

连续 C_f/Al 复合材料板双辊铸轧制备及力学性能研究

林金保, 巩毅, 牟维鹏, 许鹏, 刘二强, 常超

(太原科技大学 应用科学学院, 山西 太原 030024)

摘要: 利用电镀工艺制备了表面镀镍碳纤维, 通过双辊铸轧短流程成型工艺制备了连续碳纤维增强铝基 (C_f/Al) 复合材料板, 研究了浇注温度对铸轧复合材料板的微观组织、界面特征、断口形貌和力学性能的影响。结果表明, 在浇注温度为 963、973、983 K, 轧制速度为 2.7 m/min, 辊缝为 2 mm 的条件下可制备出表面平整、无明显表面缺陷的 C_f/Al 铸轧复合材料板; 浇注温度为 973 K 时, 碳纤维与铝基体之间界面结合良好; 纤维表面的金属镍层明显改善了碳纤维与铝基体之间的浸润性, 镍镀层还有效抑制了 Al₄C₃ 脆性相的产生, 使 C_f/Al 复合材料板力学性能大幅提升, 其中浇注温度为 973 K 铸轧的 C_f/Al 复合材料板, 其抗拉强度比基体的 38.2 MPa 提高了 87.4%。

关键词: 双辊铸轧; 连续 C_f/Al 复合材料板; 力学性能; 浇注温度

中图分类号: TG146.21; TB333

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2021)10-3745-06

连续碳纤维增强铝基 (C_f/Al) 复合材料具有高比强度、高比模量和低热膨胀系数等特点, 还具有耐高温、导热与导电率高、抗辐射等优点, 在材料性能与设计方法上有明显的优越性, 能够满足航空、航天构件对材料刚度的要求^[1-3]。因此, 碳纤维增强铝基复合材料的研制与开发受到各国研究工作者的广泛关注^[4-6]。美国、英国、德国和日本等国家相继在碳纤维增强铝基复合材料研究领域取得了显著成果, 制造了火箭发动机外壳、卫星天线支架、导弹仪器舱、天线骨架、卫星桁架等对质量、强度和刚度要求很高的航天、航空结构部件等^[7-9]。

目前 C_f/Al 复合材料主要制备方法有液态金属浸渍法、加压铸造法、扩散粘接法、粉末冶金法和超声波焊接法等^[10-14]。然而, 这些方法普遍存在制备效率低, 约束条件多 (例如高压、高温) 等问题。近年来, 随着科技的迅速发展, 对低成本高性能复合材料的需求日益增加。因此, 开发出一种生产成本低、产品质量高的复合材料板生产工艺显得尤为迫切。双辊铸轧工艺集液态浸渍法与压铸法于一体, 浸润、凝固的同时承受轧制变形, 改善铝液与碳纤维间润湿性差的问题^[15,16], 具有生产成本低、工艺流程简单、周期短和效率高等优点, 因此双辊铸轧工艺越来越多地应用于各种金属板材的生产过程中^[17,18]。目前, 双辊铸轧工艺在钢铁板材及铝箔等材料的生产中应用较多,

但在制备连续 C_f/Al 复合材料方面的研究报道较少^[19-21]。本研究采用双辊铸轧工艺制备连续 C_f/Al 复合材料板带, 通过在碳纤维表面电镀镍涂层, 减少碳纤维与铝基体的界面反应^[22,23]; 优化铸轧工艺参数, 利用轧制压力改善纤维与基体间的浸润性, 开发了短流程低成本连续 C_f/Al 复合材料板带制备工艺。

1 实验

本研究所用增强材料为 T300 碳纤维, 平均直径 7 μm, 纵向抗拉强度 ≥ 3.5 GPa, 每束碳纤维约含 12 000 根纤维。所用基体材料为工业纯铝, 纯度 ≥ 99.6%, 其化学成分见表 1。

在复合材料板制备之前, 先对碳纤维进行电镀镍处理。将化学试剂配好之后, 放入蒸馏水中搅拌, 使电镀液混合均匀, 电镀时间为 120 s, 待电镀完成后, 使用蒸馏水反复清洗。

图 1 为制备连续 C_f/Al 复合材料板的双辊铸轧工艺示意图。碳纤维预先缠绕在送丝装置上并穿过辊

表 1 工业纯铝(L2)的化学成分

Table 1 Chemical composition of commercial pure aluminum (wt%)

Mn	Fe	Si	Mg	Zn	Ti	Cu	Al
0.03	0.35	0.25	0.03	0.05	0.03	0.05~0.06	Bal.

收稿日期: 2020-10-28

基金项目: 国家自然科学基金 (51574171); 山西省自然科学基金 (201901D11126); 山西省高等学校科学研究优秀成果培育项目 (2019KJ027); 山西省高等学校科技成果转化培育项目 (2020CG046)

作者简介: 林金保, 男, 1979 年生, 博士, 教授, 太原科技大学应用科学学院, 山西 太原 030024, E-mail: linjinbao@qq.com

缝；轧制时将熔融铝液浇注在前箱中，通过浇道流进辊缝铸轧成型。铝液浇注温度分别为 963、973、983 K，轧辊辊缝为 2 mm，轧制速度为 2.7 m/min。为了对比研究，在相同条件下制备了纯铝铸轧板。

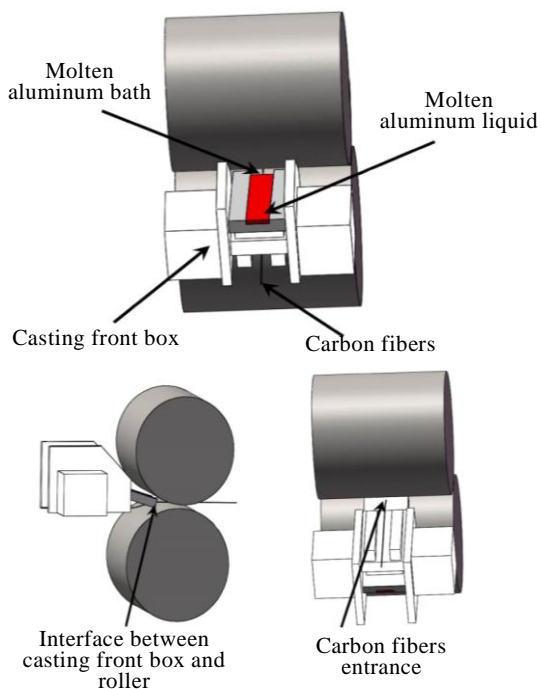


图 1 双辊铸轧工艺示意图

Fig.1 Schematic diagram of twin-roll casting process

使用 AJSM-6510 扫描电子显微镜 (SEM) 观察复合材料横截面和断口的微观形貌；利用能量色散光谱 (EDS) 分析材料元素的分布；根据 ASTM D3552-12 测试标准，使用 WDW-200E 拉伸试验机对复合材料板进行力学性能测试，拉伸样品尺寸见图 2。为了对比研究，在相同位置下制备了不含纤维的纯铝试样。拉伸断口形貌用 SEM 观察。

2 结果与讨论

2.1 微观形貌

图 3 所示为碳纤维表面电镀镍处理后的显微形貌。电镀时，在直流电的作用下，阳极镍板失电子发生氧化反应，变成镍离子，在阴极附近的镍离子得电

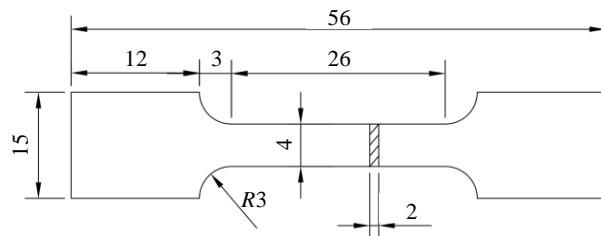


图 2 拉伸试样示意图

Fig.2 Schematic diagram of tensile specimen

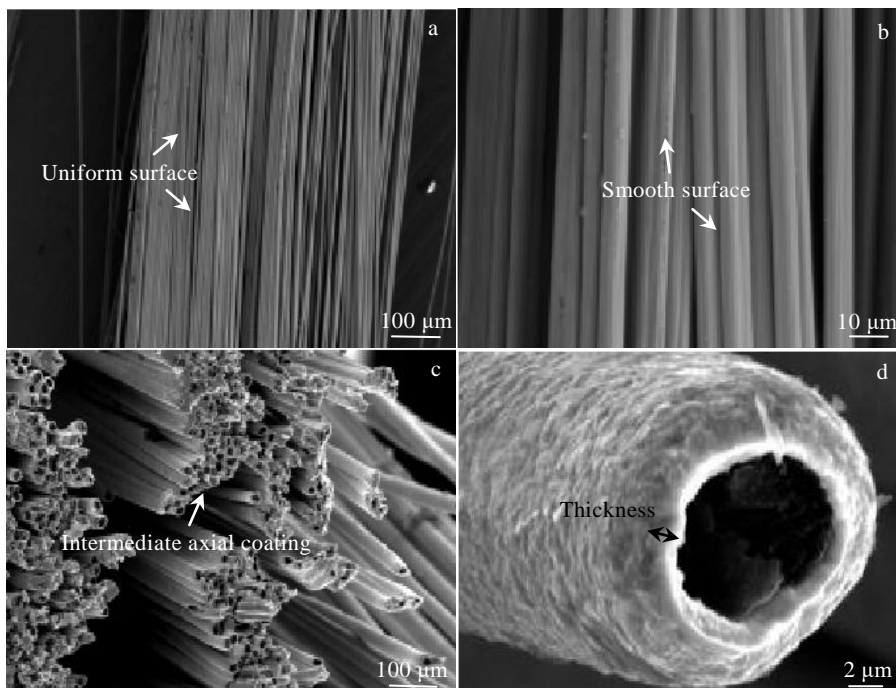


图 3 碳纤维电镀镍后的形貌

Fig.3 Morphologies of carbon fiber after electroplating: (a, b) axial; (c, d) radial

子发生还原反应, 变成镍单质沉积在阴极碳纤维表面。经过电镀处理, 碳纤维表面形成了一层均匀光滑的金属镍层, 且未发现碳纤维丝之间粘结现象。由图 3d 纤维横截面形貌可知, 镍涂层厚度约 1.8 μm 。

图 4 所示为浇注温度 963、973、983 K 条件下铸轧制得的 C_f/Al 复合材料板微观形貌。图 4a 显示, 在较低浇注温度 963 K 条件下铸轧时, 铝液过早凝固, 在轧制力作用下, 部分碳纤维被过早凝固的铝基体轧制破坏 (图中箭头所指区域), 且碳纤维和铝基体间的浸润性也不理想。当浇注温度提高到 973 K 时, 如图 4c 所示, 碳纤维和铝基体间形成了良好的结合, 铝液均匀地填充在碳纤维束内, 未发现孔隙等铸轧缺陷, 碳纤维也没有发生损伤。可知在该铸轧工艺条件下, 铝液在轧制变形区与碳纤维充分浸润后随即发生凝固, 顺利完成了复合材料板铸轧成型。如图 4e 所示, 当浇注温度进一步提高到 983 K 时, 纤

维与基体间浸润性进一步改善, 碳纤维间均匀地填充满了铝基体; 但由于铝液温度过高, 铸轧变形区部分金属铝仍以液态形式存在, 碳纤维与高温铝液接触时间过长, 导致部分区域纤维发生了氧化灼烧损伤 (图中箭头所指区域), 烧损区域主要分布在纤维束的外层。

2.2 室温拉伸力学性能

图 5 所示为不同浇注温度下 C_f/Al 复合材料板轧向室温拉伸应力-应变曲线。各材料抗拉强度和延伸率见表 2。由于 3 个温度下纯铝力学性能极为相近, 波动幅度小于 5%, 因此取其平均值作为对照。由图表可见, 浇注温度对复合材料板拉伸性能影响显著。浇注温度为 963 K 时制备的 C_f/Al 复合材料板, 由于部分纤维发生损伤破坏, 相比于基体材料抗拉强度 (38.2 MPa) 仅提高了 3.1 MPa, 而由于纤维的复合影响, 延伸率降低了 34.4%; 当浇注温度提高到 973 K

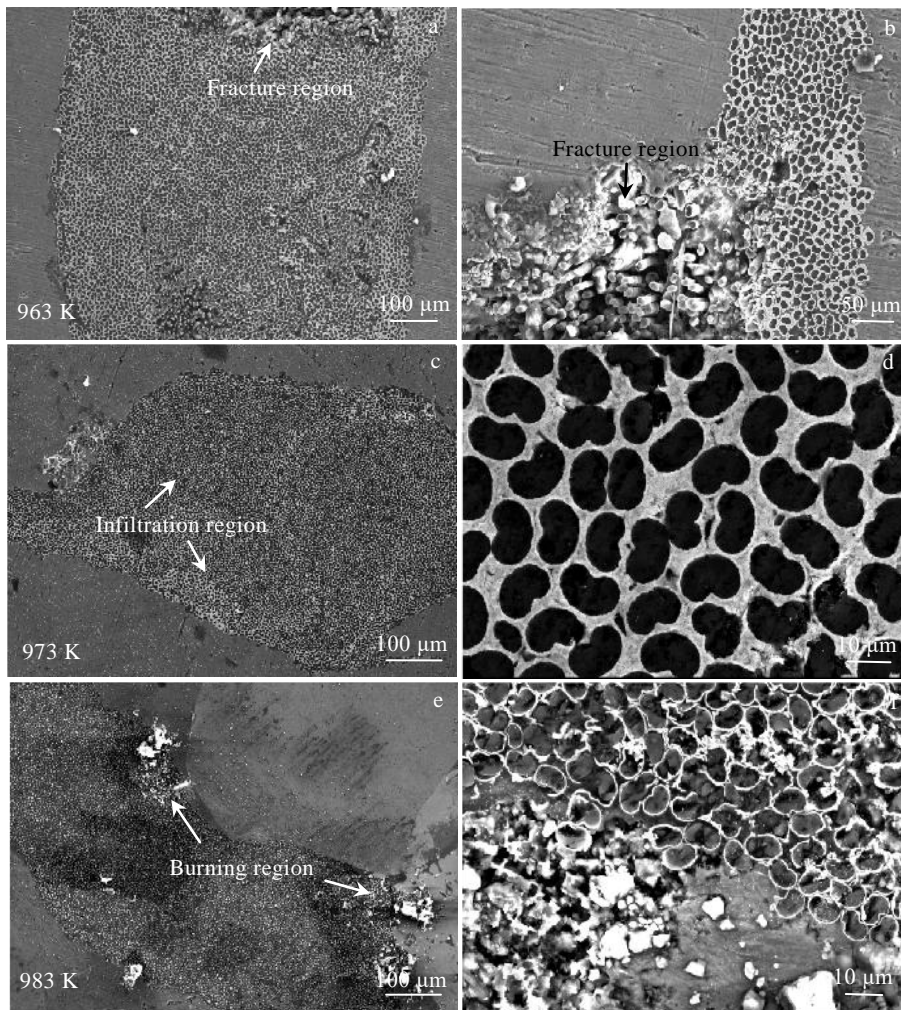


图 4 不同浇注温度下铸轧 C_f/Al 复合材料板微观形貌

Fig.4 Morphologies of C_f/Al composite plates at different pouring temperatures: (a, b) 963 K, (c, d) 973 K, and (e, f) 983 K

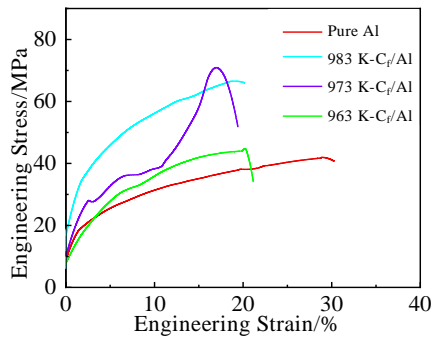


图 5 不同浇注温度下 C_f/Al 复合材料板拉伸应力-应变曲线
Fig.5 Tensile stress-strain curves of C_f/Al composite plates at different pouring temperatures

表 2 不同浇注温度下 C_f/Al 复合材料板拉伸力学性能

Table 2 Tensile mechanical properties of C_f/Al composite plates at different pouring temperatures

Alloy	Ultimate tensile strength/MPa	Elongation/%
Pure Al	38.2	29.4
C _f /Al-963 K	41.3	19.3
C _f /Al-973 K	71.6	16.5
C _f /Al-983 K	64.4	18.2

时，复合材料板抗拉强度比基体大幅提高了 87.4%，延伸率降低了 43.9%；由于浇注温度为 983 K 时制备

的试样发生了部分纤维烧损，抗拉强度比 973 K 试样降低了 7.2 MPa。

为了探究复合材料中碳纤维的氧化烧损程度，选择 983 K 浇注温度下制得的复合材料进行 EDS 线扫描分析。选取整束碳纤维的中心和外层单根纤维及周围区域为研究对象，EDS 线扫描结果如图 6 所示。由图可见，纤维束外层氧含量（图中绿色线）要高于纤维束内层，进一步说明了高温氧化烧损主要发生在纤维束的外层。从 Ni 元素的分布可看出，碳纤维被金属镍层包围，有效抑制了 C 和铝基体的反应，减少了 Al₄C₃ 脆性相的产生，使 C_f/Al 复合材料板力学性能大幅提升。

2.3 断口形貌

图 7 所示为连续 C_f/Al 复合材料拉伸断口形貌。图 7a 是 973 K 浇注温度制备的 C_f/Al 复合材料，拉断后纤维与铝基体的界面处未发生明显的分层现象，证明纤维与铝基体实现了良好的结合；在其高倍 SEM 像中（图 7b），碳纤维紧密地粘附在铝基体上，可见金属镍涂层对改善碳纤维与铝基体间的浸润起到了良好的促进作用。在较低浇注温度 963 K 条件下（图 7c），断口上碳纤维排列较凌乱，存在碎断纤维，也说明了在较低浇注温度下铸轧纤维被轧断的问题。在较高的浇注温度 983 K 制备的复合材料板（图 7d），断口中部分碳纤维呈现粉末状，这部分碳纤维在高温环境下发生了氧化烧损而失效。

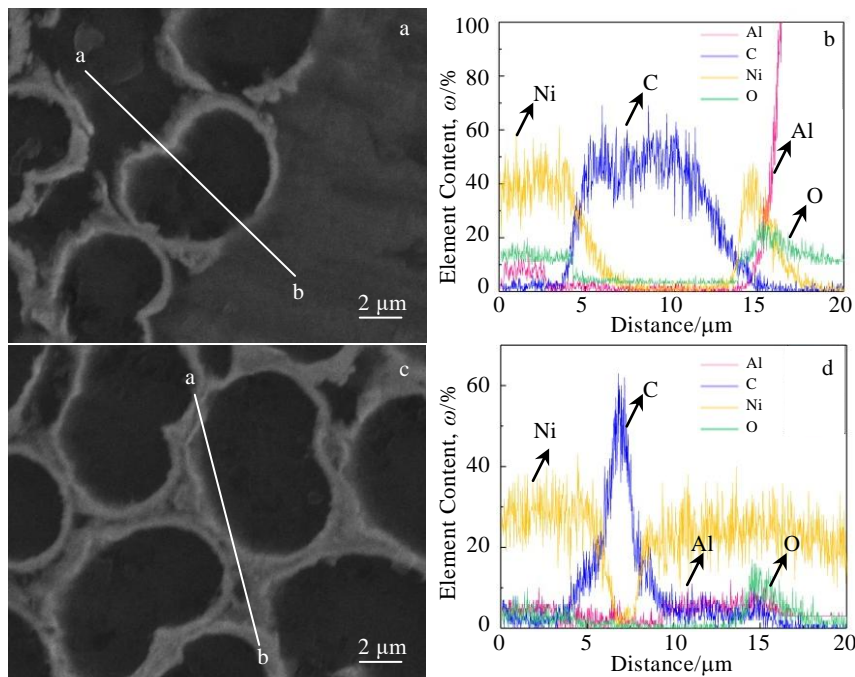


图 6 碳纤维束中心及外层的形貌和 EDS 元素线扫描

Fig.6 Morphologies (a, c) and EDS element line scan (b, d) of the carbon fiber bundle on center (a, b) and outer layer (c, d)

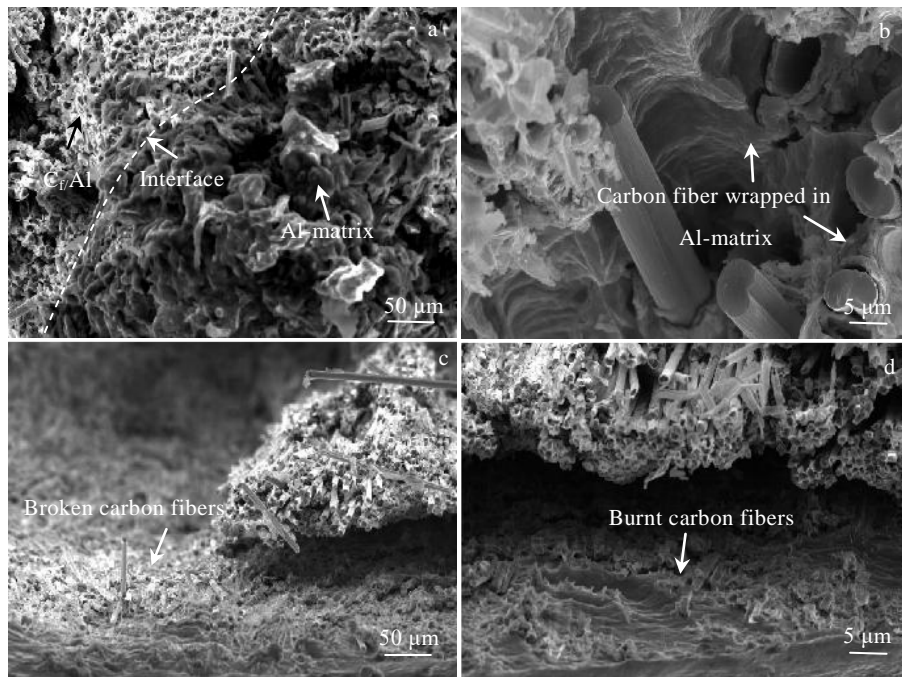


图 7 不同浇注温度下 C_f/Al 复合材料断口形貌

Fig.7 Fracture morphologies of C_f/Al composites at different pouring temperatures: (a, b) 973 K, (c) 963 K, and (d) 983 K

3 结 论

1) 通过碳纤维表面电镀镍, 制得了均匀光滑的金属镍层, 可改善碳纤维与铝基体间的浸润性, 抑制 Al₄C₃ 脆性相的产生。

2) 在铝液浇注温度 973 K、轧制速度 2.7 m/min、辊缝 2 mm 条件下, 利用双辊铸轧工艺可以制备连续 C_f/Al 复合材料板, 纤维与基体间浸润充分, 界面结合良好, 未发现明显的纤维轧断、孔洞、灼烧等缺陷, 抗拉强度比基体材料提高了 87.4%。

3) 浇注温度过高容易发生纤维氧化烧损, 浇注温度过低容易导致纤维轧制损伤, 应综合考虑铝液浇注温度与轧制速度和轧板厚度之间的耦合影响关系。

参考文献 References

- [1] Wu Gaohui(武高辉), Kuang Zeyang(匡泽洋). *Strategic Study of CAE*(中国工程科学)[J], 2020, 22(2): 79
- [2] Ma Yuqin(马玉钦), Qi Lehua(齐乐华), Wei Xinliang(卫新亮) et al. *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2015, 44(1): 179
- [3] Zhang Dawei, Zhang Qi, Fan Xiaoguang et al. *Rare Metal Materials and Engineering*[J], 2019, 48(1): 44
- [4] Zhang Yunhe, Wu Gaohui, Chen Guoqin et al. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*[J], 2006, 16(S3): 1509
- [5] Wang Xu, Jiang Daming, Wu Gaohui. *Materials Science and Engineering A*[J], 2008, 497: 31
- [6] Yang Zhiming, Wu Tengting, Liu Jinxu et al. *Rare Metal Materials and Engineering*[J], 2017, 46(4): 869
- [7] Yang Q R, Liu J X, Li S K et al. *Materials & Design*[J], 2014, 57: 442
- [8] Wu Gaohui(武高辉). *Acta Materiae Compositae Sinica*(复合材料学报)[J], 2014, 31(5): 1228
- [9] Wu Gaohui(武高辉), Zhang Yunhe(张云鹤), Chen Guoqin(陈国钦) et al. *Manned Spaceflight*(载人航天)[J], 2012, 18(1): 73
- [10] Arab Seyyed Mohammad, Karimi Saeed, Jahromi Seyyed Ahmad Jenabali et al. *Materials Science and Engineering A*[J], 2015, 632: 50
- [11] Kaczmar J W, Naplocha K, Morgiel J. *Journal of Materials Engineering and Performance*[J], 2014, 23(8): 2801
- [12] Huang Y D, Hort N, Kainer K U et al. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*[J], 2003, 35(2): 249
- [13] Dong Qun(董群), Chen Liqing(陈礼清), Zhao Mingjiu(赵明久) et al. *Materials Review*(材料导报)[J], 2004, 18(4): 86
- [14] Gu Xiaoyan(谷晓燕), Meng Zhengyu(孟政宇), Liu Jing(刘婧) et al. *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2020, 49(6): 2139

- [15] Zhang Junjia, Liu Shichao, Lu Yiping *et al.* *Journal of Materials Processing Technology*[J], 2016, 231: 366
- [16] Lancin M, Marhic C. *Journal of the European Ceramic Society*[J], 2000, 20(10): 1493
- [17] Kikuchi Daisuke, Harada Yohei, Kumai Shinji. *Journal of Manufacturing Processes*[J], 2019, 37: 332
- [18] Liang D, Cowley C B. *JOM*[J], 2004, 56(5): 26
- [19] Zhang Junjia(张峻嘉). *Thesis for Doctorate*(博士论文)[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2018
- [20] Haga Toshio, Takahashi Kenta, Nakamura Ryoji *et al.* *International Journal of Material Forming*[J], 2010, 3(1): 1063
- [21] Zhu Chengnan, Su Yishi, Zhang Di *et al.* *Materials Science and Engineering A*[J], 2020, 793(1-2): 139 839
- [22] Alten Anıl, Erzi Eray, Gürsoy Özen *et al.* *Journal of Alloys and Compounds*[J], 2019, 787: 543
- [23] Shi Xiaohong, Zeng Xierong, Li Hejun *et al.* *Rare Metal Materials and Engineering*[J], 2011, 40(3): 403

Preparation and Mechanical Properties of Continuous C_f/Al Composite Plate by Twin-Roll Casting

Lin Jinbao, Gong Yi, Mu Weipeng, Xu Peng, Liu Erqiang, Chang Chao

(School of Applied Sciences, Taiyuan University of Science and Technology, Taiyuan 030024, China)

Abstract: Ni-coated carbon fiber was prepared by electroplating process, and continuous carbon fiber reinforced Al matrix (C_f/Al) composite plate was prepared via twin-roll casting and short process forming process. The effect of pouring temperature on the microstructure, interface characteristics, fracture morphology and mechanical properties of the C_f/Al composite plate were investigated. The results indicate that the C_f/Al composite plate with smooth surface and no obvious surface defects is fabricated under the conditions of pouring temperature of 963, 973, 983 K, rolling speed of 2.7 m/min and roll gap of 2 mm; when the pouring temperature is 973 K, the interface between the carbon fiber and the Al-matrix is well bonded; Ni-coating on the surface of fiber significantly improves the wettability between carbon fiber and aluminum matrix, and also effectively inhibits the formation of Al₄C₃ brittle phase, which greatly improves the mechanical properties of C_f/Al composite plate. The tensile strength of the C_f/Al composite plate at a pouring temperature of 973 K increases by 87.4% compared with that of the matrix (38.2 MPa).

Key words: twin-roll casting; continuous C_f/Al composite plate; mechanical properties; pouring temperature

Corresponding author: Lin Jinbao, Ph. D., Professor, School of Applied Sciences, Taiyuan University of Science and Technology, Taiyuan 030024, P. R. China, E-mail: linjinbao@qq.com