

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2017.08.011

薄壁钢内衬 CF 圆筒承压性能仿真及水压爆破试验^{*}

李博¹,熊超¹,殷军辉¹,邓辉咏¹,高建勋²

(1. 军械工程学院火炮工程系,石家庄 050003; 2. 河北太行机械工业有限公司,石家庄 050003)

摘要:针对含薄壁钢内衬的碳纤维缠绕圆筒典型结构,建立三维有限元模型,采用温度参数法逐层计算内衬残余应力,并预测其承压性能;基于水压爆破试验,研究了多缠绕角下缠绕张力、不同碳纤维等级对钢内衬及复合材料圆筒承压能力的影响,并结合钢内衬的声发射振铃计数特征判别载荷屈服点。试验结果表明,含薄壁钢内衬的碳纤维缠绕圆筒的最佳缠绕张力为 75 N 左右,T700,T300 两种强度碳纤维复合圆管的钢内衬最大屈服载荷基本相同。

关键词:碳纤维;复合材料圆筒;钢内衬;缠绕张力;声发射

中图分类号: TB322 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2017)08-0050-05

Performance of CF Winding Cylinders Withstanding Internal Pressure by FEM and Water-Pressure Blasting Test

Li Bo¹, Xiong Chao¹, Yin Junhui¹, Deng Huiyong¹, Gao Jianxun²

(1. Ordnance Engineering College, Shijiazhuang 050003, China; 2. Hebei Taihang Machinery Industries Co. Ltd., Shijiazhuang 050003, China)

Abstract: The three-dimensional finite element model was established for the typical structure of carbon fiber winding cylinders with thin-walled steel liner. The temperature parameter method, combined with the finite element model, was used to calculate the residual stress of steel liner caused by winding tension layer by layer, and its performance of withstanding internal pressure was predicted. Based on water-pressure blasting test, the influences of winding tension and different carbon fiber grades on the performance withstanding internal pressure of steel liner and the burst pressure of composite cylinder were studied, and the AE signals characteristics of steel liner was used to discriminant yield pressure. The results show that the optimum winding tension is about 75 N, and there is no difference between T700 and T300 in resisting steel liner yield.

Keywords: carbon fiber; composite cylinder; steel liner; winding tension; acoustic emission

碳纤维缠绕制品具有高比强度、高比刚度以及优异的抗疲劳和耐腐蚀性能,逐渐取代传统玻璃纤维缠绕制品、铝合金等轻质金属圆筒制品,可广泛应用于航空航天、医药化工、船舶车辆等行业中的压力容器、圆柱外壳、输送管道等结构^[1-3]。

近年来,碳纤维缠绕压力容器或柱形结构的强度分析和缠绕张力的研究取得较大进展。T. Nowak 等^[4-5]基于纤维层网格理论和声发射特征,对受轴向拉伸和内压复合圆筒的金属内衬进行了弹塑性分析。邢静忠等^[6]通过研究内外压作用下纤维缠绕厚壁柱形容器的强度,发现三维应力分析比二维应力分析更接近真实应力值。吴德会等^[7]考虑了当前缠绕层对已缠绕层的“放松效应”,并将芯模等价刚性体给出了一种神经网络等剩余张力算法。吴杨等^[8]考虑了纤维体积含量变化对材料本身性能的影响,提出了通过给定缠绕张力确定纤维缠绕厚壁柱形结构剩余张力的计算方法。康超等^[9]基于纤维复合材料的各向异性推导了剩余应力计算公

式,并给出了等剩余应力计算公式。

笔者针对含有薄壁金属内衬的碳纤维缠绕圆筒典型结构,制作了不同内衬厚度、缠绕张力及不同等级碳纤维的复合材料圆筒。建立了复合材料圆筒三维有限元模型,针对内衬屈服极限载荷进行了仿真预测。通过水压爆破试验,应用声发射无损检测技术,研究了缠绕张力及不同等级碳纤维对圆筒承压能力的作用规律,并对仿真结果进行试验验证。

1 复合材料圆筒承压性能试验方案

1.1 原材料

碳纤维: T300, T700 等级碳纤维原丝,日本东丽公司;

环氧树脂: E51,无锡蓝星石油化工有限公司;

钢内衬: 50[#] 钢,河北太行机械工业有限公司。

^{*} 军队重点攻关项目 (ZS2015070132A12002)

联系人: 李博,硕士研究生,研究方向为轻量化材料与应用技术

收稿日期: 2017-05-17

1.2 主要仪器及设备

材料试验机:5982型,英国 Instron 有限公司;

数控缠绕机:FWA1/4/3型,EHA Spezialmaschinenbau GmbH 公司;

固化箱:DC型电热恒温干燥箱,宁波红菱电热烘箱有限公司;

水压静压试验台:JY-HT-200/70-A型,上海馨予液压机机电设备有限公司;

采集仪(SUAE2S型)、宽频声发射传感器(SR800-81159型):北京声华兴业科技有限公司。

1.3 复合材料圆筒结构设计

碳纤维采用 T300-12k 与 T700S-12k 等级,基体为环氧树脂,内衬材料为 50# 钢,总长度为 450 mm。缠绕角度采用环向缠绕和螺旋缠绕混合缠绕,具体缠绕方式为 $90^\circ/\pm 30^\circ/90^\circ$,缠绕层数为 4/4/4,共计 12 层,内衬内半径为 40 mm,复合材料圆筒试样结构见图 1。

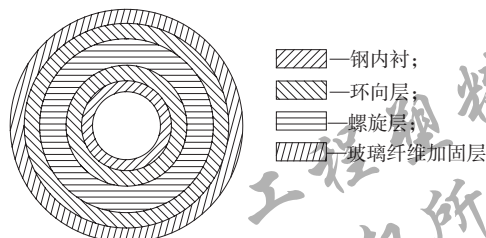


图1 复合材料圆筒试样结构图

因水压测试时,两端开口处的自由边效应显著^[10],特采用玻璃纤维环向缠绕进行端部加固,避免先于筒身破坏,玻璃纤维加固端部结构见图 2。

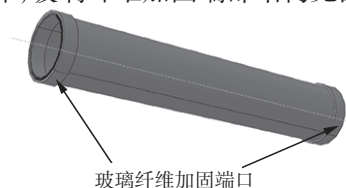


图2 玻璃纤维加固端部结构图

1.4 复合材料圆筒试验方案设计

为分析不同缠绕张力、碳纤维强度对复合材料圆筒承压性能的影响,制定的试验方案如表 1 所示。

表1 复合材料圆筒承压性能试验方案

方案	缠绕张力/N	内衬厚度/mm	碳纤维等级
1	30	1.5	T700
2	45	1.5	T700
3	60	1.5	T700
4	75	1.5	T700
5	90	1.5	T700
6	30	1.5	T300

(1) 缠绕张力试验:钢内衬的内半径为 40 mm,

其厚度为 1.5 mm,碳纤维缠绕方式为恒张力缠绕,张力大小从 30 N 至 90 N,间隔 15 N,共计 5 个方案,即表 1 中的方案 1~5 进行对比试验。

(2) 碳纤维等级试验:钢内衬材料、内衬厚度和缠绕张力相同,使用 T300 碳纤维替换 T700 碳纤维制作复合材料圆筒,研究同等模量但不同强度的碳纤维对复合材料圆筒整体承压性能的影响,即表 1 中的方案 1 与方案 6 进行对比试验。

(3) 水压爆破试验:采用准静态水压加载方法,对复合材料圆筒进行爆破压力检测,加载速率为 5 MPa/min。由于湿法缠绕工艺的特点,存在胶体浸润不充分、脱粘、气泡等多种缺陷,为充分发挥外层碳纤维的强度,在正式测量之前,以 4 MPa 压力循环加压并保压 10 min,充分释放缺陷。

1.5 钢内衬及碳纤维复合材料力学性能测试

50# 钢拉伸试样按照 GB/T 2975-1998 制作,采用线切割方法截取 50# 钢标准试样,并按照 GB/T 22315-2008 测得拉伸弹性模量为 209 GPa、泊松比 0.27、屈服强度 376 MPa、断裂强度 629 MPa。

按照 GB/T 1447-2005、GB/T 1448-2005、GB/T 1450.1-2005,分别制作 E51/T700 和 E51/T300 单向拉伸试样、面内压缩试样和层间剪切试样,并测得了拉伸弹性模量、泊松比和剪切模量,及拉伸、压缩和剪切强度,详见表 2、表 3。

表2 E51/T700 与 E51/T300 的拉伸弹性模量、泊松比、剪切模量

项目	E51/T700	E51/T300
E_1 /GPa	153	157
E_2 /GPa	9.7	10.1
E_3 /GPa	9.7	10.1
ν_{12}	0.29	0.28
ν_{13}	0.29	0.28
ν_{23}	0.3	0.3
G_{12} /GPa	5.4	5.5
G_{13} /GPa	5.4	5.5
G_{23} /GPa	4.8	4.95

注: E_1, E_2, E_3 为拉伸弹性模量; $\nu_{12}, \nu_{13}, \nu_{23}$ 为泊松比, G_{12}, G_{13}, G_{23} 为剪切模量。

表3 E51/T700 与 E51/T300 拉伸、压缩和剪切性能

复合材料	X_t /MPa	X_c /MPa	Y_t /MPa	Y_c /MPa	S /MPa
E51/T700	2273	1575	51	152	121
E51/T300	1272	987	52	138	112

注: X_t, Y_t 为拉伸强度, X_c, Y_c 为压缩强度, S 为剪切强度。

2 复合材料圆筒承压性能仿真

2.1 复合材料圆筒有限元建模

对各个方案复合材料圆筒进行三维有限元建模^[11],依据表 1、表 2、表 3 中的参数预测其承压能

力。钢内衬采用 Solid 三维实体单元,共计 5 600 个单元;纤维缠绕层每层沿厚度方向为一个单元,单元厚度为 0.25 mm,可分 12 层,采用 Solid 三维实体单元,共计 67 200 个单元;两端玻璃纤维加固层采用 Solid 三维实体单元,划分两层,共计 800 个单元,全模型总计 73 600 个单元。根据水压试验装置的结构特点,在模型左端面施加了环向约束和轴向约束,在右端面施加环向约束,以保持桶身不可旋转,但可以轴向伸缩,具体划分见图 3、图 4。

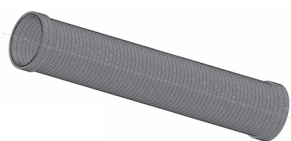


图 3 复合材料圆筒有限元模型

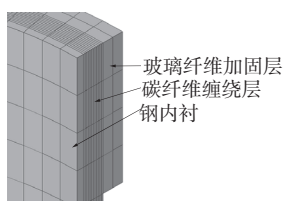


图 4 网格划分

2.2 复合材料圆筒有限元分析

(1) 缠绕张力对承压性能的影响。

复合材料圆筒采用多角度缠绕,尚无有效算法计算剩余应力公式,故采用文献[12]提供的方法,逐层施加温度降,使其产生径向收缩,直至每层环向应力达到缠绕张力的环向分力,并忽略轴向分力带来的影响。计算内衬及每层碳纤维的剩余应力,发现薄壁内衬剩余环向预压应力随缠绕张力呈图 5 所示线性关系。在外部纤维层缠绕张力的包覆作用下,钢内衬受挤压向内收缩,并产生负的预压应力。

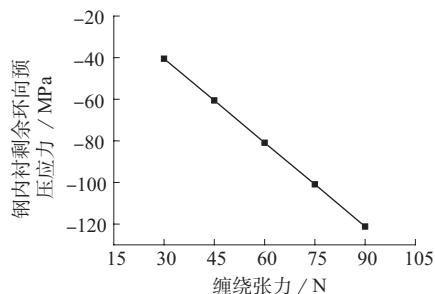


图 5 缠绕张力与内衬剩余环向预压应力的关系

在有限元模型内表面施加均匀压力,模拟水压加载过程,加载速率与水压试验加载速率相同,并设置终止条件,直至内衬屈服,得出不同缠绕张力下内衬屈服的最大载荷。根据仿真结果可知,缠绕张力越大则内衬最大屈服载荷越高,缠绕张力与内衬最

大屈服载荷的关系如图 6 所示。

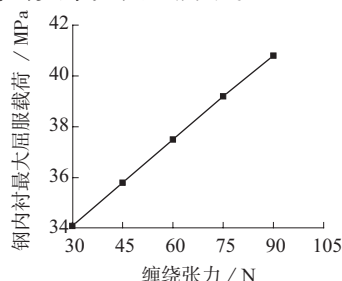


图 6 缠绕张力与内衬最大屈服载荷的关系

(2) 碳纤维等级对承压性能的影响。

采用上述方法经仿真计算得出, T700 方案的钢内衬最大屈服载荷为 34.1 MPa, 而 T300 方案的钢内衬最大屈服载荷为 34.3 MPa。可知同等模量下,碳纤维强度对钢内衬最大屈服载荷的影响较小。上述所有仿真过程中,在内衬最大屈服载荷下,外部碳纤维缠绕层均未出现破坏。

3 复合材料圆筒水压爆破试验

3.1 复合材料圆筒声发射测试

为验证复合材料圆筒的实际承压能力,对钢内衬及纤维缠绕层的内部损伤信号随加载历程进行跟踪记录。文献[1-3]指出钢的声发射信号频率分布在 20~40 KHz,进入屈服点之前声发射信号明显增强,且屈服后会经历声发射空白期,根据声发射振铃计数随载荷的变化可判断钢内衬屈服载荷。

笔者重点是监测复合材料圆筒破坏过程中因内衬屈服、纤维断裂所产生的复杂声信号,因此选定复合材料圆筒左端和中部的两个测试点,采用采集仪、宽频声发射传感器(最高有效频率 800 MHz)进行监测,如图 7 所示。

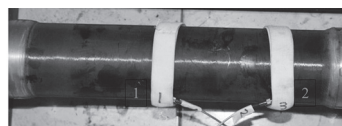


图 7 声发射测试点

3.2 缠绕张力对承压性能的影响试验

不同缠绕张力下的爆破压力数据如图 8 所示,承压性能最优的复合材料圆筒,其缠绕张力为 75 N,缠绕张力达到 90 N 时,承压性能显著降低。图 9 是 5 号试样爆破形貌。图 10 是 1 号试样爆破形貌。分析缠绕张力过大时复合材料圆筒过早破坏的原因有两点:一是缠绕张力过大,将导致钢内衬失稳发生屈曲,导致加载后变形不均匀,产生应力集中,进而产生点状破坏形貌如图 9 所示,而其它圆筒的破坏形貌基本一致形貌如图 10 所示,为碳纤维缠绕

层沿轴向出现大范围断裂和分层;另一原因为缠绕张力过大导致纤维磨损严重及树脂浸润不足缺陷增多,碳纤维缠绕层整体力学性能下降。

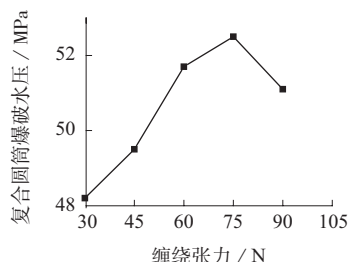


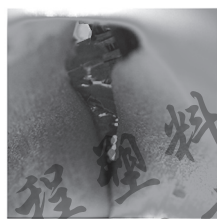
图8 爆破压力与缠绕张力



(a)



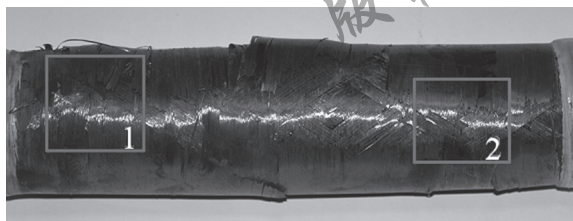
(b)



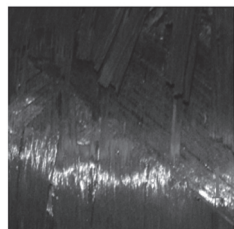
(c)

a—试样爆破全貌; b—纤维层爆破形貌; c—内衬爆破形貌

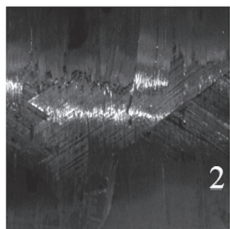
图9 5号试样爆破形貌



(a)



(b)



(c)

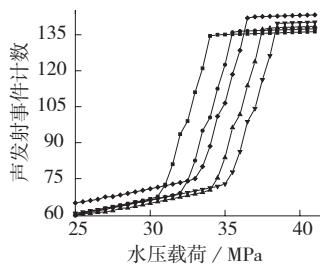
a—1号试样爆破全貌; b—1号位置纤维层爆破形貌;

c—2号位置纤维层爆破形貌

图10 1号试样爆破形貌

统计振铃计数总数,得到振铃计数随载荷升高的增长趋势,在钢内衬屈服点附近振铃计数突然升高,屈服点过后钢内衬进入塑性变形阶段,声发射信

号数量增长趋于停止,不同缠绕张力下钢内衬振铃计数总数随载荷变化情况见图11。



缠绕张力: •—30 N; •—45 N; •—60 N; •—75 N; •—90 N

图11 不同缠绕张力下钢内衬振铃计数总数随载荷变化

从图11可以看出,缠绕张力从30 N增大到75 N,声发射密集现象出现延迟,缠绕张力越高延迟效果越明显,说明钢内衬的承载能力越高,与有限元仿真结果相符;90 N缠绕张力屈服点介于45 N和60 N之间,且振铃计数明显高于其它试样,与爆破压力较低的试验结果具有一致性,但与有限元仿真结果不符,可知过高的缠绕张力破坏了复合材料圆筒结构的完整性,降低了其承压能力;同时发现,载荷在30 MPa之前随着缠绕张力升高,振铃计数总数呈现微弱上升趋势,这是因为加载之前,钢内衬中的预应力为压应力,随着载荷升高,钢内衬经历预应力释放阶段,并伴有少量声发射信号产生,预应力越大则记录的信号数量越多。

3.3 碳纤维等级对承压性能的影响试验

根据钢内衬声发射信号振铃计数随载荷的增长判断,T700方案钢内衬在33 MPa左右进入屈服状态,T300方案钢内衬在33.5 MPa左右进入屈服状态,与有限元仿真结果相比略低,但基本相同。T700方案爆破压力为50 MPa,比T300方案爆破压力45 MPa高一些。T700与T300复合材料的拉伸弹性模量基本相同,导致钢内衬最大屈服载荷相同;T700复合材料更高的强度使复合材料圆筒的爆破压力比T300方案有所提高,但差距不大。对比可知,在禁止钢内衬屈服的工作场合下,T300搭配钢内衬的效费比更高。

4 结论

(1) 通过逐层施加温度降的方法可有效计算剩余应力的,在本试验中,75 N缠绕张力效果最好,过大的缠绕张力会使薄壁钢内衬失稳,同时过大的张力加剧纤维磨损,降低缠绕质量,因此与仿真结果并不完全一致。

(2) 相同模量、不同强度等级的碳纤维,钢内衬最大屈服载荷相同,与仿真结果一致,T700方案的

爆破压力稍大于 T300 方案,对于工作载荷不允许超过内衬屈服极限的场合,T300 碳纤维在经济方面更有优势。

(3) 利用声发射振铃计数的特征判断钢内衬屈服点的方法可行,可推广应用于声发射信号数量特征随载荷变化类似于钢的金属,以判别屈服点。

参考文献

- [1] 程卫平. 聚丙烯晴基碳纤维在航天领域应用及发展[J]. 宇航材料工艺,2015(6):11-16.
Cheng Weiping. Development of PAN-based carbon fibers in aerospace[J]. Aerospace Material & Technology,2015(6):11-16.
- [2] 张菡英,刘明. 碳纤维复合材料的发展及应用[J]. 工程塑料应用,2015,43(11):132-135.
Zhang Hanying, Liu Ming. Development and applications of carbon fiber reinforced polymer[J]. Engineering Plastics Application,2015,43(11):132-135.
- [3] Chen Hung-wen, Sun Huai-ku, Liu Tien-chih. Autofretage analysis of a fibre-reinforced composite tube structure incorporated with a SMA[J]. Composite Structures,2010,89:497-508.
- [4] Nowak T, Schmidt J. Prediction of elasto-plastics behavior of pressurized composite reinforced metal tube by means of Acoustic Emission measurements and theoretical investigation[J]. Composite Structures,2014,118:49-56.
- [5] Nowak T, Schmidt J. Theoretical, numerical and experimental analysis of thick walled fiber metal laminate tube under axisymmetric loads[J]. Composite Structures,2015,131:637-644.
- [6] 邢静忠,陈利. 内外压作用下纤维缠绕厚壁柱形容器的强度[J]. 复合材料学报,2011,28(1):124-131.
Xing Jingzhong, Chen Li. Strength of filament wound thick-walled cylindrical vessel under internal and external pressure[J]. Acta Materiae Composite Sinica,2011,28(1):124-131.
- [7] 吴德会,张忠远. 厚壁复合材料管纤维缠绕张力的神经网络设计方法[J]. 复合材料学报,2012,29(4):195-203.
Wu Dehui, Zhang Zhongyuan. Approach to design tension of filament winding for thick composite pipe using a neural network[J]. Acta Materiae Composite Sinica,2012,29(4):195-203.
- [8] 吴杨,邢静忠,耿沛,等. 考虑体积含量变化的纤维缠绕厚壁柱形结构的等强度设计[J]. 复合材料学报,2015,32(3):789-796.
Wu Yang, Xing Jingzhong, Geng Pei, et al. Constant strength design of filament wound thick-walled cylindrical structure considering variation of fiber volume content[J]. Acta Materiae Composite Sinica,2015,32(3):789-796.
- [9] 康超,史耀耀,何晓东,等. 具有厚壁内衬圆筒的缠绕张力算法[J]. 工程力学,2016,33(2):200-208.
Kang Chao, Shi Yaoyao, He Xiaodong, et al. Algorithm of winding tension for cylinder with thick-walled liner[J]. Engineering Mechanics,2016,33(2):200-208.
- [10] 姚伟岸,肖峰. 基于辛对偶体系的层和板自由边缘效应的分析解[J]. 应用数学和力学,2011,32(9):1 021-1 029.
Yao Weian, Xiao Feng. Analytical solutions to edge effect of composite laminates based on symplectic dual system[J]. Applied Mathematics and Mechanics,2011,32(9):1 021-1 029.
- [11] Oller S. 复合材料力学行为的数值模拟[M]. 滕英元,等译. 北京:国防工业出版社,2016.
Oller S. Numerical simulation of mechanical behavior of composite materials[M]. Translated by Teng Yingyuan, et al. Beijing:National Defense Industry Press,2016.
- [12] 梁清波,邢静忠,杨涛. 柱形缠绕件的环向缠绕张力设计的理论研究及其数值模拟[J]. 固体火箭技术,2013,36(6):799-804.
Liang Qingbo, Xing Jingzhong, Yang Tao. Theoretical research and numerical simulation of winding tension design of hoop winding on cylindrical mandrel[J]. Journal of Solid Rocket Technology,2013,36(6):799-804.
- [13] 龙小江. 钢材损伤过程声发射监测与评价方法研究[D]. 南昌:南昌航空大学,2015.
Long Xiaojia. Research on monitoring and evaluation methods of steel damage process based on acoustic emission[D]. Nanchang: Nanchang Hangkong University,2015.

中国科学院化学研究所发明热塑性和热固性可互相转换的聚氨酯材料

环境友好、可回收重复使用聚合物材料研究是智能仿生和高新技术领域的重要方向,受到全球科学界和工业界的高度关注。聚氨酯因其优良性能而被广泛用于泡沫材料、涂料、粘合剂等领域。通常情况下,聚氨酯需要在催化剂的作用下反应生成热固性树脂来实现应用,有害物质残留以及材料难以回收对其应用造成了诸多限制。

中国科学院化学研究所高分子物理与化学实验室科研人员以六亚甲基二异氰酸酯和多官能团脲为原料,在无催化剂的温和条件下,成功制备了脲类聚氨酯(POUs)。该聚合反应具有效率很高的突出优点,在 30℃ 的二氯甲烷中反应

3 h,转化率高达 99%,所制备的 POUs 与常规聚氨酯力学性能相当。进一步研究发现,脲氨酯键具有热可逆性,POUs 表现出优异的热自修复和可回收性质,修复效率可高达 90%。这一基于脲氨酯键动态特性的研究成果,使得 POUs 可回收重复使用成为了可能。上述反应的特点是室温反应形成交联结构(此时是化学交联的 POUs 材料,热固性塑料),但是,在加热条件下交联部分发生解交联,意味着 POUs 材料变成热塑性,又可以重新加工。

POUs 材料具有制备方法简便易行、结构动态可逆、力学性能优良的特点,新型动态可逆脲氨酯键为构筑可回收重复使用聚合物带来一种新的选择,并有望大大拓展聚氨酯材料的应用领域。
(中国聚合物网)