

DOI: 10.11973/jxgccl202207002

锻造温度对 TA15 钛合金显微组织及抗拉强度各向异性的影响

王 哲¹, 冉 兴^{2,3}, 刘程程⁴, 王 欣⁵

(1. 陕西宏远航空锻造有限责任公司, 咸阳 713801; 2. 清华大学机械工程系, 北京 100084;
3. 中航重机股份有限公司, 贵阳 550005; 4. 北京星航机电装备有限公司, 北京 100074;
5. 中国航发北京航空材料研究院, 北京 100095)

摘要: 在 $(\alpha+\beta)$ 相区对 TA15 钛合金棒进行锻造, 研究了 $t_{\beta}-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $t_{\beta}-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $t_{\beta}-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ (t_{β} 为 β 相变温度) 3 种锻造温度对合金显微组织和抗拉强度各向异性的影响。结果表明: 随着锻造温度降低, TA15 钛合金中初生 α_p 相含量增加, 片层状 α 相含量减少, 厚度和长宽比减小, 抗拉强度提高; TA15 钛合金在 $t_{\beta}-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ 温度锻造后沿流线方向的抗拉强度可达 973 MPa, 3 个方向抗拉强度的极差随锻造温度的降低而减小; TA15 钛合金锻造后的拉伸断口均为韧性断口, 锻造温度越低, 初生 α_p 相含量越高, 断口韧窝越深, 而含有较多较细长片层状 α 相时, 断口韧窝较浅。

关键词: 锻造温度; TA15 钛合金; 显微组织; 抗拉强度; 各向异性

中图分类号: TG146.23 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3738(2022)07-0006-05

Influence of Forging Temperature on Microstructure and Tensile Strength Aeolotropy of TA15 Titanium Alloy

WANG Zhe¹, RAN Xing^{2,3}, LIU Chengcheng⁴, WANG Xin⁵

(1. Shaanxi Hongyuan Aviation Forging Co., Ltd., Xianyang 713801, China;
2. Department of Mechanical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China;
3. AVIC Heavy Machinery Co., Ltd., Guiyang 550005, China;
4. Beijing Xinghang Electro-mechanical Equipment Co., Ltd., Beijing 100074, China;
5. AECC Beijing Institute of Aeronautical Materials, Beijing 100095, China)

Abstract: TA15 titanium alloy bars were forged in $(\alpha+\beta)$ phase region, and the effect of three forging temperatures, namely $t_{\beta}-15\text{ }^{\circ}\text{C}$, $t_{\beta}-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ and $t_{\beta}-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ (t_{β} was β phase transition temperature), on the microstructure and tensile strength aeolotropy of the alloy was investigated. The results show that with the decrease of forging temperature, the content of primary α_p phase in the TA15 titanium alloy increased while that of lamellar α phase decreased, and the thickness and aspect ratio of lamellar α phase decreased; therefore the tensile strength increased. After forging at $T_{\beta}-50\text{ }^{\circ}\text{C}$, the tensile strength along the streamline direction of the TA15 titanium alloy reached 973 MPa. The tensile strength difference in three directions decreased with decreasing forging temperature. The tensile fracture of the forged TA15 titanium alloy was ductile fracture. The lower the forging temperature, the higher the content of primary α_p phase, the deeper the dimples on fractures; when more slender lamellar α phases existed, the fracture dimples were shallower.

Key words: forging temperature; TA15 titanium alloy; microstructure; tensile strength; aeolotropy

收稿日期: 2021-05-19; 修订日期: 2022-06-22

基金项目: 两机重大专项基础研究项目(J2019-VII-002)

作者简介: 王哲(1987-), 男, 陕西咸阳人, 高级工程师, 博士

通信作者: 冉兴研究员

0 引 言

钛合金以其低密度、高比强度以及优异的耐腐蚀性等特点而广泛应用于航空、航天、船舶等领域^[1]。其中, TA15 钛合金是在俄罗斯 BT22 钛合金的基

础上研制的一种高铝当量近 α 型钛合金,该合金兼有 α 型和 $(\alpha+\beta)$ 型钛合金的优点,如良好的热加工性、热强性和焊接性,较高的室温和中温强度,可在 $450\sim 500\text{ }^{\circ}\text{C}$ 长期使用,因此被应用于整体隔框、进气道格栅防护罩和中央翼下壁板等部件^[2-4]。目前,航空用钛合金主要采用锻造为主的成型工艺。钛合金锻件的显微组织与其热加工历史(变形、热处理等)密切相关,近 α 及 $(\alpha+\beta)$ 型钛合金在 $(\alpha+\beta)$ 相区锻造获得的双态组织具有优异的综合性能^[5-6]。近些年,研究人员对 TA15 钛合金热加工后的组织和性能关系进行了深入研究。张旺峰等^[7]研究了热处理工艺对 TA15 钛合金组织和性能的影响;JI 等^[8]研究了不同热工艺条件下 TA15 钛合金三态组织中片层状 α 相的演变规律;WU 等^[9]采用热模拟压缩试验研究了 TA15 钛合金热变形过程中的热变形行为及组织球化过程。

目前,国内外对 TA15 钛合金的研究主要集中在

表 1 TA15 钛合金棒的化学成分

Table 1 Chemical composition of TA15 titanium alloy bar

元素	Al	V	Mo	Zr	C	Fe	Si	O	N	H	Ti
质量分数	6.83	2.26	1.81	2.22	0.006	0.047	0.024	0.11	0.006	0.002 5	余

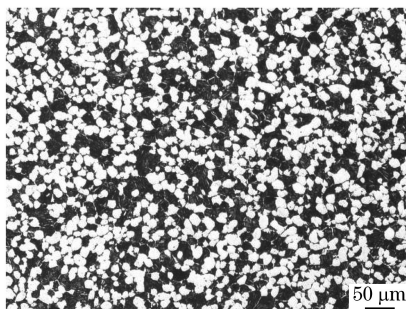


图 1 TA15 钛合金棒的显微组织

Fig. 1 Microstructure of TA15 titanium alloy bar

在陕西宏远航空锻造有限责任公司 16MN 油压机上对 TA15 钛合金棒进行锻造,锻造成厚度为 200 mm 的方坯,锻造加热温度分别为 $t_{\beta}-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $t_{\beta}-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $t_{\beta}-50\text{ }^{\circ}\text{C}$,锻后进行 $850\text{ }^{\circ}\text{C}\times 4\text{ h}$ 热处理,空冷。在钛合金锻件上取样,经去除氧化层、预磨、抛光后,采用 Kroll 试剂(HF 、 HNO_3 、 H_2O 的体积比为 1:2:7)进行腐蚀,使用 Leica DMI 3000M 型光学显微镜观察显微组织。在钛合金锻件上分别沿流线方向、宽度方向和厚度方向截取尺寸为 $\phi 13\text{ mm}\times 71\text{ mm}$ 的标准拉伸试样,标距为 25 mm,在 Instron 3200 型万能试验机上进行拉伸试验,屈服前拉伸速度为 $0.005\text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$,屈服后拉伸速度为 $0.02\text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ 。使用 Tecnai G2 F30S 型

在热压缩模拟试验以及单一方向组织与性能之间的影响关系上,而对该合金不同方向上显微组织与力学性能的相关报道较少。作者通过对 TA15 钛合金棒在 $(\alpha+\beta)$ 相区不同温度下进行锻造,研究了锻造温度对 TA15 钛合金锻件显微组织和抗拉强度各向异性的影响,为该合金获得优异组织和力学性能的热加工工艺制定提供理论依据,从而为该钛合金锻件生产提供指导。

1 试样制备与试验方法

试验材料为 $\phi 300\text{ mm}$ 的 TA15 钛合金棒;该合金棒由 3 次真空自耗电弧熔炼铸锭经 β 相区开坯和 $(\alpha+\beta)$ 相区锻造而成,化学成分见表 1。采用淬火金相法测得该炉批 TA15 钛合金棒的相变温度 t_{β} 为 $998\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。TA15 钛合金棒的显微组织如图 1 所示,可见初生 α_p 相分布于 β 相基体上,初生 α_p 相质量分数约 55%,呈球状或蠕虫状且分布均匀。

扫描电镜(SEM)观察拉伸断口形貌。

2 试验结果与讨论

2.1 对显微组织的影响

TA15 钛合金棒经 $(\alpha+\beta)$ 相区锻造后的显微组织为典型双态组织,主要由球状初生 α_p 相和 β 转变组织组成,3 个方向显微组织差异较小,如图 2(a)所示。由图 2(b)~(d)可以看出:在 $t_{\beta}-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下锻造后,沿流线方向片层状次生 α 相排列整齐,呈棒状分布于 β 相基体上;随着锻造温度降低,片层状 α 相的长度和宽度均减小。

由表 2 可以发现:当锻造温度由 $t_{\beta}-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ 升高到 $t_{\beta}-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,球状初生 α_p 相的质量分数由 45% 降低到 15%,这是因为在较高温度下,部分初生 α_p 相会转变为 β 相。初生 α_p 相含量与片层状 α 相含量成反比,因此随锻造温度升高片层状 α 相含量增加。随着锻造温度降低,片层状 α 相的厚度和长宽比减小。这是因为:在较高温度下锻造变形过程中,大量位错促进 α 相发生动态再结晶,片层状 α 相形核后会迅速长大^[10],因此片层的厚度较大;此外,由于片层状 α 相的厚度方向与 β 相界面为半共格界面,厚度方向的长大速率远小于长度方向,因此

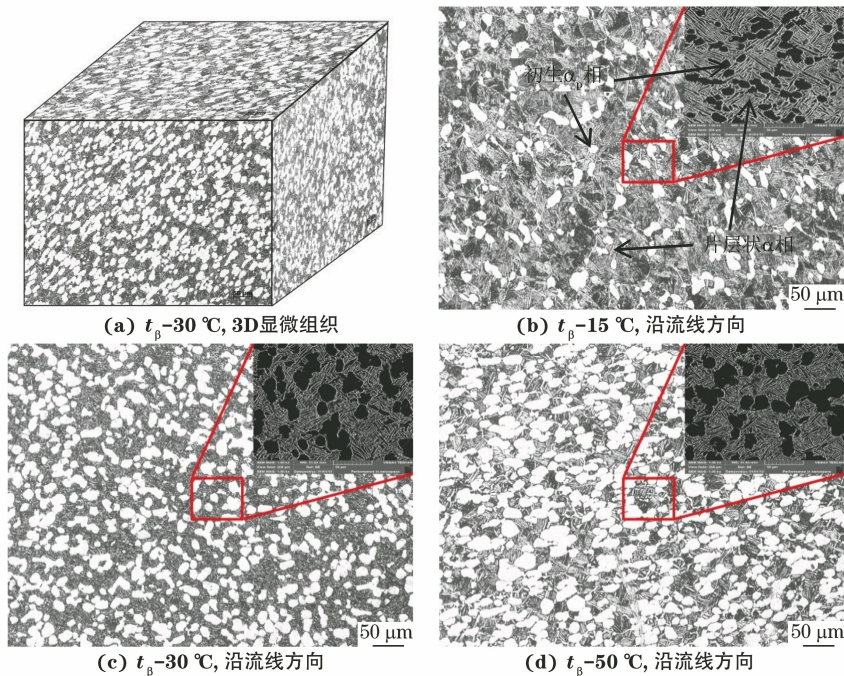


图2 不同温度锻造后 TA15 钛合金的 3D 显微组织及沿流线方向的显微组织

Fig. 2 3D microstructure (a) and microstructures along streamline direction (b-d) of TA15 titanium alloy forged at various temperatures

片层状 α 相的长宽比也较大。

表 2 不同温度锻造后 TA15 钛合金中初生 α_p 相含量和片层状 α 相尺寸

Table 2 Content of primary α_p phase and size of lamellar α phase of TA15 titanium alloy forged at various temperatures

锻造温度	初生 α_p 相质量 分数/%	片层状 α 相尺寸	
		平均厚度/ μm	平均长宽比
$t_{\beta} - 15^{\circ}\text{C}$	15	2.5	7.2
$t_{\beta} - 30^{\circ}\text{C}$	35	1.6	5.0
$t_{\beta} - 50^{\circ}\text{C}$	45	1.3	3.7

2.2 对拉伸性能的影响

由图 3 可以看出,随着锻造温度的升高,TA15 钛合金沿流线方向的抗拉强度和屈服强度均降低。结合表 2 分析可知:随锻造温度升高,初生 α_p 相含

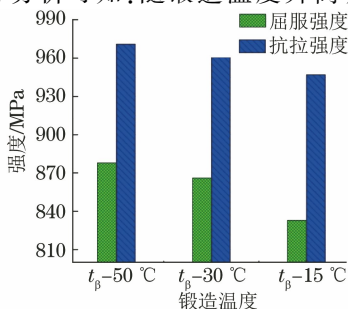


图 3 不同温度锻造后 TA15 钛合金沿流线方向的抗拉强度和屈服强度

Fig. 3 Tensile strength and yield strength along streamline direction of TA15 titanium alloy forged at various temperatures

量减少,相应的片层状 α 相含量增加,并且片层状 α 相的长宽比增大;当位错穿过同一集束尺寸的片层状次生 α 相时,位错的垂直滑移距离缩短,位错塞积程度降低^[11],因此强度降低。此外,在较高温度下锻造后,片层状次生 α 相排列较为整齐,而随着锻造温度降低,次生 α 相排列混乱度增加,起到了弥散强化的作用^[12];在拉伸过程中,位错在滑移过程中所遇到的阻力增强,导致大量位错塞积在弥散的强化相中,因此合金强度增加^[13]。

由图 4 可以看出:随着锻造温度的降低,TA15 钛合金 3 个方向的抗拉强度均增加;在 $t_{\beta} - 15^{\circ}\text{C}$ 和 $t_{\beta} - 30^{\circ}\text{C}$ 下进行锻造,锻件 3 个方向的抗拉强度极差分别为 24, 23 MPa,在 $t_{\beta} - 50^{\circ}\text{C}$ 下锻造后,3 个方向的抗拉强度极差减小到 10 MPa。钛合金的断裂过程与裂纹扩展路径的曲折程度有关,而影响裂纹

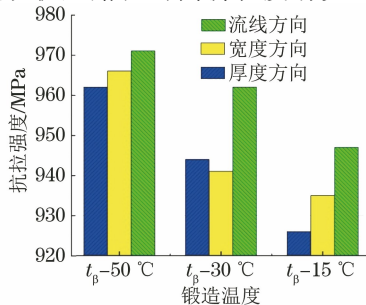


图 4 不同温度锻造后 TA15 钛合金沿不同方向的抗拉强度

Fig. 4 Tensile strength in different directions of TA15 titanium alloy forged at various temperatures

扩展路径的主要因素是 α 相的形态和含量。由于 α/β 相界面的结合能较弱,裂纹通常沿着 α/β 相界面扩展。当裂纹扩展方向与 α/β 相界面保持一致时,裂纹沿 α/β 相界面扩展;而当裂纹扩展方向与 α/β 相界面不一致时,裂纹将产生停滞效应或被迫改变扩展方向,从而消耗更多的能量^[14]。较高温度锻造后合金中大量 α 相以片层状组织形式存在,而片层状 α 相集束的不同取向会阻碍裂纹扩展,裂纹穿越集束边界时改变方向,形成裂纹分叉并萌生二次裂纹,这些过程均需消耗更多的能量。片层 α 相集束由于具有较强的方向性,其断裂过程也存在较强的方向性^[15]。在较低温度下锻造时,TA15钛合金的显微组织中存在大量球状 α_p 相,当裂纹穿过球状 α_p 相时无需改变裂纹扩展方

向,扩展路径不分叉,无需消耗更多能量,因此抗拉强度极差较小^[16]。

2.3 对拉伸断口形貌的影响

TA15钛合金在 $(\alpha+\beta)$ 相区锻造并沿流线方向拉伸后的试样宏观上呈杯锥状形态,断口上存在纤维区、放射区和剪切唇3个区域,如图5(a)所示,试样有明显颈缩现象,表明为韧性断裂。由图5(b)~(d)可知:在 $t_p-50^\circ\text{C}$ 下锻造后,TA15钛合金沿流线方向拉伸后的断口纤维区存在大量较深的等轴状韧窝,表明其在断裂过程中吸收能量较高;而在 $t_p-30^\circ\text{C}$ 和 $t_p-15^\circ\text{C}$ 下锻造后,拉伸断口纤维区虽仍以韧窝为主,但韧窝较浅。结合显微组织分析可知,含有大量球状初生 α_p 相的锻件韧窝较深,而含有较多较细长片层状 α 相的锻件韧窝较浅。

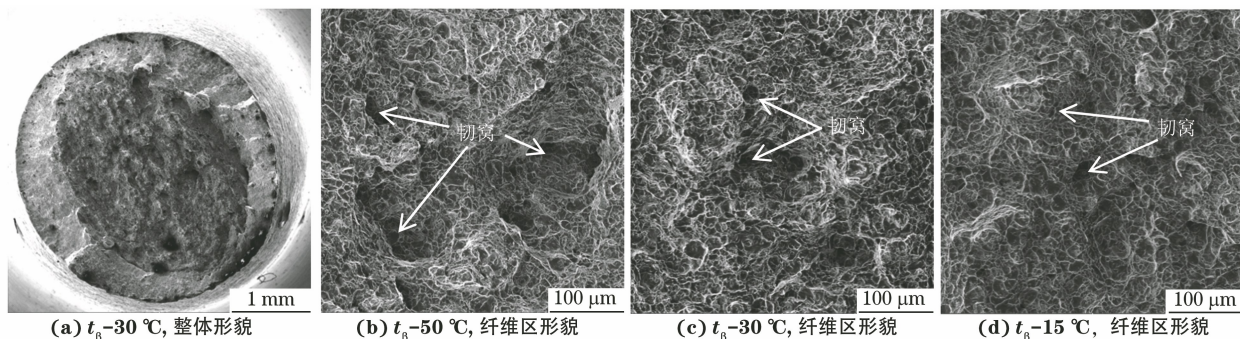


图5 不同温度锻造后TA15钛合金沿流线方向拉伸断口形貌

Fig.5 Tensile fracture morphology along streamline direction of TA15 titanium alloy forged at various temperatures:

(a) overall morphology and (b-d) fibrous zone morphology

拉伸断裂过程是裂纹形核和长大的过程。钛合金的 α/β 相界面是潜在的裂纹形核源。较多初生 α_p 相的存在减少了裂纹形核源,在塑性变形过程中优先出现屈服现象,在位错扩展过程中裂纹扩展的有效距离增加,形成较深韧窝^[17]。片层状组织为裂纹形核提供大量形核位置,对应力集中起分散效应,且片层状 α 相中位错扩展的有效滑移距离较短^[18],因此在含有较多较细长片层状 α 相的组织中,形成较浅的韧窝。

3 结论

(1) 经 $(\alpha+\beta)$ 相区锻造后,随着锻造温度降低,TA15钛合金中球状初生 α_p 相含量增加,片层状次生 α 相含量减少,厚度减小,合金强度增大,在 $t_p-50^\circ\text{C}$ 下锻造后,沿流线方向的抗拉强度达973 MPa。

(2) 随着锻造温度降低,TA15钛合金流线方向、宽度方向和厚度方向的抗拉强度极差减小。

(3) TA15钛合金在 $(\alpha+\beta)$ 相区锻造后的室温拉伸断口均为韧性断口,随着锻造温度降低,拉伸断口纤维区韧窝变深。

参考文献:

- [1] BOYER R R, WELSCH G, COLLINGS E W. Materials properties handbook: Titanium alloys[M]. [S. l.]: AMS International, 1993.
- [2] 曹春晓. 航空用钛合金的发展概况[J]. 航空科学技术, 2005, 16(4): 3-6.
CAO C X. General development situation of titanium alloys for aviation[J]. Aeronautical Science and Technology, 2005, 16(4): 3-6.
- [3] 朱知寿, 王新南, 商国强, 等. 新型高性能钛合金研究与应用[J]. 航空材料学报, 2016, 36(3): 7-12.
ZHU Z S, WANG X N, SHANG G Q, et al. Research and application of new type of high performance titanium alloy[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2016, 36(3): 7-12.
- [4] 王哲, 王新南, 商国强, 等. 新型超高强韧钛合金热变形行为研究[J]. 稀有金属材料与工程, 2018, 47(3): 810-815.
WANG Z, WANG X N, SHANG G Q, et al. Hot deformation

- behavior of new high strength and toughness titanium alloy [J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2018, 47(3): 810-815.
- [5] FAN J K, KOU H C, LAI M J, et al. Characterization of hot deformation behavior of a new near beta titanium alloy: Ti-7333[J]. *Materials & Design*, 2013, 49: 945-952.
- [6] WANG Z, WANG X N, ZHU Z S. Characterization of high-temperature deformation behavior and processing map of TB17 titanium alloy[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2017, 692: 149-154.
- [7] 张旺峰, 李兴无, 马济民, 等. 组织类型对钛合金损伤容限性能的影响及电镜原位观察[J]. *航空材料学报*, 2006, 26(3): 313-314.
- ZHANG W F, LI X W, MA J M, et al. Effect of microstructure on damage tolerance properties and SEM in situ observation for titanium alloy[J]. *Journal of Aeronautical Materials*, 2006, 26(3): 313-314.
- [8] JI Z, YANG H, LI H W. Evolution of two types of α plates in tri-modal microstructure of TA15 alloy under varying processing conditions [J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2015, 44(3): 527-531.
- [9] WU C B, YANG H, FAN X G, et al. Dynamic globularization kinetics during hot working of TA15 titanium alloy with colony microstructure[J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2011, 21(9): 1963-1969.
- [10] 张旺峰, 曹春晓, 李兴无, 等. 钛合金断裂韧性与屈强差的关系初探[J]. *稀有金属材料与工程*, 2005, 34(4): 549-551.
- ZHANG W F, CAO C X, LI X W, et al. Relationship between fracture toughness and proof-ultimate strength difference of Ti alloy[J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2005, 34(4): 549-551.
- [11] 王哲, 王新南, 祝力伟, 等. TB17 钛合金 β 相区晶粒长大行为[J]. *钛工业进展*, 2016, 33(6): 11-15.
- WANG Z, WANG X N, ZHU L W, et al. Grain growth behavior in β single phase of TB17 titanium alloy [J]. *Titanium Industry Progress*, 2016, 33(6): 11-15.
- [12] 吴欢, 赵永庆, 葛鹏, 等. β 稳定元素对钛合金 α 相强化行为的影响[J]. *稀有金属材料与工程*, 2012, 41(5): 805-810.
- WU H, ZHAO Y Q, GE P, et al. Effect of β stabilizing elements on the strengthening behavior of titanium α phase [J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2012, 41(5): 805-810.
- [13] AHMED T, RACK H J. Phase transformations during cooling in $\alpha + \beta$ titanium alloys [J]. *Materials Science and Engineering; A*, 1998, 243(1/2): 206-211.
- [14] 沙爱学, 李兴无, 王庆如, 等. 热变形温度对 TC18 钛合金显微组织和力学性能的影响[J]. *中国有色金属学报*, 2005, 15(8): 1167-1172.
- SHA A X, LI X W, WANG Q R, et al. Influence of hot deformation temperature on microstructure and mechanical properties of TC18 alloy [J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2005, 15(8): 1167-1172.
- [15] 郭萍, 赵永庆, 曾卫东, 等. 两相区热处理对 TC4-DT 钛合金断裂韧性的影响[J]. *稀有金属材料与工程*, 2018, 47(4): 1221-1225.
- GUO P, ZHAO Y Q, ZENG W D, et al. Effect of heat treatment in $\alpha + \beta$ zone on fracture toughness of TC4-DT titanium alloy [J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2018, 47(4): 1221-1225.
- [16] 蔡建明, 许超, 郝孟一, 等. SP700 和 Ti-6Al-4V 钛合金细晶组织的疲劳裂纹扩展特征[J]. *航空材料学报*, 2006, 26(3): 71-74.
- CAI J M, XU C, HAO M Y, et al. Fatigue crack growth characteristics of SP700 and Ti-6Al-4V titanium alloys [J]. *Journal of Aeronautical Materials*, 2006, 26(3): 71-74.
- [17] 孟笑影, 庞克昌, 殷俊林. 热处理工艺对 TC18 钛合金组织和性能的影响[J]. *热处理*, 2006, 21(1): 36-39.
- MENG X Y, PANG K C, YIN J L. Effect of heat treatment process on structure and property of TC18 titanium alloy [J]. *Heat Treatment*, 2006, 21(1): 36-39.
- [18] 张浩, 郑晓斐, 房永强, 等. 热处理制度对 TC6 钛合金断裂韧性的影响[J]. *世界有色金属*, 2015(9): 137-138.
- ZHANG H, ZHENG X F, FANG Y Q, et al. The influence of heat treatment system of TC6 titanium alloy fracture toughness [J]. *World Nonferrous Metals*, 2015(9): 137-138.

(上接第 5 页)

- [14] 贾淑果, 刘平, 郑茂盛, 等. 铜合金固溶强化的电子理论解释 [J]. *中国有色金属学报*, 2008, 18(8): 1522-1526.
- JIA S G, LIU P, ZHENG M S, et al. Explanation based on electron theory for solid solution strengthening in copper alloy [J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2008, 18(8): 1522-1526.
- [15] MA K K, WEN H M, HU T, et al. Mechanical behavior and strengthening mechanisms in ultrafine grain precipitation-strengthened aluminum alloy [J]. *Acta Materialia*, 2014, 62: 141-155.
- [16] FLEISCHER R L. Substitutional solution hardening [J]. *Acta Metallurgica*, 1963, 11(3): 203-209.