

电磁脉冲成形建筑用钛合金的组织及性能研究

崔盟军¹ 郭青²

(1. 承德石油高等专科学校, 河北 承德 067000; 2. 天津大学, 天津 300072)

摘要: 采用不同工艺参数进行了建筑用 Ti-6Al-4V-0.5Cr 新型钛合金的电磁脉冲成形试验, 同时进行了试验合金显微组织和力学性能的测试与分析。结果表明, 采用电磁脉冲成形可获得性能较佳的试验合金, 合金抗拉强度可达 962 MPa、屈服强度可达 891 MPa、断后伸长率可达 14.5%。随放电电压从 10 kV 变大到 20 kV 或线圈间距从 4 mm 增至 10 mm, 试验合金的组织先细化后粗化, 力学性能先提高后下降。与 10 kV 偏低的放电电压相比, 当采用 15 kV 放电电压时试验合金的抗拉强度增大 14 MPa、屈服强度增大 11 MPa, 断后伸长率减小 1.2%。与线圈间距 4 mm 相比, 采用 7 mm 线圈间距时试验合金的抗拉强度增大 11 MPa、屈服强度增大 9 MPa, 断后伸长率减小 0.8%。

关键词: 建筑用钛合金; Ti-6Al-4V-0.5Cr; 电磁脉冲成形; 放电电压; 力学性能

中图分类号: TF823 文献标志码: A 文章编号: 1004-7638(2020)04-0054-06

DOI: 10.7513/j.issn.1004-7638.2020.04.010

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



听语音
聊科研
与作者互动

Study on Microstructure and Properties of Titanium Alloy for Building by Electromagnetic Pulse Forming

Cui Mengjun¹, Guo Qing²

(1. Chengde Petroleum Technical College, Chengde 067000, Hebei, China; 2. Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: The electromagnetic pulse forming test of Ti-6Al-4V-0.5Cr, a new titanium alloy for building, was carried out at different processing parameters, and the microstructure and mechanical properties of the alloy were tested and analyzed. The results show that the experimental alloys with better properties can be obtained by electromagnetic pulse forming. The tensile strength, yield strength and elongation after fracture can reach 962 MPa, 891 MPa and 14.5% respectively. With the discharge voltage increasing from 10 kV to 20 kV or coil spacing increasing from 4 mm to 10 mm, the structure of the tested alloy is refined first and then coarsened, and the mechanical properties are improved first and then decreased. Compared with the low discharge voltage of 10 kV, the tensile strength and yield strength of the tested alloy respectively increase by 14 MPa, 11 MPa and the elongation after breaking decreases by 1.2% when the discharge voltage of 15 kV is used. Compared with the coil spacing of 4 mm, the tensile strength and yield strength of the tested alloy respectively increase by 11 MPa, 9 MPa and the elongation after breaking decreases by 0.8% when the coil spacing is 7 mm.

Key words: titanium alloy for building; Ti-6Al-4V-0.5Cr; electromagnetic pulse forming; discharge voltage; mechanical property

收稿日期: 2019-09-30

基金项目: 河北省教育厅计划项目(编号: ZD2017203)。

作者简介: 崔盟军(1980—), 女, 陕西西安人, 硕士, 讲师, 主要从事化工机械方面的研究。E-mail: laiyong089956@163.com。

0 引言

近些年,由于密度较小、热胀冷缩系数较低、强度较高、耐蚀性及加工性能好,钛合金在绿色建筑领域得到越来越广泛地关注^[1-3]。此外,钛合金对环境无污染,可以二次回收利用,使得钛合金在建筑领域的应用前景非常广阔^[4-6]。钛合金的成形方法主要有铸造(型壳铸造、熔模精密铸造等)、锻造(β 锻造、 $\alpha+\beta$ 锻造、等温锻造、近 β 锻造等)、粉末冶金(冷压、冷等静压、热等静压、注射成形、快速原位制造)等^[7]。熔模铸造可以获得尺寸精度高、表面粗糙度低的复杂钛合金薄壁铸件;锻造不仅可以使钛合金坯料与成品达到尺寸、形状与产品接近,而且还可以通过锻造提高性能,但是锻造常常存在后续加工难度大、材料利用率低等问题;粉末冶金可以获得尺寸精准、加工量少的接近净成形的钛合金产品,但是容易出现内部孔隙率较高问题^[7]。钛合金的成形技术研究备受重视,但是国内在研究水平和工业化生产应用方面还存在一定的差距,尤其是在建筑用钛合金成形领域还有待深入研究。电磁脉冲成形是新近发展的一种成形技术。与其它成形方法相比,电磁脉冲成形具有生产速度快、操作成本低、可以压缩任何管体横截面等优点^[8]。但是,目前关于钛合金电磁脉冲成形的研究还较少,难以满足未来钛合金在建筑等民用领域的大规模应用需要。为此,笔者采用电磁脉冲成形方法制备了建筑用 Ti-6Al-4V-0.5Cr 新型钛合金,并进行了合金试样显微组织和力学性能的测试与分析,为建筑用钛合金的电磁脉冲成形提供试验数据。

1 试验材料和方法

以电磁脉冲成形建筑用 Ti-6Al-4V-0.5Cr 新型钛合金为研究对象,合金的化学成分如表 1 所示。以挤压态建筑用 Ti-6Al-4V-0.5Cr 新型钛合金棒材为坯料,坯料为棒状,尺寸为 $\varnothing 250\text{ mm} \times 5\text{ mm}$,采用 EMPT80-200 型电磁脉冲成形设备(见图 1),获得电磁脉冲成形 $\varnothing 200\text{ mm}$ 直径的圆盘状试样(见图 2),底部圆盘的直径 $\varnothing 120\text{ mm}$ 、深度 10 mm 。钛合金电磁脉冲成形的工作原理为:电容器电源对驱动线圈放电,产生强大的脉冲电流,然后在钛合金工件中产生感应涡流,在感应涡流以及激励电流作用下产生电磁力,从而使得钛合金工件发生预期的塑性

变形,获得所需的电磁脉冲成形钛合金产品^[8]。建筑用 Ti-6Al-4V-0.5Cr 新型钛合金的电磁脉冲成形工艺参数如表 2 所示。电磁脉冲成形过程中,保持线圈匝数、线圈外径、线圈内径等工艺参数不变,改变放电电压和每匝线圈间距。

表 1 Ti-6Al-4V-0.5Cr 钛合金化学成分

Table 1 Chemical composition of Ti-6Al-4V-0.5Cr alloy %

Al	V	Cr	Ti
5.5 ~ 6.5	3.5 ~ 4.5	0.3 ~ 0.7	bal.



图 1 试验采用的电磁脉冲成形设备
Fig. 1 Electromagnetic pulse forming equipment used in the test



图 2 电磁脉冲成形钛合金试样
Fig. 2 Electromagnetic pulse forming of titanium alloy specimens

用线切割方法在电磁脉冲成形工件中部切取金相试样(圆片状,尺寸 $\varnothing 15\text{ mm} \times 5\text{ mm}$),经磨制、抛光后置于 PG20 型金相显微镜下过程。用线切割方法在电磁脉冲成形工件中部切取拉伸试样(矩形,尺寸 $55\text{ mm} \times 8\text{ mm} \times 5\text{ mm}$),在 10 t 微机控制电子万能试验机上进行试验,并置于 JSM6510 型扫描电子显微镜下观察拉伸断口形貌。

表 2 钛合金的电磁脉冲成形工艺参数

Table 2 Technological parameters of electromagnetic pulse forming of titanium alloys

试样编号	放电电压/kV	每匝线圈间距/mm	线圈匝数	线圈外径/mm	线圈内径/mm
1	10	7	8	60	24
2	15	7	8	60	24
3	20	7	8	60	24
4	15	4	8	60	24
5	15	10	8	60	24

2 试验结果

2.1 力学性能

图 3 为不同放电电压电磁脉冲成形试验合金的力学性能测试结果。由图 3 可以看出,电磁脉冲成形试验合金具有较好的力学性能。在电磁脉冲成形过程中,放电电压对试验合金的力学性能影响明显。随着放电电压从 10 kV 变大到 20 kV,试验合金的抗拉强度和屈服强度都先变大然后变小,断后伸长率变化幅度不大,在 14.5% ~ 15.7% 范围。由此可以看出,对于试验合金而言,放电电压不应该太低也不应该太高。与 10 kV 相比,采用 15 kV 放电电压时试验合金的抗拉强度增大 14 MPa、屈服强度增大 11 MPa、断后伸长率减小 1.2%。进一步增大放电电压时,试验合金的抗拉强度和屈服强度没有进一步增大,反而较 15 kV 放电电压时出现了下降。即放电电压 15 kV 时,试验合金的抗拉强度 962 MPa、屈服强度 891 MPa、断后伸长率 14.5%,获得较为理想的力学性能。

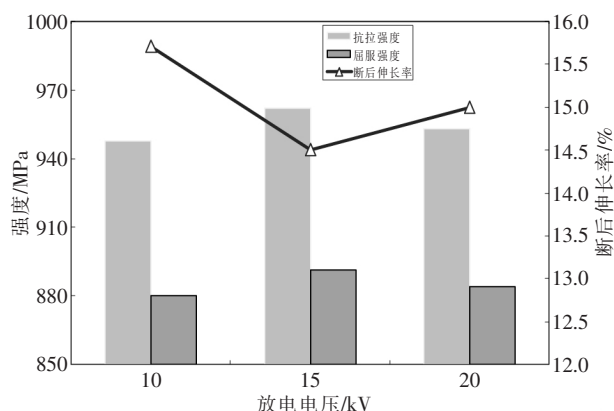


图 3 不同放电电压时试验合金的力学性能测试结果
Fig. 3 Test results of mechanical properties for the testing alloys with different discharge voltage

图 4 为不同线圈间距电磁脉冲成形试验合金的力学性能测试结果。

由图 4 可以看出,在电磁脉冲成形过程中,每匝线圈间距对试验合金的力学性能也有着较为明显的影响。随每匝线圈间距从 4 mm 增至 10 mm,试验合金的抗拉强度和屈服强度均先增大后变小,断后伸长率则先变小然后变大,但断后伸长率变化幅度较小。由此可以看出,对于试验合金而言,每匝线圈间距过小或者过大,都不利于获得高性能的电磁脉冲成形试验合金。与 4 mm 线圈间距相比,当每匝线圈间距增至 7 mm 时试验合金的抗拉强度增大 11 MPa、屈服强度增大 9 MPa、断后伸长率减小 0.8%。当进一步增大每匝线圈间距时,试验合金的抗拉强度和屈服强度出现下降。当每匝线圈间距为 7 mm 时,试验合金的抗拉强度达到 962 MPa、屈服强度达到 891 MPa、断后伸长率达到 14.5%,获得较为理想的力学性能。

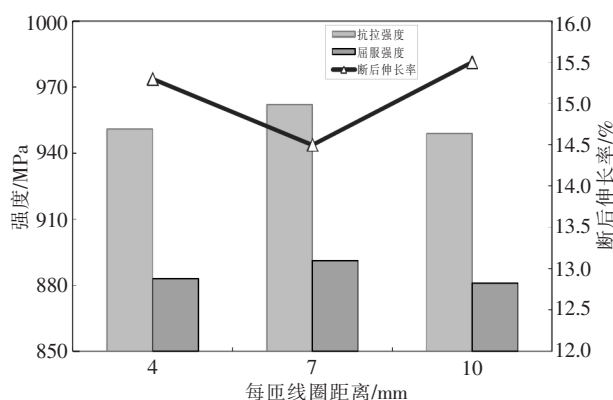


图 4 不同线圈间距时试验合金的力学性能测试结果
Fig. 4 Test results of mechanical properties for the testing alloys with different coil spacing

图 5 为不同放电电压电磁脉冲成形试验合金的拉伸断口扫描电镜照片。由图 5 可以看出,放电电压从 10 kV 变大到 20 kV,电磁脉冲成形试验合金的拉伸断口都是由韧窝和少量解理台阶组成,都属于韧性断裂为主的混合断裂方式。与 10 kV 和 20 kV 放电电压相比,采用 15 kV 放电电压时试验合金的

拉伸断口中韧窝更细小、更密集,表现出更好的力学性能。

2.2 显微组织

图 6 为不同放电电压电磁脉冲成形试验合金的显微组织照片。由图 6 可以看出,放电电压对试验合金的显微组织产生较为明显的影响。当放电电压选择偏低的 10 kV 时,试验合金的内部晶粒较为粗

大、组织分布均匀性较差;当放电电压提高到 15 kV 时,试验合金的内部晶粒明显细化,且组织分布更为均匀;当放电电压进一步提高到 20 kV 时,试验合金的内部晶粒较 15 kV 放电电压时有所增大。由此可以看出,为了获得更理想的内部显微组织,电磁脉冲成形建筑用 Ti-6Al-4V-0.5Cr 新型钛合金的放电电压不易过大也不易过小。

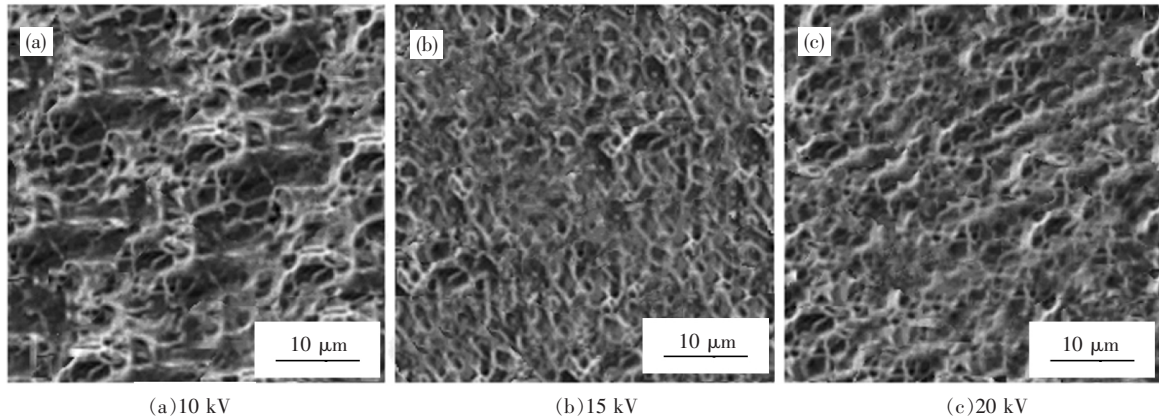


图 5 不同放电电压试验合金的拉伸断口形貌

Fig. 5 Tensile fracture morphology of the testing alloys with different discharge voltage

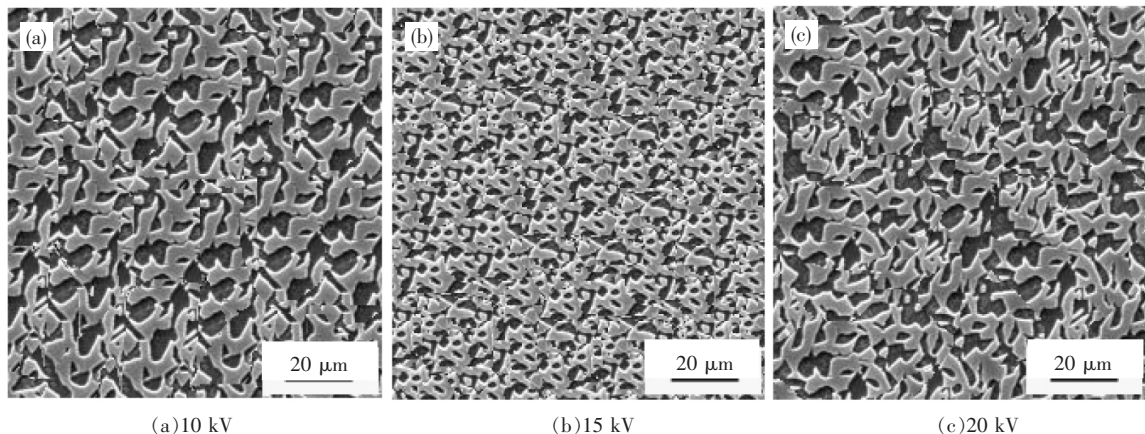


图 6 不同放电电压试验合金显微组织

Fig. 6 Microstructure of the testing alloys with different discharge voltage

图 7 为不同线圈间距时电磁脉冲成形试验合金的显微组织照片。

由图 7 可以看出,线圈间距对试验合金的显微组织产生较为明显的影响。当线圈间距选择偏低的 4 mm 时,试验合金的内部晶粒较为粗大、组织分布均匀性较差;当线圈间距提高到 7 mm 时,试验合金的内部晶粒明显细化,且组织分布更为均匀;当线圈间距进一步提高到 10 mm 时,试验合金的内部晶粒

较 7 mm 时有所增大。由此可以看出,为了获得更理想的内部显微组织,电磁脉冲成形建筑用 Ti-6Al-4V-0.5Cr 新型钛合金的线圈间距不易过大也不易过小。

2.3 讨论与分析

新型钛合金 Ti-6Al-4V-0.5Cr 在电磁脉冲成形过程中,放电电压和每匝线圈距离是两个非常重要的成形工艺参数。

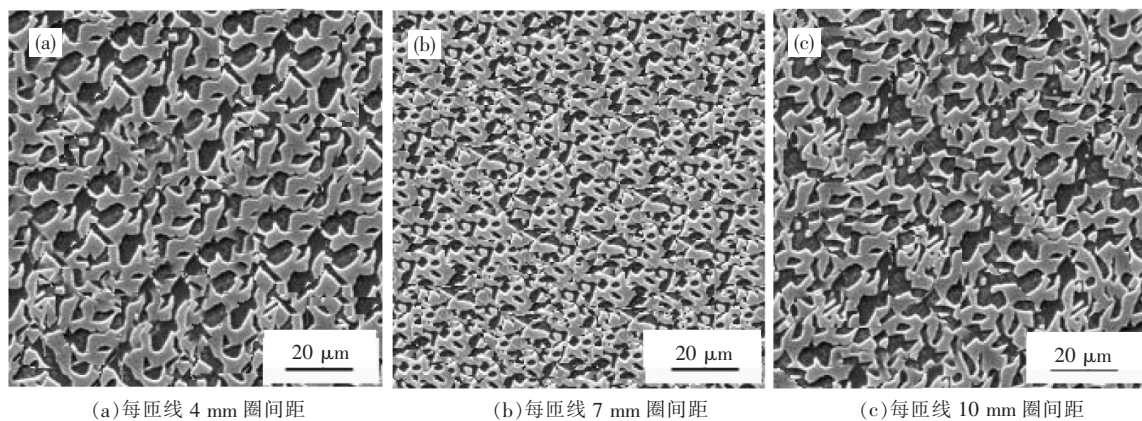


图 7 不同线圈间距时试验合金显微组织

Fig. 7 Microstructure of the testing alloys with different coil spacing

当选择偏低的放电电压(10 kV)或偏大的线圈距离(10 mm)时,试验合金的内部晶粒较为粗大、组织分布均匀性较差,导致合金的力学性能不够理想,这主要是因为偏低的放电电压或偏大的线圈距离下,电磁脉冲成形系统形成的脉冲磁场和次级磁场强度较低,从而作用在试验合金上的洛伦兹力过小,导致试验合金的变形不充分,内部变形抗力过大,所以无法获得理想的力学性能^[8]。适当提高放电电压或减小线圈距离,将增大系统形成的脉冲磁场和次级磁场强度,进而增大作用在试验合金上的洛伦兹力,从而促使试验合金获得充分变形,减小合金内部的变形抗力,细化合金内部晶粒,改善合金内部组织分布的均匀性,从而提高试验合金的力学性能^[8]。但是,如果选择的放电电压过大或每匝线圈距离过小,将使得系统形成的脉冲磁场和次级磁场强度过大,产生过大的洛伦兹力作用在试验合金上,导致试验合金内部组织粗化并难以获得均匀分布,从而使得试验合金的力学性能并不能随着放电电压的增大而增大,试验合金力学性能反而出现下降。

与铸造、锻造和粉末冶金等传统成形方法相比,采用电磁脉冲方法对钛合金成形可以提高成形极限、减小模具和工件损伤发展、减小起皱和回弹、提高变形功率等。在工业化应用方面,钛合金电磁脉冲成形发展还较慢,还需要不断的深入研究。后续

笔者将继续深入探讨电磁脉冲成形各个工艺参数对建筑用 Ti-6Al-4V-0.5Cr 新型钛合金成形件性能的影响,为钛合金电磁脉冲成形的工业化应用提供数据支持。

3 结论

采用不同工艺参数进行了建筑用 Ti-6Al-4V-0.5Cr 新型钛合金的电磁脉冲成形试验,同时进行了试验合金的显微组织和力学性能测试与分析,得到了如下结论:

1) 采用电磁脉冲成形,可以获得性能较佳的建筑用 Ti-6Al-4V-0.5Cr 新型钛合金工件,合金的抗拉强度达到 962 MPa、屈服强度达到 891 MPa、断后伸长率达到 14.5%。

2) 放电电压是建筑用 Ti-6Al-4V-0.5Cr 新型钛合金电磁脉冲成形的重要工艺参数。随放电电压从 10 kV 增大到 20 kV,钛合金的组织先细化后粗化,力学性能先提高后下降,抗拉强度和屈服强度都先变大然后变小,断后伸长率则先变小然后变大,但是断后伸长率变化幅度较小。

3) 与 10 kV 偏低的放电电压相比,当采用 15 kV 放电电压时电磁脉冲成形建筑用 Ti-6Al-4V-0.5Cr 新型钛合金的抗拉强度增大 14 MPa、屈服强度增大 11 MPa,断后伸长率减小 1.2%。

参考文献

- [1] Xu Ruida, Yu Huichen. Effects of building orientation on fatigue behavior of Ti-6Al-4V alloy produced by selective laser melting [J]. Key Engineering Materials 2019 47: 84.
- [2] Wan Yi, Wang Teng, Wang Zhongshan *et al.* Construction and characterization of micro/nano-topography on titanium alloy formed

- by micro-milling and anodic oxidation[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology 2018 98: 1-4.
- [3] Wu Jingrong. Discussion on phase transformation of high strength trace-Ti alloy steel in continuous cooling process[J]. Foundry Technology 2016 37(3): 427-429.
(吴京戎. 连续冷却过程中高强度建筑用微钛合金钢相变问题探讨[J]. 铸造技术 2016 37(3): 427-429.)
- [4] Zou Tao ,Chen Changjun ,Zhang Min *et al.* Study on laser welding mechanisms of glass/stainless-steel and glass/titanium-alloy materials[J]. Chinese Journal of Lasers 2016 43(9): 76-81.
(邹涛 陈长军 张敏 等. 建筑用玻璃/不锈钢、玻璃/钛合金激光焊接机理研究[J]. 中国激光 2016 43(9): 76-81.)
- [5] Li Na. Application analysis of titanium and titanium alloy materials in the field of environmental protection construction[J]. Shanxi Metallurgy 2016 39(5): 51-52 66.
(李娜. 钛及钛合金材料在建筑环保领域的应用分析[J]. 山西冶金 2016 39(5): 51-52 66.)
- [6] Liu Xing ,Chen Changjun ,Wang Xiaonan *et al.* Study on process and performance of architectural glass-to-titanium alloy TC4 with laser welding[J]. Chinese Journal of Lasers 2015 42(4): 58-64.
(刘星 陈长军 王晓南 等. 建筑用玻璃与钛合金 TC4 的激光封接工艺及性能研究[J]. 中国激光 2015 42(4): 58-64.)
- [7] Li Yan ,Zhang Xiaochen ,Song Meihui *et al.* Research progress of processing method for titanium alloy[J]. Heilongjiang Science , 2018 9(9): 158-159.
(李岩 张晓臣 宋美慧 等. 钛合金成型方法的研究进展[J]. 黑龙江科学 2018 9(9): 158-159.)
- [8] Chen Ronghao ,Yang Ming. Optimization of electromagnetic pulse forming process of titanium alloy pipe fittings for sports equipment[J]. Hot Working Technology 2017 46(9): 150-153.
(陈荣浩 杨明. 体育器材用钛合金管件的电磁脉冲成形工艺优化[J]. 热加工工艺 2017 46(9): 150-153.)

编辑 杨冬梅

(上接第53页)

- [9] Tan Ping ,Ge Yuan ,Tang Huiping *et al.* Study on TiAl porous metal[J]. Rare Metal Materials and Engineering 2008 37(S4): 561-564.
(谈萍 葛渊 汤慧萍 等. TiAl 多孔材料的研制[J]. 稀有金属材料与工程 2008 37(S4): 561-564.)
- [10] Lin Junpin ,Chen Guoliang. Development of TiAl intermetallic based compound[J]. Materials China 2009 28(1): 31-37.
(林均品 陈国良. TiAl 基金属间化合物的发展[J]. 中国材料进展 2009 28(1): 31-37.)
- [11] Jiang Yao ,He Yuehui ,Huang Baiyun *et al.* Progress in research on Ti-Al intermetallic compound porous material[J]. Materials China 2010 29(3): 18-22.
(江焱 贺跃辉 黄伯云 等. Ti-Al 金属间化合物多孔材料的研究进展[J]. 中国材料进展 2010 29(3): 18-22.)
- [12] Li Xianyu ,Wang Weiguo ,Hao Gangling *et al.* Preparation and property of one new intermetallic compound porous materials based Ti-Al with spherical pores[J]. Nonferrous Metals Engineering 2017 7(5): 20-24.
(李先雨 王伟国 郝刚领 等. 新型超轻高强球形孔 Ti-Al 的制备及其力学性能研究[J]. 有色金属工程 2017 7(5): 20-24.)
- [13] Hao Gangling ,Wang Hui ,Li Xianyu *et al.* Preparation and mechanical property of novel ultralight TiAl materials with high porosity[J]. Rare Metal Materials and Engineering 2016 45(9): 2379-2384.
(郝刚领 王辉 李先雨 等. 新型超轻 TiAl 多孔材料的制备及其力学性能[J]. 稀有金属材料与工程 2016 45(9): 2379-2384.)
- [14] Qiao Jichao ,Xi Zhengping ,Tang Huiping *et al.* Current status of metal porous materials by powder metallurgy technology[J]. Rare Metal Materials and Engineering 2008 37(11): 2054-2058.
(乔吉超 奚正平 汤慧萍 等. 粉末冶金技术制备金属多孔材料研究进展[J]. 稀有金属材料与工程 2008 37(11): 2054-2058.)
- [15] Liu Peisheng. Determining methods for porosity of porous materials[J]. Titanium Industry Progress 2005 22(6): 34-36.
(刘培生. 多孔材料孔隙率的测定方法[J]. 钛工业进展 2005 22(6): 34-36.)

编辑 杨冬梅