

碳纤维/酚醛树脂体系 Z-pin 加捻拉挤 工艺及其性能

张向阳, 李 勇, 褚奇奕, 李 吻

(南京航空航天大学 材料科学与技术学院, 南京 210016)

摘 要: 为了解决碳纤维/酚醛树脂体系 Z-pin 拉挤制品中的孔隙缺陷, 实现耐烧蚀复合材料三维增强体的制备, 在分析孔隙的形成与酚醛树脂的固化过程基础上, 利用纤维加捻提高酚醛树脂固化压力进而改善 Z-pin 中的孔隙缺陷. 研究表明: 一定范围内, 随着纤维捻度的增加, 孔隙缺陷的尺寸与数量明显减少, Z-pin 中树脂质量分数及可植入深度逐渐降低, 而 Z-pin 抗压性能先提高后降低; 碳纤维捻度为 80 捻/m 时, Z-pin 制品质量较好, 树脂质量分数约为 32%, 可满足后续超声植入, 常温下最大植入深度可达 10 mm.

关 键 词: 碳纤维; 酚醛树脂; Z-pin 拉挤; 加捻; 力学性能

中图分类号: V258; TB332

文献标志码: A

Pultrusion and properties of the twisted carbon fiber/phenolic resin Z-pin

ZHANG Xiang-yang, LI Yong, CHU Qi-yi, LI Wen

(College of Material Science and Technology,

Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: The main goal is to solve the pore defect of the pultruded carbon fiber/phenolic resin Z-pin and obtain the three-dimensional reinforcement of ablation resistant composite. On basis of the analysis of the pore formation and phenolic resin curing process, the twisted yarn was utilized to elevate the resin's inner pressure to eliminate the pore defects in Z-pin. The results showed that, along with the increase of the twist number within the specific range, the size and amount of pores declined obviously, and also the phenolic resin mass fraction and maximum insertion depth decreased, while the compressive property arose firstly and declined afterwards. When the twist number was 80 twist/m, Z-pin of good quality was obtained with approximately 32% phenolic resin mass fraction, which can be used for ultrasonic insertion, with the maximum insertion depth up to 10 mm in room temperature.

Key words: carbon fiber; phenolic resin; Z-pin pultrusion; twist; mechanical performance

Z-pin 技术作为一种新型复合材料三维增强技术, 因具有生产操作性好、效率高、对材料面内损伤小并很好地适用于预浸料成形复合材料等优点^[1-3]引起了广泛的关注, 已被成功用于 F/A 18-E/F 战斗机的进气道、发动机舱门和 F1 赛车防滚架^[1]及航空加筋结构^[4]. 国内外相关研究集中在结构材料常用的环氧及双马来酰亚胺树脂体

系, 根据已报道的研究成果, Z-pin 增强层合板可实现 I 型层间断裂韧性提高 5 倍^[2], 冲击后压缩强度提高 50%^[5], 但关于其在热防护结构上的应用报道较少.

热防护材料的性能与可靠性是高超声速飞机^[6]、再入式飞行器、空间探测飞行器^[7]等飞行器研制的决定性因素之一. 酚醛基耐烧蚀复合材料

是目前技术最成熟、应用最广泛的热防护材料,即使 C/C 复合材料日益发展,酚醛复合材料仍以其原料广泛、价格低廉及残炭率高等优点占有不可取代的地位^[8-9]. 酚醛复合材料增强体经历了高硅氧纤维、石英纤维和碳纤维 3 个阶段,碳纤维以其低热膨胀率、超高导热系数及低密度等特点成为优选材料.

纤维增强复合材料具有层间抗剥离能力弱、易烧蚀变形的缺点,而多层复合热防护材料的界面结合问题对航天器的可靠性具有很大的影响^[8]. 酚醛树脂体系 Z-pin 增强在显著改善酚醛基耐烧蚀复合材料层间韧性的同时,可使其获得更加优异的耐烧蚀能力. 李宁^[10]开展了石英纤维/酚醛树脂体系 Z-pin 增强层合板的基础研究,其研究表明 Z-pin 较优的拉挤工艺参数为模具温度为 90℃,后固化温度为 180℃,拉挤速度为 180 mm/min;经 Z-pin 增强后,层合板的层间拉伸强度提高了约 34%,层间剪切强度提高了约 16%. 随着耐烧蚀热防护复合材料向先进碳/酚醛树脂体系方向发展,选用碳纤维体系 Z-pin 作为三维增强体在材料相容性、热性能匹配性及散热效率方面都具有优势,因此,碳纤维/酚醛树脂体系 Z-pin 增强技术亟待研究.

本文针对碳纤维/酚醛树脂体系 Z-pin 增强技术,首先开展碳纤维/酚醛树脂体系 Z-pin 拉挤成形的研究,在 Z-pin 试制过程中发现,制品中会出现大量肉眼可见的孔隙,这相对直径很小(0.5 mm)的 Z-pin 将成为致命的缺陷. Z-pin 经过牵引棍时,孔隙被撑破,纤维束劈裂散开(如图 1 所示),Z-pin 随即折断,所得制品无法进行植入,从而不能用于耐烧蚀复合材料的三维增强. 本文通过研究孔隙的生长和酚醛树脂的固化过程,分析 Z-pin 制品内部积聚孔隙的原因,提出利用纤维加捻改善孔隙缺陷,并研究纤维捻度对 Z-pin 性能的影响,推动碳纤维/酚醛树脂体系耐烧蚀复合材

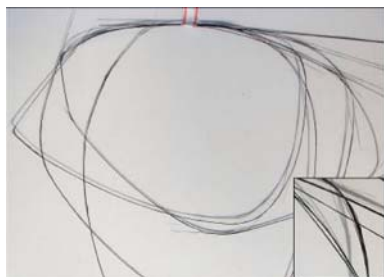


图 1 劈裂的无捻碳纤维/酚醛树脂体系 Z-pin

Fig. 1 Splitted untwisted carbon fiber/phenolic resin Z-pin

料在航空航天器热防护结构中的应用.

1 试验材料、设备及试样制备

1.1 试验材料

B30 酚醛树脂,生产商:中国科学院化学研究所,固体质量分数为 60%~65%,自由水质量分数为 3%;

T300 碳纤维,生产商:日本东丽株式会社,每束纤维根数为 3000.

1.2 试验设备

Z-pin 专用拉挤机,自制.

电子万能试验机(CMT5105 型),生产商:深圳新三思材料检测有限公司.

傅里叶阿尔法红外油品分析仪(Spectro FT-IR α Q410),生产商:美国斯派超公司.

1.3 试样的制备

本文采用手摇式加捻装置对碳纤维加捻,分别得到捻度(捻度定义为纤维退捻前 1 m 以内的捻回数量)为 40, 60, 80, 100 捻/m 的加捻碳纤维,以用于 Z-pin 试制. 成形试验在自制的 Z-pin 专用拉挤机(如图 2)上进行,采用文献^[10]研究得到的工艺参数. Z-pin 专用拉挤机由放纱装置、胶槽、模具和固化烘道、牵引和收卷装置组成,胶槽、模具和固化烘道具有独立的加热系统,其中固化烘道采用三点控温系统,保证了内部温度的均匀性. 为了改善加捻导致纤维浸润性的降低,通过加热胶槽减低酚醛树脂黏度以提高浸润性,加热温度设定 50℃为宜,制得 4 组加捻纤维增强 Z-pin 试样及 1 组空白对比试样(捻度为 0 捻/m)以待研究.

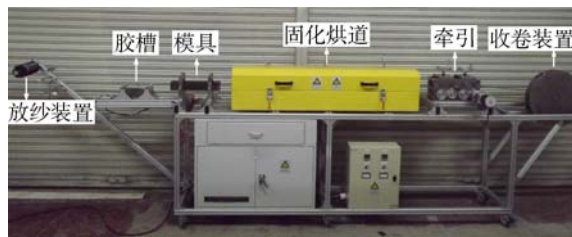


图 2 Z-pin 专用拉挤机

Fig. 2 Z-pin pultrusion machine

2 孔隙形成和影响因素

2.1 孔隙的成核与生长

根据 Kardos 等^[11]利用经典成核理论对复合材料热压成形时孔隙形成进行的分析可知,在一

定温度下,孔隙以夹杂的空气和水的混合物为核形成,并由材料中水分的扩散过程控制其继续生长或溶解,孔隙生长稳定平衡方程为

$$p_g - p_r = \frac{\gamma_{lv}}{m_{lv}} \quad (1)$$

其中 p_g 为孔隙内的蒸汽压强(MPa); p_r 为树脂等静压强(MPa); γ_{lv} 为树脂-孔隙表面张力(N/m); m_{lv} 为孔隙体积与表面积之比(m). 当孔隙内蒸汽压克服了树脂等静压强和表面张力之和时,孔隙开始生长,否则孔隙将溶解. 因此,要抑制复合材料内孔隙的生长,树脂等静压强应满足

$$p_r > p_g - \frac{\gamma_{lv}}{m_{lv}} \quad (2)$$

按照理想气体状态方程,孔隙蒸汽压强与温度和气体物质的量成正比. 在 Z-pin 拉挤过程中,孔隙内部的空气由纤维进入酚醛树脂时夹带进入,水分来源于酚醛树脂含有的自由水和酚醛树脂固化生成的产物水. 对于无小分子物质生成的酚醛树脂,模腔的挤压作用可以促使夹带空气的排出和少量自由水的蒸发,而酚醛树脂的固化过程中不断产生的水分子在高温作用下迅速蒸发,最初的孔隙不断生长成为大尺寸孔隙,最终封闭于完成固化的 Z-pin 中. 由此,本文首先研究了拉挤过程中酚醛树脂的固化过程,确定水分大量生成的阶段.

利用红外光谱法测量酚醛树脂固化度,选取数量不变的苯环基团作为内标,选取测量峰高的方法衡量各吸收峰的变化,利用羟甲基峰高(峰高比值为 1010 cm^{-1})和苯环峰高(峰高比值为 1600 cm^{-1})的比值来表示相应基团的相对浓度^[12],固化度 α (即羟甲基的转化率)的计算方法为

$$\alpha = 1 - \frac{A_t/A'_t}{A_0/A'_0} \times 100\% \quad (3)$$

其中 A_0 和 A'_0 分别表示羟甲基和苯环的初始吸光度; A_t 和 A'_t 分别表示经过模具一段时间固化后羟甲基和苯环的吸光度.

由于模具温度大于 120°C 时,会发生死模,因此认为模具温度设为 120°C 时 Z-pin 固化度为其在模具中可达到的最大固化度. 测量经过 120°C 和常温(空白组)模具时 Z-pin 中酚醛树脂的红外光谱. 根据测量的固化前后羟甲基和苯环的峰高值,利用式(3)计算得到模具温度为 120°C 时,出模口处 Z-pin 中酚醛树脂的固化度为 12%,意味着 Z-pin 在模具中可获得的最大固化度不超过 12%,剩余固化反应均在固化烘道中完成. 在固化

烘道中,产物水大量生成并在高温下迅速挥发,而 Z-pin 处于裸露状态,无法从外界获得必要的成形压力,孔隙不断生长至被困于固化的酚醛树脂中.

2.2 纤维加捻作用

本文尝试利用纤维加捻为抑制孔隙形成和生长提供压力. 如图 3 所示,经加捻后,原本相互平行排列的纤维单丝在加捻作用下呈现空间螺旋线形态,距离轴心不同距离的纤维单丝形成直径不同的螺旋线,螺旋线展开后与轴线间的夹角为捻角 θ ,即纤维单丝中心线与 Z-pin 轴线间的夹角,用来表征纤维单丝的形态,离轴线越远捻角越大^[13].

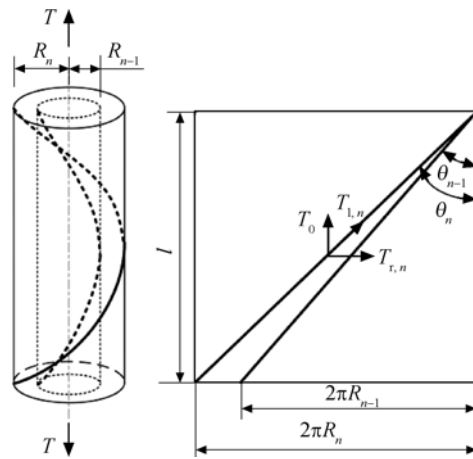


图3 理想的加捻纤维空间形态及展开平面图

Fig. 3 Spatial and unfolded layout of ideal twisted fiber

纤维单丝所形成的螺旋线沿纱束圆周分布,在拉挤牵引力作用下,纤维单丝纵向趋向于绷直状态,横向趋向于能量较小的密集状态排列. 与轴心相邻的两层纤维单丝由于变形差异而对它们之间的酚醛树脂产生挤压作用. 在以下假设条件下: ①纱束内所有纤维单丝均按照完美的螺旋线分布,螺旋线的中心线与纱束的中心线重合; ②横截面上所有纤维单丝呈紧密对称分布; ③纤维单丝的直径很小,与纱束直径相比可以忽略,得到图 3 中的受力分析, T_0 为牵引力作用下纤维单丝承受的平均拉力,那么,第 n 层纤维单丝的径向压力

$$T_{r,n} = T_0 \tan \theta_n = 2\pi R_n N T \quad (4)$$

其中 N 为纤维捻度(捻/m); R_n 为最外层纤维单丝螺旋线半径(m). 第 n 层与 $n-1$ 层纤维单丝间酚醛树脂所受径向压力为

$$\Delta T_{r,n} = T_{r,n} - T_{r,n-1} = 2\pi N T_0 (R_n - R_{n-1}) \quad (5)$$

当纤维单丝按照理想状态密集排列时,可以认为 $R_n - R_{n-1}$ 是恒定的;拉挤速度一定时,牵引力也不变,由此得到酚醛树脂径向压力与纤维捻度成正比,那么提高纤维捻度可相应有效地提高酚醛树脂等静压强,从而抑制孔隙生长。

3 捻度对 Z-pin 性能的影响

针对由拉挤成形方法制备的不同捻度 Z-pin 试样进行性能评价,考察纤维捻度对 Z-pin 制品性能的影响。

3.1 捻度对 Z-pin 外观特征及直径的影响

Z-pin 内部孔隙在外观上表现为间隔地直径波动,直径突然增大区域内部为空气与水的混合物。采用加捻碳纤维拉挤制得的 Z-pin 如图 4 所示,与未加捻 Z-pin 相比,加捻纤维增强 Z-pin 最大直径明显减小,表明孔隙的尺寸减小;另一方面,纤维捻度增加后,孔隙的数量减少,体现为相邻两个“波峰”(直径突增区域)间距变大。具体地,不同捻度纤维增强 Z-pin 最大直径和相邻“波峰”间距列于表 1 中。

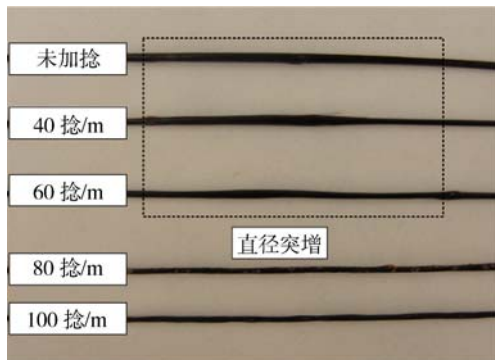


图 4 不同捻度加捻碳纤维增强 Z-pin

Fig. 4 Twisted carbon fiber reinforced Z-pin with different twist numbers

表 1 不同捻度纤维增强 Z-pin 最大直径及“波峰”间距
Table 1 Maximum diameter and interval of waviness of Z-pin reinforced by carbon fibers with different twist numbers

捻度/(捻/m)	最大直径/mm	平均“波峰”间距/mm
0	0.9 ± 0.08	8.6 ± 2.3
40	0.86 ± 0.05	87.5 ± 12.1
60	0.68 ± 0.04	262 ± 47.6
80	0.51 ± 0.01	
100	0.50 ± 0.01	

由表 1 可见,随着纤维捻度的增加,Z-pin 最大直径变小,“波峰”间距变大,证明了纤维加捻对抑制酚醛对脂体系 Z-pin 中孔隙的生长具有显著有效的作用。当捻度增加至 80 捻/m 时,间隔出现的直径波动现象消失,Z-pin 直径为均匀,与模具内腔尺寸($\phi 0.5$ mm)吻合,公差仅为 ± 0.01 mm,表明 Z-pin 内部的孔隙缺陷基本排除,如图 5 所示为 80 捻/m 碳纤维连续拉挤制得的 Z-pin。

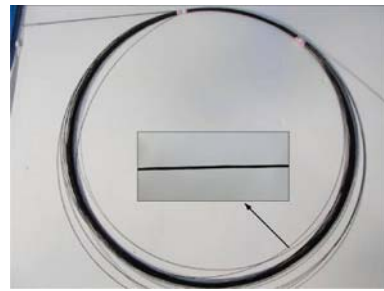


图 5 80 捻/m 碳纤维连续拉挤制得的 Z-pin

Fig. 5 Continuous pultruded Z-pin of 80 twist/m carbon fiber

3.2 捻度对 Z-pin 酚醛树脂质量分数的影响

采用称质量法测量 Z-pin 酚醛树脂质量分数,即随机取 3 段长度为 l 的 Z-pin,称取其质量,Z-pin 酚醛树脂质量分数 ω 的计算公式为

$$\omega = \frac{\bar{m} - l\rho_f}{\bar{m}} \times 100\% \quad (6)$$

其中 l 为 Z-pin 长度(m); $\bar{m}$ 为 3 段长度为 l 的 Z-pin 的平均质量(mg); ρ_f 为纤维线密度(mg/m),不同捻度纤维的线密度采用称质量法测量。纤维线密度及 Z-pin 酚醛树脂质量分数随捻度的变化如图 6 所示。

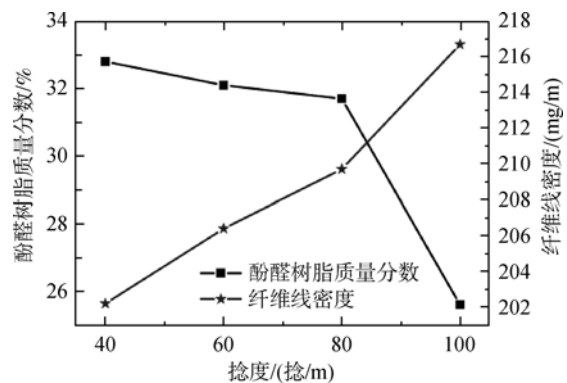


图 6 纤维捻度对其线密度和 Z-pin 酚醛树脂质量分数的影响

Fig. 6 Effect of fiber twist number on the linear density and Z-pin phenolic resin mass fraction

如图6所示,随着纤维捻度的增加,纤维的线密度增大,Z-pin中酚醛树脂质量分数降低,Z-pin通过与被增强体间的共固化作用将复合材料各层结合在一起,以达到层间增强效果,Z-pin基体树脂须与层合板基体树脂形成牢固的结合,Z-pin缺胶、贫胶均会导致Z-pin与基体结合处开裂,影响载荷传递.当捻度增加至100捻/m时,Z-pin中酚醛树脂质量分数已经低于30%,无法满足Z-pin质量要求,因此,纤维捻度以80捻/m为宜.

3.3 捻度对Z-pin抗压性能的影响

Z-pin三维增强技术的关键工艺为Z-pin的超声植入.由Aztec公司开发的超声波辅助植入技术(UAZTM)可实现Z-pin的大面积自动化植入,其方法是利用超声振动及外加压力的共同作用将Z-pin植入到未固化的预浸料坯料中^[14].当Z-pin内部存在孔隙或纤维与酚醛树脂结合状态差时,在外加轴向压力作用下,Z-pin容易发生劈裂,不能被顺利植入到预浸料中,因此Z-pin的抗压性能是影响其工艺性的重要因素.

借鉴文献^[15]中提到的Z-pin轴向压缩试验方法对Z-pin的压缩性能进行评价,试验选择Z-pin有效试验段长度为8 mm,加载速率为0.5 mm/min.采用垂直打孔的碳纤维增强层合板作为试验Z-pin的侧向支撑条件,更接近实际情况.考虑到单根Z-pin承载能力有限,试验误差较大,且根据常用超声辅助植入枪的尺寸,一次可完成约8根Z-pin的植入,因此,选择8根Z-pin同时进行压缩试验.试验用Z-pin应采用刀具一次性剪裁至所需长度,使Z-pin的长度相等以确保所有Z-pin均匀受力.试验过程中,捻度为40捻/m及捻度为60捻/m的纤维增强Z-pin在承受压力时,随着压力缓慢上升Z-pin逐渐发生劈裂破坏(图7(a));而对于80捻/m纤维拉挤得到的Z-pin,压力迅速上升达到最大值后,压力出现上下波动,Z-pin端部与夹具接触处逐渐粉碎破坏(图7(b)).对于100捻/m纤维拉挤得到的Z-pin,大部分试样在压力作用下表现出与80捻/m纤维拉挤Z-pin相同的行为,但其中一组Z-pin出现失稳失效,导致压力在较低水平时即停止上升,在数据处理时剔除该组试样的结果,最终试验结果如图8所示.

图8结果表明Z-pin所能承受的最大压力随纤维捻度的增加呈现先升高后降低的趋势,在捻度为80捻/m时达到最大.捻度小于80捻/m时,Z-pin中存在的孔隙导致纤维与酚醛树脂间结合



(a) 40捻/m纤维增强Z-pin



(b) 80捻/m纤维增强Z-pin

图7 压缩破坏Z-pin

Fig. 7 Broken Z-pin under compression

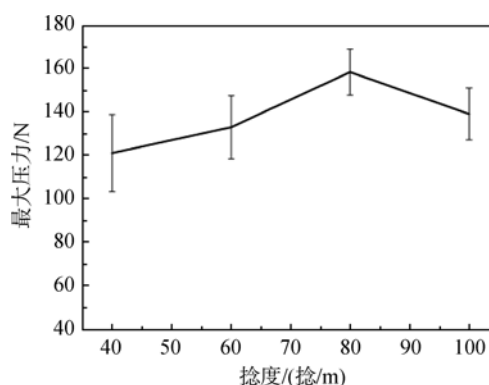


图8 Z-pin压缩试验结果

Fig. 8 Results of compressive tests on Z-pin

较弱,在较小的轴向压力下即劈裂破坏,且试验结果离散性较大,表明Z-pin质量不均匀.而当捻度为80捻/m时,Z-pin中纤维与酚醛树脂始终保持结合良好,抗压能力提高.然而,Z-pin的抗压性能并不是一直随着捻度的增加而提高,捻度为100捻/m的Z-pin的抗压性能略有下降.众所周知,纤维轴向力学性能最佳,加捻后,纤维处于偏轴应力状态,其力学性能不能得到充分发挥,Z-pin轴向力学性能由此受到影响,且捻度为100捻/m时,Z-pin酚醛树脂含量不足,Z-pin端部更加容易粉碎.纤维捻度为80捻/m时,8根Z-pin可承受的最大压力平均为156 N,后续超声植入时所施加的压力应小于该压力.

3.4 轴向刚度折减对Z-pin植入工艺的影响

纤维处于偏轴应力状态还会导致Z-pin轴向

刚度下降,对 Z-pin 可植入性的影响体现在增强较厚制件时,Z-pin 露出载体泡沫部分在超声辅助植入枪的压力作用下易发生失稳,如图 9 所示。

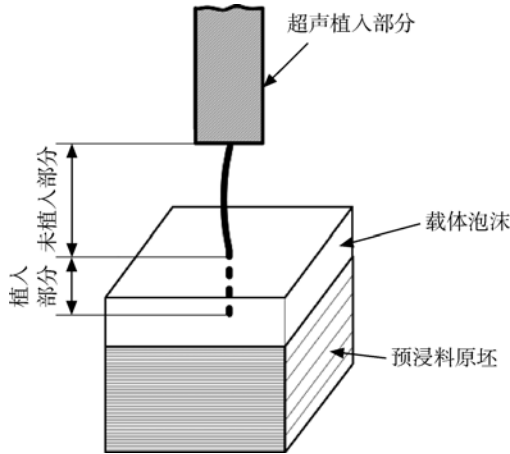


图 9 大厚度超声植入时 Z-pin 发生失稳

Fig. 9 Buckled Z-pin for thick laminates insertion

Whitney^[16]根据纤维线弹性假设下的应力-应变关系,得到加捻后纤维束的轴向弹性模量 E_l 与纤维单丝轴向弹性模量 E_f 之间的关系为

$$E_l = \frac{E_f}{1 + 4\pi^2 N^2 \bar{R}^2} \quad (7)$$

其中 $\bar{R}$ 为加捻纤维束的平均半径(mm),可见,纤维束轴向模量随着纤维捻度的增大而减小。Z-pin 中纤维为增强体,其弹性模量远高于酚醛树脂模量,根据混合法则有: $E_{pin} \approx \varphi_f E_l$, E_{pin} 为 Z-pin 的轴向弹性模量, φ_f 为纤维体积分数。植入时,Z-pin 可看作细长杆,一端埋入载体泡沫中可看作是固支,另一端为铰支^[15],受压发生失稳时的临界压力为

$$T_{cr} = \frac{\pi^2 E_{pin} I}{(0.7 l_f)^2} \quad (8)$$

其中 T_{cr} 为临界压力(N); l_f 为露出载体泡沫部分 Z-pin 的长度(m); I 为 Z-pin 截面惯性矩(m⁴)。超声植入枪上施加的压力需要克服 Z-pin 植入预浸料原坯中所受的摩擦阻力,由 Z-pin 的表面状态及预浸料的黏性决定。预浸料、Z-pin 材料及植入环境一定时,摩擦阻力 P 一定,Z-pin 可植入的理论最大深度计算公式为

$$l_{max} = \frac{\pi}{2} \sqrt{\frac{\varphi_f E_f I}{P(1 + 4\pi^2 N^2 \bar{R}^2)}} \quad (9)$$

当植入深度大于 l_{max} 时,意味着露出载体泡沫部分 Z-pin 将发生失稳,继续增大植入压力会导致 Z-pin 弯折破坏。由式(8)、式(9)发现,随着

捻度的增加,Z-pin 更易发生失稳,在特定预浸料中的可植入深度减小,限制了 Z-pin 可增强层合板的最大厚度。通过试验得到,室温条件下,80 捻/m 碳纤维拉挤制得的 Z-pin 在正交铺层预浸料中的最大植入深度为 10 mm,而对于 100 捻/m 碳纤维拉挤制得的 Z-pin,其最大植入深度只有 8 mm。

同时,根据文献[4,17]报道,利用加捻纤维可以增大 Z-pin 表面粗糙度从而提高与层合板间的结合强度,不同捻度对 Z-pin 增强效果的影响规律也是很有意义的后续研究方向。

4 结 论

本文采用对纤维加捻的方法解决了酚醛树脂体系 Z-pin 拉挤工艺的技术难点,并对加捻纤维增强 Z-pin 的性能进行了评价,得到如下结论:

1) 纤维加可形成过程中酚醛树脂的等静压强,有效地改善 Z-pin 中的孔隙缺陷。

2) Z-pin 的酚醛树脂质量分数随着纤维捻度的增加而降低;Z-pin 抗压性能随着纤维捻度的增加先提高后降低,在 80 捻/m 时达到最佳值;纤维加捻会引起 Z-pin 轴向刚度折减从而降低其最大植入深度。

3) 当纤维捻度为 80 捻/m 时,可实现 Z-pin 的连续稳定拉挤成形,Z-pin 酚醛树脂质量分数为 32%,可植入性较佳,室温下最大植入深度为 10 mm。

参考文献:

- [1] Mouritz A P. Review of Z-pinned composite laminates[J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2007,38(12):2383-2397.
- [2] Cartie D D R. Effect of Z-fibers TM on the delamination behavior of carbon fiber/epoxy laminates[D]. Cranfield: Cranfield University, 2000.
- [3] 孙先念,郑长良. 层合复合材料 Z-pinning 增强技术的力学进展[J]. 航空学报, 2006,27(6):1194-1202.
SUN Xiannian, ZHENG Changliang. Advances on modeling through-the-thickness reinforcement of laminated composite by Z-pinning[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2006,27(6):1194-1202. (in Chinese)
- [4] Toral V J, Castanié B, Barrau J J, et al. Multi-level analysis of low-cost Z-pinned composite joints: Part 2 joint behavior [J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2011,42(12):2082-2092.
- [5] Byrd L W, Birman V. The estimate of the effect of Z-pins on the strain release rate, fracture and fatigue in a composite co-cured Z-pinned double cantilever beam[J]. Composite Structures, 2005,68(1):53-63.

- [6] Walker S P, Sullivan B J. Sharp refractory composite leading edges on hypersonic vehicles[R]. AIAA 2003-6915, 2003.
- [7] 李仲平. 耐热复合材料发展与展望[J]. 复合材料学报, 2011, 28(2): 1-9.
LI Zhongping. Major advancement and development trends of TPS composites[J]. Acta Material Composite Sinica, 2011, 28(2): 1-9. (in Chinese)
- [8] 赵梦熊. 载人飞船返回舱的烧蚀防热[J]. 气动实验与测量控制, 1996, 10(3): 1-9.
ZHAO Mengxiong. Ablative thermal protection of capsule type re-entry vehicle[J]. Aerodynamic Experiment and Measurement and Control, 1996, 10(3): 1-9. (in Chinese)
- [9] 袁海根, 曾金芳, 杨杰, 等. 耐热抗烧蚀复合材料研究进展[J]. 化学推进剂与高分子材料, 2006, 4(1): 21-25.
YUAN Haigen, ZENG Jinmei, YANG Jie, et al. Research progress of high temperature thermoprotective and ablation resistant composite materials[J]. Chemical Propellants and Polymeric Materials, 2006, 4(1): 21-25. (in Chinese)
- [10] 李宁. Z-pin 增强酚醛层合板制备工艺及性能研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2012.
LI Ning. Research on preparation process and mechanical properties of Z-pinned phenolic composite laminates[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2012. (in Chinese)
- [11] Kardos J L, Duduković M P, Dave R. Void growth and resin transport during processing of thermosetting-matrix composites[M]. Berlin: Springer, 1986.
- [12] 郭昕昕, 刘永琪. 拉挤用酚醛树脂固化过程的研究[J]. 纤维复合材料, 1999, 16(4): 39-42.
GUO Xinxin, LIU Yongqi. Research on the curing process of phenolic resin for pultrusion[J]. Fiber Composites, 1999, 16(4): 39-42. (in Chinese)
- [13] 顾平, 管辛. 粘胶长丝加捻线的形态特征与数学模型[J]. 纺织学报, 2005, 26(2): 33-36.
GU Ping, GUAN Xin. Morphology features and mathematical model of viscose twisted filament threads[J]. Journal of Textile Research, 2005, 26(2): 33-36. (in Chinese)
- [14] Partridge I K, Cartie D D R, Bonnington T. Manufacture and performance of Z-pinned composites[M] // Shonaik G, Advani S. Advanced Polymeric Composites. Florida: CRC Press, 2003.
- [15] 王晓旭, 陈利. 复合材料 Z-pin 的压缩试验研究[J]. 航空材料学报, 2011, 31(4): 90-95.
WANG Xiaoxu, CHEN Li. Experimental studies on compressive properties of composite Z-pins[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2011, 31(4): 90-95. (in Chinese)
- [16] Whitney J M. Geometrical effects of filament twist on the modulus and strength of graphite fiber-reinforced composites[J]. Textile Research Journal, 1966, 36(9): 765-770.
- [17] Rugg K L, Cox B N, Ward K E, et al. Damage mechanisms for angled through-thickness rod reinforcement in carbon-epoxy laminates[J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 1998, 29(12): 1603-1613.

(编辑: 陈越)