

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2020.06.026

# 纤维增强复合材料薄壁件轴向压缩吸能性研究进展

董帆<sup>1</sup>, 马其华<sup>1,2</sup>, 周天俊<sup>1</sup>

(1. 上海工程技术大学机械与汽车工程学院, 上海 201620; 2. 高性能纤维及制品教育部重点实验室(B类), 东华大学, 上海 201620)

**摘要:**从结构设计、材料选择以及基于轻质、高强的多目标优化设计等三个方面分析了提高纤维增强复合材料薄壁件轴向吸能性的研究现状与发展方向,为开展轻量化替代材料指明发展方向。研究分析表明,纤维增强复合材料合理的结构选择与优化设计可有效减轻结构重量、提高结构吸能效率、改善结构可靠性,具有其他材料无法比拟的优势,可以为汽车轻量化发展提供现实可行的解决方案。

**关键词:**纤维增强复合材料;薄壁结构;改善;比吸能;优化设计

**中图分类号:** TG156 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2020)06-0137-08

## Research Progress on Axial Compression Energy Absorption of Fiber-Reinforced Composite Thin-Walled Parts

Dong Fan<sup>1</sup>, Ma Qihua<sup>1,2</sup>, Zhou Tianjun<sup>1</sup>

(1. School of Mechanical and Automotive Engineering, Shanghai University of Engineering and Science, Shanghai 201620, China;

2. Key Laboratory of High Performance Fibers & Products, Ministry of Education, Donghua University, Shanghai 201620, China)

**Abstract:** This paper analyzes the research status and development direction of improving the axial energy absorption of fiber-reinforced composite thin-walled parts from three aspects, including structural design, material selection and multi-objective optimization design based on light weight and high strength. Developing direction for developing lightweight alternative materials was proposed. The analysis show that the reasonable structural selection and optimization design of fiber reinforced composite materials can effectively reduce the weight of the structure, improve the energy absorption efficiency of the structure, and improve the reliability of the structure. Fiber reinforced composite materials has unmatched advantages of other materials and can provide a realistic and feasible solution for the development of lightweight vehicles.

**Keywords:** composite material; thin-walled structure; improvement; specific energy absorption; optimized design

合理的设计和布置缓冲吸能元件,以最少的材料质量投入获得最大的结构吸能特性是轻量化技术追求的目标。传统金属材料多是通过增加结构的厚度与尺寸来改善吸能特性,这与时代发展趋势明显相悖。考虑燃油经济性、排放污染、结构承载和美观等方面要求,逐渐引入非金属材料作为替代品成为目前汽车、航空等领域的研究热点。

纤维增强复合材料具有比强度高、比吸能强、可设计性好等优点<sup>[1]</sup>。如玻璃纤维和碳纤维复合材料是典型的脆性材料,在发生断裂之前通常表现为线弹性,与金属材料相比,对冲击损伤很敏感。但是,如果适当的引导破坏,复合材料结构可以以可控的方式吸收大量冲击能量<sup>[1-3]</sup>。纤维复合材

料薄壁结构中以管件结构最为经典,且应用范围最广。笔者以纤维增强复合材料薄壁管件结构为分析重点,对改善其吸能特性的方法及其多种影响因素进行综述,总结了目前学者们在此领域的研究,并对目前研究中的不足进行了总结。

### 1 薄壁件轴压吸能特性的评价

薄壁件轴向压缩载荷下的吸能性主要采用比吸能(SEA)、初始峰值载荷( $F_{\max}$ )、平均峰值载荷( $F_{\text{mean}}$ )等三个评价指标进行对比分析。

不同于金属件主要通过塑性变形来耗散能量,复合材料薄壁件主要是通过多种形式的细观破坏耗散能量,如纤维和基体的断裂、层间裂纹及开裂、局部屈曲等。在轴向载荷

**基金项目:** 纤维材料改性国家重点实验室开放课题(KF1826),中央高校基本科研业务费专项资金项目(2232018A3-02)

**通讯作者:** 马其华,博士研究生,副教授,主要从事碳纤维复合材料与汽车轻量化设计 E-mail: mqh0386@163.com

**收稿日期:** 2020-04-01

**引用格式:** 董帆,马其华,周天俊. 纤维增强复合材料薄壁件轴向压缩吸能性研究进展[J]. 工程塑料应用,2020,48(6):137-144.

Dong Fan, Ma Qihua, Zhou Tianjun. Research progress on axial compression energy absorption of fiber-reinforced composite thinwalled parts[J]. Engineering Plastics Application, 2020, 48(6):137-144.

作用下,复合材料常见变形模式有:(1)脆性断裂:如碳纤维环氧树脂复合管轴向压缩;(2)渐进式叠缩:如纤维/金属复合材料结构的轴向压缩,如图1所示。纤维增强复合材料的塑性变形以材料脆性断裂为主,吸能机理是多种细观尺度的损伤破坏共同作用的结果,而这些细观破坏机理又是通过宏观破坏模式的形式表现出来,决定复合材料薄壁件的能量吸收能力。

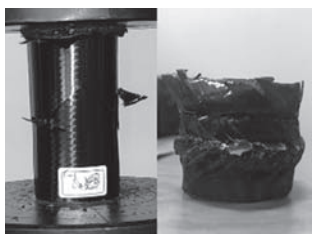


图1 复合材料管常见变形模式

从试验、数值模拟、理论预测等方面考虑,根据纤维增强复合材料薄壁件在轴向压缩下的工况要求,采用MTS或WDW等测试系统对试件进行轴向压缩实验。以实验为基础,建立相应的理论预测与有限元模型,通过实验与仿真的结果对比,验证仿真的可行性,并对纤维增强复合材料薄壁件的能量吸收影响因素和影响规律进行系统总结,为结构的耐撞性设计提供依据。复合材料吸能特性分析如图2所示。

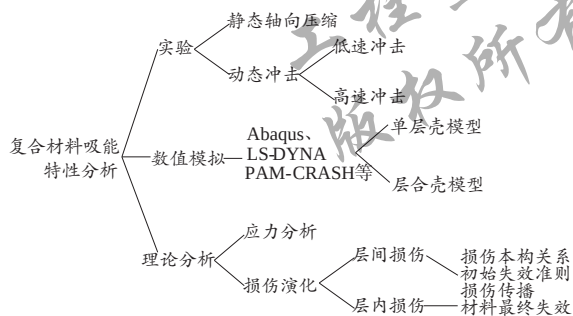


图2 复合材料吸能特性分析

## 2 复合材料薄壁管的结构影响

在设计和应用复合材料结构的缓冲吸能元件时,必须满足两个条件:一是在碰撞发生时必须以极大变形吸收大部分撞击能量。这需要对复合材料结构形式进行合理设计;二是复合材料结构在撞击条件下有较平稳的破坏模式,以可控的方式吸收能量。这需要研究结构是如何影响损伤模式和吸能机理的。

### 2.1 触发结构

纤维增强复合材料薄壁件在轴向撞击过程中表现为脆性断裂的特征和较高的能量吸收能力,可作为理想的耐撞性元件。国内外学者研究表明,撞击或准静态压缩在引发阶段的结构破坏形式和载荷特征将在之后的渐进破坏过程中得到保持或某种程度的延续,从而影响整个结构的缓冲吸能特

性。对纤维增强复合材料薄壁件端部进行削弱处理,可引发渐进破坏过程并降低初始载荷,对实际工程具有重大意义。

目前最常用、最简单的引发方式是单倒角引发。例如,G. L. Farley 和 Thornton, Hull 等<sup>[4]</sup>采用这种削弱引发方式对试件进行研究,发现这种引发机制可以减小初始压溃载荷,使复合材料可以稳态失效。基于此,王璠等<sup>[5]</sup>研究了引发角对低速冲击下能量吸收的影响,结果表明试件倒角对能量吸收效果的影响控制在5%以内,所以合理的倒角不仅可降低载荷峰值,而且不影响试件能量吸收效果。陈永刚等<sup>[6]</sup>在圆管的一端开出典型的 $[15]_0$ ,  $[45]_0$ ,  $[60]_0$ 的引发角。从试验结果和宏观失效形貌上,发现 $[45]_0$ 引发角不仅峰值载荷适中,而且引发距离短,比较适合引发初始失效。借鉴单倒角引发的经验,研究人员又提出了一种新的引发方式:双倒角引发,即在试件的两端同时做削弱处理<sup>[1]</sup>。双倒角引发的试件表现出比单倒角更小的初始引发斜率,更低的初始峰值载荷 $P_{Cr}$ ,以及更长的引发阶段,而且在到达 $P_{Cr}$ 以后载荷保持相对稳定,并有可能随压缩的继续而呈现逐渐增加的态势。双倒角引发和单倒角引发试件的比吸能相差不多,但是在延长引发阶段和降低峰值载荷上,双倒角表现更优。

国际学者对纤维增强复合材料对称元件进行研究<sup>[7-8]</sup>,发现复合材料对称元件依靠弹性变形后的压溃阶段吸收大量能量,同时这种对称构造还可以有效地引发破坏,使破坏过程更易于控制。基于此,宋毅<sup>[9]</sup>,王璠<sup>[5]</sup>和 S. Palanivelu 等<sup>[10]</sup>提出了一种新颖的花瓣型引发方式,研究表明花瓣型结构的试件能有效地引发渐进破坏,极大地降低了初始载荷峰值,试件到达初始峰值的进程大大减缓了,且在达到初始峰值载荷后,应力-位移曲线仍保持较高的平均载荷,显示出了良好的延续性,不同触发机制如图3所示。

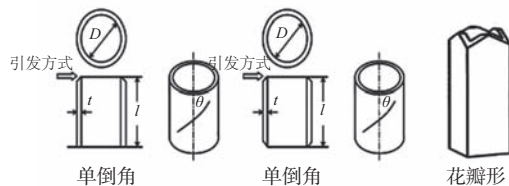


图3 单倒角、双倒角、花瓣形触发机制

触发机制可以很好地引发纤维增强复合材料管件稳态压溃失效,与比吸能没有直接的联系,但是从载荷一位移曲线分析,前者引发更稳定,后者作为探索复合材料管件稳态压溃的引发机制,同样丰富了复合材料管件稳态压溃研究。

### 2.2 诱导结构

复合材料圆柱壳吸能结构的一个重要应用是在车辆碰撞安全领域<sup>[11]</sup>。为保证车辆的碰撞安全,在发生事故时,车身应以一定的方式破坏。如图4所示。为提高结构的耐撞

性能,设置一种合理的诱导机制使碰撞能的耗散尽可能以一种可控制、可预见的方式进行<sup>[12]</sup>。

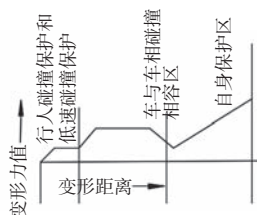


图4 车前部理想的碰撞特性曲线

很多学者在复合材料薄壁件的基础上提出了诱变原则,并通过数值模拟和实验的方法分析了诱导孔对吸能特性的改善情况。例如 E. G. Guynn 和 Bradley<sup>[12]</sup> 通过细观力学去解释损伤破坏,结果表明开孔复合材料层合板的压缩破坏是从边缘开始的通过局部屈曲/剪切破坏,使力稳定传播直到达到临界大小。C. Soutis 等<sup>[13]</sup> 对其失效特性进行了实验研究,发现孔附近的应力集中降低了穿孔层合板的临界压缩强度。在此基础上,对复合材料的诱导研究逐渐趋于工程实际。S. R. Hallett 等<sup>[14]</sup> 研究了圆形孔尺寸对复合穿孔管的影响,他们发现由于孔径的尺寸,层压板的厚度,纤维层数的不同,失效力和损伤机制存在较大差异,吸能效果也各不相同。Fathollah<sup>[15]</sup>, Wang Weiqiang 等<sup>[16]</sup> 对纤维增强复合材料管做了轴向压缩试验,他们发现多孔管的失稳模式与完整管相似,但多孔管的临界载荷和刚度却大大降低了。Liu Qiang 等<sup>[17]</sup> 又从穿孔复合管的孔径尺寸,孔的形状和孔的分布三方面对其承载能力和吸能特性进行了研究。如图5所示。孔的大小对峰值载荷无明显影响;随着孔形状的不同,  $F_{max}$  和 SEA 在一定程度上也发生微小变化,但是带有圆孔管件的 SEA 小于带有方形和菱形孔的 SEA; 单面、相邻面和相对面三种不同的分布方式,峰值力几乎保持恒定,比吸能仅与孔的数量有关与孔的分布无关。

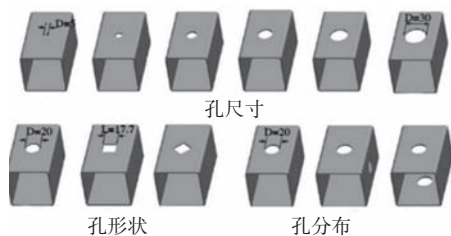


图5 穿孔管

与完整管的逐渐压溃不同,在轴向压缩工况下,诱导孔的存在使复合材料管件结构发生局部屈曲,降低初始峰值载荷,引导管件结构以可控的方式进行吸能对研究复合材料结构耐撞设计具有重要意义。

### 2.3 几何结构

复合材料结构的能量吸收机理与压溃形态不同于金属结构。纤维的断裂及其扩展方向、基体的开裂以及纤维与基

体界面的连接强度是影响复合材料结构能量吸收机理和压溃形态的因素<sup>[18-19]</sup>。由于其各向异性的材料性质,精确的几何结构设计对性能有重要影响。

国内外一批学者对复合材料管件的截面形状进行了研究。王振等<sup>[20]</sup> 探索了不同锥度( $\alpha$ )与层数( $N$ )的比值( $\alpha/N$ )对比吸能和初始峰值载荷的影响。发现随着 $\alpha/N$ 值的增大,比吸能和峰值载荷均减小;当 $\alpha/N > 0.5$ 时,锥管在压溃过程中不再发生内外分层。张惠鑫等<sup>[21]</sup> 研究了圆锥形复合材料薄壁管的压溃吸能特性,证实了圆管具有较为稳定的失效模式和较好的吸能特性。董银飞<sup>[22]</sup>,牟浩蕾等<sup>[23]</sup> 对不同截面形状的复合管在轴向压溃载荷下的损伤能量吸收特性进行了数值分析。如图6所示。结果表明,圆管的吸能能力最强,但其压溃载荷峰值较大,而六边形管在准静态压溃和冲击压溃中均表现出较高的比吸能和较低的载荷,具有较好的综合吸能性能。综合评价来说,截面的边数对吸能影响较大。对于边数较少的四边形,屈曲多为大面积褶皱,材料利用率低;截面边数较多的构件在屈曲过程中呈现逐渐塌陷状态,材料利用率较高,吸能效果好。



图6 不同截面形状复合材料管准静态压溃

从复合结构设计角度来看,薄壁管壁厚( $t$ )、直径( $D$ )及长度等被认为是影响复合材料吸能性最基本的设计参数,国内外学者对此做了大量研究。冯振宇等<sup>[24]</sup> 的研究表明复合材料壁厚的不确定性对吸能特性的影响比内径的影响更为明显。A. M. S. Elfetorif 等<sup>[25]</sup> 通过数值模拟发现增加的 $t/D$ 可以提高能量吸收的能力。H. Hamada 等<sup>[26]</sup> 研究了 $t/D$ 比以及 $t$ 和 $D$ 的绝对值对复合管能量吸收行为的影响。结果表明,在 $t$ 逐渐增加到2~3 mm的临界范围内 SEA 随之增加,超过此临界范围则减小。Ya Libo<sup>[27]</sup> 和 WangYifan 等<sup>[28]</sup> 在轴压条件下研究了复合材料管件的壁厚和高度对破碎方式和变形的影响。结果表明所有管子以类似脆性压裂破碎模式变形,层数多,长度短会增大峰值载荷和疲劳强度,对吸能性产生积极影响。

对耐撞性的数值分析已经有40年,为了获得满意的结果,研究人员必须进行多次重复实验,试验中不稳定和不确定性因素使得有限元分析存在很大程度的经验性和主观性。受限于商用软件计算时间和模型复杂性的限制,有限元分析已经不适用于一些优化设计程序集。因此,研究人员开始采用各种代理模型技术建立不同变量之间线性关系来代

替冗长的反复式、周期式分析。张哲绎等<sup>[29]</sup>在张惠鑫等<sup>[30]</sup>对圆锥管研究的基础上,选择锥形管上端直径 $d$ 为设计变量,采用响应面法求解复合材料薄壁件的最优吸能。李喆<sup>[2]</sup>等在H. Hamada等<sup>[26]</sup>研究的基础上以响应表面法为基础应用序列二次规划算法对吸能管管件的壁厚、截面长度、管长进行了优化设计,求得在设计范围内的最适配比。张勇<sup>[31]</sup>,贺兵等<sup>[32]</sup>为全面地评价薄壁管件在多种影响因素下的耐撞性,在此基础上以薄壁管件的厚度、半径及长度为设计变量,依托于此建立出高精度模型,提高优化效率的同时,为减少工程成本提供可靠依据。

#### 2.4 铺层结构

影响纤维增强复合材料薄壁件变形模式和压溃载荷水平的因素有很多,其中纤维铺设角度和纤维铺设顺序对复合材料的能量吸收特性影响较大,因此在工程设计中得到了广泛的重视<sup>[33-34]</sup>。

纤维铺设方式的不同导致复合材料的轴向刚度不同,从而产生了破坏模式与破坏机理的差别。G. L. Farley<sup>[35]</sup>, R. Keal<sup>[36]</sup>和D. Hull等<sup>[37]</sup>研究了玻璃纤维增强聚酯基圆管随纤维铺层角度改变对比吸能的影响,发现,当纤维铺层角度小于 $[65]_0$ 时,比吸能与铺层角度成正比,高于 $[65]_0$ 时比吸能与铺层角度成反比。龚俊杰<sup>[38]</sup>,罗敏等<sup>[33]</sup>研究了多个角度的纤维复合材料管在不同轴工况下的损伤影响,发现随着铺设角度 $\theta$ 的增大,纤维方向和圆管轴向之间的夹角增大,圆管轴向刚度下降,初始峰值载荷降低。解江等<sup>[39]</sup>分析了不同纤维铺层角度对复合材料薄壁圆管轴向压溃吸能特性的影响规律。结果如图7所示。当纤维铺层角度从 $[15]_0$ 增加到 $[90]_0$ ,在准静态轴向压溃下薄壁圆管的比吸能先增大, $[75]_0$ 之后会有一定程度减小,但比吸能值仍然相对较大。

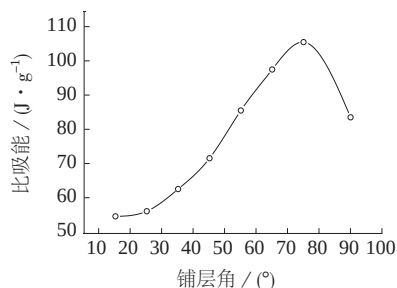


图7 不同纤维铺层角度对比吸能的影响

复合材料管件的比吸能随纤维铺设角度的变化而改变,这主要是由于不同纤维缠绕角下壳体的轴向和径向刚度不同,导致管件在轴向冲击荷载下破坏模式和损伤机理不同。因此针对具有典型破坏过程的 $[\pm\theta]_s$  ( $\theta=[15]_0$ ,  $[30]_0$ ,  $[45]_0$ ,  $[55]_0$ ,  $[65]_0$ ,  $[75]_0$ ) 试件的能量吸收能力进行了对比分析,见表1。

表1 典型纤维铺设角度的失效特点

| 角度                | 失效破坏特点   | 典型角度            | 结果分析                                               |
|-------------------|----------|-----------------|----------------------------------------------------|
| $\theta < [45]_0$ | 层间开裂破坏为主 | $[\pm[15]_0]_s$ | 纤维角度较小,铺设纤维主要起到圆柱壳的轴向增强作用对结构的不均匀性、实验条件、初始缺陷等因素非常敏感 |
| $\theta > [45]_0$ |          | $[\pm[75]_0]_s$ | 纤维缠绕角度使圆柱管周向刚度和强度增加                                |

另外,目前有关纤维铺设方式对复合材料薄壁管件吸能特性的影响研究主要集中在铺层角度、成型工艺等方面,对铺层顺序的研究并不全面<sup>[40-41]</sup>。铺层顺序作为复合材料薄壁管件吸能特性的重要影响因素之一,很多学者对此展开了研究。张鹏飞<sup>[34,42]</sup>,王天宇等<sup>[41]</sup>首先对复合材料层合板结构展开了研究,发现铺层顺序对复合材料受压分层有较大影响,继而影响分层后的屈曲强度。

解江等<sup>[40]</sup>在 $[0/90]_{3s}$ 铺层方式的基础上提出另两种铺层方式,如图8所示。结果表明,不同角度的铺层交替,导致复合材料的轴向刚度不同,对结构临界屈曲载荷的影响较大。综合评价发现,当 $0^\circ$ 铺层放在外层时,弯曲刚度增加并且层间剪应力较大,材料主要表现为分层破坏,吸收能量较低;而在内层时,材料破坏为横向剪切模式,吸能较大。说明纤维失效方式在结构宏观失效中占主导地位更有利于复合材料薄壁管件吸收能量。

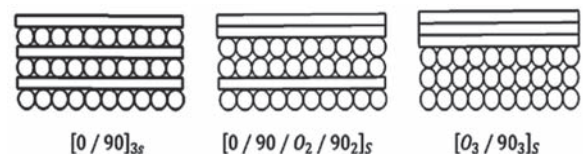


图8 铺层示意图

对于复合材料而言,铺层结构优化是设计中不可或缺的关键。合理的铺层顺序、铺层角度及铺层层数在同等条件下会提高薄壁件的临界屈曲载荷,增强吸能能力。吴浩<sup>[43]</sup>、臧杰<sup>[44]</sup>、范志瑞等<sup>[45]</sup>对复合材料的铺层角度与顺序进行了深入研究,寻求满足可靠性与耐撞性要求的最优设计。吴浩考虑材料及载荷的不确定性,通过响应面法和有限元法的结合,验证了可靠性优化方法的有效性。在前人的验证的基础上,范志瑞,苏尚彬以结构屈曲载荷最大为目标,对铺层层数和铺层顺序进行优化。而臧杰运用改进的遗传算法,解决遗传算法过早收敛问题,在满足复合材料铺层设计准则的前提下,以强度最大为目标对铺层角度进行优化。在进行纤维增强复合材料薄壁结构吸能性分析时,建立近似代理模型,用代理模型代替了原有的高精度分析模型,在提高仿真优化效率的同时,又为复合材料结构吸能性提供保障。

#### 3 复合材料薄壁管的材料影响

纤维增强复合材料管件在撞击压缩过程中表现出不同

于金属塑性变形的脆性破坏,失效模式和能量吸收能力纤维/基体材料成分、体积分数、界面性能等都有密切关系,表现出很强的各项异性和非线性。

### 3.1 各种纤维的影响

首先是纤维极限应变的影响。通常,纤维的断裂应变越小,比吸能越大。国内外学者们研究发现碳纤维比玻璃纤维或芳纶纤维增强的复合材料管具有更高的比吸能<sup>[46-47]</sup>。G. L. Farley<sup>[48]</sup>认为,某种纤维增强的材料若想获得最大的吸能能力,基体的断裂应变必须比纤维的断裂应变大。

其次是纤维刚度的影响。陈永刚<sup>[49]</sup>,马晓静等<sup>[50]</sup>对 T300 和 T700 碳纤维薄壁管的力学性能进行了探究比较。发现 T300 和 T700 增强的复合材料的破坏形式明显不同。G. L. Farley<sup>[48]</sup>研究了不同纤维材料的复合材料管,发现吸能特性在两个强度范围内呈现相反的趋势。在 75 ~ 210 GPa 范围内,试件破坏主要是层束弯曲,其次是断裂破坏,复合材料吸能能力随纤维刚度的增加而增强;而刚度在 210 ~ 525 GPa 范围内时,吸能能力明显随刚度增加而减弱。而在在复合材料管的破坏模式相同的情况下,纤维刚度对能量吸收的影响没有极限应变影响大。

再者是纤维类型的影响。玻璃纤维、碳纤维增强热固性树脂复合材料管是脆性的,轴压破坏模式是碎片型或张开型,通过纤维的断裂等破坏机理吸收大量能量<sup>[51]</sup>。最后是纤维密度的影响。密度低的纤维复合材料管会有较高的比吸能。这是因为比吸能定义为破坏单位质量的材料耗散的能量,当能量吸收相同时,密度越低比吸能越大。

目前关于纤维体积含量对比吸能的影响还不足,已有研究表明纤维体积含量的增加不一定总使比吸能增大。G. L. Farley<sup>[48]</sup>的研究表明,当纤维体积含量在 40% ~ 70% 范围内增加时,由于层间剪切强度降低,碳纤维/环氧的比吸能反而减小。一般纤维体积超过 50% 时,能量吸收能力基本保持不变<sup>[52]</sup>。

### 3.2 基体与界面的影响

树脂基复合材料具有比强度高、比模量大、抗疲劳性能好等优点,在复合材料结构中支持和固定纤维材料,传递纤维间载荷<sup>[53]</sup>。以环氧树脂为例,具有良好耐水性、耐电性等优点,特别是优异工艺操作性而被广泛使用。陈永刚等<sup>[49]</sup>对比了 5288 和 5268 环氧树脂为基体的两种复合材料薄壁管的力学性能。郑志才等<sup>[53]</sup>研究了不同环氧树脂含量对复合材料管轴向压缩强度的影响,如图 9 所示。从图中可以看出适当的增加树脂含量有利于提高管件的轴向压缩强度。李世超等<sup>[54]</sup>以碳纤维增强环氧树脂基复合材料为研究对象,研究其在超低温情况下的力学性能,为纤维增强复合材料在特定情况下的应用提供理论依据。已有研究表明基体

的极限应变越大,脆性纤维增强的复合材料能量吸收能力越强,而纤维增强复合材料的能量吸收能力越弱。

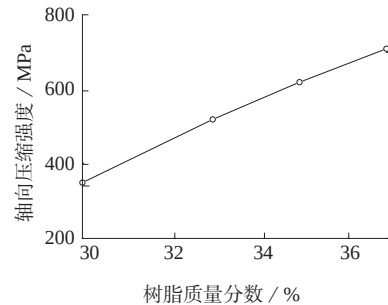


图9 不同树脂含量的复合材料管的轴向压缩强度

纤维增强复合材料界面是增强纤维与基体材料之间的桥梁,也是应力传递的纽带。纤维的表面处理提高了纤维与树脂的粘接强度,而粘接良好的复合材料又主要受基体损伤的控制。国内外学者对纤维的表面进行了改善,研究界面强度对复合材料破坏及力学性能的影响<sup>[55-57]</sup>。研究表明复合材料在强界面情况下发生脆性破坏,在弱界面情况下发生韧性破坏,且增强纤维对复合材料性能的增强效果与界面强度有关。

### 3.3 异质材料的影响

纤维增强复合材料依靠其比强度高、比刚度大、比吸能强等优点已成为可以替代金属材料的良好选择。但其作为脆性材料,韧性较差,各向异性严重,失效模式不稳定<sup>[58-59]</sup>。目前将复合材料分别与金属材料、泡沫夹心材料相结合形成多材料体系管是一个新的研究方向。

纤维/金属多材料体系管是指金属与纤维材料通过一定的成型工艺紧密结合在一起的薄壁管体。其比刚度较好,兼顾刚性的同时可塑性也是值得认同,并且在抗腐蚀性实验中表现突出。近年来,国内外研究人员针对复合管以及其它类型复合材料管的吸能特性开展了大量工作,许多研究表明薄壁金属管上缠绕复合材料(以下简称复合管)在轴向压溃时比金属管具有更大的比吸能率,并开始在吸能结构设计领域中得到应用<sup>[60]</sup>。Hwang Woo-Chae<sup>[61]</sup>和 Shi Peilong 等<sup>[62]</sup>研究了具有代表性的 Al/碳纤维增强塑料(CFRP)混合构件,发现 Al/CFRP 混合管在准静态轴向压缩载荷下的失效模式呈现出两种材料叠加的失效模式特征,内部依靠金属管的渐进叠缩、层间和层内裂纹拓展吸收能量,外部 CFRP 层通过基体和纤维的断裂、纤维弯曲吸收能量。M. R. Bambach<sup>[63]</sup>和 R. Corin 等<sup>[64]</sup>研究了复合管的轴向失效行为,发现在一定的长细比中,可以有效延缓钢管局部屈曲,并导致混合管的峰值载荷和 SEA 值显著增加。Zhu Guohua 等<sup>[65]</sup>对比了如图 10 所示的三种混合方式的样件在准静态轴向压缩实验条件下的失效形式和吸能特性。实验结果表明 a 样件的 SEA 比 b 样件分别增加了 40% 和 19%,比 c 样件分别

增加了 45% 和 29%。由上可知,碳纤维管内嵌于金属管吸能效果最佳。通过文献看出大多数研究人员只专注于力学性能研究,很少有研究设计到复合管的优化。H. W. Nam<sup>[66]</sup> 和 Peng Wenjie 等<sup>[67]</sup> 采用多目标设计对纤维增强金属材料性能进行了探索,为工程实际应用提供依据。D. S. Lee 等<sup>[68]</sup> 在此基础上设计开发了稳健的多目标优化,改善纤维-金属力学性能,提高承载能力。

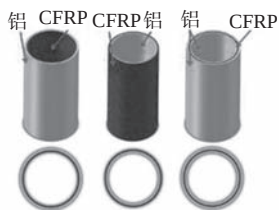


图 10 不同混合形式的铝/CFRP 混合圆管

对于金属/CFRP 混合管来说,CFRP 结构的不稳定局部屈曲失效模式可以通过金属管的限制转变为渐进式失效模式,而金属管又因为 CFRP 结构的增强提升承载能力,从而改善整个混合结构的能量吸收能力。

而纤维增强复合材料夹芯结构,是复合材料的一种特殊形式,是由具有高强度、高模量的蒙皮与低密度夹心结构通过整体一次成型或者胶接二次成型<sup>[69]</sup>,研究表明充分利用两者的优势可以实现整个结构的性能提升。

目前纤维增强复合材料夹心结构广泛应用于汽车碰撞装置、军用直升机坠落保护装备和航天器软着陆配件等领域。根据使用芯材的种类,可以分为泡沫夹芯结构,蜂窝夹芯结构,巴莎轻木夹芯结构以及异型芯材夹芯结构<sup>[70]</sup>,如图 11 所示。

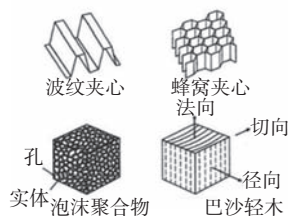


图 11 夹心结构中常见芯材

T. Thomas<sup>[71]</sup> 和 Wang Lijun 等<sup>[72]</sup> 对蜂窝结构的受力性能进行了研究,结果表明,与由相同材料制成且壁厚相同的整体板相比,蜂窝板的耐撞性更好。基于此,范学明等<sup>[73]</sup> 提出了一种玻璃纤维增强复合材料作为外壁的泡沫填充筒体。黄睿<sup>[74]</sup> 和桂良进等<sup>[75]</sup> 将前人的理论运用到泡沫填充管的轴向压缩试验中,发现与管的高度相比,管的壁厚与直径对管的吸能性能有显著影响,总体吸能效果比单纯增加厚度明显的多。对泡沫夹心结构的研究表明,芯材与蒙皮结构的合理结合可构成一种很好的碰撞吸能结构<sup>[76]</sup>。但是复合材料夹心结构存在太多变量因素,蒙皮的厚度,高度,泡沫的填充

密度,效果等都会影响碰撞吸能特性。基于此,杨扬等<sup>[77]</sup> 采用 ANSYS 对蜂窝夹心管内外蒙皮及夹心高度进行了优化。修英妹等<sup>[78]</sup> 在此基础上开发了复杂问题的结构优化软件系统,验证夹心结构方案设计的可靠性,在减轻质量的同时,获得较好的比吸能。

复合材料结构吸收冲击能的根本原因是其发生了细观尺度的屈曲、损伤、断裂和破坏。要了解复合材料薄壁件的破坏机理需要对复合材料单层板的破坏作深入研究。而影响复合材料单层板和层合结构的细观破坏形式的因素有很多,主要有纤维的种类、纤维的体积分数、基体与界面的性能等。这些因素都与吸能性密切相关。掌握材料与工艺特性,分析复合材料薄壁件的破坏规律,选择合适的参数配比,提高复合材料薄壁件的吸能特性。

#### 4 结语

综述了近年来纤维增强复合材料薄壁件的渐进破碎吸能行为。在纤维增强复合材料轴向破碎过程中,断裂破坏是吸收能量的主要因素。而断裂破坏分为突变型和渐进型两种,突变型能量吸收较小,渐进型依靠渐进叠缩、层间和层内裂纹拓展吸收大量能量。从复合材料的几何机构、材料、参数优化设计等方面对文献进行了综述,可以看出,复合材料结构的能量吸收机理和破坏模式远比金属结构件复杂、并有许多问题有待进一步的深入研究。

(1) 总结现有文献中的纤维增强复合材料结构,发现复合材料多为单向纤维结构,对编织复合材料的性能还没有充分地认识。纤维材料的纺织结构和不同类型纤维材料的混杂效应以及界面的连接强度都会对结构破坏模式和能量吸收能力产生不可忽视的影响。

(2) 与金属材料相比,复合材料的成本依然较高,特别是高性能复合材料。在目前的复合材料成型工艺中,热固性树脂仍是主要采用的成型工艺,这样就不可避免地造成浪费污染。同时在加工制造过程中,内部会存在空隙、裂纹、纤维断裂等肉眼无法观察到的缺陷,对实验结果产生较大影响。

(3) 复合材料的各向异性决定了其吸能机理的复杂性,也表明影响其性能的因素有很多,从结构形状、几何尺寸到加工工艺等都是不可忽略的。目前最准确的性能研究是实验,但是面对周期长、代价高、不可重复多次实验等硬性缺点的存在,我们需要建立不同复合材料的数据库,以便能够用于数值模拟。

#### 参考文献

- [1] 杜星文,等. 科学出版社,2004.  
Du Xingwen, et al. Science Press, 2004.
- [2] 李喆,等. 复合材料学报,2011,28(4):212-218.  
Li Zhe, et al. Journal of Composite Materials, 2011, 28(4):212-218.

- [3] 赵桂范,等. 哈尔滨工业大学学报,2005,37(2):177-179.  
Zhao Guifan, et al. Journal of Harbin Institute of Technology, 2005, 37(2):177-179.
- [4] Farley G L, et al. Journal of Composite materials.1992,26(1):37-50.
- [5] 王璠,等. 振动工程学报,2013,26(1):33-40.  
Wang Pan, et al. Journal of Vibration Engineering, 2013, 26(1):33-40.
- [6] 陈永刚,等. 材料工程,2004(12):36-39.  
Chen Yonggang, et al. Materials Engineering, 2004(12):36-39.
- [7] 刘瑞同,等. 热固性树脂,2004,19(3):39-46.  
Liu Ruitong, et al. Thermosetting Resin, 2004, 19(3):39-46.
- [8] Aminjikarai S B, et al. Composite Structures, 2007, 81(3):407-418.
- [9] 宋毅,等. 华南理工大学学报:自然科学版,2009,37(12):140-145.  
Song Yi, et al. Journal of South China University of Technology : Natural Science Edition, 2009, 37(12):140-145.
- [10] Palanivelu S, et al. Polymer Texting, 2010, 29(2):224-234.
- [11] Osman M, et al. Accident Analysis & Prevention, 2018, 111:161-172.
- [12] Gwynn E G, et al. Journal of Composite Materials, 1989, 23(5):479-504.
- [13] Soutis C, et al. Journal of Composite Materials, 1991, 25(11):1476-1498.
- [14] Hallett S R, et al. Composites Part A, 2009, 40(5):613-624.
- [15] Fathollah, et al. Thin-Walled Structures, 2012, 50(1):174-181.
- [16] Wang Weiqiang, et al. Thin-Walled Structures, 2015, 95:88-100.
- [17] Liu Qing, et al. Composite Structures, 2017, 160(1):23-25.
- [18] Palanivelu S, et al. Polymer Texting, 2010, 29(3):381-396.
- [19] Palanivelu S, et al. Composite Structures, 2011, 93(2):992-1007.
- [20] 王振,等. 振动与冲击,2018,37(7):172-178.  
Wang Zhen, et al. Journal Vibration and Shock, 2018, 37(7):172-178.
- [21] 张慧鑫,等. 计算机仿真,2018,35(7):194-199.  
Zhang Huixin, et al. Computre Simulation, 2018, 35(7):194-199.
- [22] 董银飞,等. 汽车复合材料碰撞吸能装置设计与仿真方法研究 [D]. 淄博: 山东理工大学, 2014.  
Dong Yinfei, et al. Research on design and simulation method of automobile composite material energy absorption device[D]. Zibo: Shangdong University of Technology, 2014.
- [23] 牟浩蕾,等. 航空制造技术,2015,58(19):83-87.  
Mou Hao lei, et al. Aviation Manufacturing Technology, 2015, 58(19):83-87.
- [24] 冯振宇,等. 振动与冲击,2015,34(12):7-12.  
Feng Zhenyu, et al. Journal Vibration and Shock, 2015, 34(12):7-12.
- [25] Elfetorif A M S, et al. 钢结构, 2008, 23(9):81-82.  
Elfetorif A M, et al. Steel Construction, 2008, 23(9):81-82.
- [26] Hamada H, et al. Composite Science & Technology, 1995, 55(3):211-221.
- [27] Yan Libo, et al. Materials and Design, 2013, 51(5):629-640.
- [28] Wang Yifan, et al. Composite Structures, 2016, 153:356-368.
- [29] 张哲绎,等. 复合材料薄壁结构抗撞性优化设计 [D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2016.  
Zhang Zheyi, et al. Optimum design of impact resistance of thin-walled composite structure[D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2016.
- [30] 张惠鑫,等. 计算机仿真,2018,35(7):194-199.  
Zhang Huixin, et al. Computre Simulation, 2018, 35(7):194-199.
- [31] 张勇,等. 中国机械工程,2012,23(21):2612-2616.  
Zhang Yong, et al. China Mechanical Engineering, 2012, 23(21):2612-2616.
- [32] 贺兵,等. 机械科学与技术,2018,37(3):466-474.  
He Bing, et al. Mechanical Science and Technology, 2018, 37(3):466-474.
- [33] 罗敏,等. 兵工学报,2009,30(S2):237-241.  
Luo Min, et al. Acta Armamentarii, 2009, 30(S2):237-241.
- [34] 张鹏飞,等. 铺层顺序对复合材料层合板冲击损伤阻抗性能的影响研究 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2012.  
Zhang Pengfei, et al. Effect of lamination order on impact damage impedance performance of composite laminates[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2012.
- [35] Farley G L, et al. Journal of Composite Materials 1983, 17(3):267-279.
- [36] Keal R, et al. University of Liverpool, 1983.
- [37] Hull D, et al. Composite Science & Technology 1991, 40(4):377-421.
- [38] 龚俊杰,等. 扬州大学学报:自然科学版,2009,8(4):39-42.  
Gong Junjie, et al. Journal of Yangzhou University: Natural Science Edition, 2009, 8(4):39-42.
- [39] 解江,等. 振动与冲击,2018,37(20):205-211.  
Xie Jiang, et al. Journal Vibration and Shock, 2018, 37(20):205-211.
- [40] 解江,等. 工程力学,2018,35(6):231-239.  
Xie Jiang, et al. Engineering Mechanics, 2018, 35(6):231-239.
- [41] 王天宇,等. 复合材料学报,2018,35(10):151-158.  
Wang Tianyu, et al. Journal of Composite Materials, 2018, 35(10):151-158.
- [42] 张鹏飞,等. 复合材料学报,2014,31(1):18-25.  
Zhang Pengfei, et al. Journal of Composite Materials, 2014, 31(1):18-25.

- [43] 吴浩,等. 复合材料学报,2007,24(5):149-153.  
Wu Hao, et al. Journal of Composite Materials,2007,24(5):149-153
- [44] 臧杰,等. 机械设计,2019,36(4):87-91.  
Zang Jie, et al. Mechanical Design,2019,36(4):87-91.
- [45] 范志瑞,等. 复合材料学报,2015,32(3):797-804.  
Fan Zhirui, et al. Journal of Composite Materials,2015,32(3):797-804.
- [46] 周志宏,等. 中国高新技术企业,2017(10):39-40.  
Zhou Zhihong, et al. China High Technology Enterprises,2017(10):39-40.
- [47] 孙永连,等. 材料导报,2014,28(S2):286-288.  
Sun Yonglian, et al. Materials Reports,2014,28(S2):286-288.
- [48] Farley G L. NASA Langley Technical Report Sever,1992.
- [49] 陈永刚,等. 航空学报,2005,26(2):246-249.  
Chen Yonggang, et al. Acta Aeronautica ET Astronautica Sinica,2005,26(2):246-249.
- [50] 马晓静,等. 直升机技术 2007(2):34-38.  
Ma Xiaojing, et al. Helicopter Technique,2007(2):34-38.
- [51] 张小琦,等. 纤维增强复合材料变形与损伤的细观力学分析[D]. 重庆:西南大学,2013.  
Zhang Xiaoqi, et al. Mesomechanical analysis of deformation and damage of fiber reinforced composites[D]. Chongqing: Southwest University,2013.
- [52] Ramakrishna S, et al. Composite Science and Technology,1993,49(4):349-356.
- [53] 郑志才,等. 工程塑料应用,2008,36(4):46-49.  
Zhen Zhicai, et al. Engineering Plastics Application,2008,36(4):46-49.
- [54] 李世超,等. 耐低温环境复合材料树脂基体的设计、制备及性能表征[D]. 大连:大连理工大学,2018.  
Li Shichao, et al. Design, preparation and performance characterization of low temperature environment composite resin matrix[D]. Dalian: Dalian University of Technology,2018.
- [55] 孙丽莉,等. 山东大学学报:工学版,2009,39(2):101-103.  
Sun Lili, et al. Journal of Shandong University Technology,2009,39(2):101-103.
- [56] Zhuang R C, et al. Composite Science and Technology,2010,70(10):1523-1529.
- [57] 李坤,等. 空间科学学报,2009,29(1):6-9.  
Li Kun, et al. Chinese Journal of Space Science,2009,29(1):6-9.
- [58] 裴永琪,等. 纤维与基体的界面力学特性分析[D]. 成都:西南交通大学,2012.  
Pei Yongqi, et al. Analysis of the mechanical properties of the interface between fiber and matrix[D]. Chengdu:Southwest Jiaotong University,2012.
- [59] 彭释,等. 汽车与配件,2016(24):67-69.  
Peng Shi, et al. Automobile & Parts,2016(24):67-69.
- [60] El-Hagh H, et al. Composite Structures,2006,73(4):505-514.
- [61] Hwang Woo-Chae, et al. Proceedings of SPIE-The International Society for Optical Engineering,2011,8409(99):58.
- [62] Shi Peilong, et al. Fibers and Polymers,2019,20(2):384-397.
- [63] Bambach M R. Thin-Walled Structures,2009,47(10):1112-1121.
- [64] Corin R, et al. Thin-Walled Structures,2017,117:1-9.
- [65] Zhu Guohua, et al. Composite Structures,2017,175(9):58-69.
- [66] Nam H W. Journal of Composite Materials,2001,35(18):1654-1683.
- [67] Peng Wenjie. Journal of Composite Materials,2011,45(2):237-254.
- [68] Lee D S, et al. Composite Structures,2013,99(5):181-192.
- [69] Zhang Guoqi, et al. Composite Structure,2014(108):304-310.
- [70] 胡培,等. 玻璃钢,2013(4):1-14.  
Hu Pei, et al. Fiber Reinforced Plastics,2013(1):1-14.
- [71] Thomas T, et al. International Journal of Crashworthiness,2019,(24):1-25.
- [72] Wang Lijun, et al. Materials & Design,2014(55):929-936.
- [73] 范学明,等. 玻璃钢/复合材料,2014(12):37-41.  
Fan Xueming, et al. Fiber Reinforced Plastics / Composites,2014,(12):37-41.
- [74] 黄睿,等. 太原理工大学学报,2016,47(1):10-107.  
Huang Rui, et al. Journal of Taiyuan University of Technology : Social Sciences Edition,2016,47(1):101-107.
- [75] 桂良进,等. 清华大学学报,2004,44(5):135-138.  
Gui Liangjin, et al. Tsinghua Science and Technology,2004,44(5):135-138.
- [76] 曹铁男,等. 混杂纤维增强泡沫夹芯结构力学性能研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2012.  
Cao Tienan, et al. Study on mechanical properties of hybrid fiber reinforced foam sandwich structure[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology,2012.
- [77] 杨扬,等. 复合材料蜂窝夹芯管结构设计、制备工艺及性能表征[D]. 长沙:国防科学技术大学,2012.  
Yang Yang, et al. Composite honeycomb sandwich tube structure design, preparation process and performance characterization[D]. Changsha: National University of Defense Technology,2012.
- [78] 修英姝,等. 复合材料蜂窝夹芯管结构设计、制备工艺及性能表征[D]. 北京:北京航空航天大学学报,2004,30(9):855-858.  
Xiu Yingshu, et al. Composite honeycomb sandwich tube structure design, preparation process and performance characterization[D]. Beijing: Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics,2004,30(9):855-858.