

高频感应加热对 TC4 钛合金组织和硬度的影响

高湛翔¹, 徐丹¹, 李江¹, 简仕超¹, 黄翰一¹, 刘文广¹, 万明攀^{1,2}

(1. 贵州大学, 贵州 贵阳 550025)

(2. 贵州省材料结构与强度重点实验室, 贵州 贵阳 550025)

摘要: TC4 钛合金经高频感应加热 1.4、1.5、1.6 s 后水冷, 然后分别在 350、400、450 °C 时效处理 6 h。采用光学显微镜、显微硬度计研究感应加热淬火及时效处理对显微组织和硬度的影响。结果表明, TC4 钛合金经感应加热淬火处理后可获得呈梯度分布的显微组织, 表层组织以马氏体 α' 相为主, 心部组织为原始双态组织。时效处理后 TC4 钛合金显微硬度从表层到心部递减, 呈梯度分布。随着时效温度降低, 显微硬度增加, 强化效果提升。此外, 随着感应加热时间的增加, TC4 钛合金时效处理后的显微硬度也有所增加。

关键词: 感应加热; TC4 钛合金; 梯度组织; 显微硬度

中图分类号: TG146.23

文献标识码: A

文章编号: 1009-9964(2022)04-016-05

Effect of High-frequency Induction Heating on Microstructure and Hardness of TC4 Titanium Alloy

Gao Zhanxiang¹, Xu Dan¹, Li Jiang¹, Jian Shichao¹, Huang Hanyi¹, Liu Wenguang¹, Wan Mingpan^{1,2}

(1. Guizhou University, Guiyang 550025, China)

(2. Key Laboratory of Guizhou Material Structure and Strength, Guiyang 550025, China)

Abstract: The microstructure and hardness of TC4 titanium alloy after high-frequency induction heating and quenching for 1.4, 1.5 and 1.6 s plus aging treatment at 350, 400 and 450 °C for 6 h were investigated using optical microscope and micro-hardness instrument. The results show that the microstructure with gradient distribution can be obtained after appropriate induction heating treatment, and the core structure is original duplex structure, therefore the surface structure mainly contains martensite α' phase. After aging treatment, the microhardness of TC4 titanium alloy presents gradient distribution, and gradually decreases from the surface to the core. The microhardness of TC4 titanium alloy after aging treatment increases as the decrease of aging temperature, and the strengthening effect is obvious. Moreover, the increase in the microhardness of TC4 titanium alloy after aging treatment increases with the increase of the induction heating treatment time.

Key words: induction heating; TC4 titanium alloy; gradient microstructure; microhardness

钛合金具有比强度高、密度低、耐腐蚀、耐高温等优良性能, 是新兴的结构和功能材料^[1-3]。TC4 钛合金是目前用量最大、应用范围最广的一种 $\alpha + \beta$ 型两相钛合金, 主要应用于航空航天、舰船和医疗等领域^[4,5]。但钛合金也存在一些不足, 如工艺性能

差、硬度低、耐磨性能较差, 影响了钛合金工件的安全性与可靠性^[6,7]。针对钛合金硬度低、耐磨损性差等问题, 国内外众多学者进行了大量研究。罗军明等^[8]首先采用喷丸处理在 TC4 钛合金表面制备强化过渡层, 再采用微弧氧化技术对纳米晶过渡层进行微结构重构, 有效提高了其表面硬度。宋振华等^[9]利用添加氧化镧的固体渗硼剂对 TC4 钛合金进行渗硼处理, 获得了均匀致密、硬度优良的渗层组织。李金龙等^[10]采用等离子体增强磁控溅射系统, 在 TC4 钛合金表面沉积 CrN 单层和疏密交替的 CrN

收稿日期: 2022-06-16

基金项目: 国家自然科学基金项目(12065005); 贵州大学大学生创新创业训练计划项目(S202010657044); 贵州省科技支撑计划项目([2020]2Y021)

通信作者: 万明攀(1982—), 男, 教授。

多层涂层,有效提高了合金的硬度和耐磨性。以上硬化方法都是通过改变钛合金表层的化学成分进而获得硬化层。

采用高频感应加热处理进行表面改性是提高钢铁材料表面硬度行之有效的技术手段之一。高频感应加热具有升温速度快、氧化少、脱碳轻微、无需气体保护、无保温过程、操作简便、电能利用率高、节能环保等特点,广泛应用于金属材料的快速加热处理。孙浩等^[11]利用电磁感应加热制备的 AZ80-0.2Y 镁合金半固态坯料较传统等温处理法制备的坯料晶粒更为细小,成形能力也更佳。姜雁斌等^[12]利用感应加热连续退火方法对加工态铜包铝复合线材进行软化处理,使 Cu 层和 Al 芯快速升温至其再结晶温度,直接快速冷却,从而使 Cu 层和 Al 芯的再结晶晶粒细化,明显提高了两者晶粒尺寸的均匀性。

本研究采用高频感应加热对 TC4 钛合金进行快速加热淬火处理,然后在不同温度下进行时效处理,研究 TC4 钛合金在高频感应加热淬火和时效处理过程中的组织演变规律,以及对合金显微硬度的影响,以期对 TC4 钛合金的表面硬化处理提供新思路,为拓宽钛合金的应用奠定理论基础。

1 实验

实验材料为西部钛业有限责任公司利用真空自耗电弧炉 3 次熔炼的 TC4 钛合金铸锭。铸锭经开坯、锻造处理得到厚度为 65 mm 板材。板材原始组织(图 1)由粒径为 8~20 μm 的等轴 α 相(α_p)和 β 转变组织构成,为典型的双态组织。原始组织中等轴 α 相占比约为 38%。

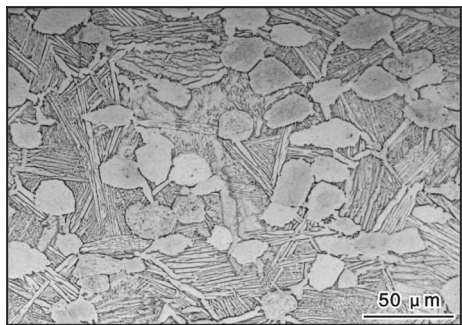


图 1 TC4 钛合金的原始组织

Fig. 1 Original microstructure of TC4 titanium alloy

从 TC4 钛合金板材上截取 $\phi 10 \text{ mm} \times 19 \text{ mm}$ 的圆柱试样。将 TC4 钛合金试样置于 SYG-10AB 型高频感应加热设备(最大加热功率为 10 kW)的感应线圈内进

行淬火处理,加热频率为 600~1100 kHz,加热功率为 2.9 kW,加热电流为 25.8 A,加热时间分别为 1.4、1.5、1.6 s,冷却方式为水冷。将试样转移到预先设置好温度的 OTF-1200X 型管式真空炉内进行时效处理,时效温度分别为 350、400、450 $^{\circ}\text{C}$,保温时间均为 6 h,同时通入氩气保护。将圆柱试样从中部截断,用环氧树脂镶嵌,再用 SiC 金相砂纸逐级打磨,采用配比为 $V(\text{HF}):V(\text{HNO}_3):V(\text{H}_2\text{O}) = 1:3:7$ 的腐蚀剂浸蚀。采用 Leica DMI 5000M 光学显微镜进行显微组织观察。利用 HVS-1000 维氏硬度计测量试样显微硬度,加载载荷为 0.9 N,加载时间为 10 s,测量点间距离为 0.2 mm。

2 结果与讨论

2.1 显微组织

图 2 为 TC4 钛合金经高频感应加热 1.4、1.5、1.6 s 淬火后的显微组织。从图 2 可以看出,经高频感应加热不同时间淬火后,TC4 钛合金显微组织中的等轴 α 相数量从心部到表层逐渐减少,形成了一种梯度组织;随着加热时间的增加,梯度转变层的厚度逐渐增大,在感应加热时间为 1.6 s 时厚度达到 4.5 mm,如图 3 所示。TC4 钛合金感应加热不同时间淬火后,表层和心部显微组织如图 4 所示,等轴 α 相体积分数如图 5 所示。从图 4、图 5 可以看出,TC4 钛合金感应加热时间为 1.4 s 时,心部与表层组织差异较大,表层等轴 α 相体积分数为 14.82%,基体为马氏体 α' 相,而心部等轴 α 相体积分数为 23.4%;感应加热时间为 1.5 s 时,表层等轴 α 相明显减少,体积分数仅为 5.8%,马氏体 α' 相占比增加,心部等轴 α 相体积分数也有所下降,约为 20.9%;而感应加热时间为 1.6 s 时,表层等轴 α 相全部转变为马氏体 α' 相,心部等轴 α 相体积分数因加热时间的增加而进一步降低,约为 10.1%。

TC4 钛合金试样置于感应线圈中加热时,由于集肤效应会使试样中的感应电流分布不均匀,从而引起试样中每一部分的发热量不均匀。在感应加热过程中,靠近表面的大量电能转换为热能,试样表面温度越来越高,当表面温度超过合金的 β 转变温度时, α 相逐渐转变为 β 相。当感应加热 1.4 s 时,从合金的显微组织可以推断此时的表面温度已经超过 β 转变温度,但由于时间短,等轴 α 相未能全部转变为 β 相,在随后的冷却过程中 β 相转变为马氏

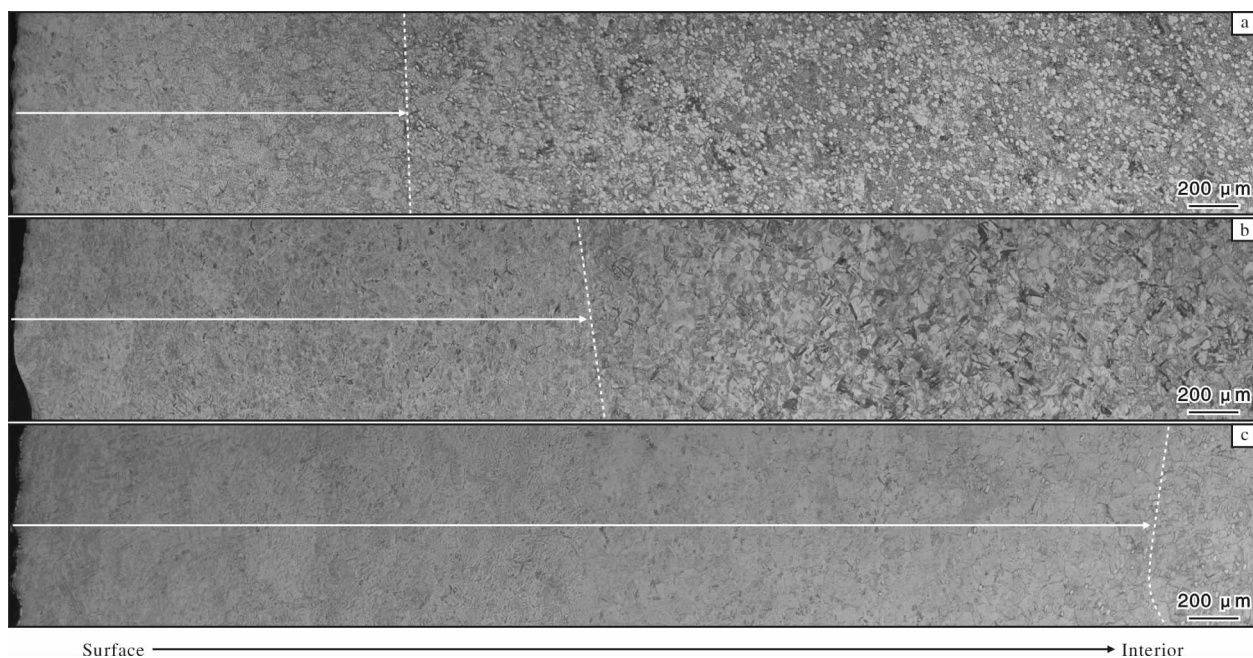


图2 TC4钛合金感应加热不同时间淬火后的显微组织

Fig. 2 Microstructures of TC4 titanium alloy after induction heating and quenching for different time: (a) 1.4 s; (b) 1.5 s; (c) 1.6 s

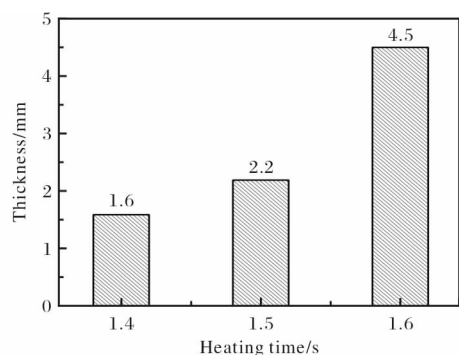


图3 TC4钛合金感应加热不同时间淬火后的梯度层厚度

Fig. 3 Thickness of gradient layer of TC4 titanium alloy after induction heating and quenching for different time

体 α' 相,而等轴 α 相不变,保留高温时的形态。感应加热时间延长至1.5 s,TC4钛合金显微组织中的细针状马氏体更长,这是由于加热时间延长,等轴 α 相含量减少, β 晶粒长大粗化所致。感应加热时间延长至1.6 s,试样表层温度会更高, β 晶粒进一步粗化,导致其淬火产物马氏体 α' 相更粗大。而试样心部的电流小,产生的热量少。心部温度上升主要靠表层热量的传导,若加热时间很短,心部温度难以超过 β 相转变温度,快速冷却后心部显微组织变化不大。随着加热时间的延长,表面传至内部的热量也增加,心部温度快速升高,导致心部更多的等

轴 α 相发生转变。

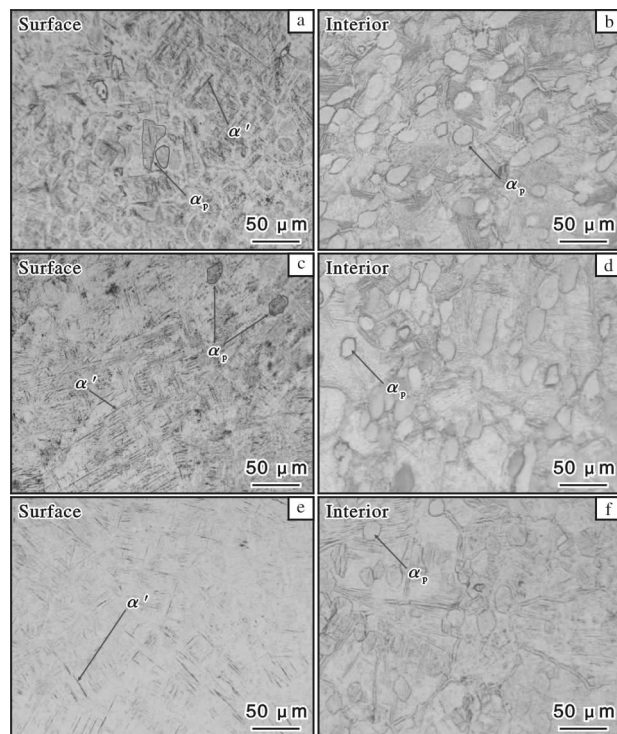


图4 TC4钛合金感应加热不同时间淬火后表层和心部的显微组织

Fig. 4 Microstructures of surface and interior of TC4 titanium alloy after induction heating and quenching for different time: (a, b) 1.4 s; (c, d) 1.5 s; (e, f) 1.6 s

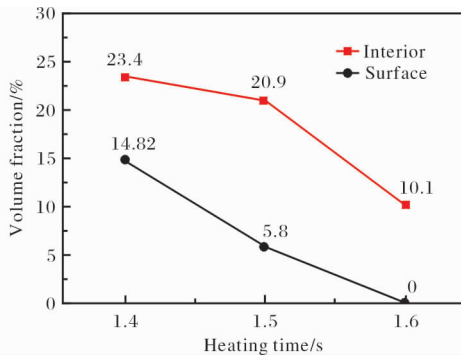


图5 感应加热时间对 TC4 钛合金显微组织中等轴 α 相体积分数的影响

Fig. 5 Effect of induction heating time on volume fraction of equiaxed α phase in TC4 titanium alloy microstructure

图6为TC4钛合金经高频感应加热1.5s淬火后再经350、400、450℃时效处理6h后的显微组织。从图6可以看出，时效温度从350℃增加到450℃，显微组织中等轴 α 相晶粒尺寸以及体积分数几乎没有变化，说明在350~450℃温度区间内进行时效时，时效温度对等轴 α 相的影响很小，等轴 α 相的

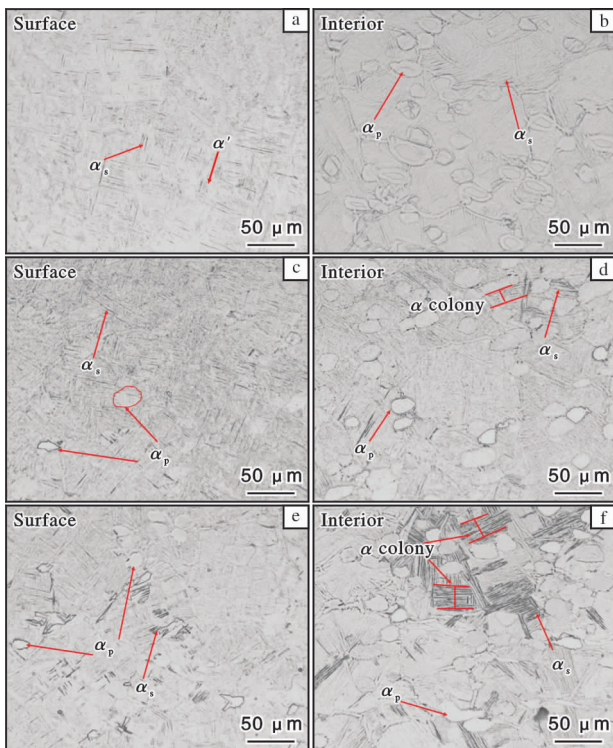


图6 TC4钛合金感应加热淬火处理($t=1.5$ s)后再经不同温度时效后的显微组织

Fig. 6 Microstructures of TC4 titanium alloy after induction heating and quenching for 1.5 s plus aging at different temperatures: (a, b) 350 °C; (c, d) 400 °C; (e, f) 450 °C

形态及体积分数主要由高频感应加热决定。TC4钛合金淬火形成的马氏体 α' 相在热力学上是不稳定的，时效加热时会发生分解，最终形成平衡状态的 $\alpha+\beta$ 组织。不同的时效温度下，基体析出的次生 α 相(α_s)尺寸和数量明显不同。在350℃时效时温度偏低，马氏体 α' 相在时效过程中缺乏分解的驱动力，分解不明显，所以时效处理后的显微组织由少量细针状的次生 α 相和大量未分解的 α' 相组成(图6a、6b)。随着时效温度增加到400℃和450℃，组织中的 α' 相分解出的次生 α 相逐渐增多且变得粗大(图6c~6f)。在较高温度时效时，充足的能量使得原子既具有一定扩散力，又有一定驱动力，能有效克服形核势垒，利于 α 相的形核及长大。另外，随着时效温度的增加，TC4钛合金第二相析出量不断增加的同时析出相也进入了长大阶段，且析出相向界面自由能最小方向生长，导致次生 α 相的厚度随时效温度的提高而增加。

2.2 显微硬度

经高频感应加热不同时间淬火及不同温度时效6h后，TC4钛合金表层到心部的显微硬度分布如图7所示。从图7可以看出，TC4钛合金显微硬度由表层到心部逐渐降低，呈明显的梯度分布。这是由于集肤效应使得TC4钛合金电流密度从表层到心部逐渐减小而形成温度梯度，表层升温速度快，超过 β 转变温度，从而在接下来的淬火过程中形成马氏体 α' 相，在时效过程中能够形成细片状的 α 相，得到进一步强化；而心部升温速度慢，加热过程中等轴 α 相没有完全溶解到 β 相中，在冷却过程中没有形成过饱和固溶体 α' 相或形成的 α' 相数量非常少，因此后期时效处理时的强化作用不明显。随着时效温度升高，TC4钛合金表层到心部的显微硬度整体降低。这是由于TC4钛合金在高频感应加热快速冷却后表层获得了马氏体 α' 相，在时效处理过程中会分解出细小的 α 相，随着时效温度的升高使得细片状 α 相尺寸逐渐增大，同时 α/β 相界面所占整个组织的体积分数会下降，而 α/β 相界面是钛合金中位错运动的主要障碍^[13]，所以位错运动的障碍减小，在外力作用下位错易于运动，表现出硬度下降。随着感应加热时间的增加，相同时效温度下TC4钛合金的显微硬度也有增加趋势。这由于感应加热时间增加，超过 β 转变温度的加热层就越厚，同时表层温度也会越高，在随后的快速冷却过程中冻结更高浓度的空位^[14]，提升时效时 α 相的形核率，促使更细

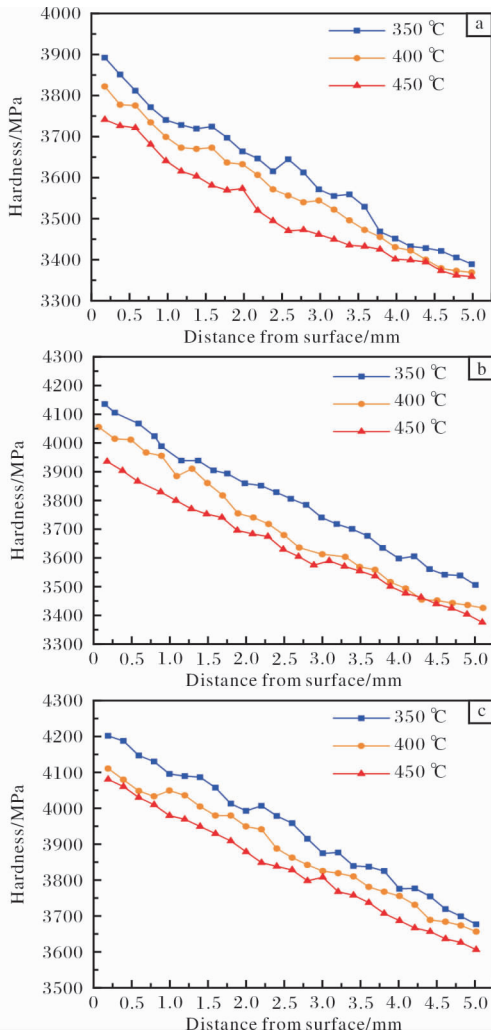


图7 TC4钛合金感应加热不同时间淬火及不同温度时效后的显微硬度

Fig. 7 microhardness of TC4 titanium alloy after induction heating and quenching for different time and aging treatment at different temperatures; (a) 1.4 s; (b) 1.5 s; (c) 1.6 s

小 α 相的析出,有效强化基体。由此可见,通过高频感应加热淬火可以使TC4钛合金获得表面硬度高而心部硬度低的梯度组织,从而赋予合金不同的性能。

3 结论

(1) 高频感应加热淬火后,TC4钛合金可获得表层组织以马氏体 α' 相为主、心部为原始双态组织的梯度组织;梯度组织的厚度随感应加热时间的增加而增加。

(2) 经高频感应加热淬火+时效处理后,TC4钛合金试样的显微硬度从表层到心部呈梯度分布;

随感应加热时间的增加,显微硬度有所增大;随着时效温度的升高,显微硬度呈下降趋势。

参考文献 References

- [1] 吴迪鹏,武永,陈明和,等. TC31钛合金板材高温流变行为及组织演变研究[J]. 稀有金属材料与工程, 2019, 48(12): 3901-3910.
- [2] Cui C X, Hu B M, Zhao L C, et al. Titanium alloy production technology, market prospects and industry development [J]. Materials & Design, 2011, 32(3): 1684-1691.
- [3] Zou Z Y, Simonelli M, Katrib J, et al. Refinement of the grain structure of additive manufactured titanium alloys via epitaxial recrystallization enabled by rapid heat treatment [J]. Scripta Materialia, 2020, 180: 66-70.
- [4] 韩明臣,倪沛彤,谢翀博,等. 大口径TC4钛合金管材的挤压组织与性能[J]. 钛工业进展, 2014, 31(5): 19-22.
- [5] 汪波,曾卫东,彭雯雯. 不同锻造工艺对TC4钛合金棒材显微组织与力学性能的影响[J]. 钛工业进展, 2014, 31(5): 14-18.
- [6] 屠振密,朱永明,李宁,等. 钛及钛合金表面处理技术的应用及发展[J]. 表面技术, 2009, 38(6): 76-78+86.
- [7] 俞树荣,马邦豪,宋伟,等. 微弧氧化对TC4钛合金微动磨损行为的影响[J]. 钛工业进展, 2021, 38(1): 6-12.
- [8] 罗军明,陈宇海,黄俊,等. 喷丸处理和微弧氧化对TC4合金组织和疲劳性能的影响[J]. 中国有色金属学报, 2019, 29(6): 1210-1218.
- [9] 宋振华,戈晓岚,许晓静,等. TC4钛合金固体渗硼催化剂的研究[J]. 稀有金属, 2014, 38(4): 548-553.
- [10] 李金龙,周艳文,张开策,等. TC4钛合金表面涂层改性: CrN素多层[J]. 表面技术, 2021, 50(4): 215-224.
- [11] 孙浩,周明扬,屈晓妮,等. 半固态等温处理与电磁感应加热AZ80-0.2Y镁合金组织的演变[J]. 中国有色金属学报, 2017, 27(10): 1988-1995.
- [12] 姜雁斌,刘新华,王春阳,等. 感应加热连续退火对铜包铝复合线材再结晶组织和界面金属间化合物的影响[J]. 金属学报, 2014, 50(4): 479-488.
- [13] 黄森森,马英杰,张仕林,等. $\alpha+\beta$ 两相钛合金元素再分配行为及其对显微组织和力学性能的影响[J]. 金属学报, 2019, 55(6): 741-750.
- [14] 万明攀,赵永庆,曾卫东,等. 固溶温度对Ti-1300合金组织与性能的影响[J]. 稀有金属材料与工程, 2015, 44(5): 1209-1213.