

2.5D 浅交直联 C_f /Al 复合材料的 显微组织及弯曲和剪切性能

Microstructure, bending and shear properties of
2.5D shallow cross-linked C_f /Al composites

冯景鹏¹, 余欢¹, 徐志锋¹, 蔡长春¹, 王振军¹, 胡银生¹, 王雅娜²

(1 南昌航空大学 轻合金加工科学与技术国防重点学科实验室,
南昌 330063; 2 中国航发北京航空材料研究院, 北京 100095)

FENG Jing-peng¹, YU Huan¹, XU Zhi-feng¹, CAI Chang-chun¹,
WANG Zhen-jun¹, HU Yin-sheng¹, WANG Ya-na²

(1 National Defense Key Discipline Laboratory of Light Alloy
Processing Science and Technology, Nanchang Hangkong
University, Nanchang 330063, China; 2 AECC Beijing Institute
of Aeronautical Materials, Beijing 100095, China)

摘要: 采用真空压力浸渗法制备体积分数为 50% 的 2.5D 浅交直联 C_f /Al 复合材料, 研究复合材料的显微组织以及室温、高温下弯曲和剪切性能, 分析复合材料弯曲和剪切性能的破坏失效机理。结果表明: 2.5D 浅交直联 C_f /Al 复合材料经向、纬向显微组织均存在一定的微孔、纤维丝偏聚等缺陷。室温的弯曲强度、弯曲模量、剪切强度分别为 268.4 MPa, 75.2 GPa 和 41.0 MPa, 350 °C 的弯曲强度、弯曲模量、剪切强度分别为 139 MPa, 70.9 GPa 和 39.2 MPa, 400 °C 的弯曲强度、弯曲模量、剪切强度分别为 97.6 MPa, 68.5 GPa 和 29.9 MPa; 其中, 弯曲失效主要由于内侧面受压导致经向纤维束在压应力作用下被压断, 纬向纤维束产生挤压变形; 外侧面受拉处随测试温度升高复合材料拉伸破坏现象不明显; 而剪切破坏首先出现在基体与纤维束界面损伤处, 室温下纤维束被拔出, 断口不平整, 350, 400 °C 时纤维束断口呈现 45° 破坏; 经向纤维束屈曲与纬向纤维束挤压变形程度随测试温度升高越来越严重。

关键词: 2.5D 浅交直联; C_f /Al 复合材料; 显微组织; 弯曲性能; 剪切性能

doi: 10.11868/j.issn.1001-4381.2019.000648

中图分类号: TB331 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4381(2020)06-0132-08

Abstract: 2.5D shallow cross-linked C_f /Al composites with volume fraction of 50% were fabricated by vacuum pressure infiltration. The microstructure, bending and shear properties at room and high temperature were studied. The failure mechanism of bending and shear properties of the composites were analyzed. The results indicate that the warp and weft microstructures of 2.5D shallow cross-linked C_f /Al composites have some defects such as microvoid and fiber aggregation. The bending strength, bending modulus and shear strength of the composites at room temperature are 268.4 MPa, 75.2 GPa and 41.0 MPa, respectively. The bending strength, bending modulus and shear strength of the composites at 350 °C are 139 MPa, 70.9 GPa and 39.2 MPa, respectively. The bending strength, bending modulus and shear strength of the composites at 400 °C are 97.6 MPa, 68.5 GPa and 29.9 MPa, respectively. The bending failure is mainly caused by the compressive stress on the inner surface, which leads to press fracture of the warp fiber bundle and the extrusion deformation of the weft fiber bundle. Tensile failure of composites is not obvious with the increase of testing temperature at the outer side tension. Shear failure occurs first in the damage interface of the matrix and fiber bundle, the fiber bundle is pulled out and the fracture surface is not at the same level at room temperature, the fracture of the fiber bundle shows 45° failure at 350, 400 °C. The buckling of the warp fiber bundle and the extrusion deformation degree of the weft fiber bundle become more and more serious with the increase of the test temperature.

Key words: 2.5D shallow cross-linked; C_f/Al composites; microstructure; bending property; shear property

三维纺织连续碳纤维增强铝基复合材料由于具有优良的比强度、比刚度、抗疲劳性、减重、强度和刚性好等优异性能,相较于树脂基复合材料具有使用温度高、抗“老化”、不吸湿等优异性能,相较于陶瓷基复合材料具有更高的韧性与冲击性等优异性能,在航空航天、武器装备等领域得以应用^[1-9]。

2.5D 织物复合材料是三维纺织复合材料的一个分支,其最大的特点是其中的纱线沿与织物厚度方向呈一定角度的方向配置,从而增强了织物层间连接强度。其不仅克服了层合板复合材料易分层、开裂和抗冲击性能差等问题^[10],还由于其结构可设计性可以织造复杂异形件^[11-12],在发动机喷管、导弹头锥、螺旋桨、直升机起落架、燃烧室内衬等航空结构件上成功应用^[13],引起国内外学者广泛关注。目前国内外研究者围绕三维纺织金属基复合材料室温力学性能展开的研究较多,如胡银生等^[14]研究了不同纺织结构 2.5D-C_f/Al 复合材料室温经/纬向拉伸性能。而对于 2.5D 纺织金属基复合材料高温力学性能的研究鲜有报道。随着复合材料成型工艺的进一步完善,及其制造成本的大幅下降,三维纺织金属基复合材料的应用不再仅局限于室温条件,许多航空结构件如压气机冷端部件工作温度一般低于 350 ℃,因此开展三维纺织金属基复合材料在一定温度环境下的各项力学性能的研究,对推动三维纺织金属基复合材料更广泛应用具有十分重要意义。

本课题组前期研究了 2.5D 浅交直联 C_f/Al 复合材料室温、350 ℃和 400 ℃拉伸性能,其室温、高温拉伸强度都能达到 400 MPa 以上,本工作采用真空压力浸渗法制备体积分数为 50%的 2.5D 浅交直联 C_f/Al 复合材料,研究了复合材料的显微组织以及室温、350 ℃和 400 ℃下弯曲与剪切性能,并分析了复合材料室温和高温弯曲、剪切失效机制,丰富了三维纺织金属基复合材料力学性能数据,为 2.5D 浅交直联 C_f/Al 复合材料的工程应用提供理论支持。

1 实验材料与方法

1.1 实验材料

实验选用 M40J 纤维编织成 2.5D 浅交直联预制体,其结构示意图见图 1,M40J 纤维性能见表 1,预制体编织参数见表 2,其中,M40J 纤维细度为 229 tex,在试件 10 mm 的宽度中,有 6 个织物单元,织物单元

如图 2 所示。基体合金 ZL301 的化学成分见表 3。ZL301 合金中 Mg 元素含量为 9.5%~11.0%(质量分数,下同),一定含量的 Mg 元素能改善铝液与碳纤维间的润湿性和抑制有害界面相的生成,同时能降低铝液的表面能和界面能。

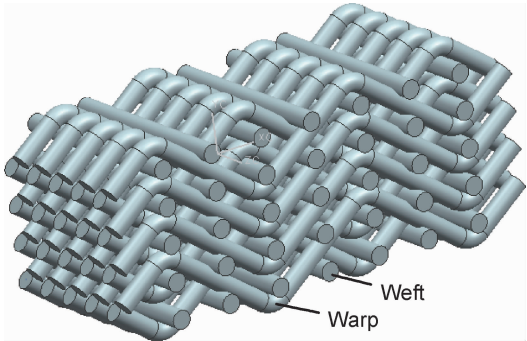


图 1 2.5D 浅交直联结构示意图
Fig. 1 Schematic diagram of 2.5D shallow cross-linked structure

表 1 M40J 纤维性能				
Table 1 Property of M40J fiber				
Fiber type	Monofilament diameter/ μm	Tensile strength/MPa	Elastic modulus/GPa	Density/ $(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$
M40J	5-7	4410	377	1.77

表 2 2.5D 浅交直联预制体编织工艺参数			
Table 2 Weaving process parameters of 2.5D shallow cross-linked preform			
Fabric size	Volume ratio of warp/%	Volume ratio of weft/%	Volume fraction/%
250 mm×200 mm×4 mm	75	25	50

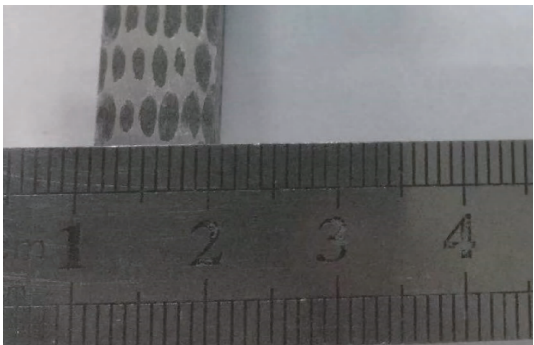


图 2 试样织物单元图
Fig. 2 Diagram of specimen fabric unit

表 3 ZL301 合金化学成分(质量分数/%)						
Table 3 Chemical composition of ZL301 aluminum alloy (mass fraction/%)						
Mg	Si	Cu	Mn	Zn	Ti	Al
9.5-11.0	0.3	0.1	0.15	0.15	0.15	Bal

1.2 实验方法

采用真空压力浸渗法制备 2.5D 浅交直联 C_f/Al 复合材料,其工艺装置原理如图 3 所示^[15],首先将表 2 所示尺寸的预制体用石墨板固定后用不锈钢模具进行封装,铝合金熔炼完成之后,将封装后的预制体进行浸渗实验。整个浸渗实验过程中氩气作为保护气体,氮气作为增压气体。

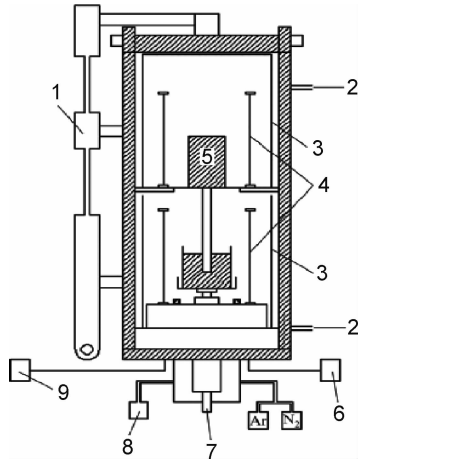


图 3 真空压力浸渗原理示意图^[15]

Fig. 3 Schematic diagram of vacuum pressure infiltration^[15]

1.3 测试与表征

弯曲、剪切实验分别根据 GB/T1449—2005 纤维增强塑料弯曲性能试验方法和 ASTM D5379 用 V 形缺口梁测试复合材料剪切性能试验方法进行实验;弯曲、剪切试样如图 4 和图 5 所示,分别采用 Inspekt100 和 Instron5882 电子万能材料试验机对复合材料进行室温和高温下的弯曲、剪切力学性能测试,设备量程为 100 kN,载荷测试精度为示值的 $\pm 1\%$ 以内,本工作的力学性能实验在中国航发北京航空材料研究院完成。

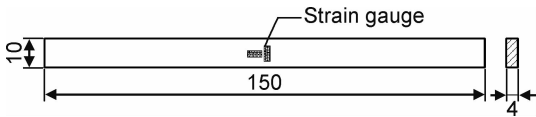


图 4 2.5D 浅交直联 C_f/Al 复合材料弯曲试样

Fig. 4 Bending specimen of 2.5D shallow cross-linked C_f/Al composites

采用 STPJA1003 电子天平测得 $10\text{ mm}\times 10\text{ mm}\times 4\text{ mm}$ 的试样分别在空气和水中的质量,设备称量范围为 $0\sim 100\text{ g}$,可读性为 1 mg ,根据阿基米德排水法原理对试样进行致密度测定;采用 Quanta2000 型扫描

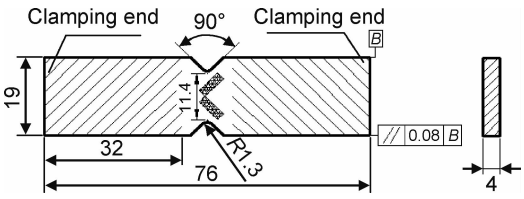


图 5 2.5D 浅交直联 C_f/Al 复合材料剪切试样

Fig. 5 Shear specimen of 2.5D shallow cross-linked C_f/Al composites

电子显微镜(SEM)对复合材料经向、纬向显微组织进行观察;采用 D8 ADVANCE 型 X 射线衍射仪(XRD)分析复合材料物相组成;采用 AM4113ZT(R4)显微镜对复合材料弯曲和剪切断口进行观察。

2 结果与分析

2.1 复合材料致密度、显微组织分析

根据阿基米德排水法测得 2.5D 浅交直联 C_f/Al 复合材料的致密度为 95.3% ,致密度较高,说明复合材料浸渗效果较好。图 6 为 2.5D 浅交直联 C_f/Al 复合材料的显微组织,可以看出,复合材料浸渗完整,铝液能完整填充纤维束。经向显微组织存在微孔、纤维丝偏聚以及纤维丝由原来的圆形状变成“豌豆”状等现象,见图 6(a);纬向显微组织也存在微孔、纤维丝偏聚以及纤维丝由原来的圆形状变成“豌豆”状等现象,但相应的缺陷程度较经向显微组织要少,见图 6(b)。这是由于:一方面 2.5D 浅交直联结构经向纤维束呈现正弦交错分布,纬向纤维束垂直于面内穿插于经向纤维束之间,经向纤维束与纬向纤维束交织点较多,纤维束与纤维束间的间隙相对小。根据 Yong-Kelvin 方程(见式(1))可知,在气-液界面上表面张力和润湿角不变的情况下,毛细压差大小取决于等效毛细管半径,当纤维束的间隙越小,熔融铝液在浸渗过程中需要克服的毛细阻力越大,铝液难以进入纤维间紧密的区域,使得这些区域不能充分浸渗完全,从而易形成细小的微孔。而由于经向纤维束的纤维体积比例要高于纬向纤维束,熔融金属液在浸渗经向纤维丝过程中克服的毛细阻力要高于浸渗纬向纤维丝,因此经向显微组织在浸渗过程中形成的微孔数量要高于纬向显微组织。另一方面,在浸渗开始时,封装的预制体内外存在巨大的压力差,在压力差作用下熔融铝液快速填充纤维束间和束内,熔融铝液较大的冲击力易造成纤维丝分布不均匀或偏聚现象。由于在浸渗过程中熔融铝液的浸渗方向平行于复合材料经向,较大冲击力的熔融铝液对垂直于浸渗方向纬向上的经纱纤维丝分布不均匀及偏

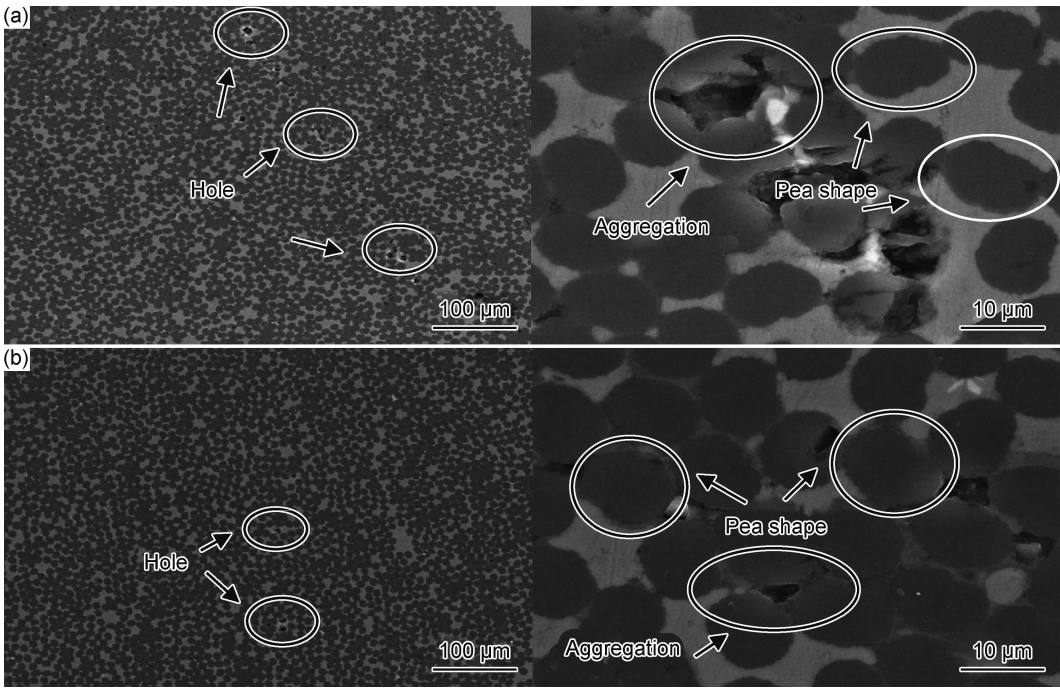


图 6 2.5D 浅交直联 C_f/Al 复合材料显微组织 (a)经向;(b)纬向

Fig. 6 Microstructures of 2.5D shallow cross-linked C_f/Al composites (a)warp;(b)weft

聚现象的影响要高于经向上的纬纱纤维丝,所以复合材料经纱纤维丝偏聚现象要高于纬纱纤维丝。此外,由于铝合金与纤维的热膨胀系数存在较大差异,复合材料从高温制备到室温冷却过程中内部易产生较大的残余应力^[16],残余应力易使复合材料中的纤维丝变形,由原来的圆形状变成“豌豆状”。

$$p_c = - \frac{2\sigma_{lg}\cos\theta}{r_{eq}} \tag{1}$$

式中: p_c 为毛细压差; σ_{lg} 为气-液界面上的表面张力; θ 为液面在固体表面的浸润角; r_{eq} 为等效毛细管半径。

2.2 复合材料室温、高温的弯曲性能

室温、350℃以及 400℃各取 5 个有效弯曲性能数据,表 4 为 2.5D 浅交直联 C_f/Al 复合材料经向弯曲性能。室温时复合材料的弯曲强度、模量分别为 268.4 MPa 和 75.2 GPa;350℃时复合材料弯曲强度、模量分别为 139 MPa 和 70.9 GPa,分别比室温下复合材料降低了 48.2%和 5.7%;400℃时复合材料弯曲强度、模量分别为 97.6 MPa 和 68.5 GPa,分别比

室温下复合材料降低了 63.6%和 8.9%。而董敬涛^[17]研究了 2.5D 浅交直联 C_f/Al 复合材料室温弯曲强度可以达到 454.74 MPa,造成两者弯曲强度差异的原因是由于本研究制备的复合材料中经纱密度为 18 股/cm(6 根/cm×3 股/根),而文献^[17]制备的复合材料中经纱密度为 24 股/cm(12 根/cm×2 股/根),经纱密度的下降显著降低了复合材料经向弯曲时的力学性能。本工作选用 50%的纤维体积分数是为了使复合材料其他力学性能更均衡。实验测试温度对 2.5D 浅交直联 C_f/Al 复合材料的弯曲性能影响很大的原因是由于:一方面 ZL301 铝合金的熔点为 660℃,在高温条件下会产生{100}<100>和{211}<110>新的滑移系,基体材料抵抗变形的能力减弱,表现为基体软化现象。测试温度越高基体合金软化程度越严重,软化的基体合金不能将弯曲载荷及时有效传递给增强体纤维束,导致基体易损伤。另一方面,通过 XRD 衍射图谱(图 7)可以看出,基体与增强体界面处存在 C, Al, Al₄C₃, Al₃Mg₂ 相,说明复合材料在高温制备过程

表 4 2.5D 浅交直联 C_f/Al 复合材料经向弯曲性能

Table 4 Warp bending properties of 2.5D shallow cross-linked C_f/Al composites

T/℃	Bending strength/MPa							Modulus/GPa						
	1	2	3	4	5	Ave	Var	1	2	3	4	5	Ave	Var
25	265	258	263	274	282	268.4	73.0	75.6	76.1	76.4	73.8	74.3	75.2	1.0
350	140	125	146	145	136	139.0	77.2	72.3	67.4	74.0	70.6	70.1	70.9	4.9
400	103	94	89	102	100	97.6	28.2	66.9	66.6	67.2	70.3	71.7	68.5	4.3

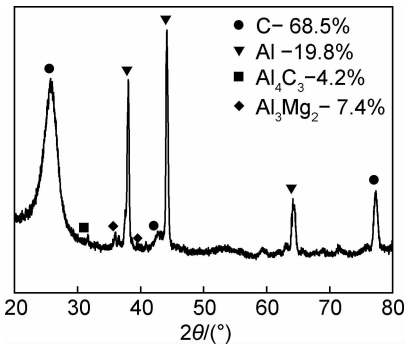


图 7 2.5D 浅交直联 C_f/Al 复合材料 XRD 衍射图谱
Fig. 7 XRD diffraction patterns of 2.5D shallow cross-linked C_f/Al composites

中,碳纤维与铝液会发生反应。其反应如式(2),(3)所示:



$$\Delta G^\theta = -265000 + 95.06T(\text{kJ/mol})$$



式中: ΔG^θ 为标准吉布斯自由能; T 为温度,K。

反应生成一定含量的 Al_4C_3 脆性相,且铝合金从高温冷却凝固的过程中会析出 β 相 Al_3Mg_2 , Al_3Mg_2 与 Al_4C_3 存在竞争生长关系,Mg 含量一定时,界面处优先生成 Al_3Mg_2 相,取代了 Al_4C_3 反应^[18],从而使得 Al_3Mg_2 相对 Al_4C_3 相的生成具有一定的抑制作用。随着实验测试温度升高,碳纤维与铝液反应进一步加剧,生成的 Al_4C_3 脆性相含量会增多, Al_4C_3 相是斜方六面体结构且形核机制为非均匀形核,在受力条件下易成为裂纹源^[19],使得纤维束与基体的界面易脱粘,影响界面对载荷的传递作用。所以随着测试温度升高,复合材料弯曲性能降低。

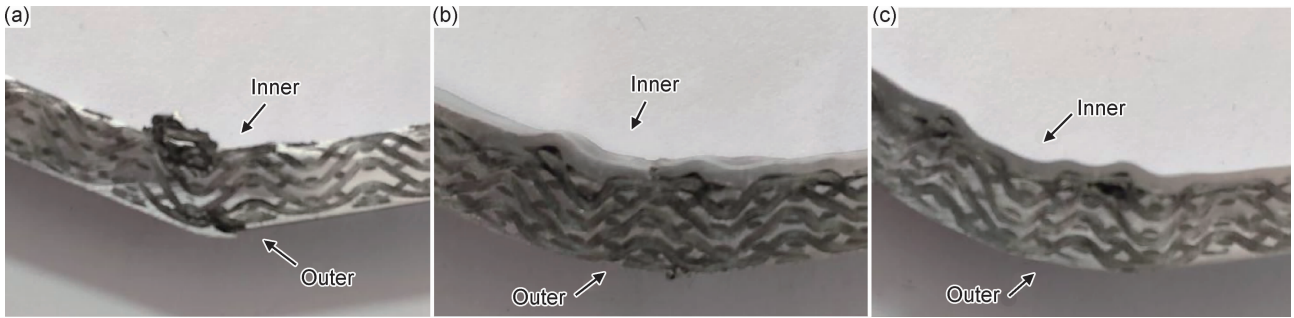


图 8 2.5D 浅交直联 C_f/Al 复合材料弯曲实验后试样 (a)室温;(b)350 °C;(c)400 °C

Fig. 8 Specimen of 2.5D shallow cross-linked C_f/Al composites after bending tests (a)room temperature;(b)350 °C;(c)400 °C

而外侧面受拉处复合材料拉伸破坏不明显。

2.3 复合材料室温、高温剪切性能

室温、350 °C 和 400 °C 各取 5 个有效剪切性能数据,表 5 为 2.5D 浅交直联 C_f/Al 复合材料经向剪切性能,室温时复合材料剪切强度为 41.0 MPa,350 °C

图 8 所示为 2.5D 浅交直联 C_f/Al 复合材料弯曲实验后试样图,400 °C 时基体软化以及界面脱粘情况较室温与 350 °C 时要严重。图 9 所示为 2.5D 浅交直联 C_f/Al 复合材料弯曲性能实验破损处断口图,室温时,内侧面受压处纤维束被压断,断口不平整,存在纤维拔出以及基体合金被撕裂现象,见图 9(a)。350 °C 时,内侧面受压处基体合金软化断裂,经向纤维束被压断,断口较平整,基体与纤维束界面出现脱粘,见图 9(b);400 °C 时,基体软化及界面脱粘程度较室温与 350 °C 时严重,经向纤维束被压断,断口较平整,见图 9(c)。测试温度越高,基体合金软化以及界面脱粘越严重。室温时,靠近压头内侧面受压处基体合金相互挤压,造成基体合金团簇在一起,内侧面产生压应力使得经向纤维束在压头应力集中处被压断,纬向纤维束则因经向纤维束受压过程中产生的挤压力则发生相应的挤压变形。外侧面受拉处则造成复合材料拉伸破坏。350 °C 时,由于纤维和基体的主要作用分别是承载和传递载荷,在界面脱粘处,由于基体不能有效将来自压头的压应力传递给纤维束,使得基体无法承受较高的压应力而被压断,裂纹在基体断口处沿着界面横向扩展至纤维束,裂纹穿过经向纤维束,经向纤维束在压应力作用下被压断,纬向纤维束则因经向纤维束受压过程中产生的挤压力则发生相应的挤压变形;而外侧面受拉处复合材料并未出现明显破坏现象。400 °C 时,高温回复软化使得压头作用处应力集中程度减弱,从而抑制或减缓裂纹横向扩展^[20],基体并未出现明显的断裂。裂纹沿着脱粘的界面处相互扩展,经向纤维束在压应力作用下被压断,纬向纤维束则由经向纤维束受压过程中产生的挤压力而发生相应的挤压变形,

时剪切强度为 39.2 MPa,比室温下复合材料降低了 4.4%;400 °C 剪切强度为 29.9 MPa,比室温下复合材料降低了 27.1%。由此可见,实验测试温度对 2.5D 浅交直联 C_f/Al 复合材料剪切性能影响较大。这是由于如前文所述,一方面测试温度越高基体合金更容易

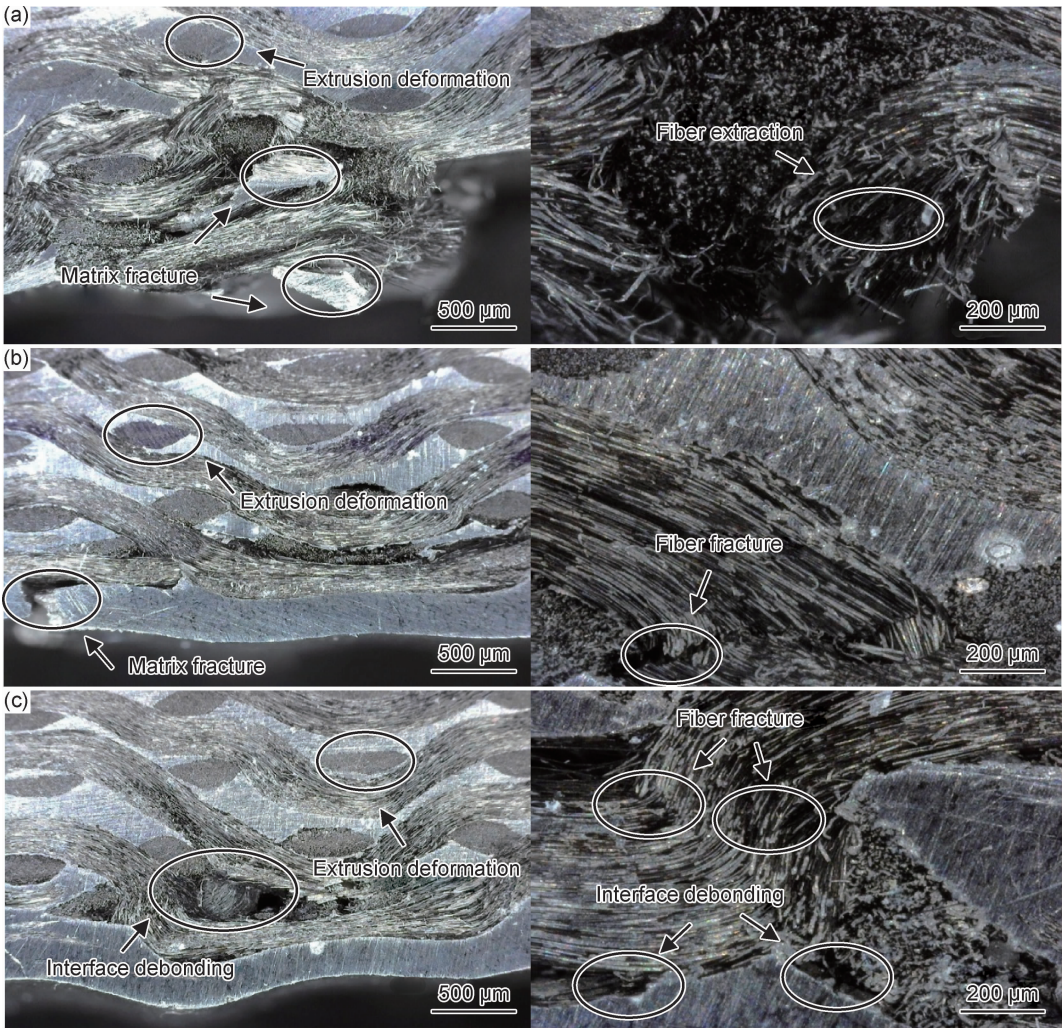


图 9 2.5D 浅交直联 C_f/Al 复合材料弯曲性能实验破坏处断口 SEM 照片 (a)室温;(b)350 ℃;(c)400 ℃

Fig. 9 Bending fracture SEM images of 2.5D shallow cross-linked C_f/Al composites (a)room temperature;(b)350 ℃;(c)400 ℃

软化,软化的基体合金不能有效地承受和传递载荷,使得基体易损伤,另一方面,随着测试温度的升高,界面反应加剧,Al₄C₃ 脆性相含量增加,在受力条件下会对界面造成破坏,影响界面传递载荷。所以随着测试温度升高,复合材料剪切性能降低。

表 5 2.5D 浅交直联 C_f/Al 复合材料经向剪切性能

Table 5 Warp shear properties of 2.5D shallow cross-linked C_f/Al composites

T/℃	Shear strength/MPa						
	1	2	3	4	5	Ave	Var
25	39.7	38.4	41.1	44.5	41.2	41.0	4.2
350	48.1	41.3	34.4	34.2	37.8	39.2	26.7
400	33.4	29.2	28.2	29.7	29.1	29.9	3.3

图 10 所示为 2.5D 浅交直联 C_f/Al 复合材料剪切破坏处断口图,复合材料的剪切破坏首先发生在“V”型口纤维束与基体界面损伤处,损伤处的纤维束与基体界面会发生破坏。室温时,经、纬向纤维束在剪

切力作用下被剪断,断口不平齐。在剪切过程中,经向纤维束在剪切力作用下会产生屈曲,纬向纤维束由于经向纤维束在屈曲过程中产生的挤压力导致发生相应的挤压变形,见图 10(a); 350 ℃时,复合材料“V”型口处的剪切断口纤维呈现近似 45°断裂,经向纤维束在剪切力作用下位错程度及纬向纤维束挤压变形程度较室温严重,见图 10(b)。400 ℃时,纤维束断口也是呈现近似 45°断裂,经向纤维束屈曲以及纬向纤维束挤压变形程度较室温和 350 ℃要严重,见图 10(c)。这是由于一方面“V”型口在剪切力作用下会产生应力集中,裂纹会沿着“V”型口纤维与基体界面损伤处与剪切力方向呈现 45°扩展,在剪切力作用下使得损伤处纤维束被剪断;另一方面,随着测试温度的升高基体合金软化越严重,软化的基体合金不能较好承受和传递剪切载荷,经向纤维束为主要剪切载荷承担者,测试温度越高经向纤维束承载就越大,导致经向纤维束屈曲程度随测试温度升高越来越严重,而纬向纤维束随着

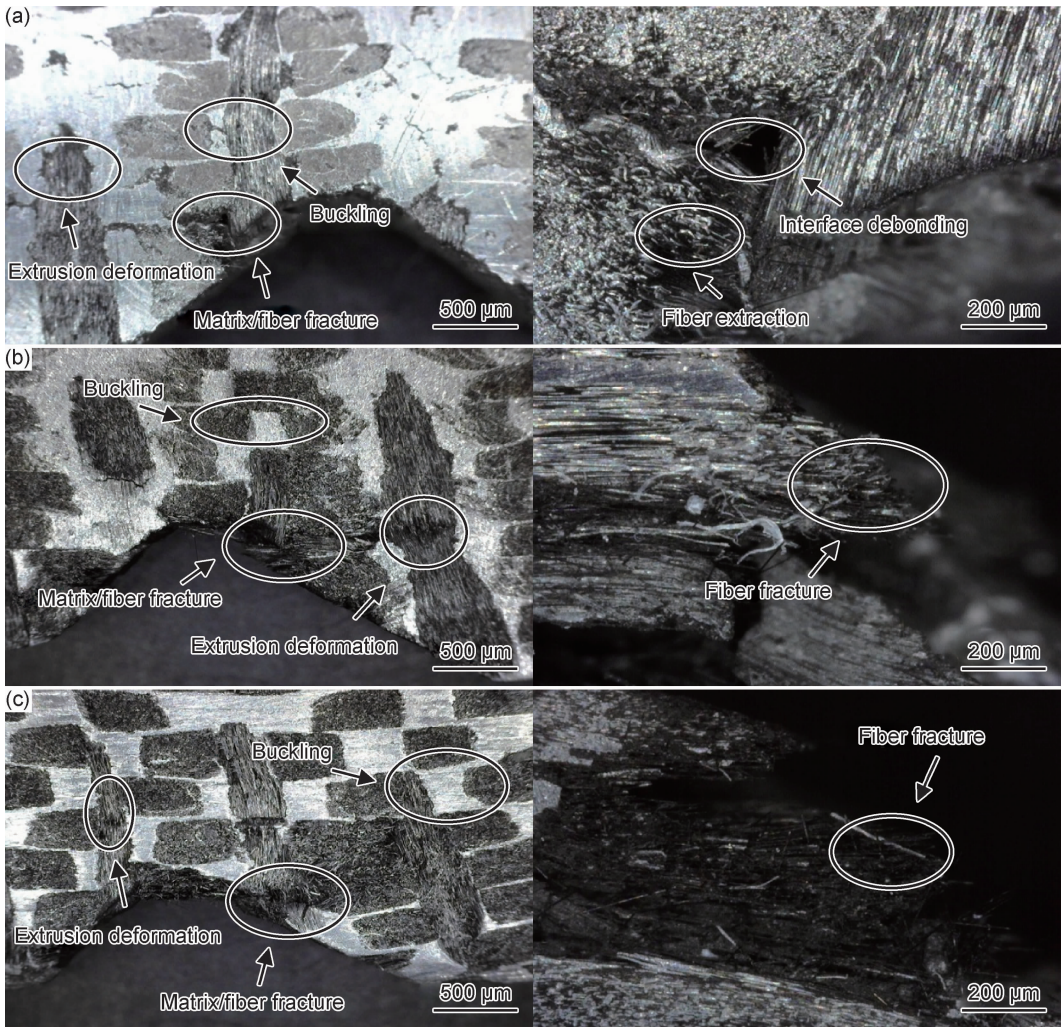


图 10 2.5D 浅交直联 C_f/Al 复合材料剪切破坏处断口 SEM 照片 (a)室温;(b) 350 °C;(c)400 °C

Fig. 10 Shear fracture SEM images of 2.5D shallow cross-linked C_f/Al composites (a)room temperature;(b)350 °C;(c)400 °C

测试温度的升高在剪切力、基体合金软化变形、经向纤维束屈曲过程中产生的挤压力共同作用下挤压变形程度越来越严重。

3 结论

(1)2.5D 浅交直联 C_f/Al 复合材料浸渗完整,铝液能完整填充纤维束。复合材料致密度为 95.3%;经、纬向显微组织均存在一定的微孔、纤维丝团聚等缺陷,且经、纬向纤维丝形貌存在由实验前的圆形状变成实验后的“豌豆”状。

(2)2.5D 浅交直联 C_f/Al 复合材料室温时弯曲强度、模量分别为 268.4 MPa 和 75.2 GPa,350 °C 时弯曲强度和模量分别为 139 MPa 和 70.9 GPa,400 °C 时弯曲强度、模量分别为 97.6 MPa 和 68.5 GPa;内侧面受压处经向纤维束在压应力作用下被压断,纬向纤维束则产生挤压变形;外侧面受拉处随着测试温度的升

高复合材料被拉伸破坏现象不明显。

(3)2.5D 浅交直联 C_f/Al 复合材料室温、350 °C 和 400 °C 时剪切强度分别为 41.0、39.2 MPa 和 29.9 MPa;剪切破坏首先出现在基体与纤维束界面损伤处,室温时纤维束被拔出,断口不平齐;350、400 °C 时纤维束断口呈现 45°破坏;经向纤维束屈曲与纬向纤维束挤压变形程度随测试温度升高越来越严重。

参考文献

[1] ZHANG Y H, WU G H. Interface and thermal expansion of carbon fiber reinforced aluminum matrix composites[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China,2010,20(11):2148-2151.
[2] GAO Y, LI J L. Effects of fiber volume fraction on damping properties of three-dimensional and five-directional braided composites[J]. Journal of Donghua University (English Edition), 2015,32(3):458-465.
[3] LI D G, CHEN G Q, JIANG L T, et al. Effect of thermal cycling on the mechanical properties of C_f/Al composites[J]. Materials Science & Engineering: A,2013,586(1): 330-337.

- [4] 刘谦,李嘉禄,李学明. 三维编织复合材料的弯曲和压缩性能探讨研究[J]. 材料工程, 2000(8): 3-6.
LIU Q, LI J L, LI X M. Research of bending and compression properties of 3 d braided composite materials [J]. Journal of Materials Engineering, 2000(8): 3-6.
- [5] 严实,郭留雨,赵金阳,等. 三维五向编织复合材料低速冲击及冲击后压缩性能实验研究[J]. 材料工程, 2017, 45(12): 65-70.
YAN S, GUO L Y, ZHAO J Y, et al. Experimental investigation on low-velocity impact and compression after impact properties of three-dimensional five-directional braided composites [J]. Journal of Materials Engineering, 2017, 45(12): 65-70.
- [6] 双超,刘璐璐,赵振华,等. 湿热老化后碳纤维复合材料层间剪切强度实验方法对比研究[J]. 航空材料学报, 2017, 37(5): 94-102.
SHUANG C, LIU L L, ZHAO Z H, et al. Comparison study on interlaminar shear strength testing methods of CFRP under hygrothermal aging conditions [J]. Journal of Aeronautical Materials, 2017, 37(5): 94-102.
- [7] 马晓康,殷小玮,范晓孟,等. 碳化硅陶瓷基复合材料的自愈合及结构吸波一体化研究进展[J]. 航空材料学报, 2018, 38(5): 1-9.
MA X K, YIN X W, FAN X M, et al. Progress on self-healing and structure-wave absorbing integration of silicon carbide ceramic matrix composites [J]. Journal of Aeronautical Materials, 2018, 38(5): 1-9.
- [8] 王涛,赵宇新,付书红,等. 连续纤维增强金属基复合材料的研制进展及关键问题[J]. 航空材料学报, 2013, 33(2): 87-96.
WANG T, ZHAO Y X, FU S H, et al. Progress and key problems in research and fabrication of fiber reinforced metal matrix composite [J]. Journal of Aeronautical Materials, 2013, 33(2): 87-96.
- [9] 汪星明,邢誉峰. 三维编织复合材料研究进展[J]. 航空学报, 2010, 31(5): 914-927.
WANG X M, XING Y F. Developments in research on 3D braided composites[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2010, 31(5): 914-927.
- [10] 韩振宇,梅海洋,付云忠,等. 三维编织预成型体的织造及三维编织复合材料微观结构研究进展[J]. 材料工程, 2018, 46(11): 25-36.
HAN Z Y, MEI H Y, FU Y Z, et al. Research progress on pre-form forming and microstructure of 3D braided composites[J]. Journal of Materials Engineering, 2018, 46(11): 25-36.
- [11] ZHANG Y H, YAN L L, MIAO M H, et al. Microstructure and mechanical properties of z-pinned carbon fibrereinforced aluminum alloy composites[J]. Materials & Design, 2015, 86: 872-877.
- [12] MA Y Q, QI L H, ZHANG T, et al. Study on defects of 2D- C_f/Al composite prepared by liquid-solid extrusion following vacuum infiltration technique[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2017, 88(1/4): 89-96.
- [13] 王一博,刘振国,胡龙,等. 三维编织复合材料研究现状及在航空航天中应用[J]. 航空制造技术, 2017(19): 78-85.
WANG Y B, LIU Z G, HU L, et al. Recent advancements of 3D braided composite and its applications in aerospace [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2017(19): 78-85.
- [14] 胡银生,余欢,王振军,等. 织物结构对 2.5D- C_f/Al 复合材料微观组织与力学性能的影响[J]. 中国有色金属学报, 2018, 28(12): 2512-2522.
HU Y S, YU H, WANG Z J, et al. Effects of woven fabric structure on microstructure and mechanical properties of 2.5D- C_f/Al composites [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2018, 28(12): 2512-2522.
- [15] 聂明明,徐志锋,余欢,等. 真空气压浸渗 3D- C_f/Al 复合材料微观缺陷分析[J]. 稀有金属材料与工程, 2018, 47(4): 1266-1274.
NIE M M, XU Z F, YE H, et al. Micro-defects of 3D- C_f/Al composites by vacuum pressure infiltration[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2018, 47(4): 1266-1274.
- [16] TROJANOVA Z, LUKACP, RIEHEMANN W, et al. Study of relaxation of residual internal stress in Mg composites by internal friction[J]. Materials Science & Engineering, 2002, 324(1/2): 122-126.
- [17] 董敬涛. 织物结构对 2.5D- C_f/Al 复合材料组织与力学性能的影响研究[D]. 南昌:南昌航空大学, 2017.
DONG J T. Research on the effect of woven fabric structure on microstructure and mechanical properties of 2.5D- C_f/Al composites [D]. Nanchang: Nanchang Hangkong University, 2017.
- [18] 武高辉,姜龙涛,陈国钦,等. 金属基复合材料界面反应控制研究进展[J]. 中国材料进展, 2012, 31(7): 51-58.
WU G H, JIANG L T, CHEN G Q, et al. Research progress on the control of interfacial reactions in metal matrix composites [J]. Materials China, 2012, 31(7): 51-58.
- [19] 聂明明,徐志锋,徐燕杰,等. 基体合金对连续 SiC_f/Al 复合材料界面及拉伸强度的影响[J]. 中国有色金属学报, 2016, 26(3): 593-601.
NIE M M, XU Z F, XU Y J, et al. Effect of matrix alloy on interface and tensile strength of continuous SiC_f/Al composite[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2016, 26(3): 593-601.
- [20] 王振军,朱世学,余欢,等. 预热温度对 C_f/Al 复合材料微观组织及室温与高温力学性能的影响[J]. 稀有金属材料与工程, 2018, 47(3): 982-989.
WANG Z J, ZHU S X, YU H, et al. Effect of fabrication temperature on microstructure and mechanical properties of C_f/Al composites at room and elevated temperature[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2018, 47(3): 982-989.

基金项目:国家自然科学基金项目(51765045; AA201301219);江西省自然科学基金(20151BAB206004; 20171BAB201021)

收稿日期: 2019-06-05; 修订日期: 2019-10-16

通讯作者: 余欢(1960—), 男, 教授, 博士, 研究方向为金属基复合材料, 联系地址: 江西省南昌市红谷滩新区丰和南大道 696 号南昌航空大学轻合金加工科学与技术国防重点学科实验室(330063), E-mail: yuhwan@163.com

(本文责编: 解 宏)