

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2017.12.022

碳纤维复合材料层合板面内压缩损伤及声发射特征分析^{*}

高华¹,熊超¹,殷军辉¹,刘建功²

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

摘要: 针对碳纤维复合材料层合板面内压缩损伤问题,基于声发射技术分析不同损伤阶段的声发射信号特征。根据加载过程中时间-载荷曲线以及试样破坏断面微观形貌,将损伤过程分为三个阶段:初始损伤阶段主要产生少量基体开裂与纤维-基体界面脱粘,裂纹迅速扩展阶段开始产生纤维剪断以及失稳变形,平稳损伤阶段主要产生失稳变形以及分层裂纹扩展。结合声发射信号的振幅、振铃计数研究损伤过程,并基于小波变换进行损伤信号的时频分析,发现不同损伤类型可通过声发射振幅及频率特征有效识别。

关键词: 复合材料层合板;面内压缩损伤;声发射;扫描电子显微镜;小波变换

中图分类号: TQ323.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2017)12-0107-05

Analysis of Internal Compressive Damage and Acoustic Emission Characteristics of Carbon Fiber Composite Laminates

Gao Hua¹, Xiong Chao¹, Yin Junhui¹, Liu Jiagong²

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

Abstract: The interlaminar compression damage of carbon / epoxy composite laminates was studied based on acoustic emission technique and acoustic emission characteristics of different types of damage were analyzed. The time load curve of the loading process and the microscopic morphology of the specimen failure section were analyzed, damage evolution was divided into three stages: a small amount of matrix cracking and fiber-matrix debonding was produced in the initial damage stage; in rapid failure stage, fiber-matrix debonding and shear fracture was produced; in stable damage stage, fiber instability deformation and crack propagation of delamination was produced. The process of damage evolution combined with the acoustic emission signal amplitude, counts and time frequency relationship obtained by wavelet transform were analyzed. It was found that different damage types can be identified by the amplitude and frequency characteristics of acoustic emission.

Keywords: composite laminate; interlaminar compression damage; acoustic emission; scanning electron microscope; wavelet transform

高性能碳纤维树脂基复合材料因其轻质、高强等优点,近年来被广泛应用到航空航天等领域。复合材料在服役过程中产生的内部损伤将严重影响其安全可靠,因此对复合材料的损伤研究具有重大意义。

复合材料的损伤主要有基体开裂、纤维-基体界面脱粘、层间开裂和纤维断裂等形式。声发射(AE)技术因其能够动态检测损伤的产生、扩展及断裂过程得到广泛应用,通过对AE信号的分析,可以得到材料内部变化的相关信息^[1],是研究复合材料损伤的有效手段之一。

近几年国内外对声发射在复合材料损伤动态检测领域的应用进行了诸多研究^[2-5]。关于声发射信号特征研究中,Sung-choong等^[6]对纤维混杂复合材料动态加载产生AE信号的振铃计数、振幅、能量等进行分析,得出了不同损伤模式对应的AE信

号特征;黄频波等^[7]利用滑动移除近似熵对碳纤维拉伸产生基体开裂、纤维/基体脱胶及纤维断裂三种损伤模式对应载荷、计数以及AE能量与时间的关系进行了分析;杨璧玲等^[8]对超高分子量聚乙烯/低密度聚乙烯复合材料准静态拉伸产生的AE信号进行无监督模式识别,分析了0°,90°以及[+45°/-45°]损伤机制;王从科等^[9]研究了聚乙烯纤维束在拉伸损伤过程中不同损伤类型的声发射特性及其特征参数。

目前对于碳纤维复合材料拉伸损伤的研究较多,而层合板面内压缩^[10]方面的研究相对较少。笔者以环氧树脂/碳纤维复合材料为研究对象,根据

^{*} 军队重点攻关项目(ZS2015070132A12002)

联系人:熊超,副教授,硕士生导师,主要从事轻量化材料与应用技术研究

收稿日期:2017-10-05

层合板面内压缩加载历程中的破坏形态及断面微观形貌,研究层合板面内压缩损伤过程,判别不同阶段的损伤模式;基于 AE 技术对层合板面内压缩破坏过程进行动态监测,对基体开裂、纤维-基体界面脱粘、纤维剪断以及失稳变形等损伤模式的 AE 信号特征进行了分析。

1 实验部分

1.1 主要原材料

碳纤维: T700, 日本东丽公司;

环氧树脂: E51, 无锡蓝星石油化工有限公司。

1.2 主要设备及仪器

材料试验机: Instron-5982 型, 英国 Instron 有限公司;

声发射仪: SAEU2S 型, 北京声华兴业科技有限公司;

宽频传感器: WD 型, 北京声华兴业科技有限公司;

扫描电子显微镜 (SEM): HD-2700 型, 江苏万科科教仪器有限公司。

1.3 试样制备

层合板试样的铺层方式为 $[0^\circ/90^\circ]_{20}$, 由碳纤维填充环氧树脂层合而成, 在 180°C 高温下固化成型, 切削打磨为 $6\text{ mm} \times 6\text{ mm} \times 6\text{ mm}$ 立方体。

1.4 性能测试

采用材料试验机垂直于试样铺层方向加载, 加载速度为 8 mm/h , 记录压缩过程的时间-载荷信息。采用声发射仪以及宽频传感器检测和记录压缩过程的 AE 信号。利用 SEM 分析试样的破坏断面。

其中, AE 实验参数设置如下: 采样频率为 1000 kHz , 闭锁时间 $2000\mu\text{s}$, 前置放大器增益 40 dB , 波形门限 40 dB , 前后采样长度为 512 , 峰值间隔 $1000\mu\text{s}$ 。传感器以真空润滑脂作为耦合剂, 试样在 AE 测试之前, 用铅芯断裂方法对数据采集系统进行校验。

2 实验结果与分析

图 1 为试样加载前状态, 时间-载荷曲线如图 2 所示, 在 143.3 s , 160.5 s 先后出现两次迅速卸载, 并于 166.1 s 卸载完成。根据时间-载荷曲线的变化特征, 将试样动态加载破坏过程分为三个阶段: 初始损伤阶段 ($0 \sim 143.3\text{ s}$)、裂纹迅速扩展阶段 ($143.3 \sim 166.1\text{ s}$) 以及平稳损伤阶段 ($166.1 \sim 321.6\text{ s}$)。

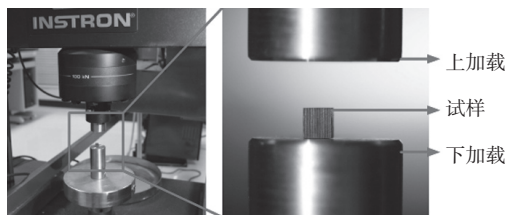


图 1 加载前试样

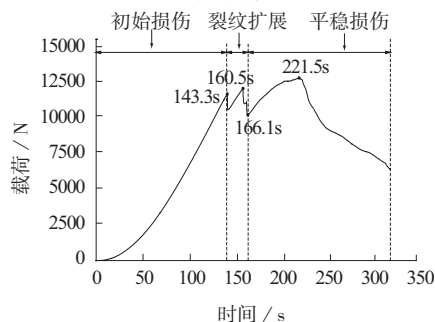


图 2 时间-载荷曲线

2.1 加载过程损伤演化分析

(1) 初始损伤阶段。

试样所载荷随时间线性增加, 此阶段试样的试验状态如图 3 所示, 试样表面无明显损伤, 高度由 6 mm 降为 5.93 mm , 宽度由 6 mm 增至 6.20 mm 。

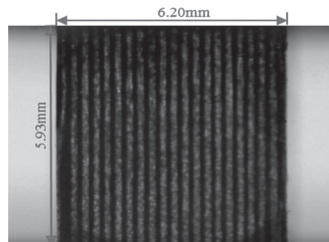
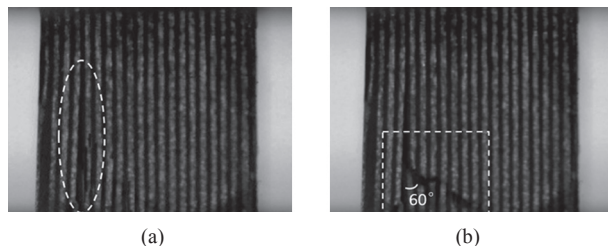


图 3 初始损伤阶段试样状态

(2) 裂纹迅速扩展阶段。

在 143.3 s 处载荷为 11293 N , 出现首次卸载。如图 4a 试样左侧产生沿加载方向分层裂纹, 随后产生与加载方向成 60° 夹角的纤维剪切断裂如图 4b 所示, 表现出了脆性材料属性。



a—分层裂纹; b—剪切裂纹

图 4 试样左侧裂纹扩展

实验中试样在与载荷法线方向成 60° 夹角处发生剪切失效。对于一般各向同性金属材料, 其断裂角为 45° , 这是因为其最大剪应力与加载方向成 45° 。

夹角,而对于碳纤维复合材料层合板,由于各方向的拉伸弹性模量等材料性能有所不同,即使最大剪应力方向与加载方向成 45° ,由于试样各方向的应力应变的比例关系不同,也会导致最大剪应力与剪应变方向不重合。

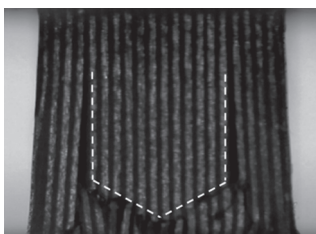


图5 裂纹迅速扩展阶段试样状态

在160.5 s处载荷为11 663 N,再次出现卸载,此时试样右侧产生与左侧相同的损伤状态,其破坏模式如图5所示,两侧纤维开始失稳变形,中心处有一个“箭头状”的区域,即为中心未变形区,此区域的纤维以及基体并未发生明显损伤;中心未变形区箭头两侧存在两个三角形的剪切变形区,此区域与中心区的交界处发生明显的纤维剪切变形。由于试样加工误差造成上下表面平行度不高,在加载过程中产生应力集中现象,导致左右两侧未同时产生分层和纤维剪切断裂损伤。

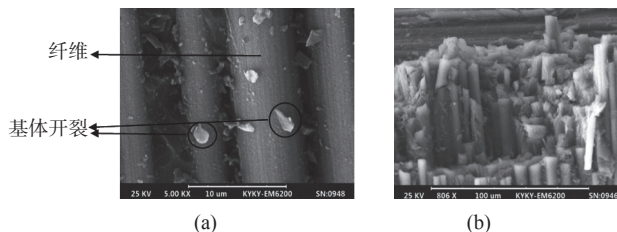
(3) 平稳损伤阶段。

试样两侧分层裂纹继续扩展,纤维承压发生失稳导致两侧纤维发生变形,充分发挥其拉伸性能,试样承受载荷增大,到221.5 s时两侧纤维与中间区域完全脱粘,中间成为主要承载部位,载荷达到峰值12 346 N。此时试样损伤状态如图6所示,主要发生失稳变形以及分层裂纹扩展。



图6 平稳损伤阶段试样破坏状态

为进一步确定试样的损伤模式,利用SEM观察分层界面以及纤维断面,如图7所示。图7a为分层断面处微观形貌,可以发现大量纤维-基体界面脱粘,局部有少量基体开裂现象,说明分层裂纹形成过程中以纤维-基体界面脱粘为主,伴随产生基体开裂损伤。图7b为剪切断裂处微观形貌,纤维断口齐整,发生了剪切失效。



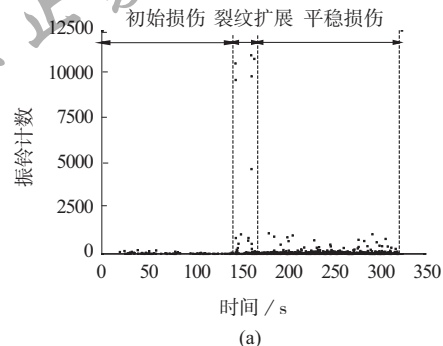
a—纤维-基体界面脱粘、基体开裂;b—纤维剪断

图7 裂纹迅速扩展阶段试样破坏断面SEM照片

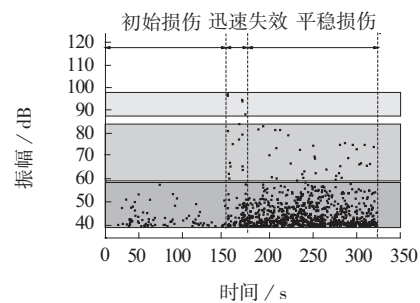
2.2 AE信号特征参数分析

图8a、图8b分别为加载过程中振铃计数以及振幅图,通过振铃计数可以用来表示损伤发生数量,振幅用来表征损伤发生强度,判断损伤类型。

从图8a中可以看出,初始阶段振铃计数均在250以下,振幅分布在40~58 dB,说明在加载过程中由于试样内部缺陷开始产生少量基体开裂以及纤维-基体界面脱粘损伤;在裂纹迅速扩展阶段,AE特征参数信号较第一阶段更加密集,振铃计数以及振幅均达到峰值;在平稳损伤阶段,振铃计数出现衰减,但仍有大量振幅信号。



(a)



(b)

a—振铃计数;b—振幅

图8 AE信号特征参数

通过图8b分析振幅随时间的分布规律,大致可以将振幅信号分为三类:

(1) 40~58 dB: 对应信号在三个阶段中均有分布,基体开裂以及纤维-基体界面脱粘在整个加载过程中一直伴随产生,因此,可以判断振幅范围为40~58 dB的AE信号应当是基体开裂以及纤维-

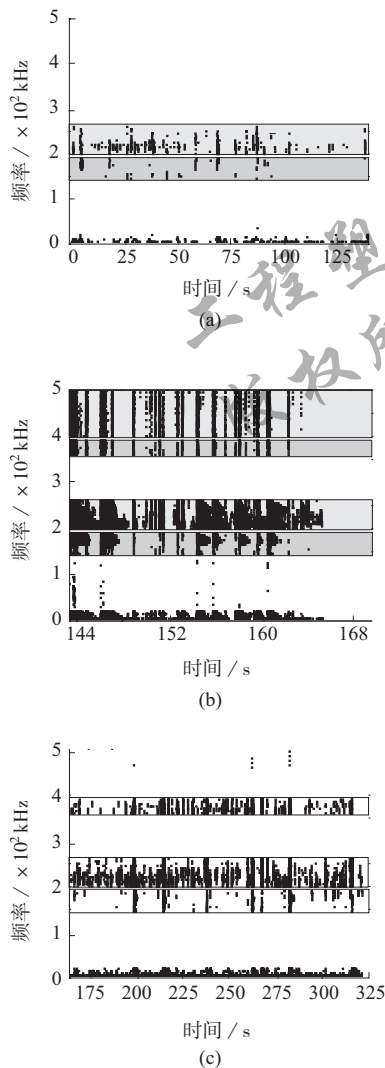
基体界面脱粘所激发的。

(2) 60 ~ 85 dB : 对应信号分布于二、三阶段,结合损伤过程可知,在二、三阶段产生的失稳变形对应 AE 信号振幅范围为 60 ~ 85 dB。

(3) 89 ~ 97 dB : 对应信号仅在第二阶段中出现,同其余两阶段相比,此阶段产生了纤维剪断,由此可以判断振幅范围为 89 ~ 97 dB 的 AE 信号应当是纤维剪断时所激发的。

2.3 AE 信号时频分析

AE 信号频率的阶段特征能够反映出其所携带的破坏信息^[11]。如图 9 所示,利用小波变换对三个损伤阶段 AE 波形信号进行时频分析,可以看出频率主要分为五类: 0 ~ 20 kHz, 145 ~ 190 kHz, 200 ~ 260 kHz, 360 ~ 390 kHz, 400 ~ 500 kHz。



a—初始损伤阶段; b—裂纹迅速扩展阶段; c—平稳损伤阶段

图 9 频率—时间图

(1) 0 ~ 20 kHz : 对应信号在三阶段中均有分

布,而碳纤维复合材料的损伤为高频信号^[6,12],因此认为频率为 0 ~ 20 kHz 的 AE 低频信号是由于试样承压过程中承载面与夹具的滑动摩擦产生。

(2) 145 ~ 260 kHz : 对应信号在三个阶段中均有分布,结合损伤阶段分析可知对应损伤类型为基体开裂与纤维—基体界面脱粘。其中频率分布于 200 ~ 260 kHz 的 AE 信号更为密集,由 SEM 破坏断面微观形貌分析可知,分层裂纹形成过程中以纤维—基体界面脱粘为主,伴随产生部分基体开裂损伤,因此,可以判断频率为 145 ~ 190 kHz 的 AE 信号与基体开裂有关,频率为 200 ~ 260 kHz 的 AE 信号与纤维—基体界面脱粘有关。

(3) 360 ~ 390 kHz : 对应信号分布在裂纹迅速扩展以及平稳损伤阶段,尤其在平稳损伤阶段同之前相比发生了明显的失稳变形,所以频率为 360 ~ 390 kHz 的 AE 信号与失稳变形有关。

(4) 400 ~ 500 kHz : 对应信号仅在裂纹迅速扩展阶段有大量信号分布,对应损伤过程可知纤维剪断只在此阶段产生,由此可知频率为 400 ~ 500 kHz 的 AE 信号是由纤维剪断所激发的。

综上分析,可知碳纤维复合材料面内压缩损伤主要有基体开裂、纤维—基体界面脱粘、失稳变形以及纤维剪断。不同损伤类型对应 AE 信号特征如表 1 所示。

表 1 不同损伤类型 AE 特征参数

伤类型	AE 振幅 / dB	频率 / kHz
基体开裂	40 ~ 58	145 ~ 190
纤维—基体界面脱粘	40 ~ 58	200 ~ 260
失稳变形	60 ~ 85	360 ~ 390
剪切断裂	89 ~ 97	400 ~ 500

3 结论

(1) AE 信号特征可表征碳纤维复合材料层合板面内压缩损伤过程,根据时间—载荷曲线,损伤过程主要分为三个阶段: 初始损伤阶段主要有少量基体开裂以及纤维—基体界面脱粘; 裂纹迅速扩展阶段开始出现纤维剪断及失稳变形; 平稳损伤阶段主要发生失稳变形以及分层裂纹扩展。上述损伤现象经 SEM 分析得到有效证实。

(2) 通过 AE 特征参数分析,不同损伤类型其振幅特征不同: 基体开裂及纤维—基体界面脱粘对应振幅分布在 40 ~ 58 dB,失稳变形振幅分布在 60 ~ 85 dB,纤维剪切断裂分布在 89 ~ 97 dB。

(3) 对 AE 信号波形进行频率分析表明: 基体开裂对应频率为 145 ~ 190 kHz,纤维—基体界面脱

粘信号频率为 200 ~ 260 kHz,失稳变形信号频率为 360 ~ 390 kHz,纤维剪切断裂信号频率为 400 ~ 500 kHz。

(4) 同拉伸、疲劳试验相比,碳纤维复合材料层合板面内压缩损伤阶段特征明显,AE 信号易于区分,为复合材料的损伤模式识别提供了方法和依据。

参考文献

- [1] 欧阳浩,石健,唐通.不同碳钢在塑性变形与裂纹扩展中的声发射研究[J].兵器材料科学与工程,2017,40(1):93-97.
Ouyang Hao, Shi Jian, Tang Tong. Acoustic emission characteristic of different carbon steel during plastic deformation and crack propagation[J]. Ordnance Material Science and Engineering, 2017, 40(1):93-97.
- [2] 陈霞,肖迎春.含冲击损伤复合材料层压板压缩破坏机制的声发射特性研究[J].实验力学,2013,28(2):187-192.
Chen Xia, Xiao Yingchun. Experimental investigation on compression failure mechanism of composite laminates with impact damage based on acoustic emission[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2013, 28(2):187-192.
- [3] 于金涛,丁明理.复合材料声发射信号传播特性试验研究[J].电机与控制学报,2012,16(8):107-112.
Yu Jintao, Ding Mingli. Experimental research for propagation of acoustic emission signals across composites[J]. Electric Machines and Control, 2012, 16(8):107-112.
- [4] 刘宏月,梁大开,韩晓林,等.基于模量/应变波耦合特性的 FBG 碳纤维增强塑料复合材料拉伸断裂监测[J].复合材料学报,2014,31(1):26-32.
Liu Hongyue, Liang Dakai, Han Xiaolin, et al. FBG fracture monitoring for CFRP based on coupling characteristic of modulus / strain wave[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2014, 31(1):26-32.
- [5] 郭勇,李大纲,陈玉霞,等.声发射在纤维增强聚合物基复合材料中的应用进展[J].工程塑料应用,2013,41(4):107-110.
Guo Yong, Li Dagang, Chen Yuxia, et al. Application progress of AE in fiber reinforced polymer matrix composites[J]. Engineering Plastics Application, 2013, 41(4):107-110.
- [6] Sung-choong, Tae-Won kim. High strain-rate failure in carbon / Kevlar hybrid woven composites via a novel SHPB-AE coupled test[J]. Composites PartB, 2016, 97:317-328.
- [7] 黄频波,丁鹏,李斌,等.碳纤维复合材料拉伸损伤声发射信号 MC-ApEn 分析[J].振动与冲击,2014,33(14):132-136.
Huang Pinbo, Ding Peng, Li Bin, et al. MC-ApEn analysis of acoustic emission signals of carbon fiber composite materials during tensile damage[J]. Journal of Vibration and Shock, 2014, 33(14):132-136.
- [8] 杨璧玲,张同华,张慧萍,等.基于声发射信号模式识别的 UHMWPE/LDPE 复合材料损伤机制分析[J].复合材料学报,2008,25(2):35-40.
Yang Biling, Zhang Tonghua, Zhang Huiping, et al. Damage mechanisms analysis of UHMWPE / LDPE composites based on the use of pattern recognition techniques on acoustic emission signals[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2008, 25(2):35-40.
- [9] 王从科,李金鹿,张霞,等. PE 纤维胶束拉伸损伤过程的声发射特性研究[J].工程塑料应用,2010(1):55-58.
Wang Congke, Li Jinlu, Zhang Xia, et al. Study on acoustic emission characteristics of tensile damage processes in PE fiber[J]. Engineering Plastics Application, 2010(1):55-58.
- [10] 牛学宝,张程煜,乔生儒,等.三维针刺 C/C 复合材料面内压缩失效行为研究[J].材料导报,2011,25(7):103-106.
Niu Xuebao, Zhang Chenyu, Qiao Shengru, et al. Study on the in-plane compressive failure behavior of 3D needled C / C composites[J]. Materials Review, 2011, 25(7):103-106.
- [11] 纪洪广,刘翔宇,曾鹏,等.高强混凝土单轴压缩声发射频率特征试验研究[J].应用声学,2016,35(3):248-254.
Ji Hongguang, Liu Xiangyu, Zeng Peng, et al. Experimental studies of frequency characteristics of the acoustic emission of the high-strength concrete under the uniaxial compression process[J]. Journal of Applied Acoustics, 2016, 35(3):248-254.
- [12] Boominathan R, Arumugam V, Santulli C, et al. Acoustic emission characterization of the temperature effect on falling weight impact damage in carbon / epoxy laminates[J]. Composites:Part B, 2014, 56:591-598.

天津石化聚丙烯新品填补国内热成型空白

20 t 国内首创高挺度热成型聚丙烯专用料 PPR-EM01 在天津石化烯烃部成功下线,发往下游客户进入试料阶段。经检测,各项技术指标达到预期要求,能够满足下游用户成系列开发生产的需要。该产品填补了国内同类产品的空白,优化了天津石化聚烯烃产品结构,更有利于市场的开发和拓展。高挺度热成型吸塑聚丙烯包装膜用于食品包装、药品包装等领域,市场需求巨大。目前国内热成型专用料主要依靠进口,国内少数加工企业采用两三种聚丙烯树脂按一定比例混配生产,但加工困难,质量波动大。天津石化烯烃部和研究院合作对市场进行研判后,结合装置工艺特点,认为开

发高挺度热成型专用料新产品,丰富无规系列产品种类,利于开发新用户并拓展市场,前景十分乐观。于是产研携手,开始进行产品升级改进攻关工作。

他们利用北京化工研究院最新研究的特殊催化剂,加入了自行研究的高性能添加剂,成功开发出无规共聚聚丙烯 PPR-EM01 专用料。该产品具有良好的光学性能,树脂刚性高,保证了下游厂家制品的挺度,完全能满足目前国内下游用户对该类专用料的需求。

天津石化成功开发的无规共聚聚丙烯 PPR-EM01 新产品与通用料相比,价格高出近 1 000 元,牌号优势明显,市场前景广阔,即将成为新的效益增长点。(工程塑料网)