.8	25.0
碳钢, C1018	2.2	0.6	9.7	24.0
不锈钢, 301	3.1	0.8	9.7	24.0
钛 6-2-4-2	8.1	2.0	10.0	26.0

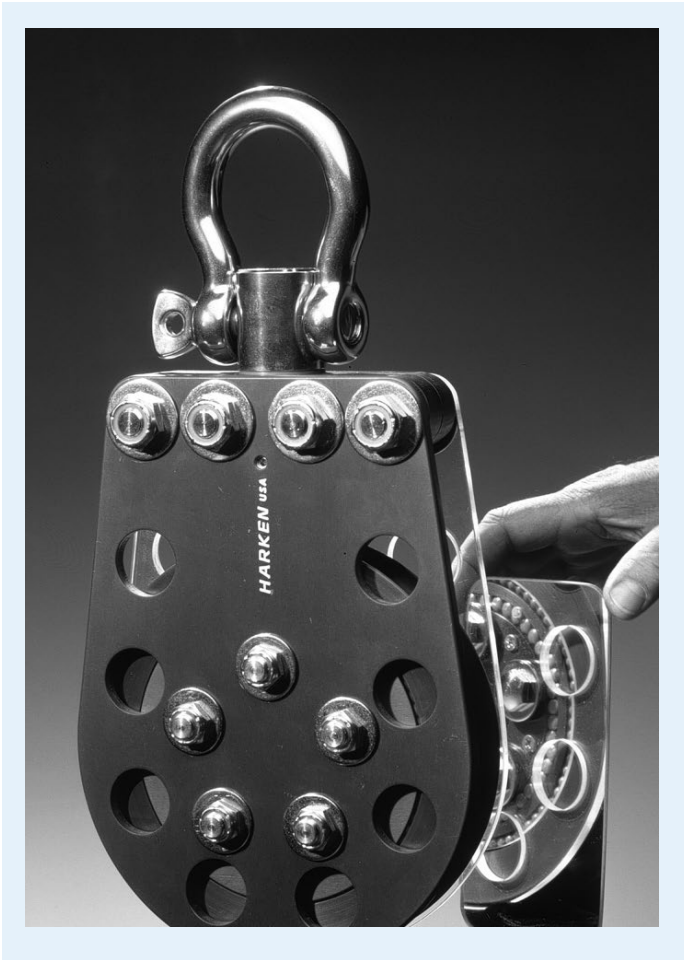
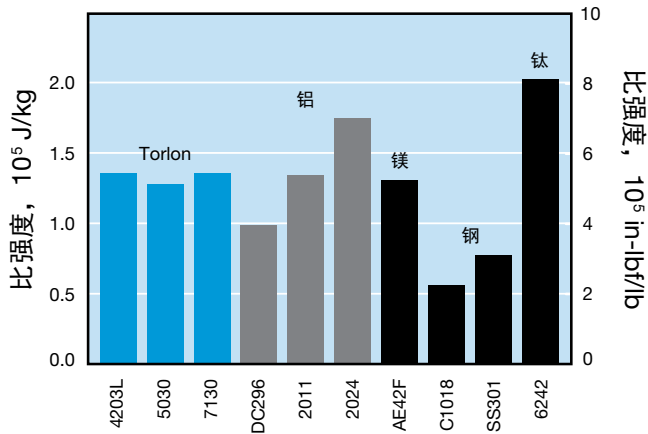


图 48: Torlon 树脂与金属之比强度的对比



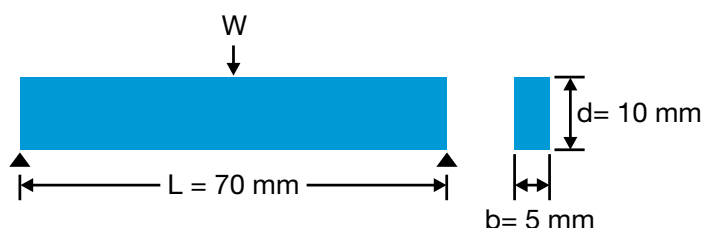
几何形状和载荷考虑

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 38 页的表 35 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 49 所示为梁的尺寸和惯性矩 (I) 的计算。

图 49: 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

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

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

$$L/2 \text{ 和 } M = \frac{WL}{4}$$

$$S_{\max} = \frac{W L c}{4 I}$$

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：

$$W_{\max} = \frac{4 S_{\max} I}{L c} = \frac{(4)(123 \text{ MPa})(0.42 \cdot 10^{-9} \text{ m}^4)}{(0.07 \text{ m})(0.005 \text{ m})} = 59 \text{ kg}$$

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：

$$Y_{\max} = \frac{W L^3}{48 E I}, \text{ 位置为 } \frac{L}{2}$$

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：

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

要计算在稳定载荷下梁的最大挠曲，应使用蠕变模量 (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 小时后的蠕变模量可通过将从表 35 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。

$$E_a = \frac{117 \text{ MPa}}{0.015} = 7814 \text{ MPa}$$

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：

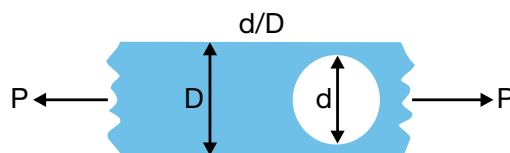
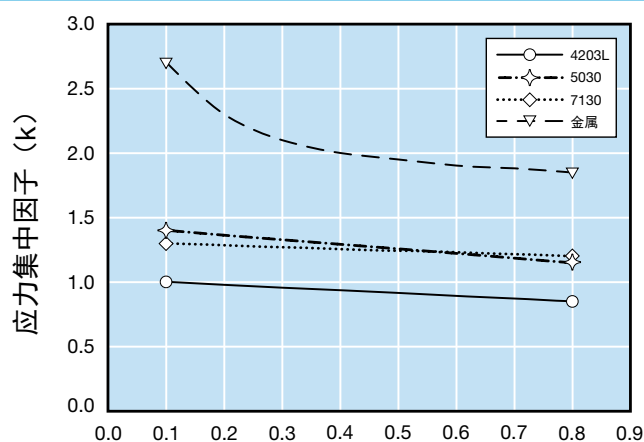
$$W_{\max} = \frac{4S_{\max} I}{Lc} = \frac{(4)(31.4 \text{ MPa})(0.42 \cdot 10^{-9} \text{ m}^4)}{(0.07 \text{ m})(0.005 \text{ m})} = 15 \text{ kg}$$

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 50 所示，Torlon 聚酰胺-酰亚胺树脂没有金属材料那样敏感。

图 50：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

部件的设计加工方法和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 35 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 35：注塑成型 Torlon 树脂的最大工作应力

国际制单位（MPa）	温度（°C）	牌号							
		4203L	4301	4275	4435	4630	4645	5030	7130
短期载荷 ⁽¹⁾	23	117	96	89	66	49	74	122	121
	135	69	67	67	54	40	66	96	94
	232	39	44	34	31	32	58	67	55
稳定载荷（蠕变）， <1.5% 应变，100 小时	23	48	69	65				117	117
	93	45	52	54				103	103
	204	34	41	41				69	69
循环载荷， 10 ⁷ 次循环	23	26	21	19	14			31	36
	135	17	14	14	11			24	29
	232	10	9	7	6			17	19
美制单位（psi）	温度（°F）								
短期载荷 ⁽¹⁾	73	17,000	14,000	13,000	9,600	7,100	10,800	17,800	17,600
	275	10,000	9,800	9,800	7,800	5,800	9,500	13,900	13,700
	450	5,700	6,400	4,900	4,500	4,700	8,400	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

⁽¹⁾ 基于 ASTM D638 测试方法的推荐值

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、挤塑成型和压塑成型。每种技术都有其优点和局限性。

注塑

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 15.9 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 Solvay 的代表联系。



压塑成型

厚度超过 15.9 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 Solvay Specialty Polymers 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 12.7 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。

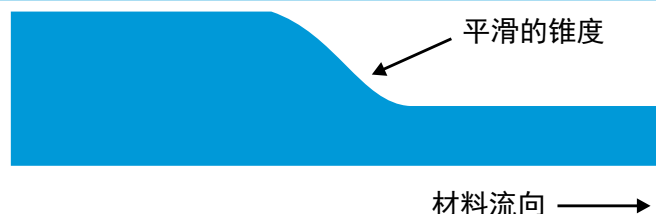
对于用 Torlon 树脂成型的小部件，壁厚一般在 0.8 mm 至 13 mm 的范围内，但增强牌号或轴承牌号的厚度可达到 15.9 mm。

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 Solvay 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 51 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 51：不同壁厚之间的逐渐过渡

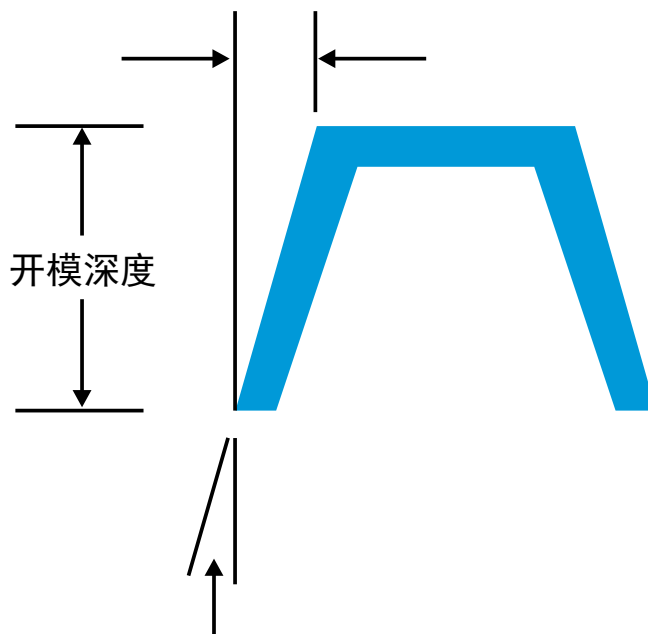


脱模角度

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，曾采用低至 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 52）。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 52：需要考虑的脱模因素

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。

加强筋结构

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 36 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 36：壁厚与嵌入件外径（OD）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。43 页的表 39 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。

螺纹扣固件

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 37: HeliCoil 嵌入件的强度

螺纹尺寸	拉伸强度				
	#4-40	#6-32	#8-32	#10-32	¼"-20
啮合					
mm	5.7	7.0	8.3	9.6	12.7
英寸	0.224	0.276	0.328	0.380	0.500
4203L					
N	3,870	6,540	8,180	9,790	12,600
lb-f	870	1,470	1,840	2,200	2,830
5030					
N	4,310	7,560	9,520	13,100	23,100
lb-f	970	1,700	2,140	2,940	5,200

表 37 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 0.51 mm 所需的轴向力。

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 38）。螺栓的直径为 6.3 mm，型号为 28TPI，螺纹为 2A 级。拉伸强度的计算基于 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。

表 38: Torlon 螺栓的强度

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

表 39: Torlon PAI 螺纹的螺钉咬合强度

	拔脱强度		啮合
	lb	kg	每孔螺纹数
4203L	540	240	7.5
4275	400	180	7.7
4301	460	200	7.8

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 4.8 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 39 所示。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。

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。

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。

各种 Torlon PAI 牌号的粘合

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 40 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 mm×13 mm×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 7 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 3.2 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 149°C 的除湿烘箱内干燥至少 24 小时（厚度超过 6.3 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，149°C 温度下 24 小时，204°C 温度下 2 小时。部件应保持夹紧直至冷却到 66°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 40 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。

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 41 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 40: 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
4203L	6,000+	41.4	2,780	19.2	5,000+	34.5
4301	2,250	15.5	1,740	12.0	2,890	19.9
4275	3,500	24.1	1,680	11.6	3,400	23.4
5030	4,780	33.0	3,070	21.2	5,140	35.4
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						
°C	-55 至 71		-29 至 99		-196 至 260	
°F	-67 至 160		-20 至 210		-321 至 500	

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

⁽²⁾ CA 5000, Lord 公司。

表 41: Torlon PAI 与金属之间粘合的剪切强度⁽¹⁾

铝 2024 与 Torlon PAI 之间粘合的剪切强度

	环氧树脂 ⁽²⁾		氰基丙烯酸酯 ⁽³⁾		酰胺—酰亚胺	
	psi	MPa	psi	MPa	psi	MPa
4203L	4,000	27.6	1,350	9.3	5,050+	34.8+
4301	2,500	17.2	1,450	10.0	4,950+	34.1+
4275	2,450	16.9	750	5.2	4,350+	30.0+
5030	3,900	26.9	3,250	22.4	6,050+	41.7+
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 ⁽²⁾		氰基丙烯酸酯 ⁽³⁾		酰胺—酰亚胺	
	psi	MPa	psi	MPa	psi	MPa
4203L	3,050	21.0	2,200	15.2	1,450	10.0
4301	3,700	25.5	2,050	14.1	1,850	12.7
4275	3,150	21.7	2,450	16.9	1,900	13.1
5030	4,650	32.1	2,100	14.5	2,400	16.5
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

°C	-55 至 71	-29 至 99	-196 至 260
°F	-67 至 160	-20 至 210	-321 至 500

⁽¹⁾ 本试验采用尺寸为 64 mm×13 mm×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。

⁽²⁾ Hysol EA 9330, Hysol 是 Dexter 公司的注册商标。

⁽³⁾ 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 42 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 42: 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)	1800-2400
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

20 MM 垂直燃烧试验	18	恒定湿度下的平衡吸收	23
ASTM D5204 聚酰胺—酰亚胺树脂 (PAI)		抗伽马辐射性	25
注塑和挤塑成型材料的标准分类体系	34	抗蠕变性	15
MIL-P-46179A 军用规范	34	拉扣配合: 既经济又简单	42
NBS 烟气密度	17	挠曲模量 - 高温下的刚度	6
PV 极限值概念	28	挤塑	39
Torlon PAI 耐磨损牌号的介绍	27	接合	42
Torlon 树脂制成的螺栓强度	42	接触面对磨损率的影响	31
Torlon 树脂的最大工作应力	38	断裂韧度	11
Torlon 树脂部件的机加工原则	46	日晒色牢度 (Weather-Ometer®) 试验	25
Torlon 耐磨损牌号	29	有润滑的耐磨损性	31
Torlon® 聚酰胺—酰亚胺树脂 (PAI)	1	机械接合技术	42
Torlon 部件与金属的粘合	44	机械特性	5
Torlon 部件的后固化处理	40	机械特性和电特性的变化	23
Torlon 部件的设计原则	40	材料效率—比强度和比模量	35
UL 57 电气照明器材	19	极限温度下的拉伸强度和挠曲强度	5
UL 94 可燃性标准	18	根据美国材料试验协会 (ASTM) 的试验方法	
UL 相对热指数	12	D638 得到的拉伸特性	6
二次加工	42	模塑嵌入件	41
例 1: 短期载荷	36	模塑嵌入件	42
例 2: 稳定载荷	36	模塑螺纹	42
例 3: 循环载荷	37	模芯	41
保险商实验所	34	止推垫圈	28
其它的机械接合技术	43	毒气排放试验	17
几何形状和载荷考虑	36	比热	13
凸台	41	氧指数	17
加工参数	14	水平燃烧试验	18
加工方式	39	水的影响	22
加强筋结构	41	汽车工程师协会的航空航天材料规范	34
压塑成型	39	汽车润滑油	21
压缩特性	8	注塑	39
可燃性	17	测量耐磨损性	29
各种 Torlon PAI 牌号的粘合	44	温度范围和相变化	14
各种环境中的性能	20	点燃特性	17
各种粘合剂的粘合强度	44	热稳定性	12
吸收速度	22	热老化后的特性保持	12
咬边	41	热重分析	12
固化处理步骤	44	物理特性	2
在需要耐磨损场合的应用	27	用于绝缘的 Torlon 聚合物	26
垂直可燃性	34	用粘合剂粘合	43
增强	14	电特性	26
壁厚的转变	40	疲劳强度	9
壁部	40	磨损率的关系式	27
孔	41	粘合剂的应用	44
导热率	13	粘合剂的选择	43
尺寸变化	23	线性热膨胀系数 (CLTE)	14
尺寸和特性的恢复	23	线性热膨胀系数 (CLTE) 测试方法	14
应力下的耐化学性	22	结构设计	35
应力和挠曲公式的应用实例	36	美国航空和航天管理局	34
应力-应变关系	7	耐冲击性	10
应力集中	37	耐化学性	20
应对机加工部件进行再固化	46	耐循环应力性	9
引言	1	耐磨损性与后固化处理	32
影响线性热膨胀系数 (CLTE) 的因素	14	耐航空和汽车工作液的能力	21
性能特性	5	联邦航空管理局	34

联邦航空管理局（FAA）可燃性..... 19

脱模角度..... 40

自动攻丝螺钉..... 42

螺纹..... 41

螺纹扣固件..... 42

螺纹机械嵌入件..... 42

螺钉咬合强度..... 43

行业和机构认证..... 34

表面的准备..... 44

计算压力和速度..... 27

超低温..... 6

超声嵌入件..... 43

超高温..... 5

轴承..... 27

轴承设计..... 33

轴承设计方案..... 27

过盈配合..... 43

连续使用..... 34

部件厚度..... 14

部件的几何形状..... 14

采用 Torlon 树脂的设计..... 39

长时间受热的影响..... 12

飞机汽轮机油，有应力和无应力作用..... 22

飞机液压液（Skydrol® 500B）..... 21

骤然高温暴露的约束条件..... 24

高性能的 Torlon 聚合物..... 2



特种聚合物

全球总部

SpecialtyPolymers.EMEA@solvay.com

Viale Lombardia, 20
20021 Bollate (MI), Italy

美洲总部

SpecialtyPolymers.Americas@solvay.com

4500 McGinnis Ferry Road
Alpharetta, GA 30005, USA

亚洲总部

SpecialtyPolymers.Asia@solvay.com

No.3966 Jindu Road
Shanghai, China 201108
上海市金都路3966号
邮编: 201108

www.solvay.com

发送电子邮件或者联系您的销售代表, 均可获取相应的安全数据表(SDS)。在使用我公司的任何产品之前, 请您务必参考相应的安全数据表。

苏威特种聚合物公司以及其子公司对于与该产品或该产品使用方面的有关信息, 无论是明示或者是暗含的, 包括适销性或者适用性, 均不予以承担任何保证或者接受任何责任义务。某些适用法律、法规, 或者国家/国际标准可能会对苏威产品的某些建议应用领域进行规范或者限制。并且, 在苏威建议的某些情况中, 包括食品/饮料、水处理、医疗、制药以及个人护理等方面, 也可能对苏威产品进行管制和限制。只有指定作“Solviva”的生物材料类的产品才可用作植入式医疗器材的备选产品; 苏威特种聚合物公司不允许也不赞成在任何植入式器材中使用任何其他产品。产品用户必须最终确认所有信息或者材料在拟用于任何方面时是否适用, 是否符合相关法律的规定, 使用方式是否得当, 以及是否侵犯了任何专利权。本信息供专业技术人员酌情使用, 并自行承担相关风险, 并且与该产品结合任何其他物质或者任何其他工艺的使用无关。本文件未授予使用任何专利或者其他任何所有权的许可。

所有的商标或者注册商标均归属于组成苏威集团的各公司或者各所有者拥有。

© 2014, Solvay Specialty Polymers. All rights reserved. D 03/2007 | R 03/2014 | Version 4.2