



磁浮车辆PET夹层结构损伤机理 与剩余性能研究

王家恒^{1,2}

(1. 中车株洲电力机车有限公司, 湖南 株洲 412001;

2. 磁浮交通车辆系统集成湖南省重点实验室, 湖南 株洲 412001)

摘要: 针对磁浮车辆轻量化结构中PET泡沫夹层复合材料在冰雹、飞石等低速冲击下易产生目视不可见损伤的问题, 文章采用落锤冲击试验系统研究了铝合金面板、PET泡沫芯材及完整Al-PET-Al夹层结构在低速冲击下的损伤行为; 并结合声发射技术实时监测损伤过程, 并采用三维光学扫描系统(ATOS Core)对冲击后损伤进行形貌表征。研究表明: 铝合金面板与PET泡沫芯材的声发射信号特征分别在50~250 kHz和50~200 kHz频段内集中, 累计计数与累计能量均随冲击能量增加显著上升; 冲头直径减小会显著加剧结构的侵入损伤; 声发射参数与光学扫描所得损伤形貌参数具有良好一致性, 验证了声发射监测的有效性; 基于局部切除与DP460胶接修复的方法可有效恢复结构剩余性能。其中, 未穿透冲击试样的修复后剩余峰值载荷比恢复至98.5%, 穿透冲击试样恢复至72.24%。该研究为PET泡沫夹层复合材料在磁浮车辆等轨道交通装备中的安全应用、损伤检测与修复维护提供了试验依据与技术支持。

关键词: PET泡沫; 夹层复合材料; 低速冲击; 损伤检测; 声发射; 光学扫描; 修复性能

中图分类号: U266.4; U237

文献标志码: A

文章编号: 1000-128X(2026)02-0163-12

0 引言

夹层复合材料结构以其极高的比刚度、优异的隔音、隔热性能以及出色的设计灵活性, 成为现代航空航天^[1-2]、高速轨道交通^[3-4]等领域轻量化设计的关键材料。传统的芯材如铝蜂窝、NOMEX蜂窝以及高性能PMI泡沫已被广泛应用^[5-6]。其中, PMI泡沫具有密度小、强度高、耐高温、抗蠕变等优点, 但高昂的成本限制了其在成本敏感的民用领域及轨道交通市场的应用, 其应用主要集中在航空航天等对性能要求高、成本不敏感的高新技术领域^[7-8]。

磁浮车辆为实现高速、低能耗运行, 对车体结构的轻量化提出了极高要求。PET泡沫夹层结构因其优异的比刚度、良好的抗冲击性、耐疲劳性能和较低的

成本, 已逐步应用于磁浮车辆的多部位次承载或非承载结构中^[9]。例如, 在车顶与侧墙中, 采用PET夹层板可有效降低整体质量, 同时满足隔音、隔热及防火要求。其较好的抗弯刚度性能有助于维持气动外形, 减少高速运行时的风阻与振动响应; 在设备舱或客室地板结构中, PET夹层结构既能承受一定的分布载荷, 又具备良好的减振与声学性能, 能提升乘坐舒适性。侧部裙板, PET夹层结构具备一定的抗冲击能力以抵御运行中可能遇到的飞石、冰雹等外部冲击, 同时需满足轻量化以降低悬浮能耗^[10]。

与航空航天等领域常用的PMI泡沫相比, PET泡沫在保持较高力学性能的同时, 更具成本优势与环保特性, 更适合在规模化、成本敏感的轨道交通装备中推广。然而, 磁浮车辆运行环境复杂, 常面临低速冲击威胁(如冰雹、碎石飞溅等), 易导致PET夹层结构

基金项目: 中央引导地方科技发展资金项目(2024ZYC0013); 湖南省科技创新计划项目(2024JK2037)

通信作者: 王家恒, 男, 高级工程师, 主要从事轨道交通磁浮车辆总体方面研究; E-mail: 743062190@qq.com

引用格式: 王家恒. 磁浮车辆PET夹层结构损伤机理与剩余性能研究[J]. 机车电传动, 2026(2): 163-174. DOI:10.13890/j.issn.1000-128X.2026.02.018.

Citation: WANG Jiaheng. Study on damage mechanisms and residual mechanical performance of PET sandwich structures for maglev vehicles[J]. Electric drive for locomotives, 2026(2): 163-174. DOI:10.13890/j.issn.1000-128X.2026.02.018.

出现目视不可见损伤，进而影响其长期承载安全^[11-14]。因此，深入研究其损伤机理、检测方法与修复策略，对保障磁浮车辆结构完整性、运营安全与维护经济性具有重要工程意义。

1 低速冲击过程中的损伤检测

1.1 材料与试样制备

本研究低速冲击试验参考 ASTM D7136/D7136M-25 《纤维增强聚合物基复合材料落锤冲击损伤阻抗测

试方法》进行，该标准适用于夹层结构的低速冲击损伤测试，能够有效模拟冰雹、飞石等外来物冲击工况。试验机采用 INSTRON/9250 HV 落锤冲击系统，夹具设计及试样支撑方式依据标准要求执行，以确保冲击能量传递与实际服役条件相符。

试验所用铝合金面板为 5754-H24，PET 泡沫芯材牌号为 S110，密度为 150 kg/m³，厚度为 30 mm，该泡沫为闭孔结构，具有各向同性的力学性能；夹层结构采用环氧结构胶粘接，修复采用 DP460 胶粘剂，其性能参数如表 1 所示。

表 1 原材料力学性能

Table 1 Mechanical properties of raw materials

材料	规格型号	密度/(kg·m ⁻³)	厚度/mm	弹性模量/GPa	屈服强度/MPa	压缩强度/MPa	备注
铝合金面板	5754-H24	—	1.0/1.5	70	100	—	供货数据
PET 泡沫芯	S110	150	30	0.15 (压缩模量)	—	3.5	测试值
结构胶	环氧胶	—	—	2.8 (剪切模量)	—	—	夹层制备
修复胶	DP460	—	—	2.5 (剪切模量)	—	—	用于修复

试验参数的选取基于磁浮车辆实际运行中常见的低速冲击威胁及典型车体夹层结构特征。冲击能量 (15 ~ 150 J) 覆盖了冰雹、飞石等典型异物的动能范围，用以模拟从表面凹坑到完全侵彻的损伤演化过程。冲头直径分别设定为 20 mm 与 10 mm，以对比大面积分布式冲击 (如冰雹群) 与局部集中冲击 (如飞石) 对损伤形貌与侵彻行为的影响。面板采用厚度为 1 mm 与 1.5 mm 的 5754-H24 铝合金，代表车辆次承载结构中常用的薄板规格；芯层选用密度 150 kg/m³、厚度 30 mm 的 PET 泡沫，为该类轻量化夹层结构在轨道交通领域的典型配置。上述工况设计旨在系统模拟实际服役条件，揭示 PET 夹层结构在不同冲击场景下的

损伤机制，并为后续修复与剩余性能评估提供试验依据。

本次试验夹层材料总质量为 17.55 kg，冲击能量通过改变冲击器的高度来调节。冲击过程中采用专用夹具夹持，该夹具由上下 2 个夹块组成，夹块中间镂空，通过 6 个带有弹簧垫圈的螺栓进行连接和夹紧，下夹块通过螺栓与 INSTRON/9250HV 落锤测试机底座进行固定，如图 1 所示。

试验涵盖了对 PET 夹层材料的单独铝合金面板、PET 泡沫芯层以及完整的 PET 夹层结构的冲击，以获得各组份材料的损伤响应特征。试样信息及冲击参数见表 2。

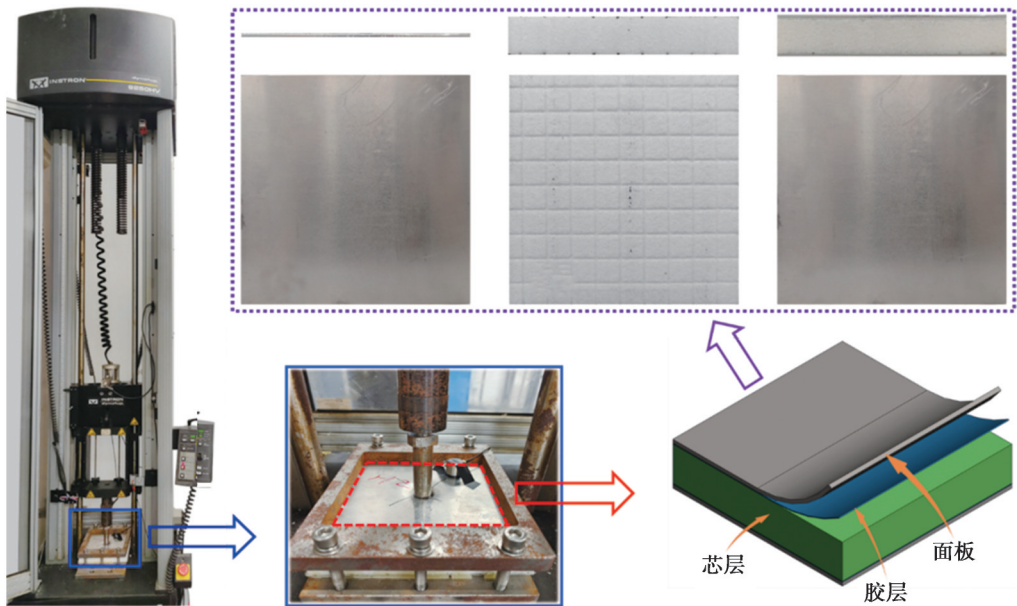


图 1 PET 夹层复合材料低速冲击试验示意

Fig. 1 Schematic diagram of low-velocity impact tests on PET sandwich composites

表2 PET夹层复合材料低速冲击试验参数

Table 2 Low-velocity impact test parameters for PET sandwich composites

试样编号	试样材料	试样尺寸/mm	冲头直径/mm	冲击能量/J
Al-1-60	5754 铝合金	190×190×1	20	60
Al-1-100	5754 铝合金	190×190×1	20	100
Al-1.5-100	5754 铝合金	190×190×1.5	20	100
Al-1.5-125	5754 铝合金	190×190×1.5	20	125
Al-1.5-150	5754 铝合金	190×190×1.5	20	150
PET-15	PET 泡沫芯层	190×190×30	20	15
PET-20	PET 泡沫芯层	190×190×30	20	20
PET-25	PET 泡沫芯层	190×190×30	20	25
PET-35	PET 泡沫芯层	190×190×30	20	35
Sandwich32-20-100	Al-PET-Al	190×190×32	20	100
Sandwich33-20-125	Al-PET-Al	190×190×33	20	125
Sandwich33-10-125	Al-PET-Al	190×190×33	10	125

1.2 基于声发射的夹层结构损伤监测

1.2.1 5754 铝合金面板试验

5754 铝合金面板损伤试验^[15]失效结果如图 2 所示。从图 2 可知，1 mm 厚的 5754 铝合金面板在 60 J 能量冲击下只发生了塑性变形，当冲击能量为 100 J 时面板被球头直接冲透，试样发生破裂。1.5 mm 厚的 5754 铝合金面板在 100 J 能量冲击下刚好出现破裂，在 125 J 和 150 J 能量冲击下则完全被穿透，其中，150 J 能量冲击下落锤冲击头的台阶与面板发生了直接接触，导致损伤进一步扩大。

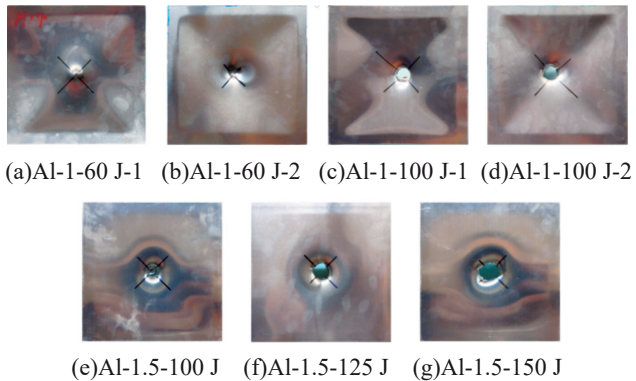


图2 5754 铝合金面板低速冲击试验损伤失效情况

Fig. 2 Damage characteristics of 5754 aluminum alloy face sheet specimen after low-velocity impact

铝合金面板低速冲击过程中典型的力-时间曲线与声发射信号随时间的变化波形如图 3 所示。图 3 给出了 1 mm 厚 5754 铝合金面板在 100 J 能量冲击下的试验结果，同时给出了声发射累计计数和累计能量随时间的变化过程。

由图 3 可知，铝板冲击峰值载荷约为 6 500 N。当冲头接触铝合金面板时（载荷上升起始），即有声发射信号输出；在接触铝板的瞬间，能量之间的转换导致铝板发生冲击振动，释放的弹性波同样产生声发射信号。此后，铝合金面板在冲击器作用下发生变形，

由于下方无支撑，铝合金面板首先发生弹性变形，无声发射信号产生，直到冲击载荷到达峰值后瞬间卸载，铝合金面板从塑性变形到破裂失效。分析声发射信号也可以发现，在峰值载荷发生突变的时候，产生了较大幅值的声发射波形。

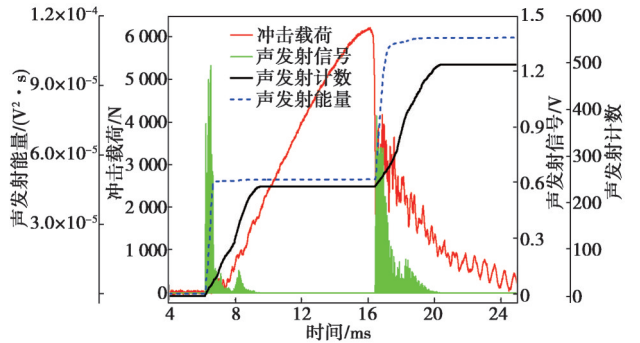


图3 铝合金面板低速冲击力-时间曲线与声发射信号波形

Fig. 3 Impact force-time curve and corresponding AE signal waveform for aluminum-alloy face sheet under low-velocity impact

将表 2 试样（铝合金面板）对不同冲击能量和不同铝板厚度获得的声发射累计计数和累计能量进行统计，结果见表 3。

表3 铝合金面板低速冲击声发射累计计数和累计能量

Table 3 Cumulative AE counts and cumulative AE energy for aluminum-alloy face sheet under low-velocity impact

参数项目	试件编号				
	Al-1-60	Al-1-100	Al-1.5-100	Al-1.5-125	Al-1.5-150
累计计数	407	496	536	1 355	2 225
累计能量/ (V ² s)	5.29×10 ⁻⁵	1.11×10 ⁻⁴	1.35×10 ⁻⁴	4.60×10 ⁻⁴	8.02×10 ⁻⁴

从表 3 可以看出，对于板厚相同的铝合金面板，随着冲击能量的增加，声发射累计计数和累计能量都有明显增加的趋势。结合图 2 不同试样的损伤失效结果，可以发现声发射累计计数和累计能量在低能量冲击下

的值都比较小，铝合金面板的损伤程度也相对较小，在高能量冲击下会成倍增加，这和铝合金面板的损伤失效程度的变化是一致的。

在本研究中，采用声发射信号每次振铃计数内的信号幅值和峰值频率对声发射信号进行分析，得到的铝合金面板低速冲击下声发射特征如图4所示，其中150 J冲击声发射信号特征与125 J冲击相似，不再赘

述。从图4可以看出，5754铝合金面板低速冲击时声发射信号主要集中在50~250 kHz，同时含有少量400 kHz和500 kHz的信号，信号幅值集中在55~100 dB。虽然试验对两种板厚材料同时进行了不同能量（60 J，100J，125 J，150 J）冲击，但5754铝合金面板的声发射信号特征相似度较高，即铝合金面板损伤模式不受面板厚度和冲击能量的影响。

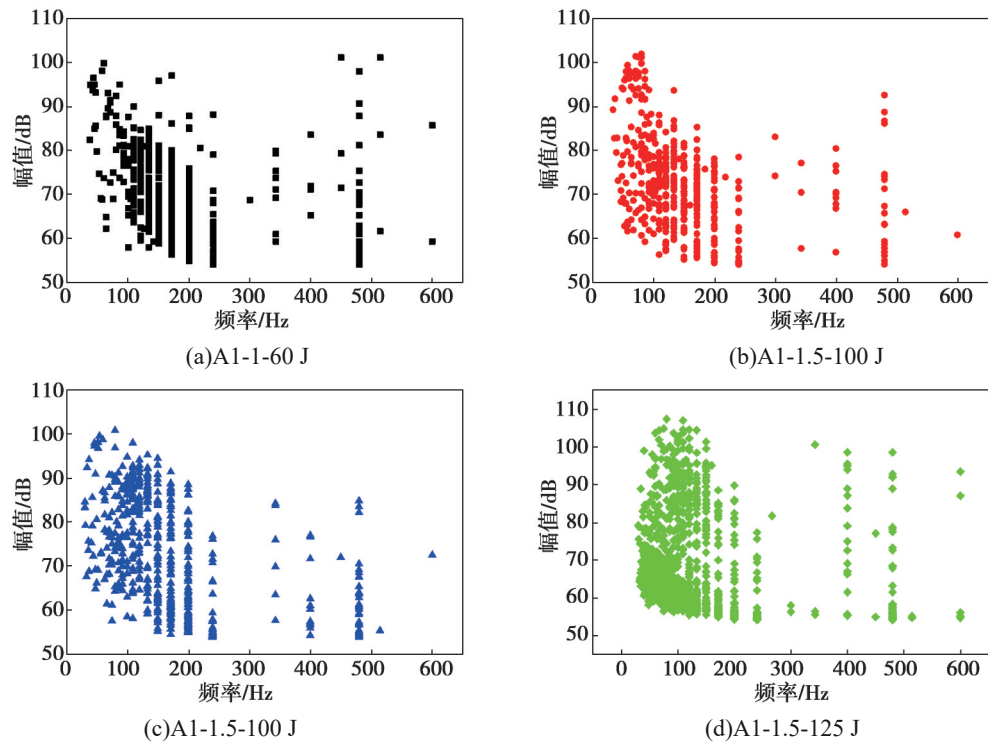


图4 铝合金面板低速冲击声发射信号幅值-频率分布特征图

Fig. 4 Amplitude-frequency distribution of AE signals for aluminum-alloy face sheet under low-velocity impact

1.2.2 PET 泡沫芯层试验

PET 芯层损伤试验^[15]失效结果如图5所示。由图5可以看出，PET 泡沫芯层在15 J和20 J能量冲击下表面只出现了凹坑，当能量达到25 J时被完全冲透，发生破裂；当能量达到35 J时，PET 泡沫芯背面被完全冲碎。

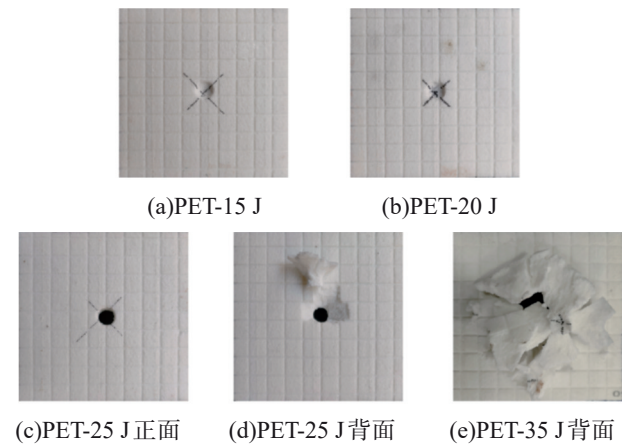


图5 PET 泡沫芯层低速冲击试验损伤失效情况

Fig. 5 Damage characteristics of PET foam core specimen under low-velocity impact

PET 泡沫芯层低速冲击过程中典型的力-时间曲线与声发射信号随时间的变化波形如图6所示，该图为PET 泡沫芯层在25 J能量冲击下的试验结果。由图6可知，密度为150 kg/m³且厚度为30 mm的PET 泡沫芯层冲击峰值载荷约为1 400 N，当冲头接触PET 泡沫芯层时同冲头接触铝合金面板一样发生冲击振动而引起变形，此时，声发射传感器采集到形变释放的弹性波。PET 泡沫在整个低速冲击过程中持续有声发射信号产

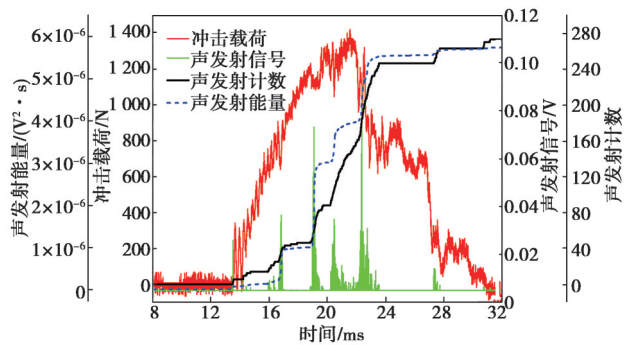


图6 PET 泡沫芯层低速冲击力-时间曲线与声发射信号波形

Fig. 6 Impact force-time curve and corresponding AE signal waveform for PET foam core under low-velocity impact

生,说明在整个冲击过程中PET泡沫可能出现压缩失效,直到冲击载荷到达峰值,PET泡沫发生破碎并完全被冲透。PET泡沫芯层的声发射累计计数和累计能量随时间变化的规律具有很强的相关性,从PET泡沫芯层的载荷-位移曲线也可以看出力载荷的下降会释放声发射信号,累计计数和累计能量急剧增加,说明PET泡沫发生了损伤和失效。

表4为PET泡沫的声发射累计计数和累计能量。从表4可以看出,随着冲击能量的增加,PET泡沫芯层的声发射累计计数和累计能量同样具有明显增加的趋势,只是由于冲击能量间隔较小,20 J和25 J冲击的累计计

数相近,20 J和15 J冲击的累计能量相比略有下降。结合图5不同试样的损伤失效结果可以发现,声发射累计计数和累计能量同样能在一定程度上表征PET泡沫芯层低速冲击下的损伤失效程度。特征图如图7。

表4 PET泡沫芯层低速冲击声发射累计计数和累计能量
Table 4 Cumulative AE counts and cumulative AE energy for PET foam core under low-velocity impact

参数项目	试件编号			
	PET-15	PET-20	PET-25	PET-35
累计计数	190	282	277	378
累计能量/(V ² ·s)	3.12×10 ⁻⁶	2.57×10 ⁻⁶	5.80×10 ⁻⁶	6.57×10 ⁻⁶

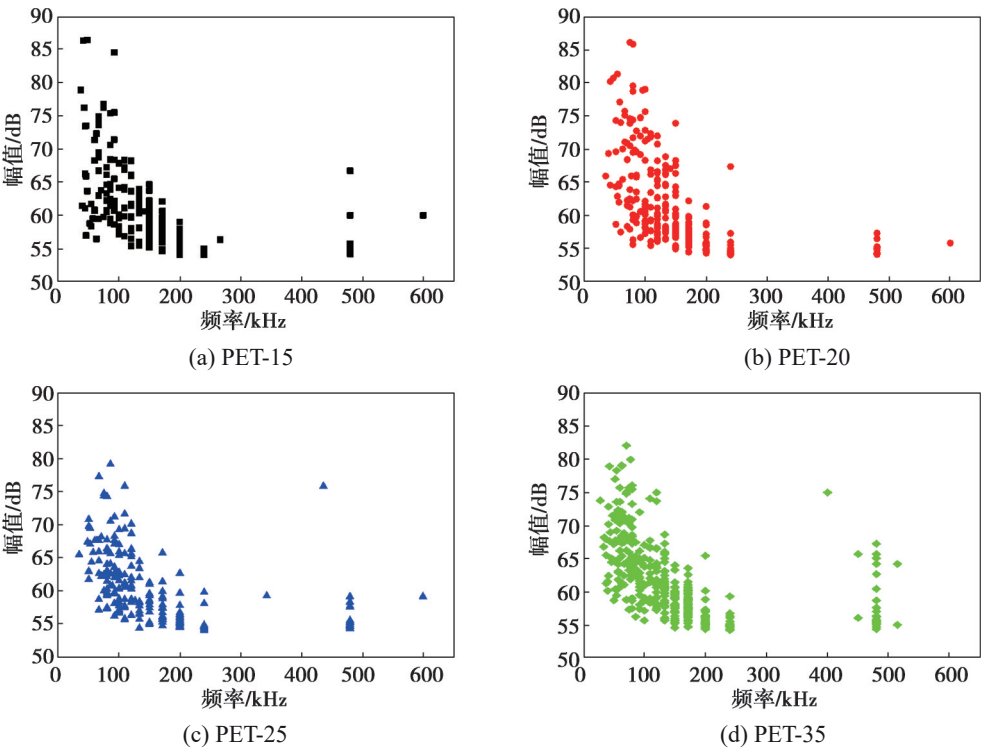


图7 PET泡沫低速冲击声发射信号幅值-频率分布特征图

Fig. 7 Amplitude-frequency distribution of AE signals for PET foam under low-velocity impact

研究团队采用声发射信号每次振铃计数内的信号幅值和峰值频率对PET泡沫的声发射信号特征进行分析。从图7可以看出,PET泡沫芯层低速冲击时声发射信号主要集中在50~200 kHz,信号幅值集中在55~80 dB,此外含有少量500 kHz左右的高频信号,考虑到试验误差等,可以认为PET泡沫芯层的失效主要体现在产生低频低幅值声发射信号。虽然低速冲击试验中进行了不同能量(15 J,20 J,25 J,35 J)的冲击,PET泡沫芯层的声发射信号特征相似度较高,即PET泡沫芯层损伤模式不受冲击能量的影响。

1.2.3 PET夹层结构试验

PET夹层板失效试验^[15]结果如图8所示。从图8可以看出,1 mm面板的PET夹层复合结构在100 J能量冲击下表面只出现了凹坑;1.5 mm面板的PET夹层板在125 J能量冲击下表面同样只出现了凹坑,为使PET夹层板被完全冲透,在能量保持125 J的情况下,采用了

10 mm的半球头冲头对1.5 mm面板的PET夹层复合结构进行冲击,成功实现了穿透,如图8(d)所示。

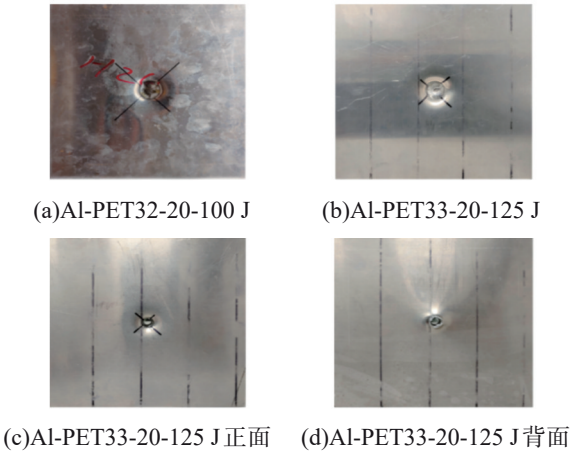


图8 PET夹层结构低速冲击试验损伤失效情况

Fig. 8 Damage characteristics of PET sandwich structure specimen under low-velocity impact

PET 夹层结构低速冲击过程中由于选用不同直径的球形冲击头,其力-时间曲线和声发射波形也有所区别。其中,面板厚度为 1.5 mm 的 PET 夹层结构在直径为 20 mm 的锤头、冲击能量为 125 J 情况下,其力-时间曲线与声发射信号波形如图 9 所示。

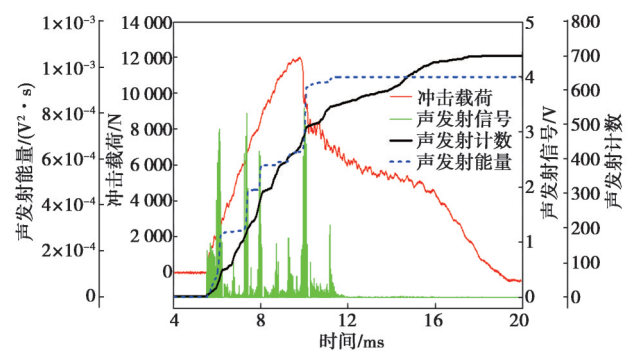


图 9 PET 夹层结构在 20 mm 锤头冲击下的力-时间曲线与声发射信号波形

Fig. 9 Impact force-time curve and corresponding AE signal waveform for PET sandwich structure under impact with a 20 mm-diameter impactor

从图 9 可知, PET 夹层结构在 20 mm 锤头低速冲击下峰值载荷约为 12 000 N,当冲头接触铝面板时(载荷上升起始),即有声发射信号输出。在接触铝板的瞬间,能量之间的转换导致铝面板发生冲击振动,释放的弹性波同样产生声发射信号。此后,随着冲击载荷的增加,铝合金面板在冲击器作用下发生塑性变形,铝合金内部夹杂物的塑性流动和 PET 泡沫芯的压缩失效持续产生声发射,直到冲击载荷到达峰值后瞬间卸载,铝合金面板发生破裂失效。由于在 20 mm 冲击器作用下 PET 泡沫夹层结构没有被侵彻,冲击器发生了回弹,在冲击后期回弹过程中主要是弹性变形,不再有声发射信号产生。

1.5 mm 面板的 PET 夹层结构在直径为 10 mm 冲击锤头、冲击能量为 125 J 情况下的力-时间曲线与声发射信号波形特征如图 10 所示。由图 10 可知, PET 夹层结构在 10 mm 锤头低速冲击下的峰值载荷约为 6 000 N,当冲头接触铝面板时即有声发射信号输出,原因同样是在低速冲击过程中能量之间的转换导致铝面板发生冲击振动,释放的弹性波产生声发射信号。此后,随着冲击载荷的增加,持续有声发射信号产生,说明在整个冲击过程中除了铝合金面板塑性变形失效还有 PET 泡沫的压缩失效,直到冲击载荷到达峰值,铝面板被冲破,瞬间释放弹性波。与采用直径为 20 mm 的冲击锤头相比,采用直径为 10 mm 的锤头时发生了冲透,力-时间曲线出现了第 2 个峰值,冲击载荷接近 5 500 N,在冲击锤头冲破 PET 夹层结构上表面铝面板到冲破下表面铝面板的过程中,持续有声发射信号产生,此过程主要是 PET 泡沫的压溃失效和裂纹扩展,并造成宏观分层失效。图 10 中,声发射累计计数和累计能

量随时间变化的规律同样具有一定的相关性,且随着 PET 夹层结构损伤的增加不断累积。

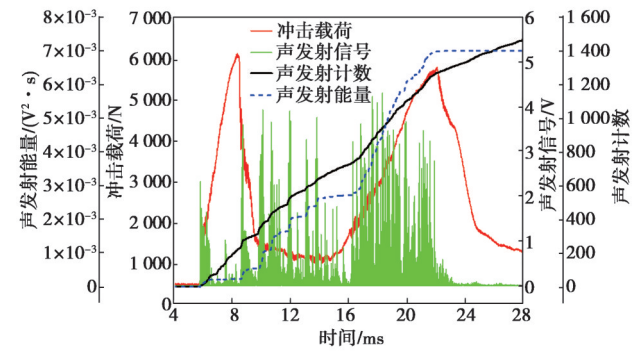


图 10 PET 夹层结构在 10 mm 锤头冲击下的力-时间曲线与声发射信号波形

Fig. 10 Impact force-time curve and corresponding AE signal waveform for PET sandwich structure under impact with a 10 mm-diameter impactor

表 5 为 PET 夹层结构在不同冲击能量和铝板厚度下获得的声发射累计计数和累计能量。

表 5 PET 夹层结构低速冲击声发射累计计数和累计能量
Table 5 Cumulative AE counts and cumulative AE energy for PET sandwich structure under low-velocity impact

参数项目	试件编号		
	Sandwich32-20-100	Sandwich33-20-125	Sandwich33-10-125
累计计数	718	749	1 523
累计能量/(V ² ·s)	1.35×10 ⁻⁴	9.59×10 ⁻⁴	0.007

从表 5 可以看出,试样 Sandwich32-20-100 和试样 Sandwich33-20-125 声发射累计计数接近,但后者的累计能量(9.59×10⁻⁴ V²·s)明显高于前者(1.35×10⁻⁴ V²·s)。对比试样 Sandwich33-20-125 (20 J) 和试样 Sandwich33-10-125 (10 J) 可知,在面板厚度相同的情况下,采用较低冲击能量(10 J)的试件反而表现出更高的累计计数和更高的累计能量,这可能与低速冲击下的损伤模式转变有关。

采用声发射信号每次振铃计数内的信号幅值和峰值频率对 PET 夹层结构的声发射信号进行分析,如图 11。PET 夹层结构低速冲击时声发射信号主要集中在 50~250 kHz 之间,信号幅值主要集中在 55~115 dB 之间;此外,同样含有 350~600 kHz 的高频信号,幅值同样在 55~110 dB 之间。PET 夹层结构的冲击失效主要包括铝合金面板失效、胶粘剂失效、胶粘界面失效和 PET 泡沫芯层失效。综合图 4、图 7 和图 11 可以发现, PET 夹层板的损伤声发射特征近似为铝合金面板和 PET 泡沫芯层损伤声发射特征的组合,如图 11 (d)所示,其中部分缺失的特征可能是由胶粘剂失效和胶粘界面失效产生的。此外,从图 11 同样可以发现 PET 夹层结构在不同能量下的低速冲击声发射信号特征相似度较高,即 PET 夹层结构损伤模式受冲击能量的影响较小。

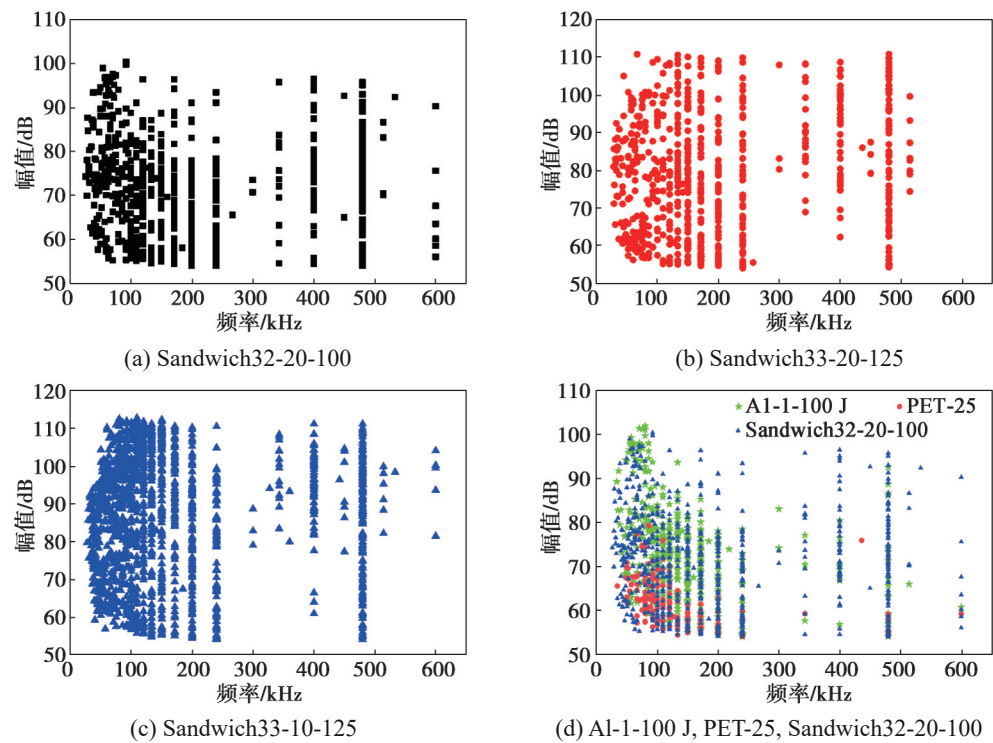


图 11 PET 夹层结构低速冲击声发射信号幅值-频率分布特征图

Fig. 11 Amplitude-frequency distribution of AE signals for PET sandwich structure under low-velocity impact

1.3 基于光学扫描的损伤检测

低速冲击载荷在 PET 夹层复合材料表面会产生一个圆形冲击凹坑（永久变形），本研究通过使用三维光学测量系统（ATOS Core,GOM GmbH of Germany）测量 PET 夹层复合材料低速冲击凹坑的特征参数以评估损伤程度。在 PET 夹层结构的三维扫描成像过程中，首先在冲击后的 PET 夹层结构表面喷涂显像剂（显像剂可以抑制金属的反光和实现更高精度的成像），然后利用 GOM SCAN 软件对 PET 夹层结构进行三维光学扫描，其试验装置及试验过程如图 12 所示。

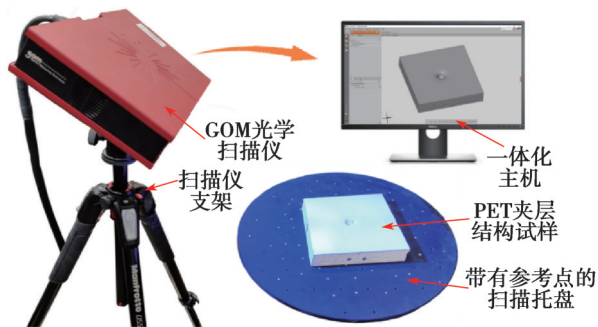


图 12 三维光学扫描变形检测试验装置

Fig. 12 Test setup for deformation detection by 3D optical scanning

在本研究中，研究团队对 PET 夹层结构的光学扫描结果采用文献中常用的 2 个参数来描述其低速冲击损伤程度，其中最大侵彻深度（maximum penetration depth, MPD）是指冲击载荷给 PET 夹层结构造成的永久变形凹坑的最大深度，开口宽度（open width, OW）是指冲击损伤凹坑区域的最大宽度，如图 13 所示。本

研究中采用了 0.5 mm 的阈值线确定开口宽度（OW），以过滤试验测量中的差异。对于铝合金面板被击穿的 PET 夹层结构，最大侵彻深度（MPD）基本反映冲击器的最终位移，是衡量铝合金面板和 PET 芯层损伤程度的关键参数。如果冲击器同时穿透了 PET 夹层结构的上下层铝合金面板，最大侵彻深度（MPD）即为 PET 夹层结构的厚度，因此只需要评估上下层铝合金面板的开口宽度（OW），如图 14 所示。

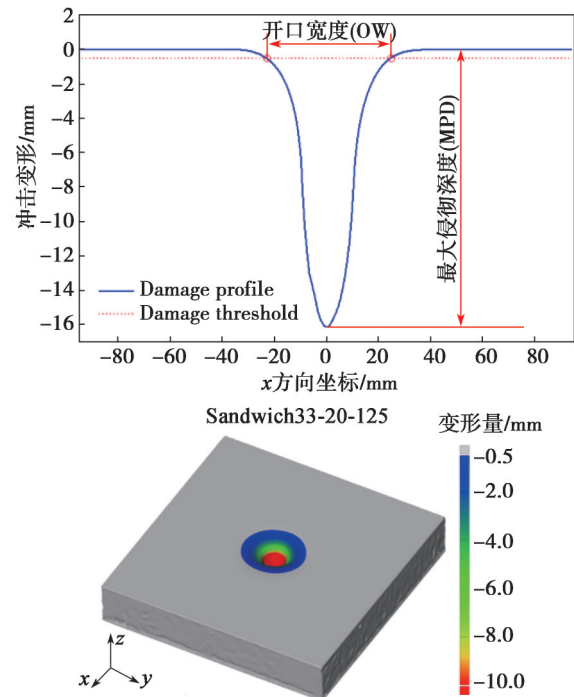


图 13 低速冲击区域最大侵彻深度和开口宽度的提取

Fig. 13 Extraction of maximum penetration depth and opening width in low-velocity impact region

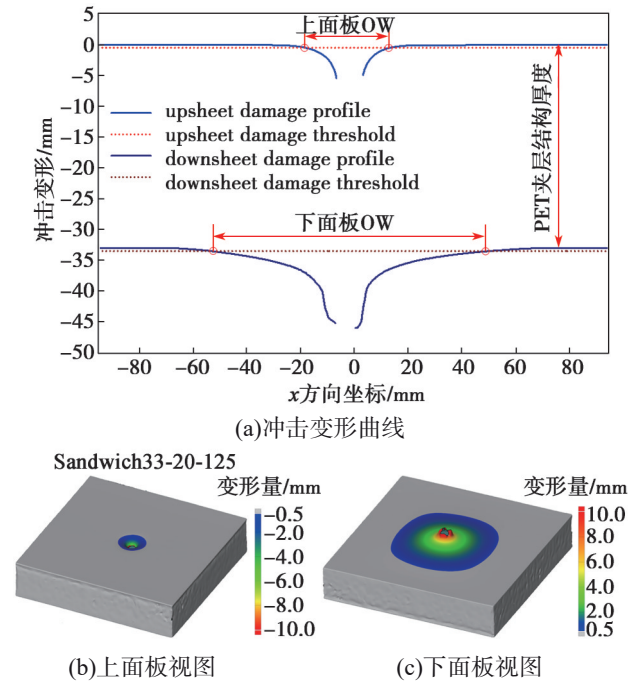


图 14 低速冲击穿透试样上下面板开口宽度的提取
Fig. 14 Extraction of opening widths on the top and bottom face sheets of a penetrated specimen under low-velocity impact

表 6 为试样 Sandwich33-20-125 和 Sandwich33-10-125 的最大侵彻深度 (MPD) 和开口宽度(OW)的结果数据。

表 6 不同冲头直径下 PET 夹层结构的最大侵彻深度 (MPD)和开口宽度(OW)

Table 6 Maximum penetration depth (MPD) and opening width (OW) of PET sandwich structures under impacts with varying impactor diameters

试样编号	MPD/mm	上面板 OW /mm	下面板 OW/mm
Sandwich33-20-125	15.677	50.531	—
Sandwich33-20-125-2	16.152	47.710	—
Sandwich33-10-125	∞	30.647	102.259
Sandwich33-10-125-2	∞	31.764	94.210

从表 6 可发现, 由于冲击能量均为 125 J, 最大侵彻深度 (MPD) 随冲头直径的减小而增大, 而开口宽度 (OW) 受到铝合金面板与冲击器的相互作用, 相比于冲头直径都有明显扩大。对于上下铝合金面板都被侵彻的 PET 夹层结构, 上面板的开口宽度 (OW) 较小, 而下面板的开口宽度 (OW) 较大, 原因在于冲击器接触上面板时, PET 夹层结构的胶层、芯层和下面板对上面板具有支撑作用, 上面板变形主要集中在冲击位置附近; 而当冲击器冲破上面板继续与下面板接触并产生变形的过程中, 下面板没有得到支撑, 其只受到冲击器下行的冲击载荷和胶层反方向的拉伸载荷的影响, 因此冲击变形面积比上面板大。

1.4 声发射与光学扫描检测结果的相关性分析

为验证声发射监测的有效性, 对比分析了声发射

累计参数 (计数, 能量) 与光学扫描损伤形貌参数 (MPD, OW) 的对应关系。结果表明, 随着冲头直径减小和冲击能量增加, 声发射累计计数与累积能量显著上升, 同时光学扫描测得的 MPD 增大、OW 扩展, 表明两种检测方法在反映损伤严重程度上具有高度的一致性。

具体而言, 对于未穿透试样 (如 Sandwich33-20-125), 声发射累计计数为 749, 累积能量为 $9.59 \times 10^{-4} \text{ V}^2 \cdot \text{s}$, 对应 MPD 为 15.677 mm, OW 约为 50.531 mm; 而穿透试样 (如 Sandwich33-10-125), 声发射累计计数上升至 1 523, 累积能量增至 $0.007 \text{ V}^2 \cdot \text{s}$, 此时 MPD 趋于无穷 (完全穿透), 上下面板 OW 显著扩大 (上面板约 31 mm, 下面板约 98 mm)。分析上述数据表明, 声发射信号强度与损伤的物理尺度 (如侵彻深度、开口宽度) 呈正相关, 说明声发射技术不仅能够实时捕获损伤过程, 还能在一定程度上反映损伤的空间形态与严重程度。此外, 声发射信号频段特征 (如铝合金面板集中于 50~250 kHz, PET 芯层集中于 50~200 kHz) 与损伤模式 (面板塑性变形、芯层压溃、胶层失效等) 具有良好的对应关系, 进一步验证了声发射在识别不同损伤机制方面的有效性。

综上, 声发射技术与光学扫描检测在 PET 夹层结构的低速冲击损伤评估中具有互补性: 声发射适用于实时、动态监测损伤的发生与扩展过程; 光学扫描则适用于冲击后损伤形貌的精确量化。二者结合可为 PET 夹层结构的损伤识别、评估与修复提供更为全面可靠的技术支撑。

2 PET 泡沫夹层结构修复

根据上述 PET 夹层复合材料在不同冲头直径下的损伤模式并不相同, PET 夹层结构试样 Sandwich33-20-125 上面板被侵彻且在冲击位置留下了永久凹坑变形, 而试样 Sandwich33-10-125 整体都被 10 mm 冲头侵彻。为了更好地恢复以上 2 种冲击试样的结构剩余性能, 本次采用了 2 种不同的修复方案, 如图 15 所示。对于未完全穿透的 PET 夹层结构, 首先在加工过程中将其损伤区域去除, 然后在芯层填充 PET 泡沫, 面板处粘贴 5754 铝合金修补贴片, 修复胶粘剂为 DP460; 对于完全穿透的 PET 夹层结构, 在加工过程中将上下面板之间的整个损伤区域去除, 芯层同样填充 PET 泡沫, 面板处粘贴 5754 铝合金修补贴片, 修复胶粘剂同样为 DP460。

试样 Sandwich33-20-125 和试样 Sandwich33-10-125 的加工方案如图 16 所示, 试样 Sandwich33-20-125 对应于图 16 所示的未完全穿透 (加工圆形盲孔), 在冲击区域切圆形盲孔, 根据表 5 获得的冲击损伤区域 MPD 和 OW, 将直径 D_1 和 D_2 统一设定为 $50 \pm 0.1 \text{ mm}$, 盲孔深度

为 t_1 加上 t_2 共16.5 mm。试样 Sandwich33-10-125 对应图16中的完全穿透情况,在冲击区域两侧切圆形形梯孔,同样根据表6获得的冲击损伤区域MPD和OW值,将直径 D_1 设定为 50 ± 0.1 mm,直径 D_2 设定为25 mm,面板切除深度 t_1 设定为2 mm。

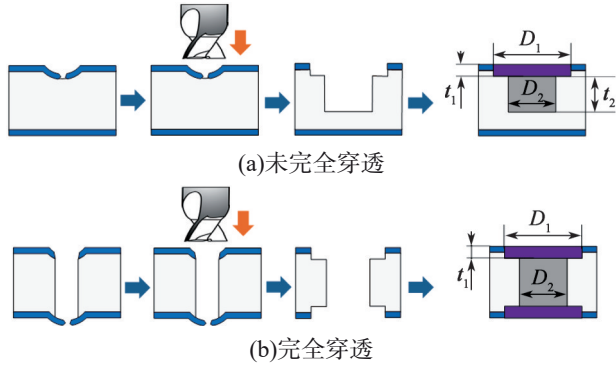


图15 PET夹层结构冲击损伤修复工艺

Fig. 15 Impact damage repair process for PET sandwich structure

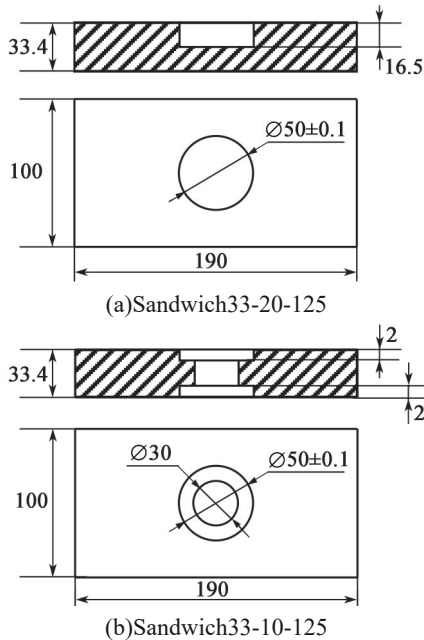


图16 PET夹层结构加工尺寸示意图

Fig. 16 Processing dimensions for PET sandwich structure

在修复过程中,先将试样背面凸起的铝面板压平校正,然后对其进行修复。本研究中用于PET夹层结构损伤修复的胶粘剂为DP460,该胶粘剂相比于环氧树脂胶Araldite®2015流动性更好,在加热固化的过程中可以渗入PET夹层结构未切除损伤区域的裂缝中,因此对试样 Sandwich33-10-125 背面只切除直径50 mm区域,修复形貌如图17所示。

从图17可知,2种试样正面切除区域边界的断面都比较完整,而试样 Sandwich33-10-125 冲击背面切除区域边界断面可以明显地看到PET芯层的破裂失效,如图17(d)所示,说明试样 Sandwich33-10-125 冲击背面的切除区域没有完全覆盖其真实的损伤面积,不过其裂纹缝隙可以通过注射流动性较强的DP460胶粘剂进

行改善。另一方面,由于试样 Sandwich33-10-125 冲击背面主要发生的是PET芯层的破裂失效,在低速冲击下胶粘剂并没有发生内聚区失效和胶粘界面失效。

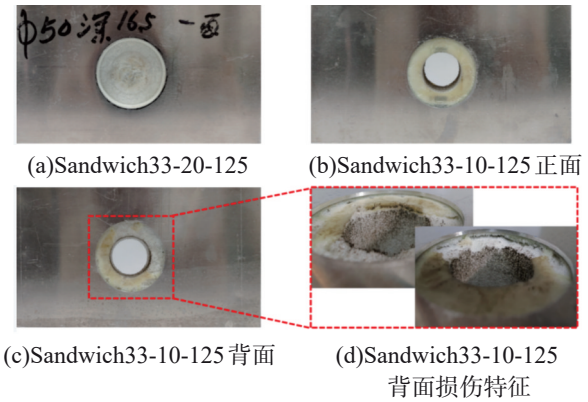


图17 PET夹层结构加工后试样形貌

Fig. 17 Morphology of processed PET sandwich structure specimen

3 PET 泡沫夹层结构损伤剩余性能

冲击后剩余压缩性能测试参考 ASTM C364—2016《夹层结构侧向压缩试验方法》进行。试验在万能试验机上进行,加载速率为2 mm/min,试样尺寸与支承条件均按标准规定执行。

本次采用面内压缩性能试验评估PET夹层复合结构冲击和修复后的剩余性能。试验样件如图18所示,试样尺寸为190 mm×100 mm×33.4 mm。将无损伤样件作为对照试验,每组试样重复试验3次。图18(d)和图18(e)中修复表面由于溢出的DP460胶粘剂较多,因此经过了清理和打磨过程。

载荷-位移曲线如图19所示。从图19可以看出,无损伤Al-PET-Al夹层结构试样面内压缩过程基本上可以根据铝合金面板的力学性能分为弹性阶段、塑性阶段和屈曲阶段。在面内压缩载荷达到峰值之前,Al-PET-Al夹层结构的压缩变形是相当稳定的,随着板内压缩量的增加,夹层结构的承载能力随着铝合金面板的屈曲变形而急剧下降,下降过程中伴有PET芯层的剪切破坏失效,如图19中D点所示。因此,无损伤Al-PET-Al夹层结构面内压缩试验的失效形式主要表现为芯层剪切破坏和面板屈曲变形的复合破坏机制,且极少出现胶粘层失效。

压缩试验结果如表7所示,无损伤Al-PET-Al夹层结构试样的面内压缩峰值载荷为68 692.54 N,将该载荷将作为基准,用于评估冲击和修复后的Al-PET-Al夹层结构试样的剩余性能。

从表7可知,试样 Sandwich-20-125 的修复效果基本上达到了未损伤试样的力学性能水平,其载荷位移曲线和无损伤Al-PET-Al夹层结构也具有很高的相似性,剩余峰值载荷比从冲击后的83.32%提升到了



图 18 PET 夹层结构面内压缩试验样件

Fig. 18 Specimen in in-plane compression test of PET sandwich structure

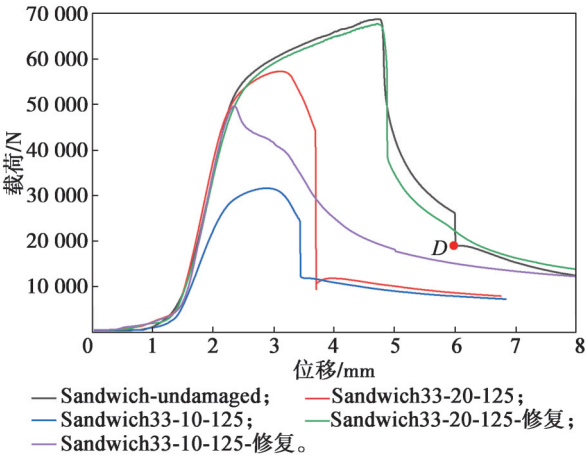


图 19 Al-PET-Al 夹层结构试样面内压缩试验典型载荷-位移曲线
Fig. 19 Typical load-displacement curve for Al-PET-Al sandwich structure specimen in in-plane compression test

98.50%；而试样 Sandwich33-10-125 的剩余峰值载荷比远低于试样 Sandwich33-20-125，其修复效果虽然没有达到 80%，但也从冲击后的 46.08% 提升到了 72.24%。可能的原因是试样 Sandwich33-10-125 冲击后试样背面 PET 芯层和铝合金面板分离破裂面积较大（可以认为是 PET 芯层和胶粘剂之间的界面失效），而修复区域为冲击点周围直径 50 mm 的圆形区域。

表 7 Al-PET-Al 夹层结构试样面内压缩试验结果

Table 7 In-plane compression test results of Al-PET-Al sandwich structure specimen

试样编号	峰值载荷/N	剩余峰值载荷比/%	失效位置
Sandwich-undamaged	68 692.54	100.00	非夹持端
Sandwich33-20-125	57 237.94	83.32	非夹持端
Sandwich33-10-125	31 651.04	46.08	非夹持端
Sandwich33-20-125-修复	67 662.41	98.50	下夹持端附近
Sandwich33-10-125-修复	49 621.41	72.24	上夹持端附近

通过对 Al-PET-Al 夹层结构未穿透低速冲击和穿透性低速冲击带来的损伤进行修复，结果发现修复后的夹层结构剩余性能得到了明显提升，压缩过程中试样不再从冲击损伤区域开始失效，证明本研究采用的修复方法是可行的。

4 结论

通过低速冲击试验与多技术联合检测，系统研究了磁浮车辆用 PET 泡沫夹层复合材料在模拟冰雹、飞石等低速冲击下的损伤行为、检测方法与修复效果。主要结论如下：

①铝合金面板与 PET 泡沫芯材在低速冲击下的声发射信号特征具有明显区分度，其信号分别集中于 50~250 kHz 与 50~200 kHz 频段；声发射累计参数（计数与能量）可有效表征材料损伤程度，且损伤模式受冲击能量影响较小。

②冲头直径对 PET 夹层结构的损伤形貌与侵彻深度影响显著，冲头直径减小导致损伤区域更集中、侵彻加剧，下面板开口宽度显著大于上面板。

③声发射累计参数与光学扫描所得最大侵彻深度、开口宽度呈正相关，两种检测方法在反映严重程度上具有高度一致性，声发射适用于实时动态监测，光学扫描适用于损伤形貌的精确量化。

④基于局部切除（直径 50 mm）与 DP460 胶粘剂胶接修复工艺可显著恢复受损 PET 夹层结构的面内压缩性能，未穿透试样修复后剩余峰值载荷比恢复至损伤前的 98.5%，穿透试样恢复至损伤前的 72.24%，证明该方法对提升结构剩余承载能力有效，具备工程应用潜力。

本研究为磁浮车辆 PET 夹层结构在冲击耐受设计、在线损伤监测、检修评估与现场修复等方面提供了系统的试验依据与技术支撑，对提升车辆结构安全性与运维经济性具有明确的工程意义。

参考文献:

- [1] 王凯, 贺强. 聚甲基丙烯酸酯亚胺泡沫夹层结构全生命周期的关键技术研究进展[J]. 复合材料学报, 2020, 37(8): 1805-1822.
- WANG Kai, HE Qiang. Research progress on key technologies for whole life cycle of polymethacrylimide foam sandwich structures[J]. Acta materiae compositae sinica, 2020, 37(8): 1805-1822.
- [2] LE V T, HA N S, GOO N S. Advanced sandwich structures for thermal protection systems in hypersonic vehicles: a review[J]. Composites part B engineering, 2021, 226: 109301.
- [3] 胡舜. 轨道列车车体轻型复合材料性能研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2019.
- HU Shun. Performance research of light composite material for railway train body[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2019.
- [4] ÖNDER A, ROBINSON M. Investigating the feasibility of a new testing method for GFRP/polymer foam sandwich composites used in railway passenger vehicles[J]. Composite structures, 2020, 233: 111576.1-111576.15.
- [5] GIBSON L J, ASHBY M F. Cellular solids[M]. New York: Cambridge University Press, 1997.
- [6] BITZER T N. Honeycomb technology: materials, design, manufacturing, applications and testing[M]. London: Chapman & Hall, 1997.
- [7] 谭艳, 姚召定, 陈火天, 等. 中速磁浮列车轻量化车体夹层复合材料研究[J]. 电力机车与城轨车辆, 2022, 45(5): 79-82.
- TAN Yan, YAO Zhaoding, CHEN Huotian, et al. Sandwich composite for lightweight car body of medium speed maglev train[J]. Electric locomotives & mass transit vehicles, 2022, 45(5): 79-82.
- [8] 张靖, 张彬, 苟宗献. PMI 泡沫在航空航天用天线印制电路板产品上的应用[J]. 中国战略新兴产业, 2024 (24): 107-109.
- ZHANG Jing, ZHANG Bin, XUN Zongxian. The application of PMI foam in aerospace antenna printed circuit board products[J]. China strategic emerging industry, 2024 (24): 107-109.
- [9] 赵锐霞, 尹亮, 潘玲英, 等. PMI 泡沫夹层结构性能研究[J]. 宇航材料工艺, 2012, 42 (5): 39-42.
- ZHAO Ruixia, YIN Liang, PAN Lingying, et al. Properties of PMI foam sandwich structure[J]. Journal of astronautic materials and technology, 2012, 42(5): 39-42.
- [10] ABRATE S. Impact on composite structures[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1998.
- [11] 张永康, 李玉龙, 汤忠斌, 等. 冰雹撞击下泡沫铝夹芯板的动态响应[J]. 爆炸与冲击, 2018, 38 (2): 373-380.
- ZHANG Yongkang, LI Yulong, TANG Zhongbin, et al. Dynamic response of aluminum-foam-based sandwich panels under hailstone impact[J]. Explosion and shock waves, 2018, 38(2): 373-380.
- [12] WANG H H, SONG X D, ZHAO M K, et al. Low velocity impact penetration response of foam core sandwich panels with face sheets[J]. International journal of impact engineering, 2023, 173: 104461.
- [13] 廖婷婷, 王明猛, 肖守讷, 等. 有轨电车复合顶盖用PET泡沫夹层板抗冲击性能分析[J]. 城市轨道交通研究, 2022, 25(8): 56-61.
- LIAO Tingting, WANG Mengmeng, XIAO Shoune, et al. Impact resistance analysis of PET foam sandwich panels for composite roof of tram[J]. Urban mass transit, 2022, 25(8): 56-61.
- [14] 张笑宇. 复合材料夹芯结构低速冲击力学性能和损伤机理研究[D]. 西安: 西北工业大学. 2021.
- ZHANG Xiaoyu. Study on the mechanical behavior and damage mechanism of composite sandwich structures under low-velocity impact[D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2021.
- [15] 金希红, 霍新涛, 王锴, 等. 夹层结构冲击损伤剩余性能与损伤修复方法[J]. 汽车工程学报, 2025, 15(3): 306-318.
- JIN Xihong, HUO Xintao, WANG Kai, et al. On residual performance and repair strategies of sandwich structures after impact damage[J]. Chinese journal of automotive engineering, 2025, 15(3): 306-318.

Study on damage mechanisms and residual mechanical performance of PET sandwich structures for maglev vehicles

WANG Jiaheng^{1,2}

(1. CRRC Zhuzhou Locomotive Co., Ltd., Zhuzhou, Hunan 412001, China;

2. Hunan Provincial Key Laboratory of Maglev Transportation Vehicle System Integration, Zhuzhou, Hunan 412001, China)

Abstract: This paper addresses the susceptibility of polyethylene terephthalate (PET) foam sandwich composites used in light-weight structures of maglev vehicles to barely visible damages from low-velocity impacts such as hail and flying stones. A drop weight impact test system was employed to investigate damage behaviors of the aluminum-alloy face sheets, PET foam cores, and complete Al-PET-Al sandwich structures under low-velocity impacts. The acoustic emission (AE) technique was integrated to monitor the damage process in real time, and a 3D optical scanning system (ATOS Core) was used for post-impact morphology characterization. Results show that AE signal features are concentrated in the frequency ranges of 50-250 kHz and 50-200 kHz for aluminum-alloy face sheets and PET foam cores, respectively; both cumulative counts and cumulative energy increase significantly as the impact energy rises. Smaller impactor diameters notably aggravate penetration damage. AE parameters exhibit good alignment with damage morphology parameters from optical scanning, validating the effectiveness of AE monitoring. The repair method based on local removal and adhesive bonding with DP460 effectively restores the structures' residual performance, with the residual peak load ratio restored to 98.5% for non-penetrated specimens and 72.24% for penetrated specimens after repair. This study provides an experimental basis and technical support for the safe application, damage detection, repair, and maintenance of PET foam sandwich composites in maglev vehicles and other rail transit equipment.

Keywords: PET foam; sandwich composites; low-velocity impact; damage detection; acoustic emission; optical scanning; repair performance

收稿日期: 2026-01-18; 修回日期: 2026-02-10

责任编辑: 詹 婧