

纤维编织结构对 3D-C_f/Al 复合材料弯曲性能的影响

周光瑞¹ 贺辛亥¹ 梁军浩¹ 马静妍¹ 刘 羿¹ 徐雅琪² 梁欢欢¹
(1.西安工程大学材料工程学院;2.西京学院计算机学院)

摘 要 为研究纤维编织结构对三维编织 C_f/Al 复合材料弯曲性能的影响,选用 TZ700S 碳纤维作为增强纤维,通过加入轴纱改变编织结构,制备了三维四向和三维五向、全五向 3 种编织结构的纤维预制体。通过压力浸渗法制备了基体合金为 7075 铝合金的 3D-C_f/Al 复合材料,测试了弯曲力学性能并观察了断口的形貌。结果表明,3D-C_f/Al 复合材料的弯曲性能高于基体弯曲性能,其中三维四向 C_f/Al 复合材料的弯曲强度为 346.7 MPa。加入轴纱后的三维五向、全五向 C_f/Al 复合材料的弯曲性能和断裂应变均高于三维四向 C_f/Al 复合材料,而加入更多轴纱的全五向复合材料的结构性能更好,弯曲强度为 399.7 MPa。

关键词 三维编织;弯曲性能;压力浸渗;三维五向;C_f/Al 复合材料

中图分类号 TB331;TQ343 **文献标志码** A

DOI:10.15980/j.tzzz.2023.05.010

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Effects of Woven Structure on Bending Properties of 3D-C_f/Al Composites

Zhou Guangrui¹, He Xinhai¹, Liang Junhao¹, Ma Jingyan¹, Liu Yi¹, Xu Yaqi², Liang Huanhuan¹

(1.School of Materials Engineering, Xi'an Polytechnic University;
2.School of Computer Science, Xijing University)

Abstract: To understand the effects of woven structure on the bending properties of three-dimensional braided C_f/Al composites, TZ700S carbon fiber was selected as reinforcing fibers, and the woven structure was modified by adding axial yarns to fabricate 3D-4 direction, 3D-5 direction and 3D-all 5 direction preforms. 3D-C_f/Al composites with 7075Al matrix alloy were prepared by pressure infiltration, and bending properties were tested and the fracture morphology was observed. The results indicate that the bending properties of 3D-C_f/Al composites are superior to that of alloy matrix, where the bending strength of 3D-4 direction C_f/Al composites reaches 345.5 MPa. After adding axial yarns, bending properties and fracture strain of 3D-5 direction and 3D all-5-direction C_f/Al composites are higher than those of 3D-4 direction ones, while 3D all-5 direction performance is desirable due to more axial yarns, where the bending strength is 399.7 MPa.

Key Words: 3D Braid, Bending Behavior, Pressure Infiltration, 3D-5-direction, C_f/Al Composites

碳纤维具有耐高温、抗摩擦及耐腐蚀等特性,其外形呈纤维状、柔软、可加工成各种织物,碳纤维密度小,比强度、比模量高,其可用作增强材料与树脂、金属或陶瓷等复合,以制造先进复合材料,其中铝基复合材料是金属基复合材料中应用最广的一种。近年来,碳纤维增强铝基复合材料已成为航空航天工业常用的先进轻量结构材料之一^[1-5]。

三维编织复合材料被称为第三代纤维增强复合材料,三维编织复合材料不需要缝合和机械加工,具有良好的综合性能指标,可一次成形复杂的零部件。与层合复合材料相比,三维编织复合材料在改进层间强度、损

伤容限等方面,具有巨大的潜力。另外,三维编织材料的细观可设计性使得该类复合材料的宏观力学性能优化成为可能^[6-11]。

三维四向编织复合材料改善了材料厚度方向的力学性能,但其面内力学性能出现下降。因此以三维四向编织工艺为基础,各行编织纱中沿轴向加入了不参与编织的轴向纱,形成了三维五向的结构。刘振国^[12]分析了现有三维四向、五向编织复合材料力学性能的缺陷,从材料细观结构角度提出了改进途径,并提出了三维全五向编织复合材料的概念。通过在三维五向编织预成形件的所有空位处增加轴向不动纱,以消除轴向空位,

收稿日期:2022-07-10;修改稿收到日期:2022-10-06
基金项目:陕西省重点研发计划资助项目(2020GY-273);陕西省秦创原纺织结构复合材料“科学家+工程师”队伍建设项目(2022KXJ-013);西安工程大学柯桥纺织产业创新研究院产学研协同创新项目(19KQZD01);陕西省教育厅科研计划资助项目(21JK0954)
第一作者简介:周光瑞,男,1996 年出生,硕士研究生,西安(710048),E-mail:grzhougr@163.com
通信作者:梁军浩,男,1987 年出生,副教授,西安(710048),E-mail:liangjunhao@xpu.edu.cn
引用格式:周光瑞,贺辛亥,梁军浩,等. 纤维编织结构对 3D-C_f/Al 复合材料弯曲性能的影响[J]. 特种铸造及有色合金, 2023, 43(5): 630-634.
ZHOU G R, HE X H, LIANG J H, et al. Effects of woven structure on bending properties of 3D-C_f/Al composites[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2023, 43(5): 630-634.

提高复合材料中纤维的体积分数。曹海建等^[13]采用无碱玻璃纤维、E51 环氧树脂制备了三维五向及全五向编织复合材料。发现三维全五向编织复合材料的弯曲性能明显好于三维五向编织复合材料。

三维编织预制体具有良好的设计性,而目前关于将不同纤维预制体结构的三维编织碳纤维应用在增强金属基复合材料的研究报道较少。更多的研究集中于制备工艺参数以及合金、纤维对 C_f/Al 复合材料性能的影响。徐鹏^[14]选用 ZL301 铝合金及 M40 碳纤维,采用真空气压浸渗法制备了 3D-C_f/Al 复合材料,研究了预热温度、保压时间、浸渗温度对 3D-C_f/Al 复合材料微观组织和抗拉强度的影响。顾殊等^[15]选用国产 M55J 碳纤维为增强体材料,ZL301 为基体合金,采用真空压力浸渗法制备三维五向 M55J/Al 基复合材料,对其致密度、微观组织以及力学性能进行了研究。贺辛亥等^[16]选用三维四向编织结构的 T300-6K 碳纤维做为增强体,采用压力浸渗法制备了 3D-C_f/6061Al 复合材料,研究了不同编织角对复合材料力学性能的影响。

本研究通过三维五向、三维全五向两种增加轴纱的方式,改变纤维预制体的编织结构,并通过压力浸渗法制备了三维编织 C_f/Al 复合材料,研究了不同纤维编织结构对三维编织 C_f/Al 复合材料弯曲性能的影响,旨在为其应用提供参考。

1 试验材料及方法

1.1 原材料以及复合材料的制备

试验选用 TZ700S 碳纤维作为增强体材料,其性能参数见表 1;选用 7075 铝合金为基体合金,其主要化学成分见表 2。

表 1 TZ700S 碳纤维的性能指标

Tab.1 Performance indexes of carbon fiber

规格	抗拉强度/MPa	弹性模量/GPa	线密度/(g·km ⁻¹)	体密度/(g·cm ⁻³)	伸长率/%	直径/μm	碳含量/%
12 k	4 900	230	800	1.8	2.1	7	93

三维编织预制体的编织设备为自行搭建的三维编织平台。三维编织的纤维预制体选用了三维四向和三维五向、全五向 3 种编织结构,均采用四步法进行三维编织,其编织排列方式及预制体实物见图 1。以 2 行 8

表 2 7075 铝合金的化学成分

Tab.2 Chemical composition of 7075 aluminum alloy %

w _B								
Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Al
≤0.4	≤0.5	1.2~2.0	≤0.3	2.1~2.9	0.18~0.28	5.1~6.1	≤0.2	余量

列的三维四向排布为基础,三维五向在四向的基础上每两列之间加入固定轴纱。三维全五向件则在每一个编织纱旁加入移动轴纱,同时在每两列编织纱之间加入固定轴纱。

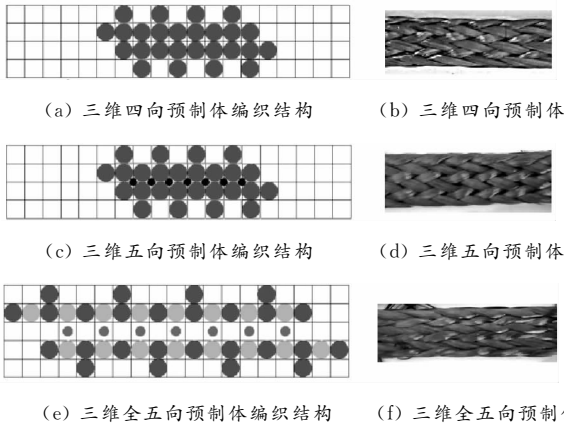


图 1 3D-C_f 预制体及编织结构

Fig.1 3D-C_f preform and brained structure

采用压力浸渗法制备三维编织 C_f/Al 复合材料,压力浸渗设备使用了平板硫化机,在氩气保护氛围下进行浸渗。浸渗工艺参数:浸渗压力为 8~10 MPa,预制体预热温度为 500~550 ℃,浸渗温度为 650~700 ℃。制备的基本流程见图 2。根据压力浸渗过程中使用的平板硫化机设计了相应的模具。将编织好的三维编织预制件放入石墨模具。完成浸渗后可得到包裹住石墨的圆形铝块,通过后续的进一步加工可较方便地得到复合材料试样。根据阿基米德原理测得复合材料致密度结果见表 3。复合材料制备完成后采用称重法计算纤维体积分数。称重前将复合材料烘干,测量所得复合材料尺寸,每件试样的纤维体积分数(V_f)计算如下:

$$V_f = \frac{G}{\rho WTH}$$

(1)

式中,G 为预制件的净重;ρ 为纤维束的密度;W、T 和 H 分别为复合材料的宽度、厚度和长度^[17-19]。

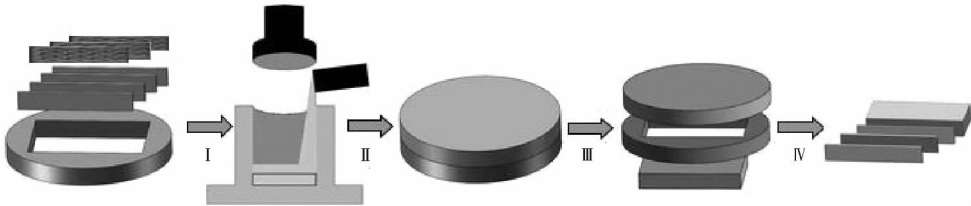


图 2 C_f/Al 复合材料制备过程示意图

Fig.2 Flow chart of preparation process of C_f/Al composites

表 3 复合材料试样的结构参数

Tab.3 Structure parameters of composite specimens			
编织结构	平均致密度/%	平均体积分数/%	纱线数
三维四向	89.33	33.69	26
三维五向	89.28	32.42	33
三维全五向	89.45	36.52	49

1.2 测试与表征

使用 UTM5504 型电子万能试验机进行三点弯曲测试。力学测试试样参照 GB/T 232-2010 弯曲性能试验方法,尺寸为 60 mm×10 mm×2.5 mm,每组制取 3 个试样测试并取平均值。三点弯曲测试取跨距为 30 mm,加载速度为 0.5 mm/min,三点弯曲力的加载方向垂直于纤维竖直方向。

用 FEG Quanta 450 场发射扫描电镜观察复合材料弯曲断口形貌。

2 试验结果与讨论

2.1 复合材料的微观组织

图 3 为三维四向、三维五向和三维全五向 C_f/Al 复

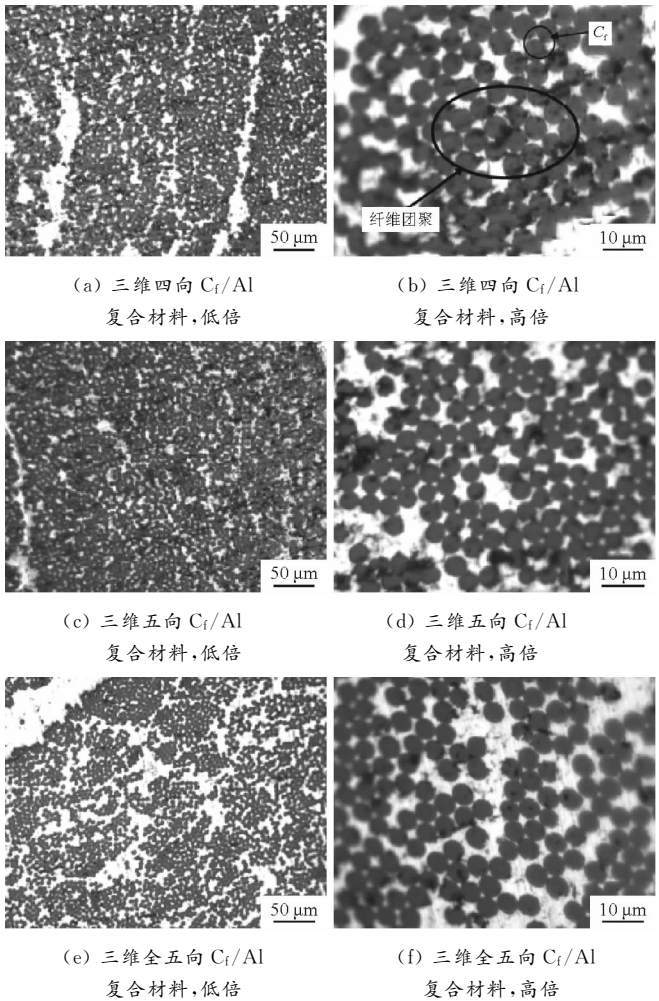


图 3 3D-C_f/Al 复合材料的微观组织

Fig.3 Microstructures of 3D-C_f/Al composites

合材料的微观组织。可以看出,复合材料的微观组织没有明显的缺陷,铝液均匀地浸渗到了碳纤维中,这有利于 C_f/Al 复合材料的力学性能改善。其中单束碳纤维呈球形无缺损,说明其与基体结合良好,界面反应适中。另外可以看出,三维四向、三维五向复合材料纤维更为密集,且存在一定的纤维聚集现象。而加入更多轴纱后的三维全五向结构纤维分布更加均匀,较少出现纤维聚集现象。这是因为加入了轴纱后,预制体的整体结构更加紧凑,在浸渗的过程中纤维束更易保持原有状态。而未加入轴纱的四向结构,纤维束与纤维束之间的距离较大,因此更易被铝液冲散以致形成聚集。

2.2 复合材料的弯曲性能

表 4 为 7075 铝合金以及 3D-C_f/Al 复合材料弯曲性能的测试结果。可以看出,三维全五向和三维五向 C_f/Al 复合材料的弯曲强度和断裂应变均高于三维四向 C_f/Al 复合材料。

表 4 3D-C_f/Al 复合材料的弯曲性能

Tab.4 Bending properties of 3D-C _f /Al composites		
材料	弯曲强度/MPa	应变/%
7075 Al	328.5	0.652
三维四向	346.7	0.649
三维五向	373.7	0.706
三维全五向	399.7	0.873

图 4 为 3D-C_f/Al 复合材料以及 7075 铝合金的弯曲应力-应变曲线。可以看到,7075 铝合金表现出典型的脆性断裂特征,断裂后应力直接降为 0。加入增强体后,复合材料仍然表现出脆性断裂的特征,但在断裂后不会出现直接降为 0 的情况,而是降到一定数值后继续缓慢下降。加入轴纱后的五向、全五向结构的断裂应变要大于三维四向结构的应变,说明加入轴纱后,复合材料的韧性和抵抗弯曲变形的能力有了提升。

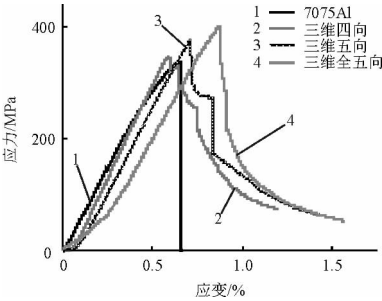


图 4 3D-C_f/Al 复合材料的弯曲应力-应变曲线

Fig.4 Bending stress-strain curves of 3D- C_f/Al composites

三维四向、三维五向和三维全五向 C_f/Al 复合材料弯曲断口 SEM 形貌见图 5。可以看出,复合材料在三点弯曲时内侧受到压力作用,因此纤维朝受力方向弯曲。未加入轴纱结构的三维四向结构纤维弯曲趋势更为明显,而加入了轴纱后,弯曲趋势减弱,可看到更多纤

维、基体被拔出后留下的空缺。三维四向和三维五向结构都可看到基体的裂纹,而三维全五向结构中裂纹出现在基体与纤维束结合处,说明加入的轴纱承受了更多的力,在拔出时产生了裂纹。

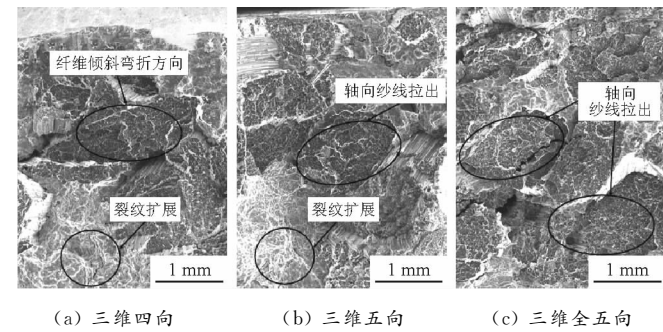


图 5 3D-C_f/Al 复合材料弯曲断口 SEM 像

Fig.5 SEM images of bending fracture of 3D- C_f/Al composites

图 6 为三维编织预制体结构示意图。可以看出,在三维四向结构的基础上三维全五向结构加入了更多的轴纱。加入轴纱后提升了复合材料的内部机构层次,提高了抗弯曲变形的能力。图 7 为 3D-C_f/Al 复合材料的三点弯曲破坏过程。可以看出,复合材料正面受压,外侧受拉。在初始受力时,试样无损伤,没有明显变形。当应力变大后,复合材料受拉一侧先出现裂纹并逐渐向受压方向延伸,由于复合材料中铝合金的强度低于碳纤维的强度,复合材料断裂失效后,仍有部分纤维在承力并继续产生断裂。由于三维五向、三维全五向结构加入了轴纱,在裂纹扩展时,可以同四向纱一同吸收扩展时

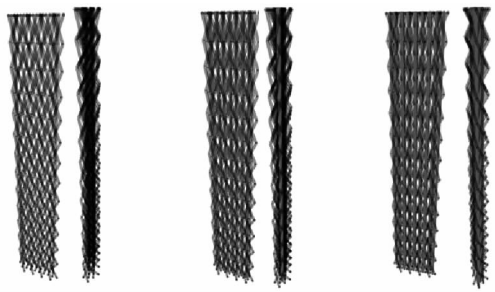


图 6 3D-C_f预制体结构示意图

Fig.6 Schematic diagram of 3D-C_f preform

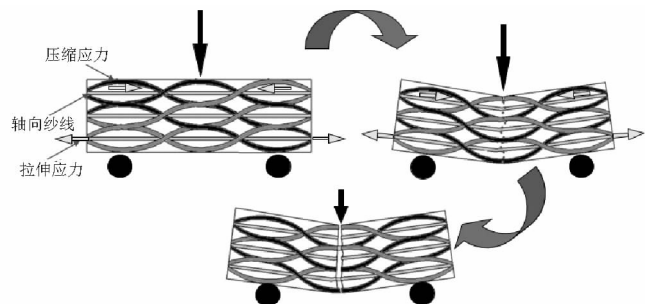


图 7 3D-C_f/Al 复合材料弯曲破坏过程示意图

Fig.7 Schematic diagram of bending failure process for 3D-C_f/Al composites

产生的能量,因此三维全五向、三维五向 C_f/Al 复合材料的抗弯强度以及断裂应变均高于三维四向 C_f/Al 复合材料的。

3 结 论

(1)采用压力浸渗成形的 3D-C_f/Al 复合材料浸渗充分,结合良好。三维四向结构存在一定纤维聚集现象,加入轴纱后的五向、全五向结构结构更为均匀。

(2)3D-C_f/Al 复合材料的弯曲性能高于基体 7075 铝合金。三维四向 C_f/Al 复合材料的弯曲强度为 346.7 MPa 而 7075 铝合金的弯曲强度为 328.5 MPa。加入轴纱后的三维五向、三维全五向 3D-C_f/Al 复合材料的弯曲性能均高于三维四向结构。而加入更多轴纱的三维全五向复合材料性能更好,其弯曲强度为 399.7 MPa,与基体相比提高了 21.7%。

(3)三维四向 C_f/Al 复合材料弯曲破坏时,纤维朝受力方向弯曲的趋势更明显,并且可见基体裂纹由复合材料受拉侧向受压侧扩展。三维全五向 C_f/Al 复合材料弯曲破坏时,可见轴纱被拔出的空隙,由于轴纱承受较大的力,在基体与纤维束结合处出现了裂纹。

参 考 文 献

- [1] ALHASHMY H A, NGANBE M. Laminate squeeze casting of carbon fiber reinforced aluminum matrix composites[J]. Materials & Design, 2015, 67:154-158.
- [2] CHAKRAPANI P. AND SURYAKUMARI T. S. A. Mechanical properties of aluminium metal matrix composites-A review[J]. Materials Today: Proceedings, 2021, 45(P7): 5 960-5 964.
- [3] 姚穆. 高性能纤维产业发展的关键问题[J]. 西安工程大学学报, 2016, 30(5): 553-554.
- [4] 李廷举,刘嘉鸣,杨茜,等. 碳纤维增强铝基复合材料制备及强化机制研究进展[J]. 特种铸造及有色合金, 2020, 40(11): 1 177-1 181.
- [5] 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.
- [6] KOSTAR T D. Analysis, Design, Fabrication, and Performance of Three-dimensional Braided Composites[D]. Delaware: University of Delaware, 1998.
- [7] 李嘉禄. 三维编织技术和三维编织复合材料[A].复合材料技术与应用可持续发展工程科技论坛[C]. 北京, 2006.
- [8] 王海雷,高艳秋,范雨娇. 三维编织复合材料研究及应用现状[J]. 新材料产业, 2017, 1(3): 51-54.
- [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.
- [10] 荆娟娟,韦鑫,张元,等.三维编织复合材料的发展及应用现状[J]. 棉纺织技术, 2019, 47(11): 79-84.
- [11] 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.
- [12] 刘振国. 三维全五向编织预型件的概念[J].材料工程, 2008(S1): 305-308, 312.

SP700 钛合金热变形行为及物理本构关系研究

张开铭 王克鲁 鲁世强 李 鑫 高 鑫 邱 仟
(南昌航空大学航空制造工程学院)

摘 要 采用 Gleeble-3800 型热模拟试验机在变形温度为 700~850 ℃、应变速率为 0.001~1 s⁻¹ 条件下对 SP700 钛合金进行等温恒应变速率压缩试验,分析 SP700 钛合金的热变形行为。首次探讨了该合金考虑变形温度对杨氏模量和自扩散系数影响的传统物理本构关系以及考虑晶界扩散和晶格扩散耦合的修正物理本构关系。结果表明,SP700 钛合金的流动应力曲线为典型的动态再结晶型曲线,其流动应力随应变速率的降低和变形温度的升高而减小;传统物理本构关系和修正的物理本构关系相关系数 *R* 分别为 0.986 和 0.965,平均相对误差 *AARE* 分别为 14.4% 和 13.1%,说明建立的两个物理本构关系都能较好地表征该合金的流动应力行为。另外,确定了该合金在 700~800 ℃ 热变形时主要扩散机制是晶界扩散,在 850 ℃ 热变形时主要是晶格扩散。

关键词 SP700 钛合金;物理本构关系;热变形;扩散机制

中图分类号 TG146.23 文献标志码 A

DOI:10.15980/j.tzzz.2023.05.011

开放科学(资源服务)标识码(OSID): 

Hot Deformation Behavior and Physical Constitutive Relationship of SP700 Titanium Alloy

Zhang Kaiming, Wang Kelu, Lu Shiqiang, Li Xin, Gao Xin, Qiu Qian
(School of Aeronautical Manufacturing Engineering, Nanchang Hangkong University)

Abstract: SP700 titanium alloy was subjected to isothermal and constant strain rate compression experiment at deformation temperature of 700~850 ℃ and strain rate of 0.001~1 s⁻¹ by Gleeble-3800 thermal simulation testing machine. The hot deformation behavior of SP700 titanium alloy was analyzed, and the traditional physical constitutive relationship considering the effect of deformation temperature on Young's modulus and self-diffusion coefficient and the modified physical constitutive relationship considering the coupling of grain boundary diffusion and lattice diffusion were discussed for the first time. The results indicate that the flow stress curves of SP700 titanium alloy are typical dynamic recrystallization, and flow stress is decreased with the decrease of strain rate and the increase of deformation temperature. The correlation coefficients *R* of the traditional and modified physical constitutive relations are 0.986 and 0.965, and the average relative errors *AARE* are 14.4% and 13.1%, respectively, indicating that both established physical constitutive relations can better characterize the flow stress behavior of the alloy. Meanwhile, it is also determined that the main diffusion mechanism of the alloy is grain boundary diffusion at 700~800 ℃ hot deformation, and lattice diffusion at 850 ℃ hot deformation.

Key Words: SP700 Titanium Alloy, Physical Constitutive Relation, Hot Deformation, Diffusion Mechanism

收稿日期:2022-08-11;修改稿收到日期:2022-09-07
基金项目:江西省自然科学基金资助项目(20202ACBL204001);江西省研究生创新专项基金资助项目(YC2021S675)
第一作者简介:张开铭,男,1998 年出生,硕士研究生,南昌(330063),E-mail:1732066723@qq.com
通信作者:王克鲁,男,1968 年出生,教授,南昌(330063),E-mail:wangkelu@126.com
引用格式:张开铭,王克鲁,鲁世强,等. SP700 钛合金热变形行为及物理本构关系研究[J]. 特种铸造及有色合金,2023,43(5):634-640.
ZHANG K M, WANG K L, LU S Q, et al. Hot deformation behavior and physical constitutive relationship of SP700 titanium alloy[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2023, 43(5):634-640.

[13] 曹海建,王怡洁,刘菲,等. 三维全五向编织复合材料的弯曲性能研究[J]. 玻璃钢/复合材料, 2013(S3): 39-42.

[14] 徐鹏. 3D-C_f/Al 复合材料真空气压浸渗工艺研究[D]. 南昌:南昌航空大学, 2015.

[15] 顾姝,蔡长春,余欢,等. 国产 M55J 级碳纤维三维编织 C_f/Al 复合材料组织与性能[J]. 特种铸造及有色合金, 2022, 42(5): 621-627.

[16] 贺辛亥,宁志新,梁军浩,等. 编织角对 3D-C_f/6061Al 复合材料弯曲性能的影响[J]. 西安工程大学学报, 2022, 36(3): 100-105.

[17] 李苏红,刘丽芳,阎建华,等. 三维编织结构参数对复合材料拉伸性能的影响[J]. 玻璃钢/复合材料, 2014(7): 69-73.

[18] 马忠辉,孙秦. 三维四向编织复合材料纤维体积分量的预测与参数分析[J]. 西北工业大学学报, 2003(6): 662-666.

[19] 周清,焦亚男,李嘉禄. 三维编织预制件的工艺参数设计[J]. 天津工业大学学报, 2004(1): 15-17.

(编辑:刘卫)