

热处理制度对汽车用 TC6 钛合金组织及性能的影响

李广德¹, 王 瑛², 李伟伦³

(1. 青海交通职业技术学院, 青海 西宁 810003; 2. 青海省教育厅教育评估与质量监测中心, 青海 西宁 810008; 3. 兰州理工大学材料科学与工程学院, 甘肃 兰州 730050)

摘 要: 采用四种不同热处理制度对汽车用 TC6 钛合金棒材进行了等温退火试验, 并进行了试样显微组织、耐磨损性能和耐腐蚀性能测试与分析。结果表明, 采用“870 ℃ 保温 1.5 h, 炉冷至 600 ℃ 保温 2 h, 空冷”热处理制度(1[#]试样)时, 合金的耐磨损和耐腐蚀性能最差; 采用“900 ℃ 保温 1.5 h, 炉冷至 600 ℃ 保温 2 h, 空冷”热处理制度(2[#]试样)时, 合金的耐磨损和耐腐蚀性能最佳; 采用“920 ℃ 保温 1.5 h, 炉冷至 600 ℃ 保温 2 h, 空冷”(3[#]试样)和“900 ℃ 保温 1.5 h, 炉冷至 620 ℃ 保温 2 h, 空冷”(4[#]试样)时, 合金试样的腐蚀电位和耐腐蚀性能介于上述二者之间。与 1[#]试样相比, 2[#]试样的磨损体积减小 $8 \times 10^{-3} \text{ mm}^3$ 、腐蚀电位正移 53 mV。

关键词: TC6 钛合金; 热处理; 等温退火; 显微组织; 耐磨损性能; 耐腐蚀性能

中图分类号: TF823, TG156

文献标志码: A

文章编号: 1004-7638(2021)06-0147-06

DOI: 10.7513/j.issn.1004-7638.2021.06.021

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



听语音
与作者互动
聊科研

Effect of heat treatment on microstructure and properties of TC6 titanium alloy

Li Guangde¹, Wang Ying², Li Weilun³

(1. Qinghai Communications Technical College, Xining 810003, Qinghai, China; 2. Education Evaluation and Quality Monitoring Center of Qinghai Education Department, Xining 810008, Qinghai, China; 3. School of Materials Science and Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, Gansu, China)

Abstract: TC6 titanium alloy bars were annealed by four different heat treatment processes. The microstructure, wear resistance and corrosion resistance of the samples were tested and analyzed. The results show that under the heat treatment at 870 ℃ for 1.5 h, furnace cooling to 600 ℃ and insulation for 2 h followed by air cooling, the wear resistance and corrosion resistance of the alloy (sample 1[#]) are the worst. The sample under the heat treatment at 900 ℃ for 1.5 h, furnace cooling to 600 ℃ and insulation for 2 h followed by air cooling shows the best wear resistance and corrosion resistance (sample 2[#]). The corrosion potential and corrosion resistance of the samples respectively under the heat treatment processes of 920 ℃ for 1.5 h furnace cooling to 600 ℃ and insulation for 2 h air cooling (sample 3[#]), and 900 ℃ for 1.5 h furnace cooling to 620 ℃ and insulation for 2 h air cooling (sample 4[#]), are between those of the sample 1[#] and sample 2[#]. Compared with sample 1[#], the wear volume of sample 2[#] decreases by $8 \times 10^{-3} \text{ mm}^3$, and the corrosion potential shifts by +53 mV.

收稿日期: 2020-06-24

基金项目: 交通部西部交通建设科技项目 (200131879549)。

作者简介: 李广德 (1982—), 男, 青海西宁人, 副教授, 硕士, 主要从事机械制造及汽车行业相关研究工作, E-mail: 47756433@qq.com。

Key words: TC6 titanium alloy, heat treatment, isothermal annealing, microstructure, wear resistance, corrosion resistance

0 引言

钛合金兼具优异力学性能和耐腐蚀性能,在汽车领域具有广泛的应用。热处理是改善钛合金性能的有效途径,引起了众多科研人员的研究兴趣。马权等^[1]分析了热处理对 Ti-1300 高强钛合金电子束焊接组织和力学性能的影响规律。曹泽安等^[2]研究了热处理对钛合金激光焊接接头超塑性变形的影响。陈志茹等^[3]探讨了热处理工艺对激光熔化沉积 TC4 钛合金组织性能的影响。王琛等^[4]研究和分析了热处理对 TC18 钛合金组织和力学性能的影响。尚进等^[5]分析了热处理对 3 D 打印钛合金耐蚀性的影响。李雪飞等^[6]研究了 TB6 钛合金等温锻后热处理工艺。卢凯凯等^[7]分析了强韧化热处理对 TA15 钛合金组织和性能产生的影响。勾健等^[8]研究了 CMT+P 过程及后热处理对 TC4 钛合金增材构件组织和性能影响。原菁骏等^[9]分析了热变形及热处理过程中 TC17 钛合金组织与取向的关联性。李立峰等^[10]研究了焊后热处理对钛合金电子束焊接接头残余应力分布的影响。李国亮等^[11]分析了热处理对 TC6 钛合金组织及力学性能的影响规律。熊爱明等^[12]探讨了热处理制度对 TC6 钛合金显微组织的影响,以及 TC6 钛合金变形及热处理组织性能。

TC6 钛合金因其良好的组织和性能稳定性,是一种极具应用前景的钛合金。但是目前关于 TC6

钛合金热处理的研究主要集中在热处理工艺对焊接组织和力学性能的影响,而热处理对合金耐磨损和耐腐蚀性能的研究甚少涉及,迫切需要进一步的探讨和研究。为此,笔者以不同的热处理制度进行了 TC6 钛合金的热处理试验,并进行了合金显微组织、耐磨损性能和耐腐蚀性能的测试分析,研究了热处理制度对 TC6 钛合金显微组织、耐磨损性能和耐腐蚀性能的影响,以期对 TC6 钛合金性能改善提供新的思路和试验数据。

1 试验材料与方法

试验材料为宝钛公司生产的未进行热处理的 TC6 钛合金棒材试样,尺寸为 $\varnothing 35\text{ mm}\times 200\text{ mm}$ 。钛合金试样化学成分如表 1 所示。由于等温退火能够以等温条件下转变的优势获得均匀的组织 and 性能,试验采用等温退火方法在 XB5-2.5-1200 型热处理炉中进行试样的热处理试验。基于 TC6 钛合金自身特点及前期初步试验,各试样采用的热处理制度如下:1[#]试样的热处理制度:870 ℃ 保温 1.5 h,炉冷至 600 ℃ 保温 2 h,空冷。2[#]试样的热处理制度:900 ℃ 保温 1.5 h,炉冷至 600 ℃ 保温 2 h,空冷。3[#]试样的热处理制度:920 ℃ 保温 1.5 h,炉冷至 600 ℃ 保温 2 h,空冷。4[#]试样的热处理制度:900 ℃ 保温 1.5 h,炉冷至 620 ℃ 保温 2 h,空冷。作为对比,5[#]试样为未进行热处理的 TC6 钛合金棒材试样。

表 1 钛合金试样化学成分
Table 1 Chemical compositions of the TC6 sample

	Al	Mo	Cr	Si	Fe	C	N	H	Ti
检测值	6.28	2.89	1.32	0.27	0.31	0.086	0.021	0.007	Bal.
标准要求值	5.5~7	2~3	0.8~2.3	0.15~0.4	0.2~0.7	≤0.1	≤0.05	≤0.015	Bal.

采用线切割方法在试样中部切取 1 个金相试样(圆形, $\varnothing 35\text{ mm}\times 10\text{ mm}$),在合金试样中部及两侧分别切取 1 个磨损平行试样和 1 个腐蚀平行试样,以 3 个磨损平行试样测试值的算术平均值作为试样耐磨损性能的测试值,以 3 个腐蚀平行试样的算术平均值作为试样耐腐蚀性能的测试值。金相试样经过砂纸磨制、抛光后在腐蚀液中浸泡 10 s 后立即冲洗

并吹干,置于 PG18 型显微镜下观察试样的显微组织。磨损试验在 MG-2000 型高温摩擦磨损试验机上进行,试验温度 400 ℃、对磨材料为 45 钢、磨轮转速 2 000 r/min、磨损时间 10 min、相对滑动速度 90 mm/min。磨损试验后将试样置于 JSM6510 型扫描电镜下观察试样表面的磨损形貌。腐蚀试验在 Reference 600 电化学工作站上进行,腐蚀液为 5%

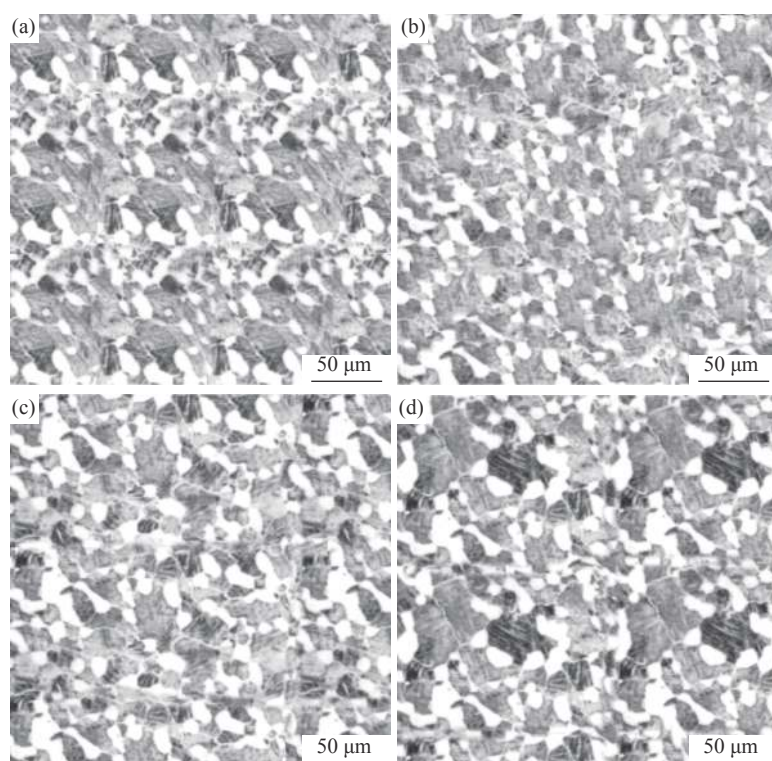
氯化钠水溶液,扫描速度 0.001 V/s。为了避免合金试样表面氧化物对试验结果产生影响,试验前先在 -1.0 V 恒电位下极化 180 s。

2 试验结果及分析

2.1 显微组织

图 1 是采用不同热处理制度下 TC6 钛合金试样的显微组织金相照片。从图 1 可以看出,在试验条件下,钛合金试样热处理后的组织都是 α 相+ β 转变组织构成的混合组织,不同的主要是初生 α 相(等轴状)和次生 α 相(短条状)的尺寸、分布以及数量。

当采用 1[#]试样的热处理制度时,合金热处理后初生 α 相分布均匀性较差、尺寸大小不一,少量次生 α 相尺寸稍大且不规则分布在合金内部;当采用 2[#]试样的热处理制度时,合金热处理后初生 α 相分布均匀性较好、尺寸差异较小,次生 α 相尺寸较小且较为均匀地分布;当采用 3[#]试样的热处理制度时,合金热处理后初生 α 相较 2[#]试样尺寸变大、分布较为均匀,次生 α 相分布较为均匀但尺寸较 2[#]试样有所增大;当采用 4[#]试样的热处理制度时,合金热处理后初生 α 相较 3[#]试样尺寸明显变大、次生 α 相较 2[#]试样分布均匀性变差且尺寸明显增大。



(a) 1[#]试样; (b) 2[#]试样; (c) 3[#]试样; (d) 4[#]试样

图 1 试样显微组织金相照片

Fig. 1 Metallography microstructure of specimens

2.2 耐磨损性能

图 2 是采用不同热处理制度下 TC6 钛合金试样的耐磨损性能测试结果。从图 2 可以看出,热处理制度对合金试样耐磨损性能产生明显影响。当采用 1[#]试样的热处理制度时,合金试样的磨损体积最大($19 \times 10^{-3} \text{ mm}^3$),试样耐磨损性能最差;当采用 2[#]试样的热处理制度时,合金试样的磨损体积最小($11 \times 10^{-3} \text{ mm}^3$),试样耐磨损性能最佳,较 1[#]试样磨损体积减小 $8 \times 10^{-3} \text{ mm}^3$,试样耐磨损性能得到明显提高;当采用 3[#]试样的热处理制度和 4[#]试样的热处

理制度时,合金试样的磨损体积和耐磨损性能介于 1[#]和 3[#]试样之间。此外,从图 2 还可以看出,与未处理试样(5[#]试样)相比,热处理后试样的磨损体积明显减小,试样耐磨损性能得到明显提高。

图 3 是采用不同热处理制度下 TC6 钛合金试样磨损试验后的表面形貌。从图 3 可以看出,当采用 1[#]试样的热处理制度时,合金试样磨损试验后表面聚集着较多的脱皮和磨屑,试样磨损现象较为严重;当采用 2[#]试样的热处理制度时,合金试样磨损试验后表面仅有少量的脱皮和磨屑,试样磨损现象明

显减轻;当采用3[#]试样的热处理制度和4[#]试样的热处理制度时,合金试样表面的脱皮和磨屑介于1[#]和3[#]试样之间,合金试样的磨损程度较1[#]试样减轻但较2[#]试样严重,合金试样的耐磨损性能优于1[#]试样但较2[#]试样差。

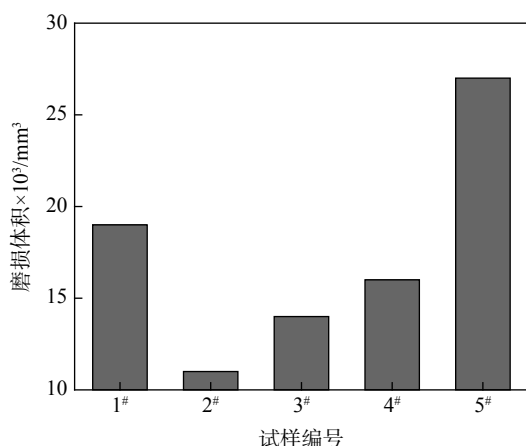
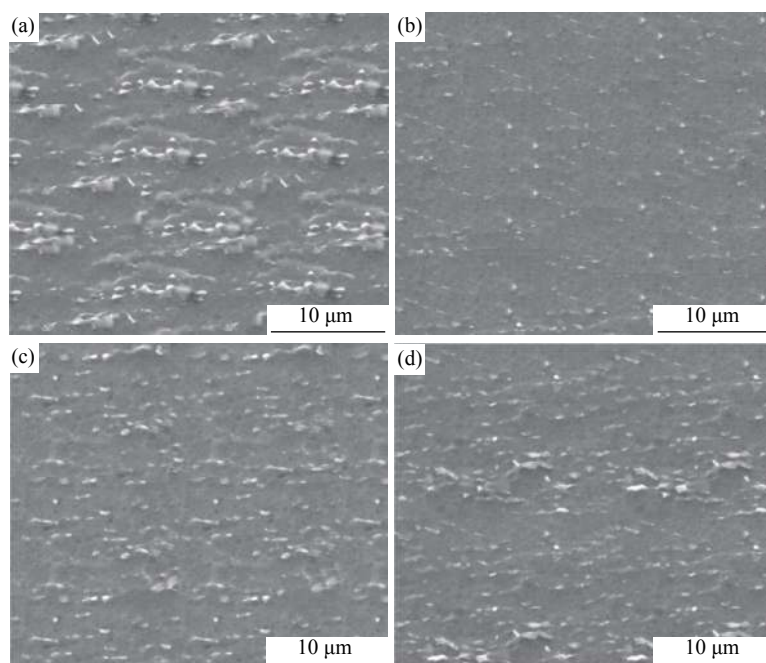


图2 试样耐磨损性能测试结果
Fig. 2 The wear resistance of samples

2.3 耐腐蚀性能

图4是采用不同热处理制度下TC6钛合金试样的耐腐蚀性能测试结果。在电化学试验过程中,腐蚀电位愈正合金试样的耐腐蚀性能越佳;反之,腐蚀电位愈负合金试样的耐腐蚀性能越差。从图4可以看出,不同的热处理制度,合金试样呈现出不同的耐腐蚀性能;换言之,热处理制度对合金试样的耐腐蚀性能产生了较为显著的影响。当采用1[#]试样的热处理制度时,合金试样的腐蚀电位最负(-0.724 V),试样耐腐蚀性能最差;当采用2[#]试样的热处理制度时,合金试样的腐蚀电位最正(-0.671 V),试样耐腐蚀性能最佳,较1[#]试样腐蚀电位正移了53 mV,试样耐腐蚀性能得到明显提高;当采用3[#]试样的热处理制度和4[#]试样的热处理制度时,合金试样的腐蚀电位和耐腐蚀性能介于1[#]和3[#]试样之间。此外,从图4还可以看出,与未处理试样(5[#]试样)相比,热处理后试样的腐蚀电位明显正移,试样耐腐蚀性能得到明显提高。



(a) 1[#]试样; (b) 2[#]试样; (c) 3[#]试样; (d) 4[#]试样

图3 试样磨损试验后的表面形貌

Fig. 3 Surface morphology of samples after wear test

图5是采用不同热处理制度下TC6钛合金试样电化学腐蚀试验后的表面形貌。从图5可以看出,当采用1[#]试样的热处理制度时,合金试样腐蚀试验后表面出现较多大小不一的粗大团状腐蚀坑,试样

腐蚀现象较为严重;当采用2[#]试样的热处理制度时,合金试样磨损试验后表面未见粗大的团状腐蚀坑,仅有少量点状腐蚀坑,试样腐蚀现象明显减轻;当采用3[#]试样的热处理制度和4[#]试样的热处理制度时,

合金试样表面腐蚀坑的大小和数量均介于 1[#]和 3[#]试样之间, 合金试样的腐蚀程度较 1[#]试样减轻但较 2[#]试样严重, 合金试样的耐腐蚀性能较 1[#]试样增强但较 2[#]试样有所下降。

钛合金热处理温度和时间系统研究, 是一个长时间的研究过程, 也是作者后续的工作内容。钛合金热处理温度和时间研究以及准确控制, 具有重要的工程应用价值。为了提高 TC6 钛合金的耐磨损性能和耐腐蚀性能, 等温退火热处理时优选: 900 ℃ 保温 1.5 h, 炉冷至 600 ℃ 保温 2 h, 空冷的热处理制度。

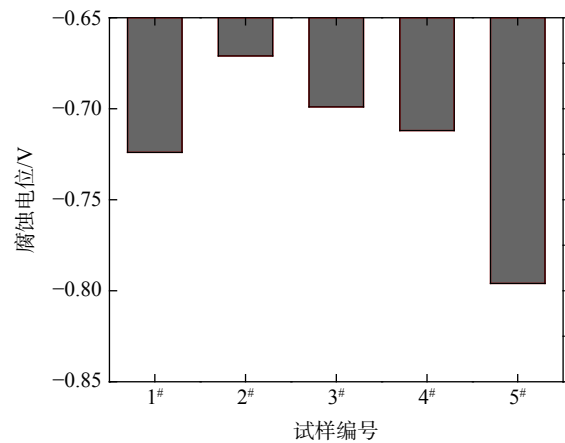
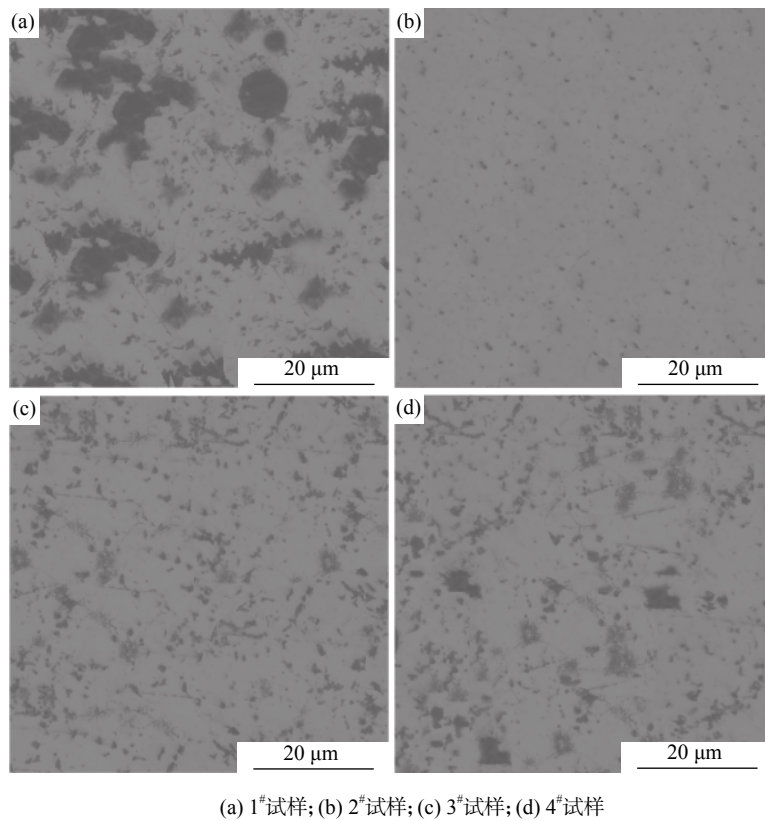


图 4 试样耐腐蚀性能测试结果
Fig. 4 Corrosion resistance of samples



(a) 1[#]试样; (b) 2[#]试样; (c) 3[#]试样; (d) 4[#]试样

图 5 试样腐蚀试验后的表面形貌

Fig. 5 Surface morphology of samples after corrosion test

3 结论

1) 采用不同热处理制度对 Ø35 mm TC6 钛合金棒材进行等温退火后, 试样的显微组织、耐磨损性能和耐腐蚀性能差异明显。采用“870 ℃ 保温 1.5 h, 炉冷至 600 ℃ 保温 2 h, 空冷”热处理制度时, 合金的耐磨损和耐腐蚀性能最差; 采用“900 ℃ 保温 1.5 h, 炉冷至 600 ℃ 保温 2 h, 空冷”热处理制度时,

合金的耐磨损和耐腐蚀性能最佳; 采用“920 ℃ 保温 1.5 h, 炉冷至 600 ℃ 保温 2 h, 空冷”和“900 ℃ 保温 1.5 h, 炉冷至 620 ℃ 保温 2 h, 空冷”时, 合金试样的腐蚀电位和耐腐蚀性能介于上述二者之间。

2) 与“870 ℃ 保温 1.5 h, 炉冷至 600 ℃ 保温 2 h, 空冷”热处理制度相比, 采用“900 ℃ 保温 1.5 h, 炉冷至 600 ℃ 保温 2 h, 空冷”热处理制度时, 合金的磨损体积减小 $8 \times 10^{-3} \text{ mm}^3$ 、腐蚀电位正移 53 mV,

合金的耐磨损和耐腐蚀性能显著提高。

3)采用四种不同热处理制度等温退火后 TC6 钛合金的组织都是 α 相+ β 转变组织构成的混合组织,不同的主要是初生 α 相和次生 α 相的尺寸、分

布以及数量。当采用“900 °C 保温 1.5 h, 炉冷至 600 °C 保温 2 h, 空冷”热处理制度时,合金热处理后初生 α 相分布均匀性较佳、尺寸差异较小,次生 α 相尺寸较小且分布较为均匀。

参考文献

- [1] Ma Quan, Xin Shewei, Song Kai, *et al.* Effect of heat treatment on microstructure and mechanical properties of Ti-1300 alloy by electron beam weldment[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2019, 48(8): 2723–2728.
(马权, 辛社伟, 宋凯, 等. 热处理对Ti-1300高强钛合金电子束焊接组织和力学性能的影响[J]. 稀有金属材料与工程, 2019, 48(8): 2723–2728.)
- [2] Cao Ze'an, Cheng Donghai, Hu De'an, *et al.* Effect of hydrogen heat treatment on superplastic deformation of laser welded joints of titanium alloy[J]. Transaction of Materials and Heat Treatment, 2018, 39(12): 129–134.
(曹泽安, 程东海, 胡德安, 等. 氢热处理对钛合金激光焊接接头超塑性变形的影响[J]. 材料热处理学报, 2018, 39(12): 129–134.)
- [3] Chen Zhiru, Ji Xia, Chu Ruikun, *et al.* Effect of heat treatment on microstructure and properties of TC4 titanium alloy by laser melting deposition[J]. Heat Treatment of Metals, 2018, 43(11): 144–149.
(陈志茹, 计霞, 楚瑞坤, 等. 热处理工艺对激光熔化沉积TC4钛合金组织性能的影响[J]. 金属热处理, 2018, 43(11): 144–149.)
- [4] Wang Chen, Xu Dong, Chen Li. Effect of heat treatment on microstructure and mechanical properties of TC18 titanium alloy[J]. Heat Treatment of Metals, 2018, 43(9): 186–190.
(王琛, 徐栋, 陈力. 热处理对TC18钛合金组织和力学性能的影响[J]. 金属热处理, 2018, 43(9): 186–190.)
- [5] Shang Jin, Cao Wei, Chen Yongchang. Effect of heat treatment on corrosion resistance of 3 D printed titanium alloy[J]. Corrosion & Protection, 2020, 41(5): 27–29,62.
(尚进, 曹玮, 陈永畅. 热处理对3 D打印钛合金耐蚀性的影响[J]. 腐蚀与防护, 2020, 41(5): 27–29,62.)
- [6] Li Xuefei, Huang Lijun, Huang Xu, *et al.* Research on heat treatment process of TB6 titanium alloy after isothermal forging[J]. Titanium Industry Progress, 2020, 37(2): 31–34.
(李雪飞, 黄利军, 黄旭, 等. TB6钛合金等温锻后热处理工艺研究[J]. 钛工业进展, 2020, 37(2): 31–34.)
- [7] Lu Kaikai, Zhou Lipeng, Li Minna, *et al.* Effect of strengthening and toughening heat treatment on microstructure and mechanical properties of TA15 titanium alloy[J]. Transaction of Materials and Heat Treatment, 2020, 41(1): 44–49.
(卢凯凯, 周立鹏, 李敏娜, 等. 强韧化热处理对TA15钛合金组织和性能的影响[J]. 材料热处理学报, 2020, 41(1): 44–49.)
- [8] Gou Jian, Wang Zhijiang, Hu Shengsun, *et al.* Effects of CMT+P process and post heat treatment on microstructure and properties of TC4 component by additive manufacturing[J]. Transaction of the China Welding Institution, 2019, 40(12): 31–35,46.
(勾健, 王志江, 胡绳荪, 等. CMT+P过程及后热处理对TC4钛合金增材构件组织和性能影响[J]. 焊接学报, 2019, 40(12): 31–35,46.)
- [9] Yuan Jingjun, Ji Zhongshuo, Zhang Maicang, *et al.* Correlation between structure and orientation of TC17 titanium alloy during thermal deformation and heat treatment[J]. Chinese Journal of Engineering, 2019, 41(6): 772–780.
(原菁俊, 姬忠硕, 张麦仓. 热变形及热处理过程中TC17钛合金组织与取向的关联性[J]. 工程科学学报, 2019, 41(6): 772–780.)
- [10] Li Lifeng, Li Ganggang, Ma Tianju, *et al.* Effect of post-weld heat treatment on residual stress distribution of electron beam welded joints of titanium alloy[J]. Hot Working Technology, 2019, 48(17): 154–157.
(李立峰, 黎刚刚, 马天驹, 等. 焊后热处理对钛合金电子束焊接接头残余应力分布的影响[J]. 热加工工艺, 2019, 48(17): 154–157.)
- [11] Li Guoliang, Yao Zekun, Sun Pengpeng, *et al.* Effect of heat treatment on TC6 alloy microstructure and tensile property[J]. Forging & Stamping Technology, 2011, 36(6): 125–128.
(李国亮, 姚泽坤, 孙朋朋, 等. 热处理对TC6钛合金组织及力学性能的影响[J]. 锻压技术, 2011, 36(6): 125–128.)
- [12] Xiong Aiming, Huang Weichao, Chen Shenghui, *et al.* Effects of heat treatment on microstructure of TC6 titanium alloy[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals. 2002, 12(z1): 206–209.
(熊爱明, 黄维超, 陈胜晖, 等. 热处理制度对TC6钛合金显微组织的影响[J]. 中国有色金属学报, 2002, 12(z1): 206–209.)