

多向锻造对汽车用钛合金组织及性能影响分析

高亚男¹, 郑 镭², 张全逾^{1*}

(1. 河北石油职业技术大学汽车工程系, 河北 承德 067000; 2. 华北理工大学机械工程学院, 河北 唐山 063210)

摘 要:对汽车制造用 Ti80 钛合金进行了多向锻造试验和多向锻造试样的内部显微组织分析, 测试了室温条件下的力学性能和耐磨损性能。研究表明, 锻造温度和锻造道次对试样显微组织、力学性能和耐磨损性能均产生明显影响, 随锻造温度从 880 °C 升高到 960 °C、锻造道次从 2 增加到 8, 多向锻造试样的组织先细化后粗化、力学性能和耐磨损性能均先提高后下降。当锻造温度为 920 °C、锻造道次 5 时, 试样晶粒最细小、第二相呈连续网状分布, 试样力学性能和耐磨损性能最佳, 试样抗拉强度和屈服强度分别为 976、892 MPa、磨损 15 min 后磨损体积仅为 $7 \times 10^{-3} \text{ mm}^3$ 。

关键词:汽车制造用钛合金; 多向锻造; 显微组织; 力学性能; 耐磨损性能

中图分类号: TF823

文献标志码: A

文章编号: 1004-7638(2023)01-0078-06

DOI: 10.7513/j.issn.1004-7638.2023.01.014

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 multi direction forging on microstructure and properties of titanium alloy for automobile manufacturing

Gao Yanan¹, Zheng Lei², Zhang Quanyu^{1*}

(1. Department of Automotive Engineering, Hebei Petroleum University of Technology, Chende 067000, Hebei, China;
2. College of Mechanical Engineering, North China University of Science and Technology, Tangshan 063210, Hebei, China)

Abstract: In this paper, the multi-directional forging test of Ti80 titanium alloy for automobile manufacturing was carried out, and the microstructure, room temperature mechanical properties and wear resistance of the alloy samples were tested and analyzed. The results show that the forging temperature and the forging pass have obvious effects on the microstructure, mechanical properties and wear resistance of the specimen. With the increase of the forging temperature from 880 °C to 960 °C and the forging pass from 2 to 8, the microstructure of the multi-directional forging specimen is refined first and then coarsened, and the mechanical properties and wear resistance are increased first and then decreased. When the forging temperature is at 920 °C and the forging pass is at 5, the grain size of the sample is the smallest, the second phase is in continuous network distribution, the mechanical properties and wear resistance of the sample are the best, the tensile strength and yield strength of the sample are 976 MPa and 892 MPa respectively, and the wear volume is only $7 \times 10^{-3} \text{ mm}^3$ after 15 minutes of wear.

收稿日期: 2022-05-27

基金项目: 河北省高等学校科学技术研究重点项目(ZD2016113)。

作者简介: 高亚男, 1982 年出生, 男, 汉族, 河北承德人, 博士, 副教授, 研究方向: 从事金属塑性成形, 汽车关键零部件结构设计等方面的研究, E-mail: llivr@163.com; * 通讯作者: 张全逾, 1980 年出生, 男, 汉族, 河北承德人, 硕士研究生, 副教授, 研究方向: 从事汽车方面的教学与科研工作, E-mail: llivr@163.com。

Key words: titanium alloy for automobile manufacturing, multi direction forging, microstructure, mechanical properties, wear resistance

0 引言

钛合金是汽车工业中的一种常用金属材料。由于强度高、耐腐蚀性好、耐热性高等特点,钛合金备受关注。甘伟等^[1]分析了锻造温度对汽车用新型钛合金性能的影响。宋纬^[2]对汽车钛合金气阀的铸造工艺进行了优化。赵福利和汪永江^[3]探讨了搅拌摩擦加工对汽车用钛合金性能的影响。周渝庆和张祥^[4]对机械紧固件用新型钛合金锻造温度进行了优化研究。张斌^[5]分析了钛合金汽车零件烧结过程中的烧结工艺对零件性能产生的影响。张慧芳^[6]研究了如何在汽车用钛合金表面制备双辉等离子 Mo 合金化层,并测试了分析涂层的摩擦磨损性能。周晓虎等^[7]分析了准 β 锻造工艺对 TC21 钛合金大型锻件组织及性能的影响。随着汽车工业的发展,市场对汽车用钛合金性能的要求不断提高,尤其是力学性能和耐磨损性能。已有的研究表明,多向锻造作为一种新型的材料改性手段在金属材料改性方面得到成功应用^[8]。张伟华等^[9]分析了终锻温度对多向锻造高纯铜组织及硬度的影响。蓝希鑫等^[10]分析了多向锻造对 TC21 钛合金 $\alpha+\beta$ 片层组织球化的影响。但是,目前钛合金多向锻造的研究还较少,迫切需要进一步研究和探索。为此,笔者研究了多向锻造对

汽车制造用 Ti80 钛合金显微组织、力学性能和耐磨损性能的影响。

1 试验材料和方法

1.1 试验材料

采用三次真空自耗电弧炉熔炼的 Ti80 钛合金方形铸锭(尺寸 300 mm×300 mm×300 mm)为试验材料,试样化学成分如表 1 所示。在 500 t 油压机上进行多向锻造试验。试样多向锻造的每道次锻造过程如图 1 所示。锻造加热采用中频感应加热,采用自制模具,模具材料为 W360 钢,模具预热温度 300 ℃。锻造时先将试样按图 1 所示进行第一个方向锻造(z 方向),锻造完成后取出试样并旋转 90°再进行第二个方向锻造(y 方向),锻造完成后取出试样再旋转 90°后进行第三个方向锻造(x 方向),由此完成一道次多向锻造,每道次变形量 25%。多向锻造过程中,选择不同的锻造温度和锻造道次,各试样的锻造工艺参数如表 2 所示。锻造温度分别选为 880、920、960 ℃,锻造道次分别选为 2、5、8,模具预热温度和每道次变形量均保持不变,多向锻造后各试样照片如图 2 所示。可见,多向锻造后各试样外形无明显区别。

表 1 试样化学成分
Table 1 Chemical composition of the specimens

Al	Zr	Mo	Nb	Fe	Si	其它	Ti
6.04	2.08	0.98	3.03	0.04	0.02	<0.15	Bal.

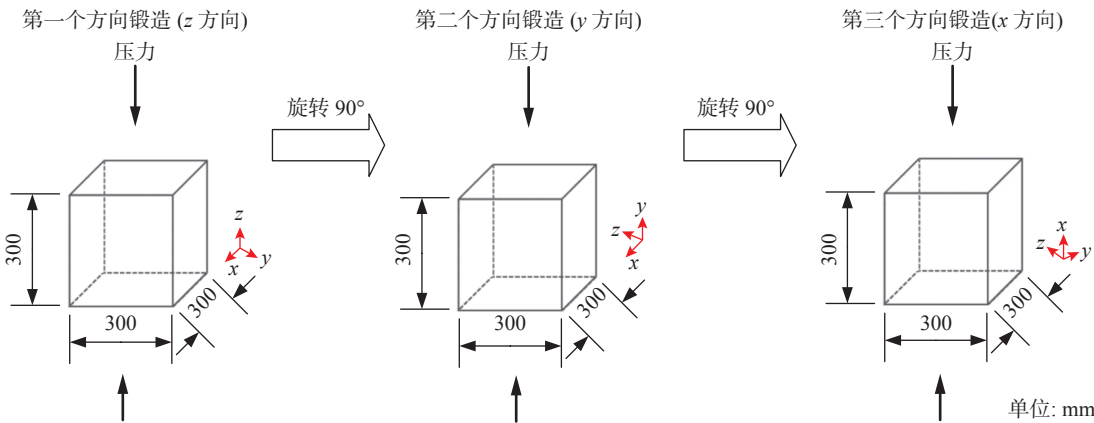


图 1 试样多向锻造的每道次锻造过程
Fig. 1 Each forging process of multi direction forging

表2 试样多向锻造工艺参数

Table 2 Technological parameters of multi-directional forging of samples

试样编号	锻造温度/℃	锻造道次	模具预热温度/℃	每道次变形量/%
1 [#] 试样	880	5	300	25
2 [#] 试样	920	5	300	25
3 [#] 试样	960	5	300	25
4 [#] 试样	920	2	300	25
5 [#] 试样	920	8	300	25

1.2 试验方法

用线切割方法在试样中部切取方形金相试样

(尺寸 30 mm×20 mm×10 mm), 金相腐蚀剂为 13 mLHF、26 mLHNO₃ 和 100 mLH₂O 混合溶液。金相组织观察用 KEYENCE 金相显微镜和 EVO18 扫描电子显微镜进行观察。

用线切割方法在试样中部切取 3 个拉伸样(具体尺寸见图 3)。在室温条件下进行拉伸试验, 试验机型号为 QX-W550 微机控制电子万能试验机, 采用的拉伸速度为 1 mm/min, 拉伸断口的观察和拍照在 EVO18 扫描电子显微镜上进行。试样力学性能测试值为 3 个不同位置取样的拉伸样测试值的算术平均值。

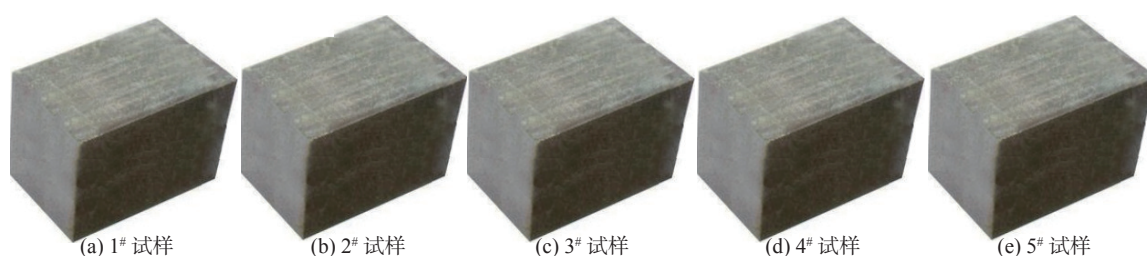


图2 多向锻造后的试样照片

Fig. 2 Specimens' photos after multi direction forging

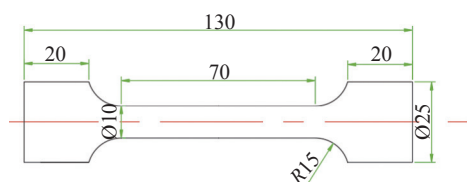


图3 拉伸样尺寸(单位:mm)

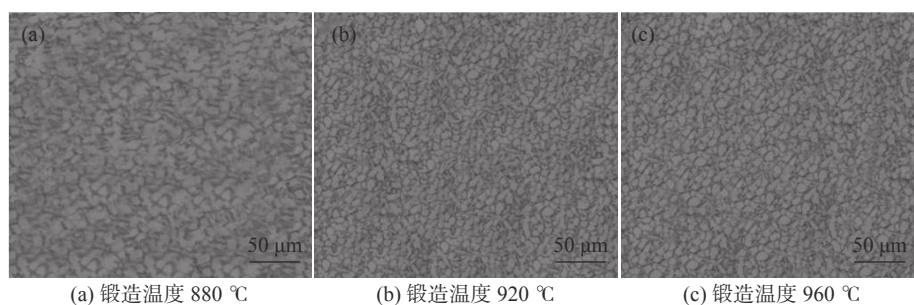
Fig. 3 Size of the tensile specimens

在试样中间位置以线切割方式切取圆形磨损试样(尺寸 $\varnothing 30$ mm×15 mm)。在室温条件下进行磨损试验, 试验机型号为 HT-1000 型摩擦磨损试验机, 对磨材料选用 45 号钢材, 磨轮转速设置为 1 000 r/min、摩擦磨损时间设定为 20 min、相对滑动速度设置为 90 mm/min。

2 试验结果及讨论

2.1 显微组织

图 4 和图 5 是采用不同锻造温度多向锻造的汽车制造用 Ti80 钛合金试样的显微组织金相照片和扫描电镜(SEM)照片。从图 4 和图 5 可以看出, 锻造温度对多向锻造试样内部的组织产生明显影响。随锻造温度从 880 ℃ 升高到 960 ℃, 多向锻造试样内部组织先变细后变粗, 当锻造温度 920 ℃ 时, 多向锻造试样内部的组织晶粒最细小、组织分布最均匀。多向锻造试样内部晶粒呈现出较为明显的等轴组织, 第二相分布呈网状结构分布。



(a) 锻造温度 880 ℃

(b) 锻造温度 920 ℃

(c) 锻造温度 960 ℃

图4 不同锻造温度试样显微组织金相照片

Fig. 4 Metallographic photographs of the specimens' microstructure at various forging temperatures

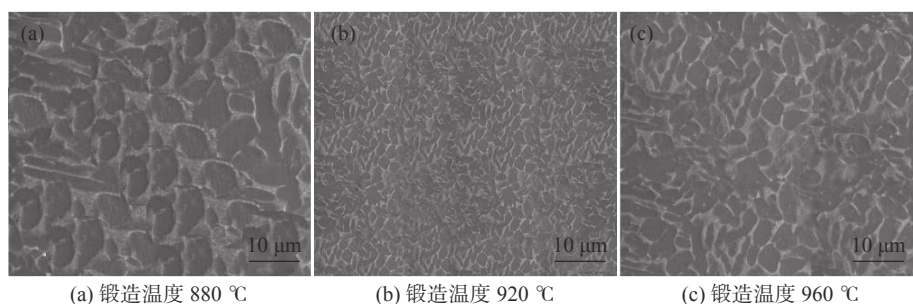


图 5 不同锻造温度试样显微组织 SEM 照片

Fig. 5 SEM photos of the specimens' microstructure at various forging temperatures

图 6 和图 7 是采用不同锻造道次多向锻造的汽车制造用 Ti80 钛合金试样的显微组织金相照片和扫描电镜(SEM)照片。从图 6 和图 7 可以看出, 锻造道次对多向锻造试样内部的组织产生明显影响。

随锻造道次从 2 增加到 8, 多向锻造试样内部组织先变细后变粗, 当锻造道次为 5 时, 多向锻造试样内部的组织晶粒最细小、组织分布均匀性最好, 试样内部第二相的网状结构分布最完整, 呈连续网状分布。

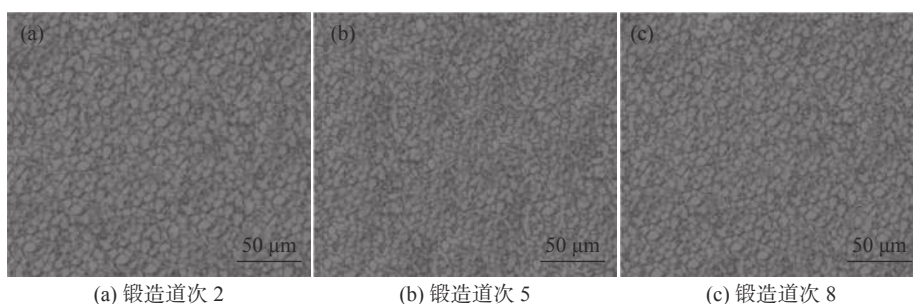


图 6 不同锻造道次试样显微组织金相照片

Fig. 6 Metallographic photographs of the specimens' microstructure at various forging passes

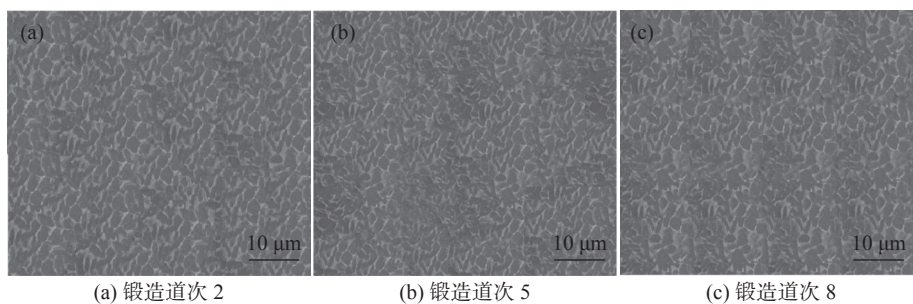


图 7 不同锻造道次试样显微组织 SEM 照片

Fig. 7 SEM photos of the specimens' microstructure at various forging passes

2.2 力学性能

采用不同锻造温度多向锻造的汽车制造用 Ti80 钛合金试样的力学性能测试数据见表 3。从表 3 可知, 锻造温度对多向锻造试样的力学性能产生较为显著的影响。当锻造温度从 880 °C 升高到 960 °C 时, 试样抗拉强度和屈服强度先增大后减小、断后伸长率和断面收缩率先小幅度减小后小幅度增大。在其它工艺参数不变的情况下, 当锻造温度 880 °C 时试样力学性能最差; 当锻造温度为 920 °C 时力学性能最佳。与锻造温度 880 °C 相比, 锻造温

度为 920 °C 时试样的抗拉强度增大 38 MPa、屈服强度增大 36 MPa、断后伸长率减小 0.9 个百分点、断面收缩率减小 1.3 个百分点。选择恰当的锻造温度有助于提高多向锻造试样的力学性能。

采用不同锻造道次多向锻造的汽车制造用 Ti80 钛合金试样的力学性能测试数据见表 4。从表 4 可知, 锻造道次对多向锻造试样的力学性能产生较为显著的影响。当锻造道次从 2 增加到 8 时, 试样抗拉强度和屈服强度先增大后减小、断后伸长率和断面收缩率先小幅度减小后小幅度增大。在其

它工艺参数不变的情况下,当锻造道次为 2 时,试样力学性能最差;当锻造道次为 5 时,力学性能最佳。与锻造道次为 2 相比,锻造道次为 5 时试样的抗拉强度增大 29 MPa、屈服强度增大 24 MPa、断后伸长率减小 0.7 个百分点、断面收缩率减小 0.8 个百分点。锻造道次并非越多越好,选择恰当的锻造道次有利于改善多向锻造试样的力学性能。

表 3 不同锻造温度试样力学性能

Table 3 Mechanical properties of the specimens at various forging temperatures

锻造温度 /℃	抗拉强度 /MPa	屈服强度 /MPa	断后伸长率 /%	断面收缩率 /%
880	934	856	22.7	54.9
920	976	892	21.8	53.6
960	955	884	22.4	54.2

表 4 不同锻造道次试样力学性能

Table 4 Mechanical properties of the specimens at various forging passes

锻造道次	抗拉强度/MPa	屈服强度/MPa	断后伸长率/%	断面收缩率/%
2	947	868	22.5	54.4
5	976	892	21.8	53.6
8	963	886	22.2	54.1

图 8 是不同工艺多向锻造汽车制造用 Ti80 钛合金试样室温拉伸试验后拉伸断口形貌的扫描电镜 (SEM) 照片。从图 8 可以看出,多向锻造试样的拉伸断口均由韧窝和撕裂棱组成,均表现出比较明显的韧性断裂特征。但是与其它工艺参数相比,采用锻造温度 920 ℃、锻造道次 5(图 8(b), 2[#]试样)时,试样拉伸断口中韧窝更加细小,展现出更加优异的拉伸性能。

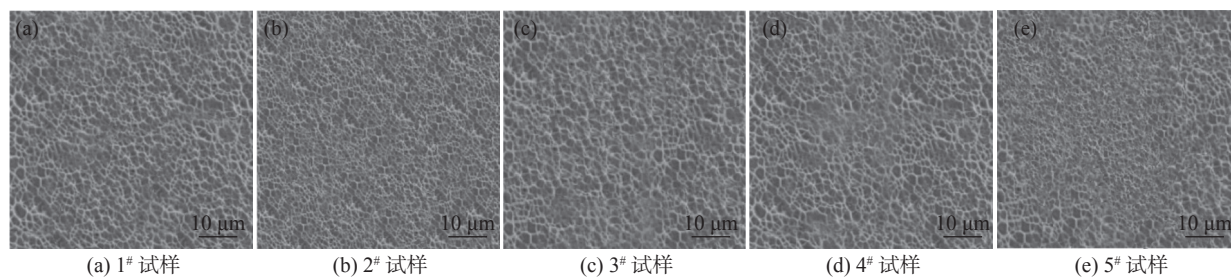


图 8 试样拉伸断口 SEM 照片

Fig. 8 SEM photos of the specimens' tensile fracture

2.3 耐磨损性能

采用不同锻造温度多向锻造的汽车制造用 Ti80 钛合金试样在室温条件下的磨损试验结果见表 5。从表 5 可知,锻造温度对试样磨损体积产生较为明显的影响。当锻造温度从 880 ℃ 升高到 960 ℃ 时,试样磨损体积先减小后增大、试样耐磨损性能先提高后下降。在其它工艺参数不变的情况下,当锻造温度 880 ℃ 时,试样磨损体积最大、耐磨损性能最差;当锻造温度 920 ℃ 时,试样磨损体积最小、耐磨损性能最佳。与锻造温度 880 ℃ 相比,锻造温度 920 ℃ 时试样磨损 15 min 后磨损体积从 $21 \times 10^{-3} \text{ mm}^3$ 减小到 $7 \times 10^{-3} \text{ mm}^3$,减小了 $14 \times 10^{-3} \text{ mm}^3$,锻造温度升高到 920 ℃ 时显著提高了多向锻造试样的耐磨损性能。

采用不同锻造道次多向锻造的汽车制造用 Ti80 钛合金试样在室温条件下的磨损试验结果见表 6。从表 6 可知,锻造道次对多向锻造试样的耐磨损性能也产生较为明显的影响。当锻造道次从 2

增加到 8 时,试样磨损体积先减小后增大、试样耐磨损性能先提高后下降。在其它工艺参数不变的情况下,当锻造道次为 2 时,试样磨损体积最大、耐磨损性能最差;当锻造道次为 5 时,试样磨损体积最小、耐磨损性能最佳。与锻造道次为 2 相比,锻造道次为 5 时,试样磨损体积从 $9 \times 10^{-3} \text{ mm}^3$ 减小到 $7 \times 10^{-3} \text{ mm}^3$,减小了 $2 \times 10^{-3} \text{ mm}^3$ 。但是锻造道次并非越多越好,选择恰当的锻造道次可以有效改善多向锻造试样的耐磨损性能。

表 5 不同锻造温度试样耐磨损性能测试结果

Table 5 Mechanical properties of the specimens at various forging temperatures

锻造温度 /℃	磨损体积 $\times 10^3 / \text{mm}^3$			
	磨损 0 min	磨损 5 min	磨损 10 min	磨损 15 min
880	0	6	13	21
920	0	3	5	7
960	0	4	7	9

表 6 不同锻造道次试样耐磨性能测试结果

Table 6 Mechanical properties of the specimens at various forging passes

锻造道次	磨损体积 $\times 10^3/\text{mm}^3$			
	磨损0 min	磨损5 min	磨损10 min	磨损15 min
2	0	4	7	9
5	0	3	5	7
8	0	5	11	15

3 结论

1) 锻造温度和锻造道次对多向锻造汽车制造用 Ti80 钛合金显微组织、力学性能和耐磨损性能均产生明显影响, 随锻造温度从 880 °C 升高到 960 °C、锻造道次从 2 增加到 8, 多向锻造试样的组织先细化后粗化、力学性能和耐磨损性能均先提高

后下降。

2) 当锻造温度 920 °C、锻造道次 5 时, 多向锻造汽车制造用 Ti80 钛合金试样晶粒最细小、第二相呈连续网状分布, 试样力学性能和耐磨损性能最佳。

3) 与锻造温度 880 °C 相比, 锻造温度 920 °C 时多向锻造汽车制造用 Ti80 钛合金试样抗拉强度增大 38 MPa、屈服强度增大 36 MPa、断后伸长率减小 0.9 个百分点、断面收缩率减小 1.3 个百分点、磨损 15 min 后磨损体积减小 $14 \times 10^{-3} \text{ mm}^3$ 。

4) 与锻造道次为 2 相比, 锻造道次为 5 时多向锻造汽车制造用 Ti80 钛合金试样抗拉强度增大 29 MPa、屈服强度增大 24 MPa、断后伸长率减小 0.7 个百分点、断面收缩率减小 0.8 个百分点、磨损 15 min 后磨损体积减小 $2 \times 10^{-3} \text{ mm}^3$ 。

参考文献

- [1] Gan Wei, Xiang Junfeng, Huang Fang. Effect of forging temperature on properties of new titanium alloys for automobiles[J]. Ordnance Material Science and Engineering, 2019, 42(5): 70–73.
(甘伟, 项俊峰, 黄芳. 锻造温度对汽车用新型钛合金性能的影响[J]. 兵器材料科学与工程, 2019, 42(5): 70–73.)
- [2] Song Wei. Optimization of casting process for automobile titanium alloy air valves[J]. Hot Working Technology, 2018, 47(7): 102–104, 111.
(宋伟. 汽车钛合金气阀的铸造工艺优化[J]. 热加工工艺, 2018, 47(7): 102–104, 111.)
- [3] Zhao Fuli, Wang Yongjiang. Effect of friction stir processing on properties of titanium alloy for automobile[J]. Iron Steel Vanadium Titanium, 2018, 39(3): 59–62.
(赵福利, 汪永江. 搅拌摩擦加工对汽车用钛合金性能的影响[J]. 钢铁钒钛, 2018, 39(3): 59–62.)
- [4] Zhou Yuqing, Zhang Xiang. Optimization on forging temperature of new titanium alloy for mechanical fasteners[J]. Forging & Stamping Technology, 2020, 45(1): 35–40.
(周渝庆, 张祥. 机械紧固件用新型钛合金的锻造温度优化[J]. 锻压技术, 2020, 45(1): 35–40.)
- [5] Zhang Bin. Effects of sintering process on properties of titanium alloy auto parts[J]. Iron Steel Vanadium Titanium, 2017, 38(4): 53–57.
(张斌. 烧结工艺对钛合金汽车零件性能的影响[J]. 钢铁钒钛, 2017, 38(4): 53–57.)
- [6] Zhang Huifang. Preparation of Mo alloy coating on titanium alloy used in cars by double glow plasma alloying process and its friction and wear performance[J]. Materials Protection, 2017, 50(6): 88–90.
(张慧芳. 汽车用钛合金表面双辉等离子 Mo 合金化层的制备及其摩擦磨损性能[J]. 材料保护, 2017, 50(6): 88–90.)
- [7] Zhou Xiaohu, Liu Wei, Hao Fang, et al. Influence of quasi- β forging process on microstructure and properties of TC21 titanium alloy large forgings[J]. Forging & Stamping Technology, 2020, 45(6): 29–34, 44.
(周晓虎, 刘卫, 郝芳, 等. 准 β 锻造工艺对 TC21 钛合金大型锻件组织及性能的影响[J]. 锻压技术, 2020, 45(6): 29–34, 44.)
- [8] Zhang Zhixiong, Wang Tao, Lin Peng, et al. Recent advances on multi-directional forging of titanium alloy[J]. Journal of Plasticity Engineering, 2020, 27(8): 1–9.
(张志雄, 王涛, 林鹏, 等. 钛合金多向锻造工艺研究进展[J]. 塑性工程学报, 2020, 27(8): 1–9.)
- [9] Zhang Weihua, Zhu Qingfeng, Yu Jie, et al. Effect of final forging temperature on microstructure and hardness of multi-directional forged high purity copper[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2020, 30(6): 1307–1316.
(张伟华, 朱庆丰, 余杰, 等. 终锻温度对多向锻造高纯铜组织及硬度的影响[J]. 中国有色金属学报, 2020, 30(6): 1307–1316.)
- [10] Lan Xixin, Ouyang Delai, Chen Tongcai, et al. Effect of multi-directional forging on spheroidization of $\alpha+\beta$ lamellar structure of TC21 titanium alloy[J]. Journal of Plasticity Engineering, 2020, 27(12): 24–29.
(蓝希鑫, 欧阳德来, 陈同彩, 等. 多向锻造对 TC21 钛合金 $\alpha+\beta$ 片层组织球化的影响[J]. 塑性工程学报, 2020, 27(12): 24–29.)