

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2024.04.026

复合材料在汽车防撞梁上的应用研究进展

袁铁军¹, 孙强¹, 吕红明², 宋树权¹

(1.盐城工学院机械工程学院,江苏盐城 224051; 2.盐城工学院汽车工程学院,江苏盐城 224051)

摘要:为促进复合材料在汽车构件中的应用,以汽车保险杠防撞梁为例,对复合材料防撞梁的材料、结构设计以及保险杠内部零件连接的研究进展进行综述。简述了碳纤维、玻璃纤维以及天然纤维等复合材料在汽车防撞梁上的研究进展,介绍了不同结构复合材料防撞梁对于耐撞性能的影响,分析了保险杠内部零件不同连接方式的优缺点。最后提出了汽车复合材料防撞梁的未来发展方向,应注重新型复合材料的开发、防撞梁结构的优化设计以及新型连接方式的研究。

关键词: 复合材料;防撞梁;结构设计;连接方式

中图分类号: TB332 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2024)04-0169-06

Research progress on application of composite materials in automotive crash beams

YUAN Tiejun¹, SUN Qiang¹, LYU Hongming², SONG Shuquan¹

(1. School of Mechanical Engineering, Yancheng Institute of Technology, Yancheng 224051, China;

2. School of Automotive Engineering, Yancheng Institute of Technology, Yancheng 224051, China)

Abstract : A review of the research progress on composite materials in automotive components, using the bumper anti-collision beam as an example, was conducted to promote their application. The material and structural design of composite anti-collision beams, as well as the research progress on the connection of internal parts of bumpers, were summarized. Progress in research on carbon fiber, glass fiber, natural fiber, and other composite materials in automotive anti-collision beams were briefly described. The influence of different structural composite anti-collision beams on crashworthiness performance was introduced, and the advantages and disadvantages of different connection methods for internal parts of bumpers were analyzed. Finally, future directions for the development of automotive composite anti-collision beams were proposed, including the development of new types of composite materials, optimization of anti-collision beam structures, and research on new connection methods.

Keywords : composite ; crash beam ; structural design ; connection method

随着人们对于绿色低碳理念的日益关注,新能源汽车也在飞速发展。当前,新能源汽车续航里程并不理想,主要受到电池容量的限制。除此之外,车辆质量也是提升续航里程的关键因素。新能源汽车自重降低 20%,能有效增加 5%~10% 左右的续航时间^[1]。汽车轻量化途径可以分为 3 个方面:轻质材料的选用、结构优化设计和先进加工技术的应用。其中,使用轻质材料被认为最有效的方法^[2]。

汽车保险杠防撞梁是安装在车辆后部或前部的一种缓冲吸能结构,在汽车发生碰撞时吸收冲击能量,以保障车身结构的完整性以及人员安全。以往,防撞梁大多数由铝合金和高强度钢等金属材料制成,但存在质量大、易锈蚀等缺点。

研究人员设计防撞梁时,普遍以纤维增强树脂基复合材料替代金属材料。与金属材料相比,复合材料有着更高的比强度、比刚度、冲击能量、吸收性能以及易于设计制造等优点^[3],成为汽车防撞梁的优选材料,在现代汽车轻量化领域有着广泛的运用前景。笔者基于汽车保险杠防撞梁采用的复合材料种类、结构及保险杠内部零件连接对保险杠性能的影响,讨论复合材料在汽车保险杠防撞梁的研究现状,并对防撞梁未来的发展趋势进行展望。

1 保险杠系统结构

图 1 为保险杠系统的结构^[4]。在碰撞中,保险杠防撞梁主要通过弯曲变形来吸收冲击能量,而吸能盒主要通过轴向

基金项目: 国家自然科学基金项目(51875494)

通信作者: 袁铁军,博士,副教授,主要从事材料成型以及装备方面的研究

收稿日期: 2024-01-12

引用格式: 袁铁军,孙强,吕红明,等. 复合材料在汽车防撞梁上的应用研究进展[J]. 工程塑料应用, 2024, 52(4): 169-174.

YUAN Tiejun, SUN Qiang, LYU Hongming, et al. Research progress on application of composite materials in automotive crash beams[J].

Engineering Plastics Application, 2024, 52(4): 169-174.

变形来吸收冲击能量^[4]。

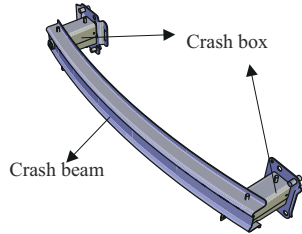


图1 保险杠系统结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of bumper system structure

国内汽车保险杠的标准为 GB 17354-1998,其中详细规定了除保险杠外,汽车的其余零部件和系统在低速碰撞中不会被破坏^[6]。GB 17354-1998 规定的两种碰撞工况^[7]如图 2 所示。在对汽车防撞梁进行仿真或者试验时,一般将防撞梁侵入量和吸收能量作为评估轻量化设计对结构部件冲击性能影响的主要评价指标。侵入量定义为碰撞后防撞梁的最大内部变形,为保证乘客安全和附近零件的完整性,防撞梁和其他零件之间不应有任何接触。吸收能量定义为防撞梁通过自身变形吸收的冲击能量,起到保护乘客安全的作用。保险杠系统吸收的能量越大,汽车其他结构受到的冲击力越小,进而保护汽车整体结构,保护乘客。

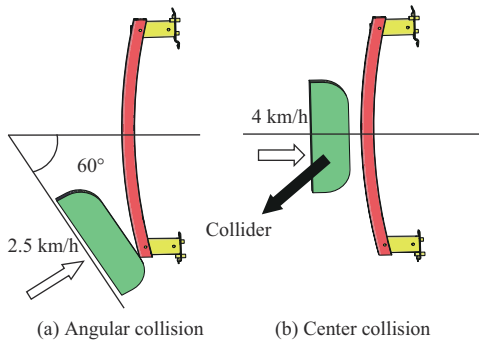


图2 GB 17354-1998 规定的两种碰撞工况^[7]

Fig. 2 Two collision conditions specified in GB 17354-1998^[7]

2 防撞梁复合材料

2.1 玻璃纤维(GF)复合材料

GF具有力学性能好、比强度高、耐高温、易加工、价格便宜等优点,全球 90% 的市场使用 GF 作为复合材料增强体^[3,8]。Duan 等^[9]使用长 GF 增强聚丙烯(LGFR-PP)复合材料防撞梁替代了钢制防撞梁,并分别对两种防撞梁进行了碰撞仿真。结果显示,复合材料防撞梁相比于钢制防撞梁,比吸收能量(总吸收能量/质量)约提升一倍,峰值冲击力由 19.92 kN 降为 11.23 kN,质量也从 5.296 kg 降为 2.574 kg。Xue 等^[10]对长 GF 增强 PP 复合材料与铝合金防撞梁分别进行碰撞仿真,复合材料防撞梁相比于铝合金防撞梁,其质量减轻了 17.4%,比吸收能量提高了 6%,成本降低了 69%,峰值冲击力和碰撞侵入量均有所降低。

Du 等^[11]将质量占比 40% 的长无氟无硼环保型(LECT) GF 增强聚酰胺复合材料(LECT/PA66)、铝合金和 45 钢防撞

梁分别进行冲击试验仿真。结果见表 1^[11],其中能量吸收比 η 为塑性变形能除以总能,成本以人民币(CNY)为单位。40%LECT/PA66 防撞梁具有很高的能量吸收率,质量减轻铝合金防撞梁的一半,成本与 45 钢防撞梁相近。

表 1 不同材料汽车防撞梁的对比

Tab. 1 Comparison of automobile crash beams of different materials

Material	Density/ (g·cm ⁻³)	Displace- ment/mm	η /%	Weight/ kg	Unite cost/ (CNY· kg ⁻¹)	Total cost/ CNY
45 steel	7.89	7.26	35.32	13.785	6	82.71
6061-T6 Al alloy	2.70	11.20	56.76	4.717	38	179.26
40%LECT/ PA66	1.54	23.25	95.92	2.691	32.8	88.25

2.2 碳纤维复合材料

碳纤维复合材料(CFRP)作为一种新型高性能材料,具有密度小、强度高、吸能性好等优点,被广泛运用于航空、航天、汽车等领域^[12-13]。Dixit 等^[14]对碳纤维增强环氧复合材料和钢制防撞梁分别进行碰撞试验,结果揭示了两种材料防撞梁在冲击试验下的失效形式。与钢制防撞梁相关的失效模式是吸能盒的永久局部变形和防撞梁至吸能盒接头附近的梁端变薄,而在 CFRP 保险杠中,则是防撞梁的剪切失效和吸能盒底部与底部法兰的接头处的断裂。

Hu 等^[15]对高强度钢与碳纤维增强环氧复合材料防撞梁分别进行冲击试验仿真,并研究纤维铺层和截面厚度对于 CFRP 防撞梁耐撞性能的影响。在优化了纤维铺层和截面厚度后,CFRP 防撞梁的总吸收能量与高强度钢防撞梁相当,其质量约为高强度钢防撞梁的一半。此外,CFRP 防撞梁具有更低的碰撞加速度和碰撞力,耐撞性能更优。Salifu 等^[16]对铝合金和碳纤维增强环氧复合材料双帽型防撞梁分别进行高速碰撞仿真,结果显示 CFRP 防撞梁在碰撞中,吸收能量低于铝合金防撞梁,但有着质量优势和较低的侵入量。

2.3 天然纤维复合材料

天然纤维增强复合材料相比于合成纤维增强复合材料有着成本低、密度低、环境友好性好等优点,但其存在力学性能和亲水性差等不可忽视的缺点。Witayakran 等^[17]使用化学方法对棕榈果束(EFB)纤维进行改性,并结合环氧树脂制备了 EFB 纤维增强环氧基复合材料。在对性能优化后,发现所制备的天然纤维复合材料弯曲弹性模量和热性能与 GF 复合材料相近,但冲击强度依旧较低。Adesina 等^[18]讨论了天然纤维复合材料防撞梁的研究现状,得出纯天然纤维复合材料不能满足防撞梁所需的力学性能与耐撞性能需求,但与合成纤维混合使用,有助于改善力学性能。

2.4 混合纤维复合材料

混合纤维复合材料被定义为两种或以上不同纤维组合在一个基体之内所形成的复合材料,目的是保留多种纤维的优点,并减轻其缺点,如天然与合成纤维混合增强复合材料。为提高混合复合材料的性能,研究人员对天然与合成纤维混

合复合材料进行研究。

Ahmad Nadzi 等^[19]研究了红麻(K)/玻璃混合纤维(G)增强不饱和聚酯树脂(UP)基复合材料层压板在不同铺层方案(K/K/K, G/K/K, G/K/G)下的低速冲击性能和损伤模式。研究结果显示,随着 GF 复合材料层在层压板所占比例越多,其耐撞性能越好。Irawan 等^[20]分别在不同层数的编织藤条(RS)增强环氧复合材料层压板的顶部与底部添加一层 GF 增强复合材料,并与原 RS 复合材料层合板进行对比。结果显示,RS/G 纤维混合复合材料相比于纯 RS 复合材料,其力学性能有显著提升。Muthalagu 等^[21]将凯夫拉纤维与椰枣树纤维混合作为增强体,与环氧树脂结合,制造防撞梁,发现两种纤维在质量比为 1:1 时,防撞梁性能最好。

除天然与合成纤维混合增强复合材料外,因碳纤维相较于 GF 具有更为优异的比强度和昂贵的材料成本,碳/玻纤维混合增强复合材料也是研究热点。Kim 等^[5]对由单向 GF 增强树脂基复合材料(GFRP)层和编织 GFRP 层组成的 GF 毡增强热塑性复合材料(GMT)防撞梁,使用碳纤维替换 GF 层,设计了 GF/碳纤维毡增强热塑性复合材料(GCMT)防撞梁(基体采用 PP 树脂)。首先,将混合 GCMT 和 GMT 材料的力学性能进行对比。结果显示:碳纤维在单向层可以大大提升纵向拉伸强度,在编织层可以大大提升剪切强度。其次,将各个方案进行冲击试验仿真,综合考虑成本、耐撞性能等因素,选择最终设计方案。最后,制造复合材料防撞梁实物进行冲击试验,与传统 GMT 材料防撞梁相比,质量减轻 33%,耐撞性能也得到提升。

3 复合材料防撞梁结构设计

3.1 复合材料铺层方案设计

由于复合材料增强纤维的各向异性,其在防撞梁中铺设的角度不同,对于耐撞性能有着显著影响。因此,研究人员对不同铺层方案如何影响防撞梁的耐撞性能进行了深入研究。Berton 等^[22]基于碳纤维/双马来酰亚胺基和 GF/环氧基两种复合材料防撞梁的碰撞仿真,研究 $[0/90]_s$ 、 $[-45/45]_s$ 和 $[0/90/\pm 45]_s$ 3 种铺层方案对于防撞梁耐撞性能的影响。研究表明,在上述 3 种铺层方案中, $[0/90/\pm 45]_s$ 的铺层方案使得两种复合材料防撞梁在碰撞过程中具有最大的冲击力和最小的侵入量。Hu 等^[15]基于碳纤维增强环氧复合材料防撞梁的碰撞仿真,研究不同铺层方案对于耐撞性能的影响。仿真结果显示,由 $[\pm 45]$ 和 $[0/90]$ 层所混合铺设的保险杠耐撞性最为优异,且 $[0/90]$ 层所占比例应为 0.17~0.35。

3.2 防撞梁截面设计

3.2.1 防撞梁截面厚度设计

Zhu 等^[23]研究了碳纤维增强环氧复合材料防撞梁截面厚度对于耐撞性能的影响,并进行正面撞击和角度撞击的有限元仿真。结果显示,在正面撞击情况下,防撞梁厚度对侵入量影响较大,厚度增大可有效改善耐撞性能;在角度撞击情况下,防撞梁厚度对于侵入量影响较小。Xue 等^[10]使用长 GF 增强 PP 复合材料防撞梁研究了截面厚度对耐撞性能的

影响。为了平衡好侵入量、比能量吸收及成本之间的关系,提出了一种中厚端薄的连续可变截面防撞梁设计。仿真对比发现,与等厚度防撞梁相比,该设计的峰值冲击力和侵入量都有减少,比吸收能提高 20.6%,耐撞性能得到提升。

3.2.2 防撞梁截面几何形状设计

Godara 等^[24]设计了 8 种不同截面几何形状的碳纤维增强环氧复合材料防撞梁^[24],如图 3 所示,并进行了碰撞仿真分析。从仿真结果来看,开式截面的侵入量和应力值一般都大于闭式截面。

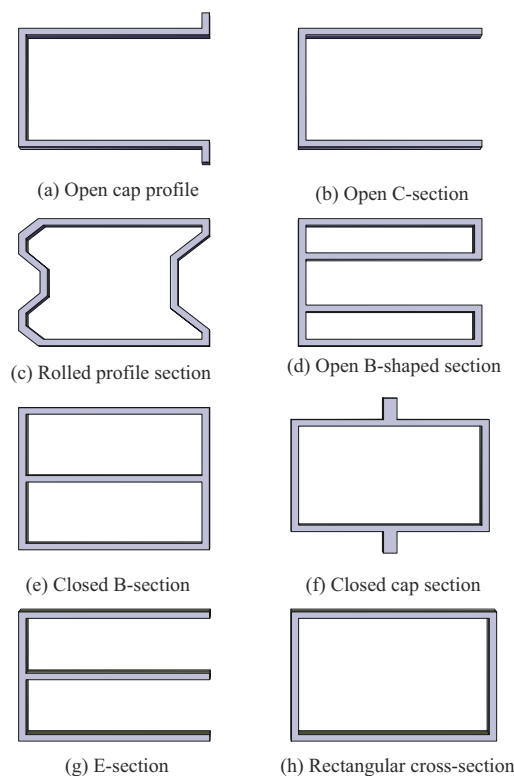


图 3 不同截面形状

Fig. 3 Different cross-section shapes

Jiao 等^[25]和 Wang 等^[26]使用亚麻增强聚乳酸复合材料防撞梁来研究截面圆度对耐撞性能的影响,所设计的不同截面如图 4 所示^[25]。结果显示:随着截面圆度的增大,总吸收能越小,其中截面 A 总吸收能最大;其次,因为不同截面的圆度差异,各截面保险杠质量不同,截面 D 质量最低,比吸收能最高。

Belingardi 等^[27]设计了适用于复合材料(GF 增强环氧树脂)拉挤成型的多种防撞梁截面,考虑了截面槽数、槽深度、槽宽度和壁厚对于耐撞性能的影响。碰撞仿真结果显示,通过对防撞梁褶皱的数量和位置进行优化,能有效减少应力集中现象,形成裂纹渐进撕裂的破坏形式,获得更好的耐撞性能。

3.3 开式防撞梁加强肋设计

在防撞梁内,添加加强肋结构能增强结构刚度,减小碰撞时产生的变形,并增加冲击能量^[28]。Davoodi 等^[29]以带加

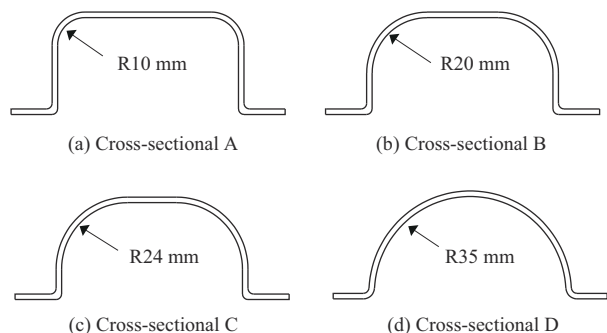


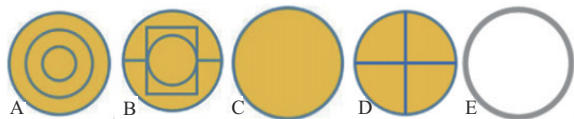
图4 防撞梁的横截面形状

Fig. 4 Cross-sectional shape of the crash beam

强肋结构的红麻/GF增强环氧复合材料防撞梁为研究对象,研究加强肋对于防撞梁耐撞性能的影响。结果显示,带加强肋相对于无肋防撞梁,侵入量降低11%,总吸收能量提升11.3%,但零件制造困难程度与质量增加。

3.4 闭式防撞梁内部增强结构设计

近年来,随着泡沫、铝蜂窝等轻质材料在薄壁结构的运用增加,研究人员对轻质材料填充薄壁闭式复合材料构件的耐撞性能增强效果展开研究^[30-31]。卢强等^[32]设计了铝蜂窝填充碳纤维增强环氧复合材料防撞梁来替换传统的铝合金防撞梁,可减重50%左右。基于三点弯曲试验的有限元仿真发现,通过调整铝蜂窝填充CFRP防撞梁的结构参数,如蜂窝的边长与壁厚等,可有效提升防撞梁的耐撞性能。与铝合金防撞梁相比,新型防撞梁不仅能承受更大的外部载荷,还能吸收更多的能量。Sebaey等^[33]制备了3种肋板增强泡沫填充碳纤维增强环氧复合材料圆管,一种空心CFRP圆管与一种纯泡沫填充CFRP圆管(图5)。通过5种CFRP圆管的横向冲击试验发现,编号为D和E的圆管抗冲击性能较差,在试验中损坏。A、B和C圆管总吸收能量分别为49,50 J和55 J,比吸收能量分别为0.98,0.84 J/g和1.44 J/g。因此,纯泡沫填充CFRP圆管在五中CFRP圆管中耐撞性能最优。

图5 5种CFRP管^[33]Fig. 5 Five types of CFRP tubes^[33]

Yin等^[34]通过三点弯曲试验研究泡沫铝填充碳纤维增强双马来酰亚胺复合材料方管在横向弯曲载荷下的耐撞性能。在相同试验条件下,相较于未填充泡沫铝的CFRP方管,填充了泡沫铝的CFRP方管在最高载荷、弯曲刚度和总吸收能量方面分别提升69%,2.4%和111.9%。这一结果表明,泡沫铝的填充有效提升了CFRP方管的承载能力与吸收能量,但比吸收能量减少。

除上述研究外,研究人员为制造高刚度、高强度的防撞梁,同时保障高生产速率,将非连续纤维复合材料通过注射/压缩成型与连续纤维预浸渍芯棒结合来实现这一目标。Lee

等^[35]以一种连续GF增强PP复合材料棒为芯材,在外部包覆短切GF增强PP复合材料,以此设计汽车后保险杠防撞梁。碰撞仿真结果显示,连续GFRP芯棒的插入使防撞梁的总能量吸收提升了3.4%,侵入量减小了1.1 mm,裂纹开始时间延迟0.003 s,有效抑制了防撞梁在外部载荷下的变形和裂缝发生。

Joo等^[36]设计了长切GF增强热塑性(LFT)材料包覆连续GF增强PP复合材料芯棒(3D-TOW)的防撞梁。将3D-Tow/LFT复合材料防撞梁和纯LFT防撞梁进行试验和仿真对比,总吸收能量提升134%,提升效果与两种材料界面强度相关,并发现注射成型参数中,注射压力是界面强度最主要的影响参数。

3.5 金属/复合材料混合结构设计

复合材料在碰撞中通常发生脆性断裂,导致承载能力骤降,大大降低其耐撞性能。因此,研究人员将复合材料与塑性变形的金属材料结合,构成混合薄壁结构,提升失效过程的稳定性,引导复合材料发挥更好的耐撞性能。余航^[37]将铝管与碳纤维增强环氧复合材料管通过套接组合,并根据CFRP管在混合管的位置,制备了两种混合管试件。通过两种试件的三点弯曲试验发现,当CFRP管在内侧时,其总吸收能量相较于在外侧时高2.9%,但其比吸收能量和压溃效率分别低6.9%和6.8%。在对混合管的失效形式研究发现:当CFRP管位于外侧时,仅有外侧的CFRP管发生了断裂;而当CFRP管位于内侧时,混合管在压头后端形成了一处贯穿内外两侧的缺口。综合考虑,CFRP管在外侧时,耐撞性能更优。Rouzegar等^[38]对复合材料(GF增强乙烯基酯树脂)、金属和金属/复合材料混合圆管进行准静态横向压缩,3种材料圆管的比吸能分别为1 308,834,1 020 J/kg,压溃效率分别为0.65,0.6和0.76。因此,混合圆管综合了金属与复合材料的性能,在提升吸能能力与降低密度的同时,使失效形式变得更加稳定。Zha等^[39]对Al/CFRP混合管进行了准静态横向压缩,并与Al管和CFRP管进行对比,发现混合管总吸收能量比两者吸收能量之和41.6%,比吸收能比CFRP管高41.6%,且失效形式更稳定,有更好的承载能力。Zhou等^[40]研究了Al/CFRP混合管的界面连接条件对于耐撞性能的影响。结果显示,将喷砂处理后的Al管胶接CFRP管组成Al/CFRP混合管,相较于未经过表面处理的两管直接套接而成的混合管,吸收能量高14.5%,比吸收能量高12.1%。

3.6 保险杠内部连接设计

复合材料与金属材料的连接往往都有局限性,铆接用于复合材料与金属连接时,会造成复合材料增强纤维的破坏^[41];螺纹连接同样会造成增强纤维的破坏,且连接构件带来额外的质量^[42-43];焊接因其高热量的输入,会改变材料的局部性能,且复合材料与金属材料的焊接条件差距很大^[44]。粘接没有上述的缺点,但复合材料与金属材料的粘接强度、耐久性等方面是否满足实际要求,需进一步探究。

Wehler等^[45]对复合材料与金属材料的直接粘接展开研

究,以3种不同基体的片状成型复合材料(SMC)与带有铝硅涂层的热成型钢直接粘接。3种基体材料为乙烯基酯(VE)、环氧树脂和UP,其中除VE基体材料,都进行了改性处理(粘接力促进,去除内部脱模剂)。其中,未改性VE组在制备过程中就已失效,微观分析表明,环氧树脂组的断口中,铝硅涂层大面积脱落,而UP组涂层基本完整,可以得出环氧树脂基体SMC复合材料与涂层的直接粘接性能更为优越。

Çam等^[4]对汽车保险杠中碳纤维增强环氧复合材料防撞梁和金属吸能盒的粘接性能进行研究。在研究中,选取了3种不同性质(刚性、延展性、高韧性)的黏合剂,研究发现刚性黏合剂在碰撞仿真中完全失效;而延展性黏合剂在碰撞仿真后,顶部和侧面的黏合层失效体积分别占各粘接层体积的33.1%和78.7%,相比之下,高韧性黏合剂失效体积占比分别为11.6%和22.9%,这显著降低了失效体积,同时总吸收能量也提升7%;此外,研究还探讨了防撞梁曲率半径、顶部黏接层厚度和侧面粘接层厚度、高度对于黏接可靠性的影响。研究结果表明,选择合适的黏合剂和设计参数,可以实现复合材料防撞梁和金属吸能盒的可靠粘接。

4 结语

基于以上研究,复合材料的优异性能使其成为未来汽车防撞梁材料的首选。同时,通过对复合材料防撞梁结构进行优化,可以设计出更高耐撞性能的结构。汽车保险杠复合材料防撞梁的未来发展,建议基于新型复合材料的开发与防撞梁结构的优化设计,从以下几方面展开研究。

(1)与天然纤维相比,碳纤维、GF等合成纤维存在成本高、环境友好性差等缺点。然而,天然纤维由于有限的力学性能而限制了其应用。如何处理天然纤维,提升其力学性能,制备高性能的天然纤维复合材料或天然/合成纤维混合复合材料,以基于环境友好性,进一步提升减重效果,将是未来的研究方向。

(2)基于以上研究,讨论了不同结构在复合材料防撞梁上的运用。其中,加强肋结构的引入能有效提升复合材料防撞梁的耐撞性能,然而,由于其制造复杂,目前在汽车防撞梁上的应用受到限制。为克服这一制约,可通过改善制造工艺或加强肋结构的设计,降低生产难度;轻质材料填充后的薄壁吸能结构,虽然能显著增强防撞梁缓冲吸能特性,并展现出更稳定的失效形式,但同时也带来了质量增加的问题,可使用高性能的轻质材料填充,或对轻质材料的填充形式和界面进行优化设计,以确保轻量化效果;金属/复合材料混合结构在提升耐撞性能的同时,能保障良好的轻量化效果,此外,也可采用轻质材料填充,进一步增强其缓冲吸能特性,金属/复合材料混合结构有望成为未来汽车防撞梁研究的重要方向。

(3)传统的金属保险杠防撞梁与吸能盒连接通常采用螺栓连接、铆接等方式。但这些连接方法会破坏复合材料增强纤维,并降低结构的轻量化效果。为避免传统连接的负面影响,现有研究提出粘接的连接方式,初步满足了强度要求,但

在面对复杂安装环境(如高温、油污等)时的可靠性还有待进一步验证。此外,还有其他替代连接技术,如一体化和预埋件连接,这些方法也能避免传统连接方式的负面影响,在保险杠内部连接的可行性同样值得深入探究。

参考文献

- [1] 马进.产业创新研究,2022(2):45-47.
MA Jin. Industrial Innovation, 2022(2):45-47.
- [2] LIU Q, et al. Composite Structures, 2013, 97:231-238.
- [3] MOHAMMADI H, et al. Polymers, 2023, 15(1). DOI: 10.3390/polym15010193.
- [4] CAM S, et al. International Journal of Impact Engineering, 2023, 173. DOI:10.1016/j.ijimpeng.2022.104478.
- [5] KIM D H, et al. Composite Structures, 2015, 131:742-752.
- [6] DU B, et al. Materials (Basel), 2023, 16(3). DOI: 10.3390/ma16030967.
- [7] 张振明.变厚度复合材料汽车防撞梁优化设计研究[D].长沙:湖南大学,2014.
ZHANG Zhenming. Research on optimization design of composite automotive bumper beam with variable thickness[D]. Changsha: Hunan University, 2014.
- [8] 赵智奎,等.纺织科学与工程学报,2023,40(3):120-125,138.
ZHAO Zhikui, et al. Journal of Textile Science and Engineering, 2023, 40(3):120-125, 138.
- [9] DUAN S, et al. Transport, 2018, 33:1 135-1 143.
- [10] XUE Y, et al. Polymer Composites, 2021, 42(6):2 933-2 947.
- [11] DU B, et al. Polymers (Basel), 2022, 14(9). DOI: 10.3390/polym14091814.
- [12] 韩善灵,等.复合材料科学与工程,2024(2):119-128.
HAN Shanling, et al. Composites Science and Engineering, 2024 (2):119-128.
- [13] 付浩博.锻压装备与制造技术,2023,58(4):123-126.
FU Haobo. China Metalforming Equipment & Manufacturing Technology, 2023, 58(4):123-126.
- [14] DIXIT Y, et al. Journal of Dynamic Behavior of Materials, 2020, 6 (1):96-111.
- [15] HU Y, et al. Advances in Mechanical Engineering, 2015, 7(6). DOI:10.1177/1687814015589458.
- [16] SALIFU S, et al. Materials Today:Proceedings, 2021, 38:712-716.
- [17] WITAYAKRAN S, et al. Key Engineering Materials, 2017, 751: 779-784.
- [18] ADESINA O T, et al. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2019, 103(5-8):1 781-1 797.
- [19] AHMAD NADZRI S N Z, et al. Journal of Industrial Textiles, 2022, 51(3):4 167S-4 183S.
- [20] IRAWAN A P, et al. Polymers, 2022, 14(24). DOI: 10.3390/polym14245562.
- [21] MUTHALAGU R, et al. Materials Today:Proceedings, 2021, 46: 433-438.
- [22] BERTON T, et al. Composites Part B: Engineering, 2019, 168:

- 140–151.
- [23] ZHU G, et al. *International Journal of Crashworthiness*, 2016, 22(4):365–376.
- [24] GODARA S S, et al. *Materials Today: Proceedings*, 2020, 26: 2 601–2 607.
- [25] JIAO W L, et al. *Mechanics of Advanced Materials and Structures*, 2022, 30(16):3 245–3 256.
- [26] JIAO W L, et al. *Materials (Basel)*, 2022, 15(16). DOI: 10.3390/ma15165480.
- [27] BELINGARDI G, et al. *Composite Structures*, 2013, 102: 217–225.
- [28] MARZBANRAD J, et al. *Thin-Walled Structures*, 2009, 47(8-9): 902–911.
- [29] DAVOODI M M, et al. *Life Science Journal-Acta Zhengzhou University Overseas Edition*, 2012, 9(1):210–213.
- [30] YAN L, et al. *Composites Part B:Engineering*, 2014, 63:15–26.
- [31] SARKHOSH R, et al. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 2022, 44(8). DOI: 10.1007/s40430-022-03662-0.
- [32] 卢强,等. *现代制造工程*, 2023(3):77–82, 76.
LU Qiang, et al. *Modern Manufacturing Engineering*, 2023(3):77–82, 76.
- [33] SEBAEY T A, et al. *Composite Structures*, 2021, 255. DOI: 10.1016/j.compstruct.2020.112910.
- [34] YIN D, et al. *Mathematical Problems in Engineering*, 2020:1–17. DOI:10.1155/2020/8764349.
- [35] LEE J W, et al. *Fibers and Polymers*, 2022, 23(7):1 965–1 974.
- [36] JOO S J, et al. *Composite Structures*, 2020, 236. DOI: 10.1016/j.compstruct.2019.111849.
- [37] 余航. *金属与复合材料的混合结构吸能特性研究*[D]. 长沙: 湖南大学, 2018.
YU Hang. *Study on energy absorption characteristics of metal/composite hybrid structures*[D]. Changsha: Hunan University, 2018.
- [38] ROUZEGAR J, et al. *Iranian Journal of Science and Technology: Transactions of Mechanical Engineering*, 2019, 44(3):585–598.
- [39] ZHA Y, et al. *Polymer Composites*, 2020, 41(11):4 602–4 618.
- [40] ZHOU Q, et al. *Fibers and Polymers*, 2021, 22(6):1 761–1 773.
- [41] LAMBIASE F, et al. *Journal of Materials Processing Technology*, 2015, 215:12–19.
- [42] KLUKE M. *Reinforced Plastics*, 2018, 62(2):79–81.
- [43] NAGEL P, et al. *Welding in the World*, 2017, 61(5):1 057–1 067.
- [44] WIECZOREK A, GRAUL M, DILGER K. Bonding strength of hot-formed steel with an AlSi coating and approaches to improve it by laser surface engineering [C]/L. F. M. D. SILVA. *Materials Design and Applications*. Cham:Springer International Publishing, 2017:389–398.
- [45] WEHLER S, et al. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D:Journal of Automobile Engineering*, 2020, 235(5):1 183–1 190.