

纺织复合材料能量吸收性能的研究进展

薛璞¹ 陶肖明² 余同希¹

¹ 香港科技大学机械工程系, 香港

² 香港理工大学纺织制衣学系, 香港

摘要 纺织复合材料的能量吸收性能是近年来一个十分引人注目的研究课题. 本文综述了近年来对纺织复合材料能量吸收性能研究的最新进展, 包括纤维纺织结构、纺织复合材料的制造及加工、材料的能量吸收机理及失效模式、能量吸收性能测试方法等.

关键词 纺织复合材料, 能量吸收性能, 冲击载荷, 针织

1 引言

纺织复合材料是一类先进的复合材料, 它由纺织结构提供增强. 由于这类材料具有良好的层间、层内强度和抗损伤容限性能, 具有较高的能量吸收能力, 同时由于它更易于成型, 制造成本低, 重量轻, 所以在飞机、汽车、建筑、防护装置、运动器材等结构中具有强劲的竞争力, 并得到了广泛的应用. 工程实践已经证明了纺织复合材料在许多方面优于其他材料.

对纺织复合材料的研究虽然起源于40~50年代, 但真正的突破是在80年代后期. 许多研究人员对纺织复合材料产生了浓厚的兴趣, 但是, 主要集中于高强、高模的承载结构件. 近年来的研究表明, 纺织复合材料由于本身的材料特性和结构, 具有较高的能量吸收能力, 并有着广阔的应用前景. 因此, 能量吸收性能成为普遍关心的课题之一. 显然, 纺织复合材料的能量吸收性能与许多因素有关, 例如: 组分材料、纤维纺织结构、复合材料的制造工艺、复合材料结构的几何形态和冲击后的失效模式等. 本文将回顾和展望这些方面的研究.

2 纤维纺织结构和复合材料的加工过程

根据工程应用中对复合材料的要求, 可以采用不同的纺织技术得到各种类型织物增强预制品. 目前应用的基本纺织技术有缠绕(winding)、机织(woven)、编织(braid)、针织(knitting)及无纺(non-woven). 通常把经纱和纬纱呈直角交织的织物称作机织物; 编织过程则将三根或三根以上纱线沿布面对角方向交织成编织物; 把纱制成线圈, 再把线圈连接起来而制成的织物称作针织物; 所谓无纺则定义为由一定的取向或随机排列组成的纤维层或由该纤维层与纱线交织, 通过机械钩缠, 缝合或化学, 热粘合等方法粘合而成的织物^[1].

收稿日期: 1998-09-29, 修回日期: 1999-11-03

近年来, 三维纺织复合材料备受关注. 使用不同纺织技术, 可以制造出不同的纺织复合材料. 三维机织技术主要用于各种编排的三维平板结构, 最新研制的加工过程有可能实现整体的外形加工. 三维编织工艺使结构具有很大的灵活性, 这种工艺的缺点是加工速度慢, 调整纤维需要消耗大量的时间. 在大规模生产的纺织技术中, 针织技术是最晚用于纺织复合材料中的一种技术. 第一篇关于针织增强纺织复合材料的论文出现在 90 年代初期. 由于针织织物与机织或编织织物相比具有更大的可变形性, 人们对于针织增强复合材料的兴趣愈来愈浓厚. 正是因为针织增强复合材料的这个特点, 这种复合材料具有很好的抗冲击性能. 从材料的能量吸收性能考虑, 我们将在下面重点讨论这种针织增强复合材料.

针织纺织技术基本上可以分为两类, 即纬向针织技术 (图 1) 和经向针织技术 (图 2). 通过引入直的经纱、纬纱, 可以得到一种新的针织纺织织物, 如多轴向经编织物 (图 3), 以满足对复合材料的特殊要求. 一般地说, 经向针织速度比纬向针织速度快, 但经向针织又比纬向针织技术中的环向针织速度慢.

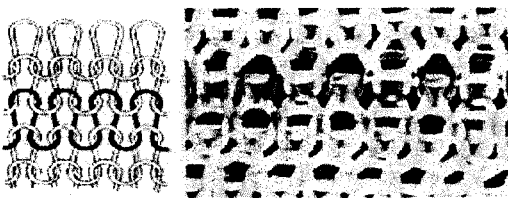


图 1 平面纬向针织织物

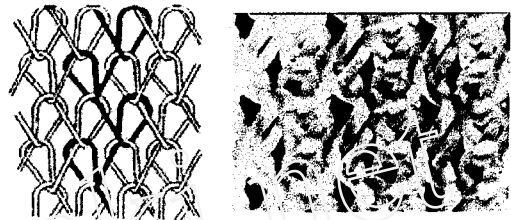


图 2 1×1 经编平针织物

针织纺织技术的主要缺点在于这种纺织过程容易造成纤维损伤.

纺织复合材料的力学性能 (包括能量吸收性能) 与其组分材料及纤维纺织结构有关外, 还与它的加工过程有着密切的关系. 所以, 优化复合材料的加工过程则是研究者关心的课题之一.

纺织复合材料的加工过程主要有三个步骤: 纤维束或织物的浸渍、成型及固化. 其中成型及固化与其他复合材料的制备过程类似, 所以对纺织复合材料加工过程的探讨, 主要集中在纤维束或织物的浸渍部分.

热塑性和热固性基质材料的浸渍过程是不同的. 对于热塑性材料, 浸渍过程实际上是“干浸渍”, 纤维增强和基体的混合可以在针织过程以前或针织过程中完成. 这样, 织物中将可能同时包含增强纤维和热塑性基体材料, 这种浸渍过程使纺织复合材料在“干浸渍”以后, 再需要一个加工步骤就可完成, 即在适当的温度和压力下将成型和固化一次完成. 要保证热塑性基复合材料的质量, 对纤维和基体有许多要求, 如增强纤维和热塑性基体间应有较好的相容性, 或较好的粘附性和浸润性; 热塑性基体材料应具有较低的熔融粘性, 保证基体材料在加工过程中容易流动; 纤维和热塑性丝带都应适合一定的纺织工艺.

对热固性材料, 浸渍过程主要由预浸技术或树脂注射完成. 预浸技术可达到较高的纤维含量, 用热压机或热压罐技术, 纤维含量可达 60%; 树脂注射成型 (MTR) 可以浸渍形状复杂的纤维织物, 但纤维含量一般只能达到 50%^[2]. Philips^[3] 等将 PET 单丝与玻璃纤维或苧麻等多根丝缠在一起, 以此来改善浸渍质量 (见图 4).

热固性材料有许多缺点, 如生产周期长, 加工过程不可逆, 对浸渍料的存放时间和条件都

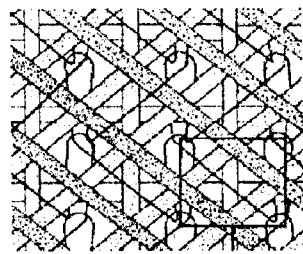


图 3 多轴向经编织物

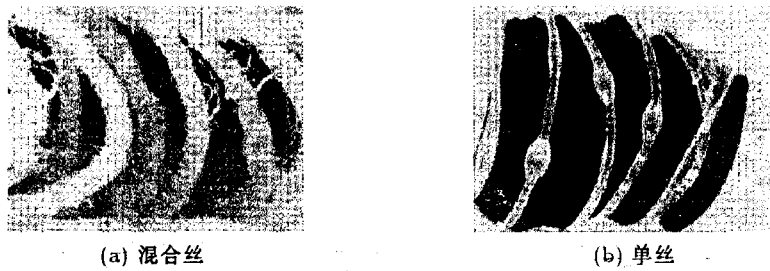


图 4 丝的浸渍情况 [3]

有限制。所以，近年来，以热塑性材料为基体的复合材料受到人们普遍关注。Ramakrishna^[4] 的研究结果表明，使用上述“干浸渍”的一步加工过程，材料的机械性能是可接受的。Verpoest^[5]，Stumpf^[6]，Singkofer^[7] 和 Stumpf^[8] 等都提出，这种“干浸渍”的加工过程有许多优点，如：降低复合材料价格，缩短生产周期，增加纤维在基体中分布的均匀度，使得复合材料具有良好的机械性能。

Verpoest 等^[9] 指出，在复合材料的加工过程中有几个参数要特别重视，这些参数包括预热温度、加热方法、施加的压力以及在此压力、温度下保持的时间等。这些参数将影响基质材料的可流动性和流动速度，是决定复合材料性能的主要参数。当热塑性材料粘性较大，剪切流动速度低时，可采用纤维和基质材料适当混合的方法，来减少基质材料到纤维的流动距离，保证浸渍质量^[10,11]。Helen 等^[12] 针对热塑性基体复合材料 GF/PA6，研究了冷却速度对复合材料微观结构和机械性能的影响（表 1）。结果表明，冷却速度不同，材料的微观结构就不一样。当冷却速度从快到慢变化时，PA6 基体中的结晶度及基体中 α 相和 γ 相之比也随着增加，因此拉伸强度、剪切强度、弹性模量也大大改善。

表 1 冷却速度对复合材料微观结构和机械性能的影响^[12]

冷却速度	α/γ	结晶度 (α, γ)	σ_{\max} (MPa)	τ_{ult} (MPa)	E (GPa)
-1°C/min	27	37%	42.89	120	4.3
-3°C/min	2.6	20%	33.79	91	3.5
-60°C/min	1.2	17%	25.58	79	2.4

从上述文献综述中可以看出，纺织结构和纺织复合材料的几何参数和加工参数繁多，如何鉴别和控制对力学性能（包括能量吸收性能）影响最大的一些参数，是研究中必须注意的。

3 纺织复合材料的力学性能

Verpoest 等^[5] 比较了不同种类的复合材料的机械性能，见表 2。他们指出，针织增强复合材料的机械性能介于机织增强复合材料和无规纤维毡复合材料之间。针织增强复合材料的弹性模量和拉伸强度是各向异性的，但剪切特性几乎是各向同性的。从复杂形状的可加工性来看，针织增强复合材料比它在表 2 中所处的位置还要好，即如表 2 中的斜向箭头所示。针织增强复合材料具有优异的层间断裂韧性，因此使得这种复合材料具有良好的损伤容限和抗冲击性能。

Ramakrishna 等^[4] 探讨了玻璃纤维 / 聚丙烯针织增强复合材料在静载和低速冲击条件下的拉伸性能和损伤容限，证实了这种复合材料是各向异性的（图 5），材料沿经向的拉伸强度远高于沿纬向的特性。他们还发现弹性模量、拉伸强度和抗冲击性能都随着针织密度的增加而增加，并与叠层的层数成正比。

三维纺织纤维增强的夹层结构是用于能量吸收的常用结构之一。它的上下两层织物表面由垂直于表面的多束纤维连接。这些纤维束的作用与夹层结构芯子的作用相同。调整这些纤维束的长度可以改变夹层结构的厚度，以及夹层结构复合材料的性能。三维针织增强夹层结构的上

表 2 各种复合材料性能比较 [5]

	短纤维复合 材料	连续纤维毡 复合材料	针织增强 复合材料	机织或编织增 强复合材料	多轴织物	单向层压板
刚度 强度	低					高
层间断裂 韧性	高					低
复杂形状 的可加工性	高					低
材料及生产 价格	低					高

下表面由针织织物增强。这种结构有许多优点，如：能方便地制造出具有双向曲率的夹层结构板，这是其它夹层结构很难做到的；这种结构也能够克服结构在冲击载荷下的分层问题，而对传统的夹层结构，分层一直是使研究者困扰的难题；由于成熟的纺织技术和大规模的工业生产，三维针织增强夹层结构的产品价格与其他夹层结构价格相比要低得多。

Philips 等 [13] 对三维针织增强双向曲率表面的夹层结构进行了研究。他们发现这种结构的复合材料具有出色的抗冲击性能。结构的抗冲击性能与纤维束芯子的高度、密度，表面织物针织单元的几何形状以及纤维的体积分量有关。在冲击载荷下，这种夹层结构能防止分层，冲击能量吸收能力类似于聚苯乙烯泡沫，

透气性也优于其他板壳结构。Drechsler 等 [14] 研究了三维机织增强复合夹层结构的能量吸收性能，结果表明这种结构与传统的泡沫芯或蜂窝芯的夹层结构相比，有重量轻、能量吸收能力强的优点。

值得注意的是，复合材料的能量吸收能力是一种特殊要求的力学性能，它既不同于传统的模量、强度等机械性能，也不同于复合材料在一次冲击后的损伤表征和残余强度。因此，无论是研究的目标还是研究的手段，都有其独特之处。

4 结构的失效模式和能量吸收机理

在过去的十余年里，一系列实验研究已经探明了复合材料在冲击载荷下的能量吸收能力。Farley [15] 和 Thornton [16] 用实验证明了复合材料通过适当的设计，可使能量吸收能力优于金属材料，并且压溃载荷分布均匀。文献 [17~19] 比较了各种材料的能量吸收能力，并指出碳纤维增强的环氧树脂基复合材料单位重量的能量吸收是铝的两倍，是钢的四倍。Chirwa [20] 等讨论了非机织的三维 NEFESYF (Needleloom Felt Synthetic Fibre) 纺织增强复合材料在汽车受横向冲撞时的能量吸收能力。他们发现非机织三维 NEFESYF 纺织增强复合材料的单位重量的能量吸收能力比传统的钢板高出 99%。如果将这种材料包上铁皮，那么，与传统的钢板相比，单位重量的能量吸收能力将增加 126%。

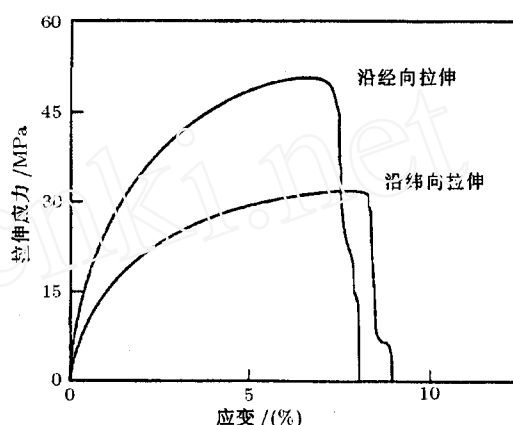


图 5 四层针织布增强复合材料在单向拉伸下的应力应变曲线 [4]

Hamada^[21] 探讨了编织复合材料的工字梁作为汽车吸能元件的可行性. 结果表明编织复合材料的工字梁沿轴向具有较高的能量吸收能力. 通过实验观察, 这种工字梁的渐进压溃过程可分 4 个阶段 (图 6). 第一阶段, 斜口区域可观察到层间开裂; 第二阶段, 可观察到纤维和基体的碎片楔, 并在楔下形成轴向裂纹; 第三阶段, 楔形区域进一步扩大; 第四阶段, 纤维明显断裂, 腹板端部出现层间开裂. Chiu 等^[22] 考察了三维编织的复合材料方管的能量吸收能力和失效模式. 实验结果表明, 编织碳纤维布 / 环氧树脂复合材料方管在轴向压缩载荷下, 方管的四个角处先开口, 然后平面部分弯曲, 最后发展到纤维和基体的断裂 (图 7). 编织芳纶纤维布 / 环氧树脂复合材料方管则展现稳定的渐进折叠失效 (图 8). 与编织芳纶纤维布 / 环氧树脂复合材料方管相比, 编织碳纤维布 / 环氧树脂复合材料方管具较高的能量吸收能力, 但受冲击后, 很难保持其结构的完整性. 因此, 有些研究人员则尝试混合纤维增强的复合材料, 并用试验验证了将脆性碳纤维与韧性的高性能聚乙烯纤维 (HP-PE) 混合, 能够有效地改善碳纤维增强的复合材料的抗冲击性能^[23,24]. Peijs 等^[25] 也探讨了高强度的碳纤维与 HP-PE 纤维混合机织布 / 环氧树脂复合材料管的能量吸收能力 (图 9 和表 3), 结果表明, 碳纤维与 HP-PE 纤维混合后

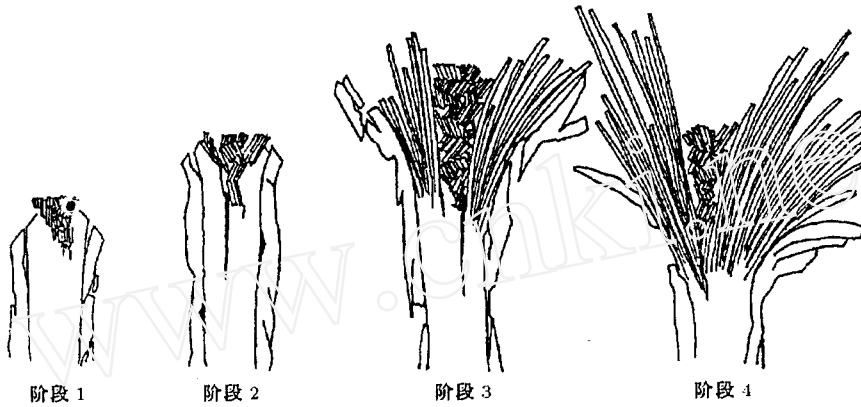


图 6 在沿工字梁轴向的准静态压缩试验中, 腹板横截面的示意图^[21]

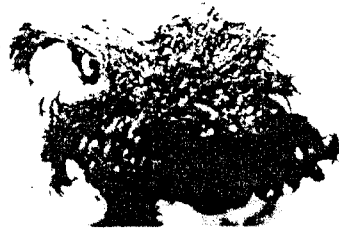


图 7 碳纤维 / 环氧树脂编织复合材料方管在轴向压缩载荷下的压溃特征^[22]



图 8 芳纶纤维 / 环氧树脂编织复合材料方管在轴向压缩载荷下的压溃特征^[22]

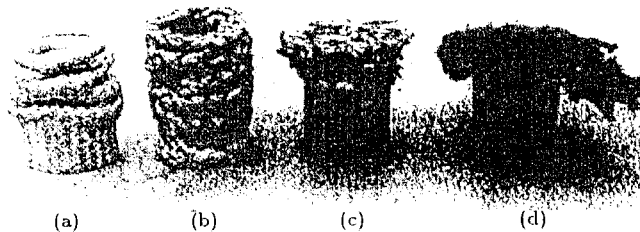


图 9 复合材料管的压溃特征^[25]

- (a) HP-PE / 环氧树脂复合材料管, (b) 77vol% HP-PE 混合纤维复合材料管, (c) 55vol% HP-PE 混合纤维复合材料管, (d) 碳纤维 / 环氧树脂复合材料管

表 3 复合材料管子的能量吸收参数 [25]

纤维类型	HP-PE 含量 (vol%)	载荷峰值 (kN)	载荷平均值 (kN)	单位重量的能量吸收 (kJ kg ⁻¹)
HP-PE	100	4.8	3.6	29.9
混合	77	6.5	4.9	37.6
混合	55	8.0	6.6	44.6
碳纤维	0	14.0	10.8	63.5

能使结构受冲击后较好地保持其完整性及稳定性, 但能量吸收能力也有所下降。Lu 和 Chiu 等 [26] 还指出, 编织的密度对三维编织复合材料方管的压溃模式影响不大, 但对管子的能量吸收能力有较大的影响。编织密度愈大, 管子的能量吸收能力愈高。Karbhari [27] 则通过与编织有关的参数, 如纤维的种类、平面编织模式、叠层数等, 讨论它们对混合纤维编织的复合材料管的渐进压溃及能量吸收能力的影响。玻璃纤维与碳纤维混合, 芳纶纤维与碳纤维混合, 并且碳纤维沿轴向布置能够提高管子的抗冲击性能, 同时保持结构受冲击后的完整性。

余同希和陶肖明等 [28~31] 探索、研制了具有高能量吸收能力的多胞纺织复合材料。这种多胞纺织复合材料的每个胞元具有半球-截头圆锥曲面, 许多胞元在基础平面上呈格柵状排列 (图 10)。研究表明, 当采用尼龙纤维和树脂基体时, 此结构的单位重量的能量吸收能力高于非纺织复合材料, 以及聚脂泡沫和聚乙烯泡沫。在冲击载荷作用下, 胞元的变形过程主要是半球壳的坍塌和锥壁的塑性大变形 (图 11)。作者通过建立力学模型, 预测了加载过程中力与位

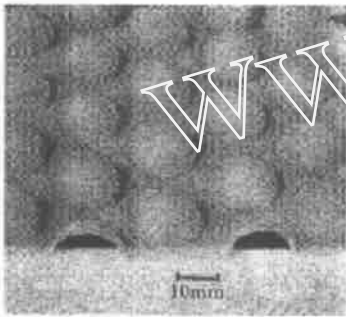


图 10 多胞纺织复合材料试样 [30]

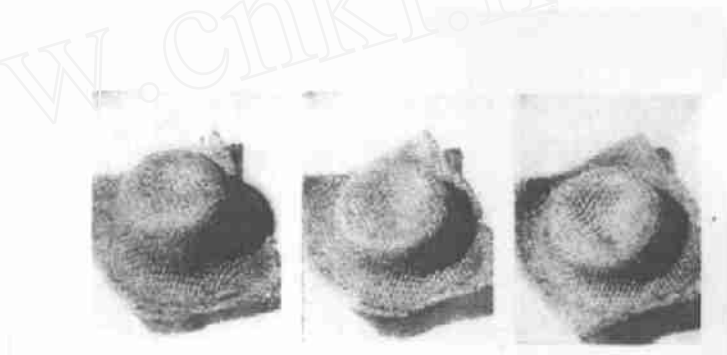


图 11 多胞纺织复合材料的胞元变形机理 [30]

移的关系, 以及材料在不同变形过程中的能量吸收能力。在半球壳的局部翻转及整体坍塌的过程中, 材料的能量吸收能力分别由以下公式给出

$$W_1 = \int_0^w (P_1)_{\text{total}} dw = 29.1nM_o w^{1.5} h^{-0.5} \quad (1)$$

和

$$\frac{P_2}{M_o} = \frac{\pi \times \cos \beta}{\cos \phi \cos(\phi + \beta)} + \frac{16\pi R}{3h} \times \tan \phi \sin \phi \cos(\phi + \beta) \quad (2)$$

$$w = R \times [1 - \sin \beta - 2 \cos(\phi + \beta) \sin \phi] \quad (3)$$

在锥壁的塑性大变形过程中, 材料的能量吸收能力为

$$W_w = \int_0^w (P_3)_{\text{total}} dw \cong n \frac{\pi R h}{4H} E_p \cos^2 \beta \times w^2 \quad (4)$$

在以上公式中, n 表示胞元的数目, E_p 和 M_o 分别是材料的硬化模量和单位宽度上的塑性极限弯矩; R 是胞元上部球壳的半径; w 是胞元顶部的铅直位移; H 和 β 是胞元锥面部分的

高度和倾角; φ 是球壳变形的过程参数, h 表示材料的厚度. 对尼龙纤维 / 聚酯树脂材料系统, 以上理论预报与试验结果吻合较好, 同时也证明了锥壁的塑性膜变形对材料的能量吸收能力贡献最大. 根据理论分析与试验结果, 作者对该多胞纺织复合材料进行了优化, 提出了具有平头锥胞元的多胞纺织复合材料 (图 12). 通过比较两种多胞纺织复合材料的冲击试验结果 (图 13), 发现具有平头锥胞元的多胞纺织复合材料具有更高的能量吸收能力, 较小的载荷峰值, 并能在较大的变形过程中保持载荷几乎不变.

Brachos^[32] 讨论了几何因素及芯子材料对编织复合材料夹层管能量吸收能力的影响. 他们发现在相同的制造条件下, 圆管比矩形管吸收更多的能量 (图 14). 随着编织层数的增加, 管的能量吸收能力也随之增加. 添加芯子有利于提高管子的能量吸收能力. 管子的失效模式与管壁的厚度, 是否有泡沫填芯及泡沫材料的刚性有很大关系. 在试验中可观察到三种主要失效模式: 横向剪切断裂、层面弯曲压溃及局部失稳失效.

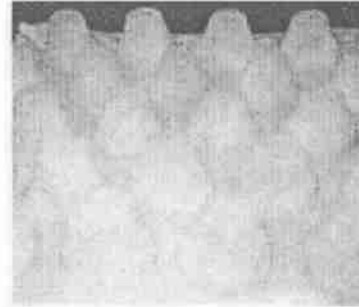
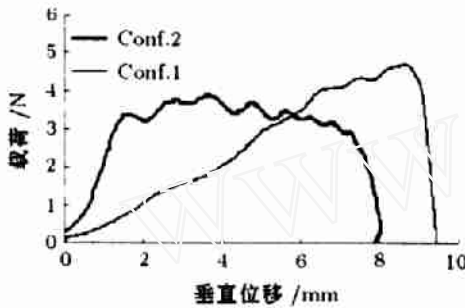
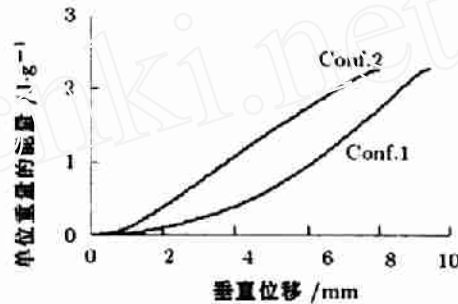


图 12 具有平头锥胞元的多胞纺织复合材料^[31]



(a) 力 - 位移关系^[31]



(b) 单位重量的能量吸收能力 - 位移关系^[31]

Conf.1——具有半球-截头圆锥胞元的试样, Conf.2——具有平头锥胞元的试样

图 13

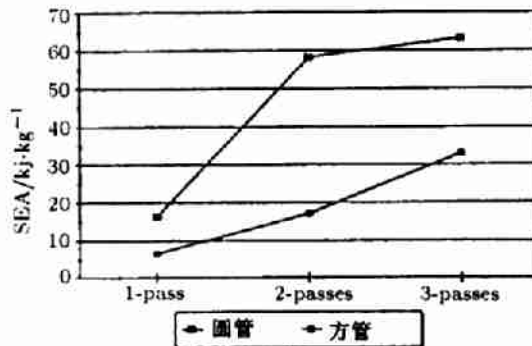


图 14 混合编织复合材料圆管和方管能量吸收能力的比较^[32]

Ramakrishna 等^[33,34] 针对包含直的经纱的针织玻璃纤维布 / 环氧树脂及针织碳纤维布 / 环氧树脂复合材料管, 研究了管子的能量吸收能力和失效模式间的关系. 结果表明, 当针织布的纬向与管子的轴向一致时, 管子的压溃表现为张开的模式 (图 15), 当针织布的经向与管子的

轴向一致时,管子的压溃表现为碎断的模式(图 16),并且前者的能量吸收能力高于后者.同时,他们还研究了纺织复合材料的纤维含量对材料的能量吸收能力的影响,图 17 给出了针织碳纤维布 / 环氧树脂复合材料管的实验结果.显然,管子的能量吸收能力随复合材料中纤维含量的增加而提高.

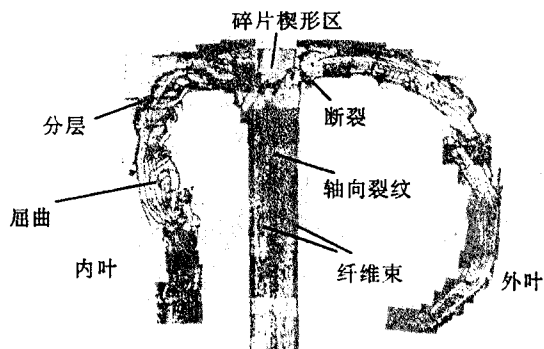


图 15 管子压溃的张开模式 [34]



图 16 管子压溃的碎断模式 [34]

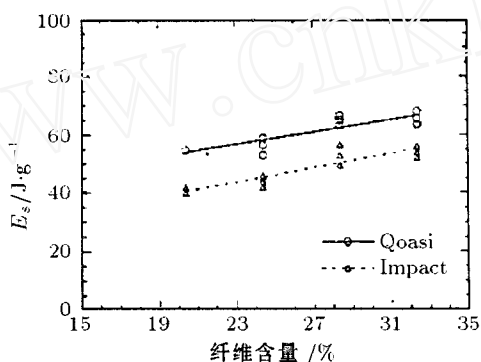


图 17 纤维含量对管子能量吸收能力的影响 [34]

以上研究针对不同的材料系统、不同的纺织技术和加工工艺、不同的复合材料元件提供了大量的实验数据和微观观测.但是,在该领域仍缺乏对材料的能量吸收能力的定量分析;缺乏材料破坏的微观机理与宏观能量吸收能力间关系的研究;还缺乏用于预报材料能量吸收能力的结构宏观力学模型.这些都是今后研究的主要目标.

5 实验条件对材料性能测试结果的影响

对于一种新兴的复合材料,材料机械性能的测试是非常重要的.目前还没有见到关于纺织复合材料的实验标准.根据测试聚合物基复合材料拉伸性能的实验标准 (ASTM, D3039-39),弹性模量可在 0.1%~0.6% 的纵向应变范围内,用应力 - 应变曲线获得.但这个标准是否适合纺织复合材料有待研究.

Verpoest 等 [35] 对经向针织增强的玻璃纤维 / 环氧树脂复合材料作了实验研究,发现即使在非常小的应变范围内,其拉伸曲线也是非线性的.所以他们建议,对每一种针织增强复合材料,都需要作加载 - 卸载循环实验,以确定材料的弹性变形范围.同时他们发现,当加载速率

在 1 mm/min~20 mm/min 的范围内变化时, 它对拉伸曲线的影响不大 (图 18).

Hamada^[36], Davies^[37] 和 Masters 等^[38] 研究了试件尺寸对纺织复合材料机械性能的影响. 研究表明: 只要试件的宽度包含足够多的纺织结构单元 (textile repeating units), 试件尺寸对材料强度和刚度的影响就可忽略不计. Masters^[38] 等还指出, 在二维编织的一个单元里, 变形是不均匀的. 所以, 在使用应变片时, 这一点应特别注意. Lang 和 Chou^[39] 探讨了应变片的大小对周期非均匀材料应变测量结果的影响. 他们建立了应变片输出信号的统计模型, 其中包含织物的单元尺寸, 单元内的应变变化, 应变片的长度、宽度, 材料的缺陷和不规则因素, 以及仪器误差. 通过理论分析和实验验证, 指出如果应变片的大小比织物的单元尺寸小得多, 那么测量结果就不准确.

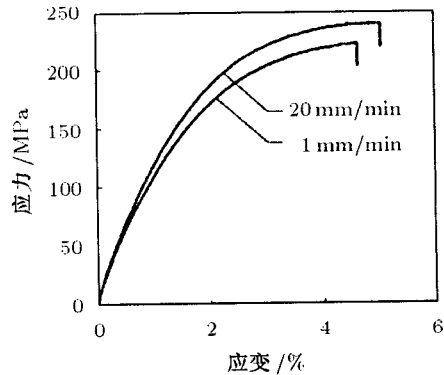


图 18 加载速度对针织纺织复合材料拉伸性能的影响^[35]

Hamada 等^[40~42] 还研究了环境温度、湿度以及加载速度和界面强度对机织玻璃纤维布 / 环氧树脂复合材料管压溃行为及能量吸收性能的影响. 试验结果表明, 随着温度的升高, 管子的能量吸收能力会降低 (图 19). 在低温下, 管子的压溃表现为张开模式. 在高温下 (80°C 和 100°C), 管子的压溃行为包含张开模式及碎断模式. 当温度高于 100°C, 管子在外载荷作用下将失稳, 看不到渐进压滞的现象. 另外, 管子的能量吸收能力随材料水分含量的增加而降低. 在试件浸水时间相同的条件下, 纤维表面覆盖不同物质时, 能量吸收能力的降低幅度也不同 (图 20). 管子的能量吸收能力还随加载速度的增加而提高. 在相同的加载速度下, 强界面的复合材料管具有较高的能量吸收能力 (表 4). 但对针织玻璃纤维布 / 环氧树脂和针织碳纤维布 / 环氧树脂复合材料管, 文献^[33] 指出材料的能量吸收能力随加载速度的提高而降低 (见图 17).

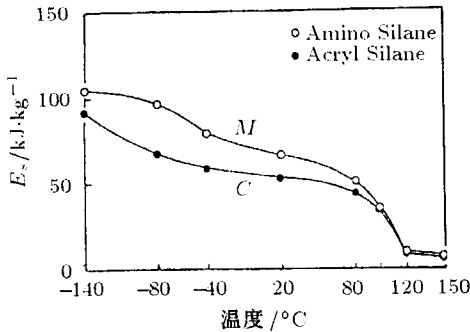


图 19 环境温度对管子能量吸收能力的影响^[40]

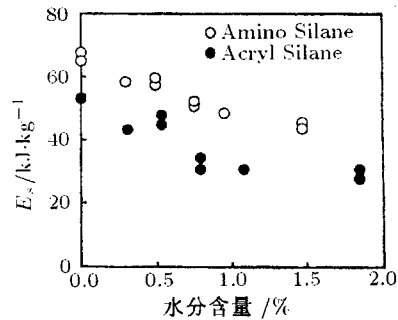


图 20 复合材料管的能量吸收能力随材料水分含量的变化^[41]

表 4 机织玻璃纤维布 / 环氧树脂复合材料管的能量吸收性能^[42]

纤维表面物质	载荷平均值 (kN)		单位重量的能量吸收能力 (kJ/kg)	
	准静态试验	冲击试验	准静态试验	冲击试验
Amino Silane	45.8	51.5	66.6	69.4
Acryl Silane	37.5	46.0	53.0	61.4

在纺织复合材料的设计制造过程中,了解纤维束在外载荷作用下的应力、应变分布是非常重要的。过去,用应变计、超声传感器等传统的测量方法,要想测量纺织复合材料内部的应力、应变分布几乎是不可能的。随着光纤传感器技术的迅速发展,已经使得测量温度、压力、应力、应变等物理参数的分布场得以实现。与其他传感器相比,光纤传感器有许多优点,如:重量轻、尺寸均匀、柔性好等。光纤传感器具有不影响复合材料结构的整体性,并和增强纤维一起共同增加材料的功能。埋进纺织结构复合材料中的光纤可以用来测量材料内部的应变场^[43]。Volthanen的测量系统^[44]可用来确定在三点弯曲试验中叠层纺织复合材料沿光纤轴向的应变分布^[45]。沿长度方向,测量结果与理论分析结果吻合得较好,其相对误差为9%。陶肖明、汤立群等^[46]进一步论证了光纤传感器和被测量的纺织复合材料之间的相互作用。

从以上综述可以看出,建立实验标准和开拓新的测试方法对纺织复合材料的发展和应用都具有不可或缺的意义。

6 结束语

由以上几个方面可以看出,纺织复合材料作为一类先进的复合材料,具有重量轻、价格低的特点,同时具有良好的机械性能和能量吸收性能。这种材料在工程实际中作为吸能元件或其他结构元件,已得到了初步的应用,并有着广阔的发展前景。但作为一类新的材料,要提高其性能、进一步开发它的能量吸收能力,仍有许多问题有待研究,如:

(1) 优化组分材料和纺织工艺,研究复合材料的加工过程以及工艺参数对复合材料的细观结构及宏观性能的影响;

(2) 针对不同材料组分、不同纤维纺织结构、不同的界面条件和不同的能量吸收元件,建立相应的理论模型,对材料的能量吸收性能和失效模式进行预报;

(3) 研究实验条件和实验环境对测试结果的影响,建立针对纺织复合材料的实验标准,并开发新的测试方法。

通过大量的实验研究和理论分析,目的是要了解材料的能量吸收机理、用宏观的力学模型对结构的能量吸收能力进行预报,以此为依据来优化材料的设计,使得纺织复合材料在各工程领域得以更加广泛的应用。

参 考 文 献

- 1 姚穆,周锦芳等. 纺织材料学. 中国纺织出版社, 1996. 484~488
- 2 Arendts F J, Drechsler K, Brandt J. Advanced textile structural composites—status and outlook. In: Proc International Conference on Advanced Composite Material, USA, 1993. 409~406
- 3 Philips D, Verpoest I, Raemdonck J V. Optimizing the mechanical properties of 3D-knitted sandwich structures. In: Proceedings of ICCM-11, Gold Coast, Australia, 1997. V: 211~218
- 4 Ramarkrishna S, Hamada H, Cuong N K, Maekawa Z. Mechanical properties of knitted fabric reinforced thermoplastic composites. In: Proceedings of ICCM-10, Whistler, B C, Canada, 1995. IV: 245~252
- 5 Verpoest I, Gommer B, Gert Huysmans, Jan Ivens, Yiwen Luo, Surya Pandita, Dirk Philips. The potential of knitted fabrics as a reinforcement for composites. In: Proceedings of ICCM-11, Gold Coast, Australia, 1997. I: 108~133
- 6 Stumpf H, Otto T, Schulte K. New textile preforms and processing concepts for the manufacture of low-cost thermoplastic composites. In: Proceedings of ICCM-11, Gold Coast, Australia, 1997. V: 249~259
- 7 Singkofer R, Mehn R. Advanced thermoplastic composites based on knitted fabrics with weft insertion ~ economical application in high loaded vehicle components. In: Proc 17th Intern Sampe Conference, Basel, Switzerland, 1996
- 8 Stumpf H, Mader E, Schulte K, Zah W. New thermoplastic composites made from low-cost textile preforms and specialized processing techniques for short cycle times. In: Proc 17th Intern Sampe Conference, Basel, Switzerland, 1996. 327~339
- 9 Baeten S, Verpoest I, Stumpf H, Schulte K, Zah W, Mader E, Pisanikovski T, Andersson C, Eng K. New low

- cost textile performs and short cycle processing techniques for thermoplastic composites. In: Proceedings of ICCM-11, Gold Coast, Australia, 1997. V: 227~237
- 10 Wakeman M D, Cain T A, Rudd C M. Optimisation of the flexural stiffness of compression moulded co-mingled glass and polypropylene composites. In: Proceedings of ECCM 7, London, May 14~16, 1996
 - 11 Mader E. New hybrid yarns for continuous fiber-reinforced thermoplastics. In: Proc 35th Intern Man-Made Fibers Congress, Austria, Sept 25~27, 1996
 - 12 Cartledge Helen C Y, Baillie C A, Mai Y W. Influence of cooling rate on morphological and mechanical properties of thermoplastic composites. In: Proceedings of ICCM-11, Gold Coast, Australia, 1997. V: 645~651
 - 13 Philips D, Verpoest I, Raemdonck J V. Evaluation of the out-of-plane properties of 3D-knitted fabric composites. In: Proceedings of ICCM-10, 1995, Whistler, B C, Canada. IV: 349~356
 - 14 Drechsler K, Brandt J, Larrode E, Miravete A. Energy absorption behavior of 3-D-woven sandwich structures. In: Proceedings of ICCM-10, Whistler, B C, Canada, 1995. V: 535~542
 - 15 Farley G L. Energy absorption of composite materials. *J of Composite Materials*, 1983, 17: 267~279
 - 16 Thornton P H. Energy absorption in composite structures. *J of Composite Materials*, 1979, 13: 247~262.
 - 17 Schmueser D W, Wickliffe L E. Impact energy absorption of continuous fiber composite tubes. *Trans ASME*, 1987, 109: 72~77
 - 18 Tao W H, Robertson R E, Thornton P H. Crush energy management: axial crush of unidirectional fiber composite rods. In: Advanced composite materials: new developments and applications conference proceedings, Detroit, Michigan, USA, 1991
 - 19 Tao W H, Robertson R E, Thornton P H. Effects of material properties and crush conditions on the crush energy absorption of fiber composite rods. *Composite science and technology*, 1993, 47: 405~418
 - 20 Chirwa E C, O'Larey L S, Muhtaseb S. Side impact protection: the use of 3-D reinforced composite panels. *IJCrash*, 1996, 1: 315~332
 - 21 Hamada H. Can braided composites be used for crushing elements in cars?. In: Proceedings of ICCM-11, Gold Coast, Australia, 1997. I: 218~246
 - 22 Chiu C H, Lu C K, Wu C M. Energy absorption of three-dimensional braided composites tubes. In: Proceedings of ICCM-10, Whistler, BC, Canada, 1995. IV: 187~194
 - 23 Peijs A A J M, Venderbosch R W, Lemstra P. Hybrid composites based on polyethylene and carbon fibers. *J Composites*, 1990, (21): 522
 - 24 Peijs A A J M, Venderbosch R W. Hybrid composites based on polyethylene and carbon fibres, IV: Influence of hybrid design on impact strength. *Journal of Materials Science Letters*, 1991, 10(19): 1122~1124
 - 25 Peijs A A J M, Klinken E J Van. Hybrid composites based on polyethylene and carbon fibers, Part V: Energy absorption under quasi-static crash conditions. *Journal of Materials Science Letters*, 1992, 11: 520~522
 - 26 Lu C K, Chiu C H, Wu C M. The influence of braid pitch-length on crush behaviour of 2-step braided composite square tubes. In: 40th International SAMPE Symposium. May 8~11, 1995. 1383~1392
 - 27 Karbhari V M. Energy absorption characteristic of hybrid braided composite tubes. *Journal of Composite Materials*, 1997, 31: 1164~1186
 - 28 Tao X M, Yu T X, Ngan K M, Ko F K. Energy absorption of cellular textile composites under quasi-static compression. In: Proceedings of ICCE/4, Hawaii, USA, 1997. 981~982
 - 29 Yu T X, Tao X M, Wu K Q. Energy absorption of cellular textile composite under impact. In: Proceedings of ICCE/4, Hawaii, USA, 1997. 1099~1100
 - 30 Yu T X, Tao X M, Xue P. Energy-absorbing capacity of grid-domed textile composites. *International Journal Composites Science & Technology*, 2000, 60(5): 785~800
 - 31 Yu T X, Xue P, Tao X M. Energy absorbing-capacity of cellular textile composites: modeling and optimization. In: Proceedings of ICCM-12, Paris, 1999. 675
 - 32 Brachos V, Douglas C D. Energy absorption characteristics of hybrid composite structures. In: International SAMPE technical Conference, 1995. 27: 421~435
 - 33 Ramakrishna S. Energy absorption characteristics of knitted fabric reinforced epoxy composite tubes. *Journal of Composites Science and Technology*, 1993, 49: 349~356
 - 34 Ramakrishna S, Hull D. Energy absorption capacity of epoxy composite tubes with knitted carbon fiber fabric reinforcement. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 1995, 14: 1121~1141
 - 35 Gommers B, Verpoest I. Tensile behavior of knitted fabric reinforced composites. In: Proceedings of ICCM-10, Whistler, B C, Canada, 1995. IV: 309~316
 - 36 Hamada H, Fujitaa A, Inoda M, Maekawa Z. Effects of the specimen width on the tensile behavior of textile composites. In: Proc Eur Conf on Comp Testing and Standardisation (ECCM-CTS2), Hamburg, Germany, Sept

- 13~15, 1994. 287~294
- 37 Davies P, Choqueuse D, Delbury M, Deverite J. Scale effects in the determination of tensile and shear properties of marine composites. In: Proc Eur Conf on Comp Testing and Standardisation (ECCM-CTS2), Hamburg, Germany, Sept 13~15, 1994. 277~286
- 38 Masters J E, Ifju P G, Fedro M J. Development of test methods for textile composites. In: Proc Fiber-Tex, NASA, Philadelphia, USA, Oct 27~29, 1992. 249~269
- 39 Lang E J, Chou T W. The effect of strain gage size on measurement errors in textile composite materials. In: Proceedings of ICCM-11, Gold Coast, Australia, 1997. v: 1~8
- 40 Hamada H, Ramakrishna S, Nakamura M, Maekawa Z, Hull D. In: Progressive crushing behaviour of glass/epoxy composite tubes with different surface treatment. *Composite Interface*, 1994, 2(2): 127~142
- 41 Hamada H, Ramakrishna S, Maekawa Z. Environmental effects on the progressive crushing behaviour of glass cloth/epoxy composite tubes. *Composite Interface*, 1995, 3(1): 23~39
- 42 Hamada H, Ramakrishna S. Impact performance of glass cloth/epoxy composite tubes with different surface treatment. *Composite Interface*, 1996, 4(1): 35~44
- 43 Tao X M. Integration of fiber optic sensors in smart textile composites-design and fabrication. *J Textile Institute*, (in press)
- 44 Volanthen M, Geiger H, Cole M J, Dakin J P. Measurement of arbitrary strain profiles within fiber gratings. *Electron Lett*, 1996, 11: 1028~1029
- 45 Tao X M, Tang L Q, Du W C, Choy C L. Internal strain measurement by fiber bragg grating sensors in textile composites. *J Composite Science and Technology*, 2000, 60(5): 657~669
- 46 Tang L Q, Tao X M, Du W C, Choy C L. Reliability of fiber bragg grating sensors in textile composites. *J Composite Interfaces*, 1998, 5(5): 421~435

PROGRESS IN THE STUDIES OF ENERGY ABSORPTION BEHAVIOR OF TEXTILE COMPOSITES

Xue Pu* Tao Xiaoming** Yu Tongxi*

*Department of Mechanical Engineering, Hong Kong University of Science and Technology

**Institute of Textile and Clothing, The Hong Kong Polytechnic University

Abstract The energy absorption behavior of textile composites has been an attractive research topic in recent years. In this paper, the current research status and development on the energy absorption behavior of textile composite are reviewed, with emphases on fiber architectures, fabrication processes, energy absorbing capacity and failure modes under impact load, as well as experimental methods for the energy absorption behavior of textile composites.

Keywords textile composite, energy absorption behavior, impact load, knitting