

不同状态的 Ti65 钛合金板材各向异性的研究

樊智贤¹, 谢洪志², 张晓巍², 陈宏燃¹, 赵天章¹

(1. 沈阳航空航天大学 航空宇航学院, 辽宁 沈阳 110136)

(2. 沈阳飞机工业(集团)有限公司, 辽宁 沈阳 110034)

摘要: 利用单向拉伸分别测试了高温 Ti65 钛合金板材原始态、时效态和热变形条件下强度的各向异性, 并通过光学显微镜(OM)、电子背散射衍射(EBSD)和扫描电镜(SEM)观察了各状态的微观组织。结果表明: 原始态 Ti65 钛合金板材 RD 方向具有最高强度, 45°方向的强度最低, 主要原因是含有沿着 RD 方向被拉长的 α 相和较强的晶体学织构: $\{0001\} // RD$ -TD 面和 $\langle 01\bar{1}0 \rangle // RD$ 的轧制织构。经过 790 °C 的时效后, 因为 α 相发生了一定的粗化, 纤维组织弱化导致 Ti65 板材 TD 方向拥有最高强度。在 790 °C 中热抗拉强度大幅度降低, 且各向异性发生明显变化, TD 方向强度明显高于其它 2 个方向, 主要因为 α 相中各滑移系的临界剪切应力随温度的升高而大幅度降低, 且不同滑移系的降幅不同。另外高温变形中存在着更强的回复和再结晶。断口观察发现, 室温下 Ti65 钛合金板材断裂机制是以韧窝为主的韧性断裂, 而 790 °C 的断裂是由分散的微小孔洞相互连接的断裂机制。

关键词: 高温钛合金; 各向异性; 断口形貌; 织构

中图分类号: TG146.23

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2022)12-4783-05

钛及其合金具有比强度高、耐腐蚀、耐高温等优异的性能, 被广泛应用到航空、航天、核工业等领域。高温钛合金在服役过程中具有较高的组织稳定性和良好的疲劳性能, 逐渐成为提高现代航空发动机推重比的重要材料之一, 并随着航空轻量化材料和技术的发展具有更高的工业使用价值^[1-3]。

现阶段, 钛合金钣金件的成形主要以塑性加工轧制板材为主, 然而轧制通常会产生大量的织构, 导致不同变形方向上的滑移系开动存在明显差异, 零件力学性能的各向异性显著。目前, 国内外均已开展钛合金相关方面的研究工作。朱知寿等^[4]测试了 TA2 板材的织构类型, 发现织构的取向分布状态和类型对力学性能各向异性的影响起主要作用。Salem 等^[5]通过高温单轴压缩试验确定了 Ti-6Al-4V 合金临界剪切应力(CRSS), 锥面滑移系最大; 在柱面滑移系中沿 a1 方向最低, a3 方向最高。Roth 等^[6]讨论孪晶、位错滑移等对力学行为各向异性的作用, 提出了一种考虑位错滑移的各向异性机制。骆雨萌等^[7]利用静态和动态力学性能测试, 结合微观分析影响热轧态 TC4 的各向异性因素, 主要原因是热轧后的织构($\{0002\} \langle 1\bar{1}00 \rangle$)和取向分布明显的亚结构。Liu 等^[8]研究了不同轧制路径对纯钛板材各向异性的影响, 结果表明相比沿轧向和横向的单向轧制, 交叉轧制

的板材平面各向异性系数更小。Li 等^[9]发现 Ti60 板在 600 °C 下拉伸性能的各向异性主要归因于 TD 和 RD 方向中滑移系施密特因子的差异。Wu 等^[10]研究了不同厚度 TC1 钛合金板材的力学性能, 证明 Yld2000-2d 屈服函数可以准确描述 TC1 钛合金板材的塑性各向异性。Kumar 等^[11]研究 $\beta 21s$ 在室温下各向异性行为, 通过估算平面内各向异性百分比、各向异性指数、屈服轨迹和塑性应变比量化各向异性。高铁军等^[12]在温热条件下利用超声振动辅助拉伸试验, 得到了能够降低各向异性的超声振动工艺参数。郝晓博等^[13]发现退火后 Ti70 合金板力学性能的各向异性是因为基面织构倾向 RD 方向集中。Wu 等^[14]研究了轧制 TA32 钛合金板材的高温各向异性, 发现 r 值随温度的升高和应变速率的降低而减小, 随应变的增加而增大, 热变形过程中不连续动态再结晶可以削弱各向异性。

可见, 钛合金板材的各向异性由多因素共同决定, 而对于新型高温 Ti65 钛合金板材的各向异性, 尤其是不同状态各向异性了解并不深入。本研究以 Ti65 钛合金板材作为研究对象, 利用单向拉伸测试原始态、时效态和热变形条件下的强度各向异性, 探究影响其各向异性的因素, 为构建热处理、微观组织和力学性能之间的关系提供理论依据。

收稿日期: 2021-12-05

基金项目: 国家自然科学基金(51605310); 辽宁省教育厅项目(LJKZ0180); 沈阳市中青年创新计划项目(RC210422)

作者简介: 樊智贤, 男, 1997 年生, 硕士生, 沈阳航空航天大学航空宇航学院, 辽宁 沈阳 110136, E-mail: 891907597@qq.com

1 实验

实验材料为 Ti65 钛合金轧制板材, 具体化学成分如表 1 所示。利用 MTS 材料试验机分别测试 Ti65 板材的力学性能, 包括原始状态(OS)、时效状态(AS)、高温状态(HT), 其中时效状态在 790 °C 保温 0.5 h, 随炉冷却; 原始状态和时效状态在室温下拉伸, 高温状态为原始态在 790 °C 拉伸, 随炉冷却。拉伸速率均为 0.0018 s⁻¹。分别在 3 个方向(RD、45°和 TD)切出单向拉伸件, 不同状态的拉伸试样如图 1 所示。利用 Olympus GX71 金相显微镜观察板材的微观组织, 所需金相样品先经过砂纸打磨, 再抛光至光滑镜面, 经腐蚀得到最终观察样品。采用场发射扫描电镜(SEM)观察拉伸后断口的形貌。利用电子背散射衍射(EBSD)测试原始板材的晶体学结构。

2 实验结果

2.1 力学性能的各向异性

图 2 为不同状态 Ti65 钛合金板材的工程应力-应变曲线。如图 2a 所示, Ti65 钛合金板材原始态 RD 方向强度最高, 屈服强度(YS)和抗拉强度(UTS)分别为 1160 和 1208 MPa; TD 方向强度略低于 RD, 屈服强度和抗拉强度分别为 1133.3 和 1190 MPa; 而 45°方向强度最低, 屈服强度和抗拉强度分别为 1112.5 和 1152 MPa。图 2b 显示了经过时效后 Ti65 钛合金板材的工程应力-应变曲线, 此时 TD 方向强度在 3 个方向上达到最高, 屈服强度和抗拉强度分别为 1082.6 和 1118.1 MPa; 而 45°方向强度仍为最低, 屈服强度和抗拉强度分别为 1034.1 和 1082.5 MPa。不难看出, 在高温条件下拉伸, Ti65 钛合金板材强度明显低于室温拉伸的强度, 如图 2c 所示, TD

表 1 Ti65 合金的化学成分

Table 1 Chemical composition of Ti65 alloy (wt%)

Al	Sn	Zr	Mo	Nb	Ta	Si	W	C	Ti
5.8	4.0	3.5	0.5	0.3	1.0	0.4	0.8	0.055	Bal.

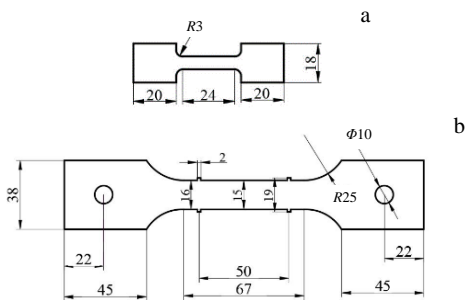


图 1 拉伸试样

Fig.1 Samples of tensile under original state and aging state (a) and high temperature state (b) (mm)

方向强度明显高于另外 2 个方向, 屈服强度和抗拉强度分别为 216.8 和 233.1 MPa。

相比原始态 Ti65 钛合金板材, 经过时效后, Ti65 钛合金板材 TD 方向强度与 RD 方向强度相接近, 但略高于 RD 方向强度, 二者屈服强度相差 9.4 MPa, 明显低于原始态(差值为 26.7 MPa)。在高温条件下拉伸, TD 方向强度与 RD 方向强度差异进一步加大, 为 18.1 MPa, 而 45°方向强度与 RD 方向强度更相似。但 3 种状态下, 45°方向强度始终最低。可见, Ti65 钛合金板材在不同状态下不同方向的强度存在明显差异。

2.2 金相组织

图 3 为不同状态下板材的金相组织。原始板材为退火态, 图 3a 为金相波纹, 由细小的等轴 α 相、变形的 α 相和 β 相转变组织组成, α 相占比约 57%。可明

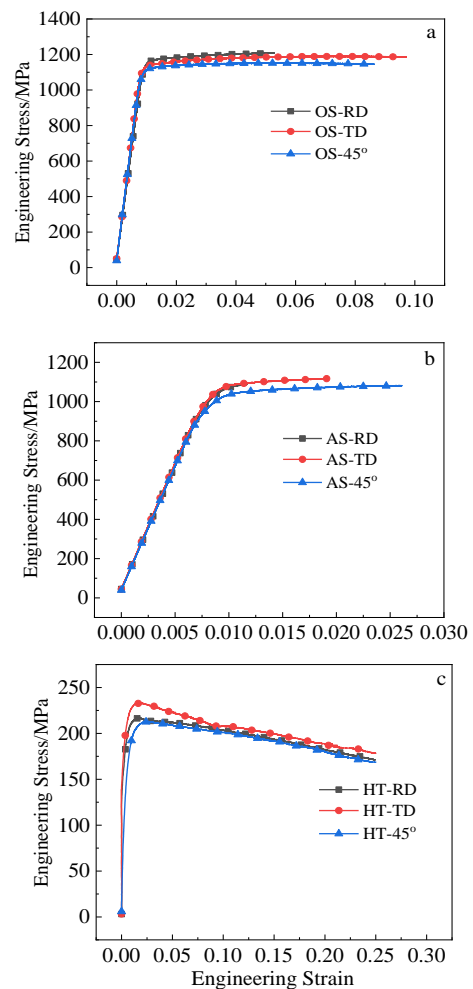


图 2 Ti65 钛合金板材工程应力-应变曲线

Fig.2 Engineering stress-strain curves of Ti65 titanium sheet: (a) original state, (b) aging state, and (c) high temperature state

观察到 RD 方向纤维组织, α 相和 β 相都被拉长主要原因是因为在两相区高温热变形所致。经过 790 °C/0.5 h 时效后, α 相发生了一定的粗化, 所占比例增加约为 68%, 等轴 α 相数量明显增多, 如图 3b 所示。经过长时间 790 °C 时效后(即高温态), α 相进一步长大, 并在 β 相转变组织中出现了细小等轴状 α 相, 如图 3c 所示。

2.3 晶体学结构

图 4 为原始 Ti65 钛合金的晶粒欧拉角分布图、极图和反极图。由欧拉角分布图(图 4a)可见, 轧制后晶粒存在择优取向(颜色较为集中), 等轴晶粒尺寸较大, 约为 6.3 μm 。在变形晶粒中存在许多亚晶和小角晶界, 晶界明显。图 4b 极图所示的 $\{0001\}$ 极图中基面与 RD-TD 面相近, 有 1 个小角度。 $\{10\bar{1}0\}$ 极图所示, 晶粒取向在 RD 方向上有集中现象。而且在 RD 方向反极图可明显观察到 $\langle 01\bar{1}0 \rangle // \text{RD}$ 。

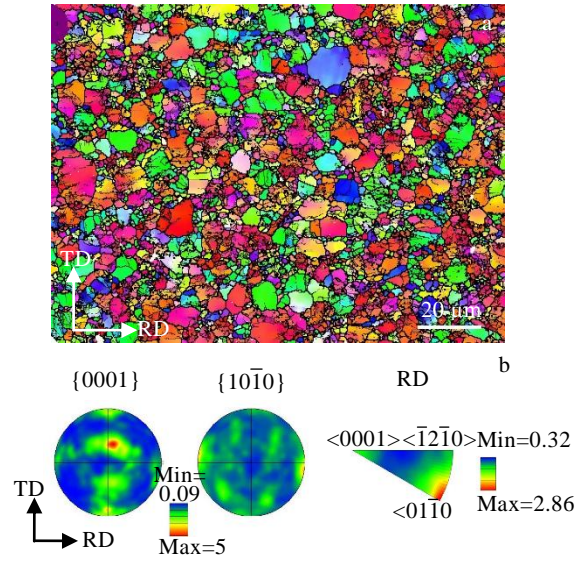


图 4 Ti65 钛合金板材欧拉角分布图及极图和反极图

Fig.4 EBSD maps of Ti65 titanium sheet: (a) Euler distribution map; (b) pole figure and inverse pole figure

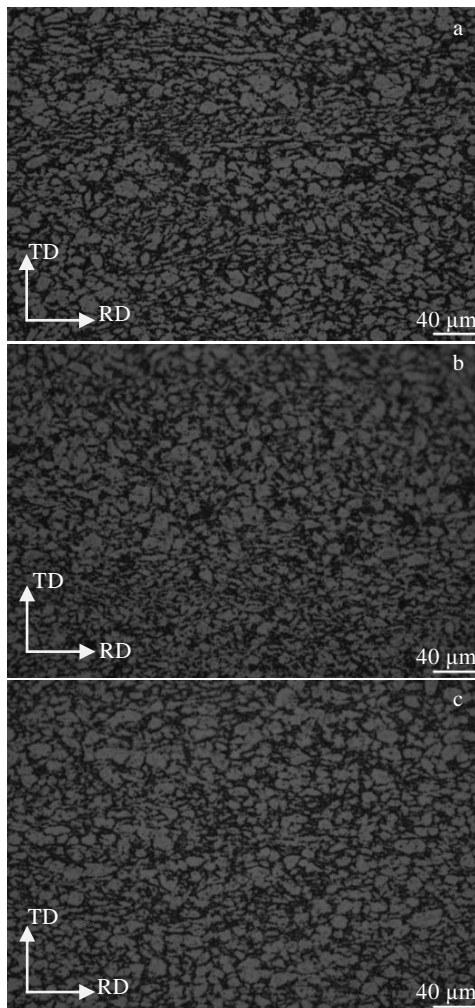


图 3 不同状态下 Ti65 钛合金板材的金相组织

Fig.3 OM microstructures of Ti65 titanium alloy sheet under different states: (a) original state, (b) aging state, and (c) high temperature state

2.4 断口形貌

图 5 显示了 Ti65 钛合金板材不同状态断口宏观和微观形貌。从宏观断口来看, 原始态各方向与时效态 RD 方向断口较为平整, 无明显颈缩现象, 属于平直断口。790 °C 拉伸断口出现明显颈缩, 表面分布着大量的微孔。从微观断口来看, 室温拉伸断口含有大量的等轴韧窝。原始态 TD 方向韧窝尺寸大小相近且深度更深, 而 RD 和 45 °方向等轴韧窝尺寸大小不一, 且韧窝深度较浅, 如图 5a~5c 所示。经过时效后, 断口等轴韧窝尺寸明显增大, 如图 5d 所示。高温拉伸断口出现大量细小的孔洞, 弥散分布在断口中, 如图 5e 所示。可见, 室温拉伸断裂机制属于韧性断裂, 而高温拉伸断裂由微孔洞聚集引起。

3 分析与讨论

根据各向异性指标 IPA 计算不同状态各向异性指数^[15-17], 其中 IPA 定义:

$$IPA = \frac{2X_{\max} - X_{\text{mid}} - X_{\min}}{2X_{\max}} \quad (1)$$

式中, X 分别取不同方向上屈服强度和抗拉强度试验值。如图 6 所示, 原始板材的屈服强度各向异性指数(IPA_{YS})和抗拉强度各向异性指数(IPA_{UTS})相似; 经时效后 IPA_{YS} 和 IPA_{UTS} 降低且 IPA_{YS} 略低于 IPA_{UTS} , 表明时效有利于强度各向异性降低; 而在高温下 IPA_{YS} 和 IPA_{UTS} 明显高于原始态和时效态且 IPA_{UTS} 低于 IPA_{YS} ,

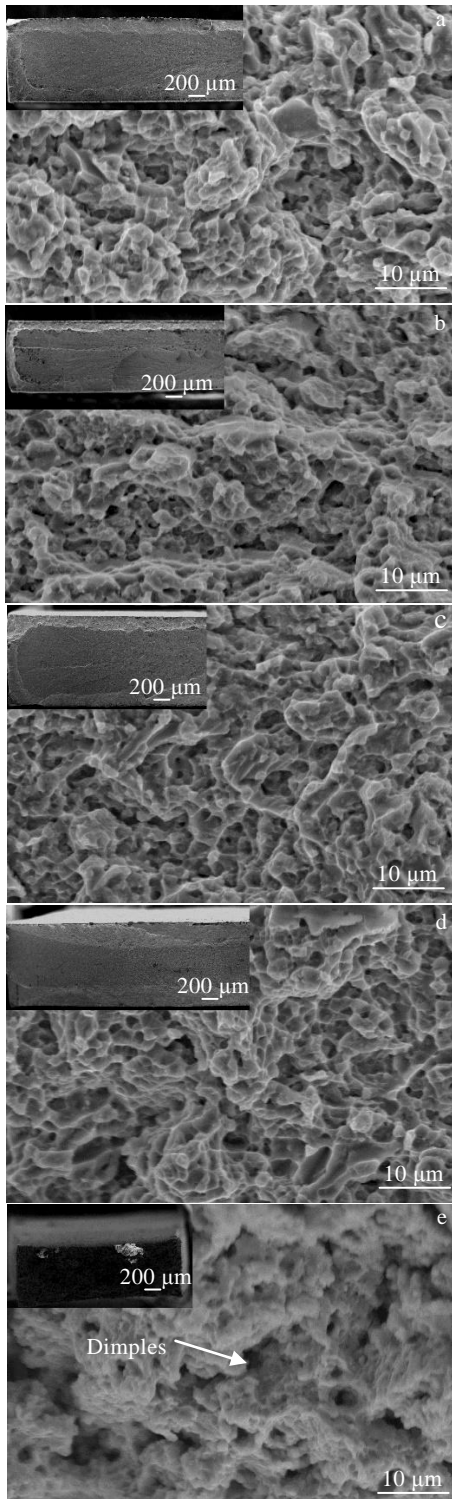


图 5 Ti65 钛合金板材断口形貌

Fig.5 SEM fracture morphologies of Ti65 titanium alloy sheet:

(a) OS-RD; (b) OS-TD; (c) OS-45°; (d) AS-RD; (e) HT-RD

表明高温环境增强板材各向异性。综上所述，3 个状态下 IPA_{YS} 和 IPA_{UTS} 表现并不一致，说明不同状态变形机制有所差异。

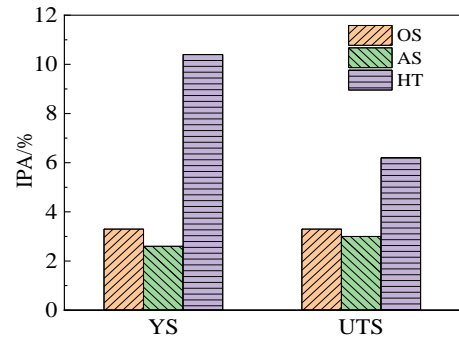


图 6 不同状态 Ti65 钛合金板材的各向异性指数

Fig.6 IPA of Ti65 titanium alloy sheet under different states

Ti65 高温钛合金板材属于近 α 型钛合金，变形机制主要为 α 相内位错滑移和孪晶^[18,19]。对于原始态 Ti65 板材其强度各向异性的原因主要包括 2 个方面：晶体学织构和纤维组织。经过热轧后出现了强烈的 $(0001) // RD-TD$ 面和 $\langle 01\bar{1}0 \rangle // RD$ 的轧制织构。而且初生 α 相在热变形过程中沿 RD 方向被拉长，导致晶界密度在不同方向上是不同的。故沿着 RD、45°和 TD 方向拉伸时，不同滑移系的临界剪切应力(CRSS)不同，差异比例较大，产生了明显的各向异性。经过 790 °C 时效后，Ti65 板材组织的基本结构未发生变化，但 α 相体积分数增加，等轴晶增加且尺寸增加，导致其室温抗拉强度下降。同时被拉长的变形 α 相形态发生变化，逐渐减少并向等轴 α 相转变，因此各向异性发生了变化。790 °C 高温拉伸时，温度升高能够降低滑移系的临界剪切应力，促进位错攀移和界面滑动，利于位错运动^[20-22]。因此，Ti65 钛合金高温变形抗力大幅降低。由于 RD、45°和 TD 试样中起主要变形作用的滑移系不同；并且随温度的升高，各滑移系临界剪切应力下降速度不同，导致 3 个取样方向上激活的滑移系不同，所以高温各向异性明显不同于室温拉伸。

4 结 论

1) 原始态 Ti65 钛合金板材 RD 方向具有最高强度，45°方向的强度最低，主要原因是含有沿着 RD 方向被拉长的 α 相和较强的晶体学织构： $(0001) // RD-TD$ 面和 $\langle 01\bar{1}0 \rangle // RD$ 的轧制织构。

2) 时效态 Ti65 钛合金板材 TD 方向屈服强度最高，45°方向仍最低，因为经过时效后 α 相发生了一定的粗化，纤维组织弱化导致 Ti65 钛合金板材 TD 方向拥有最高强度。

3) 高温态 Ti65 钛合金板材抗拉强度大幅度降低，且各向异性发生明显变化，TD 方向强度明显高于其它 2 个方向，主要因为 α 相中各滑移系的临界剪切应

力随温度的升高而大幅度降低, 且不同滑移系的降幅不同。

4) 室温下 Ti65 钛合金断裂机制是以韧窝为主的韧性断裂, 而 790 °C 的高温拉伸断裂是由分散的微孔洞相互连接的断裂机制。

参考文献 References

- [1] Zhao Yongqing(赵永庆), Ge Peng(葛鹏), Xin Shewei(辛社伟). *Materials China*(中国材料进展)[J], 2020, 39(S1): 527
- [2] Wang Qingjiang(王清江), Liu Jianrong(刘建荣), Yang Rui(杨锐). *Journal of Aeronautical Materials*(航空材料学报)[J], 2014, 34(4): 1
- [3] Boyer R R. *Materials Science and Engineering A*[J], 1996, 213(1-2): 103
- [4] Zhu Zhishou(朱知寿), Gu Jialin(顾家琳), Chen Nanping(陈南平) *et al. Materials for Mechanical Engineering*(机械工程材料)[J], 1994, 18(2): 23
- [5] Salem A A, Semiatin S L. *Materials Science and Engineering A*[J], 2009, 508(1-2): 114
- [6] Roth A, Lebyodkin M A, Lebedkina T A *et al. Materials Science and Engineering A*[J], 2014, 596: 236
- [7] Luo Yumeng(骆雨萌), Liu Jinxu(刘金旭), Li Shukui(李树奎) *et al. Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2014, 43(11): 2692
- [8] Liu D K, Huang G S, Gong G L *et al. Transactions of Nonferrous Metals Society of China*[J], 2017, 27: 1306
- [9] Li W Y, Chen Z Y, Liu J R *et al. Materials Science and Engineering A*[J], 2017, 688: 322
- [10] Wu Jianjun(吴建军), Wang Bao(王苞). *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2017, 46(2): 363
- [11] Kumar S S, Pavithra B, Singh V *et al. Materials Science and Engineering A*[J], 2019, 747: 1
- [12] Gao Tiejun(高铁军), Jiao Zhihui(矫志辉), Wang Jian(王健) *et al. Journal of Plasticity Engineering*(塑性工程学报)[J], 2020, 27(3): 88
- [13] Hao Xiaobo(郝晓博), Li Bobo(李渤渤), Liu Yinqi(刘茵琪) *et al. Heat Treatment of Metals*(金属热处理)[J], 2020, 45(8): 34
- [14] Wu Y, Fan R L, Chen M *et al. Materials Science and Engineering A*[J], 2021, 820: 141 560
- [15] Jata K V, Hopkins A K, Rioja R J. *Materials Science Forum*[J], 1996, 317: 647
- [16] Yang Shengli(杨胜利), Song Dejun(宋德军), Gao Fuyang(高福洋) *et al. The Chinese Journal of Nonferrous Metals*(中国有色金属学报)[J], 2020, 30(6): 1358
- [17] Hao Min(郝敏), Wang Liang(王亮), Chen Junzhou(陈军洲) *et al. Chinese Journal of Rare Metals*(稀有金属)[J], 2021, 45(6): 641
- [18] Wu Xiyue(吴汐玥), Chen Zhiyong(陈志勇), Cheng Chao(程超) *et al. Chinese Journal of Materials Research*(材料研究学报)[J], 2019, 33(10): 785
- [19] Yue Ke(岳颢). *Study on Microstructure and Key High Temperature Mechanical Properties of Ti65 Alloy*(Ti65 合金显微组织及关键高温力学性能)[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2019
- [20] Dastidar I G, Khademi V, Bieler T R *et al. Materials Science and Engineering A*[J], 2015, 636: 289
- [21] Viswanathan G B, Karthikeyan S, Hayes R W *et al. Acta Materialia*[J], 2002, 50(20): 4965
- [22] Kim J S, Kim J H, Lee Y T *et al. Materials Science and Engineering A*[J], 1999, 263(2): 272

Mechanical Anisotropy of Ti65 Titanium Alloy Sheet Under Different States

Fan Zhixian¹, Xie Hongzhi², Zhang Xiaowei², Chen Hongran¹, Zhao Tianzhang¹
 (1. Institute of Aerospace Engineering, Shenyang Aerospace University, Shenyang 110136, China)
 (2. AVIC Shenyang Aircraft Industry (Group) Co., Ltd, Shenyang 110034, China)

Abstract: The mechanical anisotropy of high temperature titanium alloy Ti65 plate under the conditions of original state, aging state and high temperature state was studied by unidirectional tension. The microstructure of each state was observed by OM, EBSD, SEM. The results show that original Ti65 sheet has the highest strength in RD and the lowest strength in the 45 ° direction, which is due to the elongated α phase and strong crystallography texture: (0001)//RD-TD plane and $\langle 01\bar{1}0 \rangle$ //RD. After aging at 790 °C, Ti65 titanium alloy sheet has the highest strength in TD because of the coarsening of α phase and weakening of fiber structure. At 790 °C, the thermal tensile strength decreases greatly, and anisotropy changes obviously. The TD strength is remarkably higher than those of other two directions, primarily because the critical resolved shear stress of each slip system in α phase decreases greatly with the increase of temperature and the decline of different slip systems is different. In addition, there is stronger recovery and recrystallization at high temperature. The fracture mechanism of Ti65 at room temperature is ductile, and the fracture mechanism at 790 °C is interconnected by dispersed micropores.

Key words: high temperature titanium alloy; anisotropy; fracture morphology; texture

Corresponding author: Zhao Tianzhang, Ph. D., Professor, Institute of Aerospace Engineering, Shenyang Aerospace University, Shenyang 110136, P. R. China, E-mail: zhaotianzhang@sau.edu.cn