

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2018.01.018

高密度聚乙烯蜂窝防护结构的抗侵彻试验

陈首, 石少卿, 陈自鹏

(陆军勤务学院军事设施系, 重庆 401311)

摘要: 对高密度聚乙烯 (PE-HD) 蜂窝防护结构进行了枪弹侵彻试验, 共设置 9 种工况。通过分析结构各部分的能量变化, 发现在弹体侵彻过程中, 起主要耗能作用的部分是土体, 蜂窝结构对土体起到约束作用。此外, 研究了 PE-HD 膜厚度和弹体初速度对蜂窝结构抗侵彻性能的影响。结果表明: 在一定范围内, 增加 PE-HD 膜厚度, 可以有效增加蜂窝结构的抗侵彻性能, PE-HD 膜厚度取 4 mm 较为经济实用; 该蜂窝结构对初速度小于 1 000 m/s 的弹体有较好的抗侵彻性能, 具有一定的应用前景。

关键词: 高密度聚乙烯; 蜂窝防护结构; 抗侵彻

中图分类号: TQ325.1+2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2018)01-0074-05

Experimental about Penetration Resistance of the Honeycomb Protective Structure Made of PE-HD

Chen Shou, Shi Shaoqing, Chen Zipeng

(Army Logistics University of PLA, Dept of Military Facilities, Chongqing 401311, China)

Abstract : The bullet penetration test of high density polyethylene (PE-HD) honeycomb protection structure was carried out, including nine conditions. By analyzing the energy changes of each part of the structure, it was found that the part of the main energy dissipation was the soil during the penetration, and the honeycomb structure played a restraint effect on the soil. In addition, the effect of PE-HD film thickness and the initial velocity of the shell on the anti-penetration performance of the honeycomb structure was studied. It is found that the PE-HD film thickness increases the anti-penetration performance of the honeycomb structure in a certain range, and PE-HD film thickness of 4 mm is more economical and practical. The honeycomb structure has good anti-penetration performance to the projectile with the initial velocity of less than 1 000 m/s, and has certain application prospect.

Keywords : high density polyethylene ; honeycomb protective structure ; penetration resistance

高密度聚乙烯 (PE-HD) 作为一种常见的通用塑料^[1], 具有耐腐蚀性能好、拉伸强度大、延展性好等优点, 被广泛应用于汽车、食品、化工等多个领域。长期以来, 国内外学者对 PE-HD 的性能做了深入的研究^[2-4]。张敏^[5]通过研究不同 PE-HD 膜材料在光氧老化过程中的差异, 明确了炭黑在光氧老化过程中的作用。H. J. Kwon 等^[6]通过对多次单轴拉伸试验数据的研究分析, 提出了 PE-HD 的本构关系, 该本构关系较好地解决了 PE-HD 在大变形单轴拉伸数值模拟中计算结果不收敛的问题, 具有很好的自适应性。Zhang Yi 等^[7]通过建立 PE-HD 的

失效函数对 PE-HD 波纹管的裂纹发展模式进行研究。李俊伟等^[8]通过单轴拉伸试验, 研究不同拉伸速率、拉伸方向以及片材样式对 PE-HD 力学性能的影响。唐毓婧等^[9]采用同步辐射小角 X 射线散射技术观察 PE-HD 的拉伸塑性形变与空洞化行为。

目前, 将 PE-HD 作为一种轻质材料应用于防护工程的研究还比较少, 国内学者石少卿等^[10]提出一种由聚合物构成的新型柔性蜂窝防护结构见图 1。该结构具有质量轻、易于展开和收纳、携带方便等优点, 同时, 展开后可在每个蜂窝胞元内填充沙土和石子, 并根据防护结构的实际需要重叠铺设, 形成

基金项目: 国防科技项目基金 (3604011)

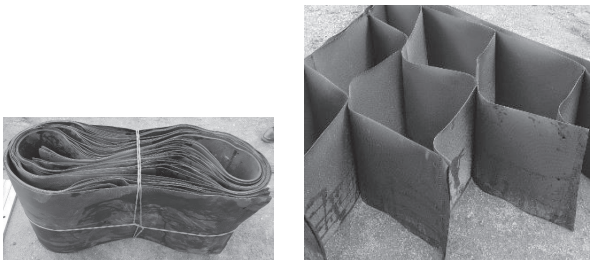
通讯作者: 陈首, 研究生, 主要从事防灾减灾工程及防护工程研究 E-mail: ssq601@163.com

收稿日期: 2017-11-20

引用格式: 陈首, 石少卿, 陈自鹏. 高密度聚乙烯蜂窝防护结构的抗侵彻试验 [J]. 工程塑料应用, 2017, 46(1): 74-78.

Chen Shou, Shi Shaoqing, Chen Zipeng. Experimental about penetration resistance of the honeycomb protective structure made of PE-HD[J]. Engineering Plastics Application, 2017, 46(1): 74-78.

多层结构,以满足防护工程的需要。陈自鹏等^[11]运用 LS-DYNA 有限元软件分析了弹体数量、弹体入射位置和入射角度对由 PE-HD 构成的柔性蜂窝防护结构的破坏效应,研究表明弹体入射位置和入射角度会影响弹体运行轨迹和侵彻深度,通过研究多枚弹体侵彻蜂窝结构的有限元模型发现该结构具有一定的抗二次打击能力,但对于 PE-HD 柔性蜂窝的结构选型及其优化研究较少。



(a) (b)
(c)
a—未展开的结构; b—人工展开后的局部结构;
c—展开后的结构

图1 柔性蜂窝防护结构

为了进一步研究 PE-HD 蜂窝防护结构在遭受弹体侵彻后的能量变化以及 PE-HD 膜厚度和弹体初速度对结构抗侵彻性能的影响,笔者在已有的研究基础上^[12-15],对 PE-HD 蜂窝防护结构进行了枪弹侵彻试验,研究弹体侵彻 PE-HD 蜂窝防护结构的具体机理,对比该蜂窝结构在不同工况下的抗侵彻性能,讨论其在防护工程领域的应用前景。

1 试验设置

根据实地测量得到的数据,每个蜂窝胞元长 97 cm,宽 70.2 cm,高 50 cm, PE-HD 的参数见表 1。蜂窝胞元中填充的土体为本地的红粘土,具体参数见表 2。射击单元采用的是 95 式自动步枪,该枪最大射程为 600 m,有效射程为 400 m。射击子弹选用的是口径 5.8 mm 的 DBP87 普通弹,该弹型的具体参数可见表 3,选用该弹是因为它初速度高,直射距离长,有利于试验中弹着点的把控。综合考虑人员安全、射击精准性和实际工程运用等因素,将射击距离设为 120 m。

笔者重点讨论 PE-HD 膜厚度以及弹体初速度

对蜂窝结构抗侵彻性能的影响,共设计 9 种工况,工况设置如表 4 所示。

表 1 PE-HD 参数

密度 / (kg · m ⁻³)	拉伸弹性模量 / Pa	泊松比
942	1.034 × 10 ⁹	0.35

表 2 土体参数

密度 / (kg · m ⁻³)	剪切弹性模量 / Pa	体积弹性模量 / Pa
1800	1.601 × 10 ⁷	1.328 × 10 ¹³

表 3 DBP87 弹体参数

项目	参数
子弹型号	DBP87
全弹长度 / mm	57 ~ 58
全弹质量 / g	12 ~ 13
直径 / mm	5.8
弹头长度 / mm	25
弹头质量 / g	4.15
初速度 / (m · s ⁻¹)	990 ~ 1 010
枪口动能 / J	1952

表 4 工况设置

工况编号	PE-HD 膜厚度 / mm	弹体初速度 / (m · s ⁻¹)
1	2	300
2	2	700
3	2	1000
4	4	300
5	4	700
6	4	1000
7	8	300
8	8	700
9	8	1000

2 试验现象

图 2 为弹体侵彻 PE-HD 蜂窝防护结构后弹体残留钢芯。由图 2 的圆圈中的钢芯可以看出,弹体黄铜外壳已剥离散开,弹体内部的钢芯较完整地保留下来,又由于弹体的主要质量集中于弹体内部的钢芯,因此将钢芯的侵彻深度定为弹体的侵彻深度。此外,从图中可见弹体发生了较为明显的偏转,弹头位置与初始射入位置有所偏差。



图 2 侵彻入结构后的弹体残留钢芯

图 3 为弹体侵彻 PE-HD 蜂窝防护结构后的残留弹孔,图中弹孔周围的片材向外突出。

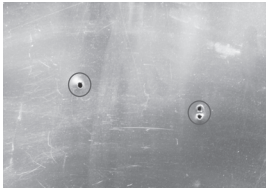


图 3 弹体侵彻 PE-HD 蜂窝防护结构后的残留弹孔

此外,在枪弹试验中,有两枚弹体的射入间距较小(图3中右侧),且弹孔间并未贯通,可作为一种典型工况进行下一步数值模拟研究。

图4为弹体射入PE-HD蜂窝防护结构后的运动轨迹示意图。弹体在结构中运动偏转后,从片材后部射出,由于动量损耗较大,弹体嵌入在另外一个蜂窝胞元表面上。

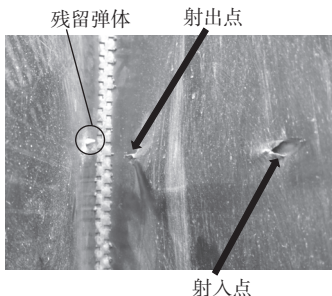


图4 弹体射入PE-HD蜂窝防护结构后的运动轨迹

3 结果与分析

3.1 结构能量分析

选取弹体初速度为700 m/s, PE-HD膜厚度为2 mm的工况2进行结构能量分析。图5为工况2的动能变化曲线。由图5可以看出,在弹体侵彻蜂窝结构初期,弹体的动能迅速下降,蜂窝结构的动能变化很小,土体的动能小幅上升。在0.0975 ms时土体的动能达到最大值3.25 kJ,此时弹体的动能为2.64 kJ,与初始动能相比下降了89.44%,可见弹体因受到蜂窝结构和土体的共同作用,动能下降得很快。

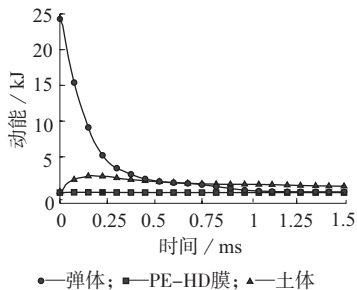


图5 工况2动能变化曲线

图6为工况2势能变化曲线。

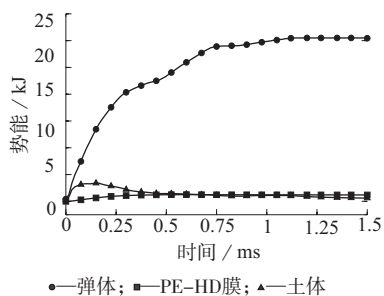


图6 工况2势能变化曲线

由图6可以看出,在0~0.0975 ms时,弹体、蜂窝结构和土体3部分的势能都有所上升,其中弹体的势能增加得最多,土体次之,蜂窝结构的势能增加得最少。结合图5和图6可以看出,弹体在侵彻蜂窝结构和土体的过程中,大部分动能转化为自身的势能、土体的动能和势能,小部分转化为蜂窝结构的动能和势能。图7为工况2总能量变化曲线。由图7可以看出,弹体总能量变化曲线与图5中弹体动能变化曲线相似,说明弹体在侵彻过程中以动能变化为主,势能变化没有动能变化明显。此外,蜂窝结构在弹体侵彻过程中能量的变化不明显,相反,土体的总能量在整个过程中先是有一定幅度的上升,然后下降了一小部分,最后趋于平稳,说明在弹体侵彻过程中,起主要耗能作用的部分是土体,蜂窝结构对土体起到约束作用,对土体施加了围压,避免弹体侵彻到土体后,土体向四周飞溅,对防护结构背面的人员和设备造成二次伤害。

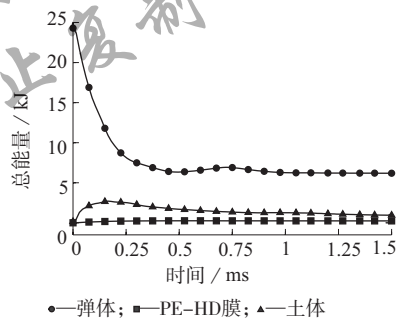


图7 工况2总能量变化曲线

3.2 PE-HD膜厚度对蜂窝结构抗侵彻性能的影响

选取弹体初速度为700 m/s, PE-HD膜厚度为2 mm, 4 mm和8 mm的3组工况进行研究分析,弹体在3组工况中的最大侵彻深度如表5所示。

表5 各工况弹体侵彻深度

工况编号	弹体初速度 / (m · s ⁻¹)	PE-HD膜厚 度 / mm	弹体最大侵彻 深度 / m
2	700	2	0.261
5	700	4	0.238
8	700	8	0.235

由表5可以看出,在弹体初速度一定的情况下,随着PE-HD膜厚度的增加,弹体最大侵彻深度在减小。PE-HD膜厚度从2 mm增加到4 mm,弹体最大侵彻深度从0.261 m减小到0.238 m,减小了8.8%, PE-HD膜厚度从4 mm增加到8 mm,弹体最大侵彻深度从0.238 m减小到0.235 m,减小了1.3%,说明在一定范围内增加PE-HD膜厚度,可以有效减小弹体最大侵彻深度,但之后再增加PE-HD

膜厚度,并不能明显减小弹体最大侵彻深度,同时还会增加原材料成本,故 PE-HD 膜存在着一个经济厚度。在该试验中,PE-HD 膜厚度取 4 mm 是较为经济实用的。

3 组工况中弹体的速度变化曲线如图 8 所示。由图 8 可看出,弹体在侵彻蜂窝结构初期,3 种工况中弹体的速度变化曲线基本重合,但随着侵彻的深入,PE-HD 膜厚度越大,弹体的速度下降得越快,这与实际情况也是吻合的,PE-HD 膜厚度越大,相同初速度的弹体侵彻蜂窝结构需花费的时间就越长,因摩擦阻力造成的动能损失也就越大,速度下降得就越快。此外,在侵彻后期,工况 5 和工况 8 中弹体的速度变化曲线基本重合,说明 PE-HD 膜达到一定厚度后,再增加膜的厚度,整个结构的抗侵彻性能并没有显著提高,也间接验证了之前提到的蜂窝结构的主要作用是约束土体,而不是主要的耗能构件。

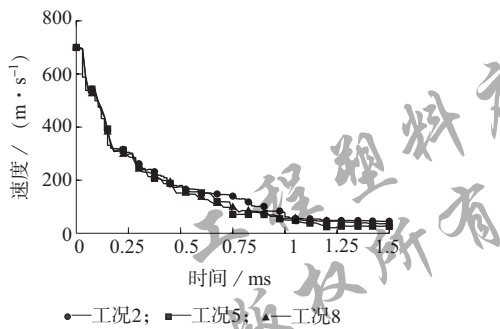


图 8 各工况弹体速度变化曲线

3.3 弹体初速度对蜂窝结构抗侵彻性能的影响

选取 PE-HD 膜厚度为 2 mm,弹体初速度为 300,700 m/s 和 1000 m/s 的 3 组工况进行研究。表 6 为 3 组工况中弹体的侵彻数据。

表 6 各工况弹体侵彻数据

项目	工况编号		
	1	2	3
PE-HD 膜厚度/mm	2	2	2
弹体初速度/(m·s ⁻¹)	300	700	1000
最大侵彻深度/m	0.146	0.261	0.315
最大偏转深度/m	0.013	0.021	0.026

由表 6 可以看出,在 PE-HD 膜厚度一定的情况下,弹体初速度越大,侵彻深度越大。弹体初速度为 1000 m/s 时,最大侵彻深度为 0.315 m,还未贯穿整个结构,说明该蜂窝结构对初速度小于 1000 m/s 的弹体有很好的抗侵彻作用,能有效保护结构物背面人员和设施的安全,具有一定的应用前景。此外,弹体在侵彻过程中,由于受到蜂窝结构和土体的“阻碍”作用,除沿初速度方向侵彻外,还

会发生一定角度的偏转。由表 6 可知,最大偏转深度随着弹体初速度的增加而增加,但远小于最大侵彻深度,说明垂直入射蜂窝结构的弹体,运动轨迹以沿初速度方向的侵彻为主。

图 9 为 3 组工况中弹体反向加速度变化曲线。由图 9 可以看出,3 组不同初速度弹体的反向加速度变化趋势基本一致,即在侵彻初期,由于蜂窝结构和土体的阻碍,弹体受到的阻力越来越大,弹体的反向加速度也越来越大,并在某一时刻达到峰值。之后,部分土体破坏,在结构内部形成空腔,造成弹体受到的阻力下降,反向加速度也随之下降,在此过程中,由于土体重新被挤压,造成弹体的反向加速度出现一定波动。此外,弹体初速度越大,在侵彻过程中受到蜂窝结构和土体的阻力就越大,反向加速度也就越大。在数值模拟中还可以继续加大弹体的初速度,找到弹体刚好贯穿整个蜂窝结构的临界初速度,对于指导防护工程具有重要意义。图 10 为各工况弹体侵彻深度图。

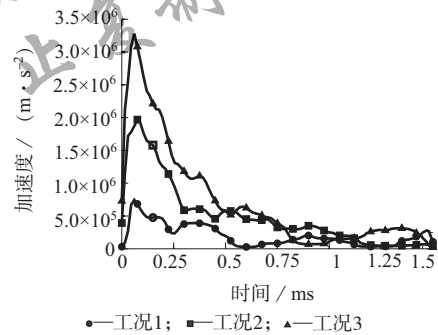


图 9 工况 1,2,3 弹体反向加速度对比曲线

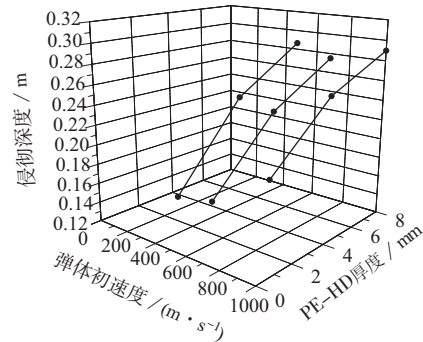


图 10 各工况弹体侵彻深度图

综合表 5、表 6 和图 10 可得,对于初速度一定的弹体,PE-HD 膜厚度越大,弹体侵彻深度越小,即蜂窝结构的抗侵彻性能越好;对于同等厚度的 PE-HD 膜,弹体初速度越大,弹体侵彻深度越大,这与实验现象也是吻合的。

4 结论

(1) 在弹体侵彻蜂窝结构过程中,土体是主要耗能部分,蜂窝结构的主要作用是对土体提供围压,约

束土体的侧向位移,避免土体受弹体侵彻后向四周飞溅,对蜂窝结构背面的人员和设备造成二次伤害。

(2) 通过分析对比不同厚度的 PE-HD 膜对蜂窝结构抗侵彻性能的影响,可得在一定范围内,增加 PE-HD 膜厚度,可以有效减小弹体最大侵彻深度。但随着厚度的继续增加,蜂窝结构的抗侵彻性能并没有显著提高,PE-HD 膜厚度取 4 mm 是较为经济实用的。

(3) 通过分析对比不同初速度的弹体对蜂窝结构抗侵彻性能的影响,可知弹体初速度越大,受到的阻力越大,最大侵彻深度也越大。蜂窝结构对初速度小于 1 000 m/s 的弹体有较好的抗侵彻性能,具有一定的应用前景。

参考文献

- [1] 王春艳. 高密度聚乙烯/石墨导电复合材料的制备及研究[J]. 塑料工业, 2017, 45(4): 119-122.
Wang Chunyan. Preparation and study of high density polyethylene / graphite conductive composites[J]. Plastics Industry, 2017, 45(4): 119-122.
- [2] 杨乐, 魏江涛, 罗筑, 等. 高密度聚乙烯的熔融支化及其对性能的影响[J]. 高分子学报, 2017(8): 1 339-1 349.
Yang Le, Wei Jiangtao, Luo Zhu, et al. Effect of melt branching and properties on high density polyethylene[J]. Acta Polymerica Sinica, 2017(8): 1 339-1 349.
- [3] 郭骏骏, 晏华, 胡志德, 等. 基于主成分分析的高密度聚乙烯环境适应行为研究[J]. 材料工程, 2015, 43(1): 96-103.
Guo Junjun, Yan Hua, Hu Zhide, et al. Study on environmental adaptation behavior of high density polyethylene based on principal component analysis[J]. Materials Engineering, 2015, 43(1): 96-103.
- [4] 杨晓明, 王铎, 田耘. 纳米 MgO/高密度聚乙烯复合材料的性能[J]. 复合材料学报, 2016, 33(2): 234-239.
Yang Xiaoming, Wang Duo, Tian Yun. Study on properties of nano-MgO/high density polyethylene composites[J]. Chinese Journal of Composites, 2016, 33(2): 234-239.
- [5] 张敏. 高密度聚乙烯(HDPE)膜材料光氧化性能研究[D]. 上海: 东华大学, 2017.
Zhang Min. Study on photo-Oxygen aging properties of high density polyethylene (HDPE) film[D]. Shanghai: Donghua University, 2017.
- [6] Kwon H J, Jar P Y B. On the application of FEM to deformation of high-density polyethylene[J]. International Journal of Solids and Structures, 2008, 45: 3 521-3 543.
- [7] Zhang Yi, Jar P Y B. Phenomenological modelling of tensile fracture in PE pipe by considering damage evolution[J]. Materials and Design, 2015, 77: 72-82.
- [8] 李俊伟, 黄宏伟. 土工格室 HDPE 片材拉伸应变率相关特性[J]. 建筑材料学报, 2008, 11(1): 47-51.
Li Junwei, Huang Hongwei. Study on tensile strain rate correlation of geocell HDPE sheet[J]. Journal of Building Materials, 2008, 11(1): 47-51.
- [9] 唐毓婧, 姜志勇, 门永锋, 等. 高密度聚乙烯的拉伸塑性形变与空洞化行为[J]. 石油化工, 2016, 45(3): 346-351.
Tang Yujing, Jiang Zhiyong, Men Yongfeng, et al. Tensile plastic deformation and hollowing behavior of high density polyethylene [J]. Petrochemical Industry, 2016, 45(3): 346-351.
- [10] 石少卿, 刘颖芳, 罗伟铭, 等. 一种用于野战的蜂窝防护结构和使用该防护结构的方法: CN18003322.8[P]. 2015-08-12.
Shi Shaoqing, Liu Yingfang, Luo Weiming, et al. A honeycomb protective structure for field operation and the method of using the protective structure: CN18003322.8[P]. 2015-08-12.
- [11] 陈自鹏, 石少卿, 罗伟铭, 等. 柔性蜂窝防护结构抗侵彻数值模拟[J]. 后勤工程学院学报, 2017, 33(1): 11-15.
Chen Zipeng, Shi Shaoqing, Luo Weiming, et al. Numerical simulation of anti-penetration of flexible honeycomb protection[J]. Journal of Logistics Engineering, 2017, 33(1): 11-15.
- [12] Jar P Y B. Transition of neck appearance in polyethylene and effect of the associated strain rate on the damage generation[J]. Polymer Engineering & Science, 2014, 54(8): 1 871-1 878.
- [13] Sukjoon N, Sabrina S, Yick G H. Fracture characterization of pristine / post-consumer HDPE blends using the essential work of fracture (EWF) concept and extended finite element method (XFEM)[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2015, 139(7): 1-4.

帝斯曼推出新型 Arnite® 耐水解 PBT

荷兰皇家帝斯曼集团开发出新型耐水解聚对苯二甲酸丁二酯 (PBT), 为 Arnite® 热塑性聚酯系列再添新产品。新材料将为耐高温潮湿环境应用 (包括汽车连接器、控制设备和传感器) 提供高性价比解决方案。该款新型耐水解产品可满足汽车市场对耐高温高湿材料日益增长的需求。

帝斯曼汽车电子全球市场经理 Mark Terlaak 表示, 他们从客户那里得到的信息表明, 随着连续使用时间和发动机环境峰值温度的持续上升, 聚酰胺 6、聚酰胺 66 和标准 PBT 材料等已不能满足特定应用的要求。各级供应商将耐水解的 PBT 视为从这些材料过渡到更昂贵的特种材料解决方案的

过渡材料。

Terlaak 指出, PBT 的性能优于用于汽车电子应用的标准聚酰胺, 因为其无需使用热稳定剂 (某些热稳定剂可导致金属接触腐蚀问题), 而且因其吸湿性较低也保证了材料具有较高的尺寸稳定性。

Terlaak 还指出, 新型 Arnite® 耐水解 PBT 产品在诸多方面都优于其它 PBT, 但其最显著的优势是: 在 USCAR 标准 3, 4, 5 类型温度/湿度环境和双 85 湿热循环试验 (85℃ 和 85% 相对湿度) 下, 在长达 3 000 h 以内, Arnite® 耐水解 PBT 力学性能具备良好的保持率。该产品在 150℃ 时具有极佳的性能。
(CPRJ 中国塑料橡胶)