

锻造工艺对 Ti-1300 合金棒材组织和性能的影响

周伟, 辛社伟, 李倩, 贾蔚菊, 张思远, 毛成亮, 李思兰

(西北有色金属研究院, 陕西 西安 710016)

摘要: 研究了 $\alpha + \beta$ 锻造、近 β 锻造、 β 锻造 3 种锻造工艺对 Ti-1300 合金棒材组织和力学性能的影响。结果表明, 锻造工艺对 Ti-1300 合金显微组织影响较大。经 $\alpha + \beta$ 锻造后, Ti-1300 合金棒材的初生 α 相为细小等轴状, 近 β 锻造后多为短棒状, β 锻造后为沿晶界分布的尺寸较大的块状 α 相。经不同工艺锻造的 Ti-1300 合金棒材热处理后, 近 β 锻造和 β 锻造的抗拉强度明显高于 $\alpha + \beta$ 锻造, 同时 β 锻造后棒材的断裂韧性最高, 近 β 锻造次之。本实验条件下, 经 β 锻造的 Ti-1300 合金棒材抗拉强度达到 1390 MPa, 断裂韧性超过 $70 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$, 是最优的锻造工艺。

关键词: 钛合金; 锻造工艺; 显微组织; 拉伸性能; 断裂韧性

中图分类号: TG319; TG146.23

文献标识码: A

文章编号: 1009-9964(2021)05-006-04

Microstructure and Properties of Ti-1300 Alloy Bar under Different Forging Process

Zhou Wei, Xin Shewei, Li Qian, Jia Weiju, Zhang Siyuan, Mao Chengliang, Li Silan

(Northwest Institute for Nonferrous Metal Research, Xi'an 710016, China)

Abstract: The effects of $\alpha + \beta$ forging, near β forging and β forging on microstructure and mechanical properties of Ti-1300 alloy bar were studied. The results show that the morphology of primary α phase is obviously different under different forging processes. The primary α phase of Ti-1300 alloy bar is equiaxed after $\alpha + \beta$ forging. After near β forging, most of them are short rods. But discontinuous block α phase is formed along grain boundary after β forging. The tensile strength of near β and β forged Ti-1300 alloy bars after heat treatment is significantly higher than that of $\alpha + \beta$ forged. The fracture toughness of β forged Ti-1300 alloy bar is the highest, followed by near β forging. The tensile strength of β forged Ti-1300 alloy bar is 1390 MPa and the fracture toughness is more than $70 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$, so it is the best forging process.

Key words: titanium alloy; forging process; microstructure; tensile strength; fracture toughness

与 α 、 $\alpha + \beta$ 型钛合金相比, β 型钛合金具有更好的强度、塑性和韧性匹配, 因而在航空航天、石油化工等领域得到了广泛的应用^[1,2]。随着航空航天工业的发展, 对钛合金比强度、塑性、韧性等提出了更高要求, 具有更高强度水平的超高强度钛合金 ($R_m \geq 1250 \text{ MPa}$) 成为钛合金材料的重点研究方向。其代表性的合金有美国的 Ti-5553^[3]、俄罗斯的 VST-55531^[4] 和我国的 Ti-1300^[5] 合金等。与其他 β 型高强钛合金相比, 这些合金具有更高的强度和足够的韧性, 同时具有较宽的加工范围和良好的淬透

性, 而且不易产生成分偏析, 特别适用于飞机起落架和机身、机翼中的各种重要承力构件, 可实现更优的减重效果。

众所周知, 钛合金材料加工、组织和性能之间的关系一直是热加工领域的研究热点, β 型钛合金的组织 and 性能更强烈依赖于加工过程。常用的钛合金锻造工艺主要有 β 锻造、近 β 锻造和 $\alpha + \beta$ 锻造^[6,7]。不同锻造工艺通过影响组织中 α 相与 β 相的比例、形态及大小, 最终导致力学性能的差异。

Ti-1300 合金是西北有色金属研究院设计开发的一种超高强结构钛合金, 该合金棒材力学性能满足 $R_m > 1350 \text{ MPa}$, $A > 8\%$, $K_{IC} > 55 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$, 达到了 BOEING 公司标准 BMS7-360H 对 Ti-5553 合金的要

收稿日期: 2021-03-05

基金项目: 陕西省重点研发计划项目(2020GY-284)

通信作者: 周伟(1978—), 女, 教授级高工。

求。对于 Ti-1300 超高强钛合金, 国内学者开展了包括合金热处理工艺^[8]、变形行为^[9]、管材成形工艺^[10]、相转变特征^[11]等大量的研究工作, 但关于不同锻造工艺下 Ti-1300 合金显微组织和力学性能的研究较少。为此, 对 Ti-1300 合金棒材进行了 β 锻造、近 β 锻造和 $\alpha + \beta$ 两相区锻造试验, 研究锻后 Ti-1300 合金棒材的显微组织和力学性能, 以期制备满足不同性能需求的 Ti-1300 合金锻件提供参考。

1 实验

实验材料为西北有色金属研究院生产的 Ti-1300 合金锻坯, 规格为 200 mm × 200 mm, ($\alpha + \beta$)/ β 相转变温度为 (830 ± 5) °C。锻坯组织为未被完全破碎的粗大 β 晶粒, 晶内析出弥散细小球状 α 颗粒, 如图 1 所示。

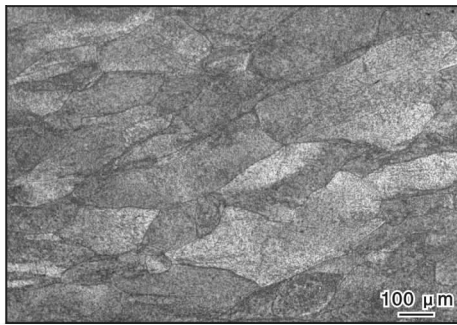


图 1 Ti-1300 合金锻坯显微组织

Fig. 1 Microstructure of Ti-1300 alloy forging billet

为了研究锻造工艺对 Ti-1300 合金棒材显微组织和力学性能的影响, 分别采用 $\alpha + \beta$ 锻造、近 β 锻造和 β 锻造 3 种工艺将锻坯加工成 $\phi 130$ mm 的棒材, 具体工艺参数见表 1。分别从 3 种工艺制备的 Ti-1300 合金棒材上取样, 进行 760 °C/1 h/AC + 540 °C/4 h/AC 固溶时效处理。采用 Olympus MG3 光学显微镜和

JSM-6700 扫描电子显微镜 (SEM) 观察 Ti-1300 合金棒材的显微组织和断口形貌。采用 INSTRON 5985 万能拉伸试验机进行拉伸性能和平面应变断裂韧性试验。采用 MTS810 疲劳试验机测试疲劳裂纹扩展速率, 载荷比 $R = 0.1$ 。

表 1 Ti-1300 合金锻造工艺

Table 1 Forging processes of Ti-1300 alloy

No.	Process type	Forging temperature/°C	Deformation amount/%
1 [#]	$\alpha + \beta$ forging	790	60
2 [#]	Near β forging	820	60
3 [#]	β forging	860	60

2 结果与讨论

2.1 锻造工艺对 Ti-1300 合金显微组织的影响

图 2 为经过 $\alpha + \beta$ 锻造、近 β 锻造和 β 锻造后 Ti-1300 合金棒材的显微组织。由于 Ti-1300 合金含有较多的 β 稳定元素, 具有较高的 β 稳定性, 抑制了 α 相的析出和长大, 因此光学显微镜下难以清晰分辨出相的形态和尺寸特征, 只能直观地比较析出相的含量。Ti-1300 合金棒材经 $\alpha + \beta$ 锻造和近 β 锻造后, 粗大的 β 晶粒被完全破碎, 局部可观察到遗留的晶界痕迹, 显微组织为大量细小析出相均匀密集地分布在 β 基体上 (图 2a、2b)。相比之下, β 锻造后的合金组织明显不同, 其特征是粗大的 β 晶粒被压扁变形, 原始晶界不同程度地被破碎, 析出相只在晶界附近析出且数量较少 (图 2c)。

钛合金在 $\alpha + \beta$ 相区进行固溶时效处理通常不改变锻造后生成的初生 α 相形态, 仅能通过固溶温度控制 α 相和 β 相比例^[12]。3 种锻造工艺采用相同的固溶温度, 因此可以通过热处理后的显微组织表征

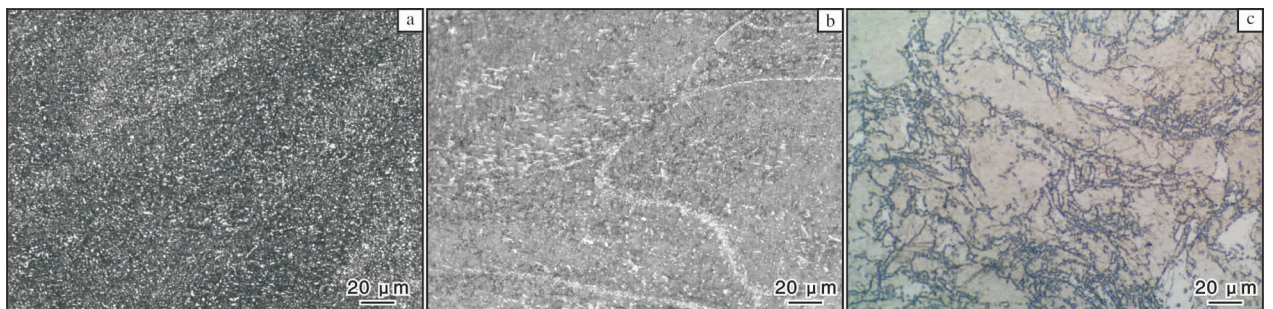


图 2 不同锻造工艺下 Ti-1300 合金棒材的显微组织

Fig. 2 Microstructures of Ti-1300 alloy bars under different forging processes: (a) $\alpha + \beta$ forging; (b) near β forging; (c) β forging

锻造工艺对析出相形态的影响。为了能更好地揭示不同锻造工艺下 Ti-1300 合金初生 α 相的形态, 对不同锻造工艺下热处理试样进行了 SEM 组织观察, 如图 3 所示。从图 3 可以看出, 高倍显微镜下能清楚地观察到初生 α 相(α_p) 的形貌和大小特征。Ti-1300 合金经 $\alpha + \beta$ 锻造后 α_p 相呈等轴状, 分布较为均匀, 尺寸大小相当, 直径 $3 \sim 5 \mu\text{m}$ 。近 β 锻造后 α_p 相多

为短棒状, 宽度约 $1 \mu\text{m}$, 长度为 $3 \sim 7 \mu\text{m}$, 另有少量细小等轴初生 α 相, 平均直径为 $0.5 \mu\text{m}$ 。由于 β 锻造的变形温度在相变点之上, 原始晶粒粗大, 直径 $200 \sim 300 \mu\text{m}$, 锻造后晶粒被不完全破碎, 沿晶界破碎生成的块状 α 相形状不规则, 且分布不均匀。有报道称, 块状 α 相与合金中元素不均匀扩散和内吸附引起的成分偏析有关^[13]。

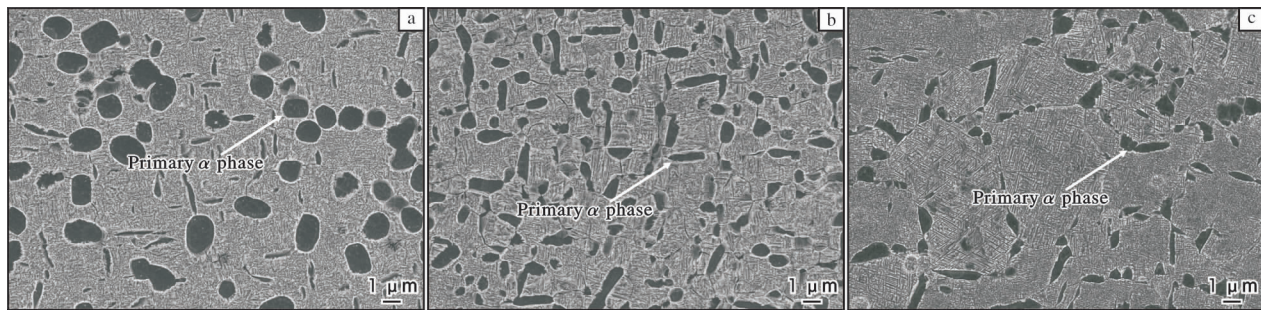


图 3 Ti-1300 合金棒材经不同工艺锻造及热处理后的显微组织

Fig. 3 Microstructures of Ti-1300 alloy bars after different forging processes and heat treatment:

(a) $\alpha + \beta$ forging; (b) near β forging; (c) β forging

2.2 锻造工艺对 Ti-1300 合金力学性能的影响

表 2 是 Ti-1300 合金棒材经不同工艺锻造及热处理后的室温拉伸和断裂韧性测试结果。从表 2 可以看出, 近 β 锻造和 β 锻造 Ti-1300 合金的抗拉强度较高, 超过 $\alpha + \beta$ 锻造约 40 MPa , 但 $\alpha + \beta$ 锻造 Ti-1300 合金的塑性最好, 延伸率 13.0% , 断面收缩率为 51.0% , 高于近 β 锻造和 β 锻造。对比分析 3 种工艺后棒材的断裂韧性可知, β 锻造后 Ti-1300 合金的断裂韧性最高, K_{IC} 值达到 $70.3 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$, 近 β 锻造次之, 为 $52.7 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$, $\alpha + \beta$ 锻造后的断裂韧性仅为 $45.6 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ 。钛合金断裂韧性的高低主要与裂纹尖端塑性区的尺寸有关^[14]。

表 2 Ti-1300 合金棒材经不同工艺锻造及热处理后的拉伸性能和断裂韧性

Table 2 Tensile properties and fracture toughness of Ti-1300 alloy bars after different forging processes and heat treatment

No.	R_m/MPa	$R_{p0.2}/\text{MPa}$	$A/\%$	$Z/\%$	$K_{IC}/\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$
1 [#]	1358	1323	13.0	51.0	45.6
2 [#]	1393	1345	11.5	41.0	52.7
3 [#]	1390	1330	10.0	38.5	70.3

图 4 为 Ti-1300 合金棒材经不同工艺锻造及热处理后的疲劳裂纹扩展速率。从图 4 可以看出, 应力强度因子 ΔK 在 $10 \sim 15 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ 时 (I 区), 3 种状

态的疲劳裂纹扩展速率均在 $10^{-5} \sim 5 \times 10^{-4} \text{ mm/cycle}$ 之间。随着 ΔK 增大 (II、III 区), 合金疲劳裂纹扩展速率呈上升趋势。总体而言, β 锻造 Ti-1300 合金较近 β 锻造和 $\alpha + \beta$ 锻造的具有更低的疲劳裂纹扩展速率。裂纹扩展过程强烈依赖于材料断裂韧性, 材料断裂韧性是裂纹扩展的内在抗力参量^[15], 因此断裂韧性越高, 疲劳裂纹扩展越缓慢。

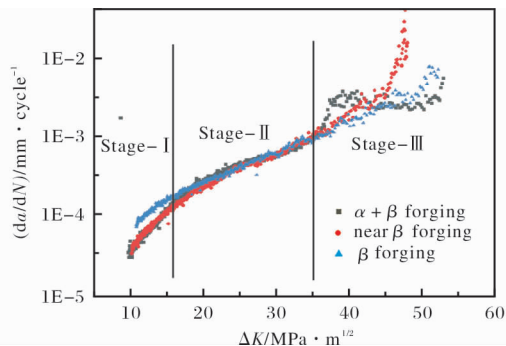


图 4 不同锻造工艺下 Ti-1300 合金棒材的疲劳裂纹扩展速率

Fig. 4 Fatigue crack propagation rate of Ti-1300 alloy bars under different forging processes

从组织与性能的关系角度分析, Ti-1300 合金在不同锻造工艺下表现出的性能差异主要是初生 α 相 (α_p) 和次生 α 相 (α_s) 共同作用的结果。

α_p 相含量变化会改变亚稳 β 相的溶质原子浓

度, 从而对 α_s 相产生影响。 β 锻造后初生 α_p 相含量较其他 2 种锻造工艺明显减少, 亚稳 β 相相对不稳定, α_s 相易形核和长大, 易形成较大长宽比的次生 α 相, 这种组织断裂时更容易使裂纹发生偏折, 合金的断裂韧性提高。

3 结论

(1) 锻造工艺对 Ti-1300 合金棒材显微组织影响较大, 不同锻造工艺下初生 α 相的形貌、尺寸均有所不同。 $\alpha + \beta$ 锻造后的初生 α 相为细小等轴状, 近 β 锻造后多为短棒状, β 锻造后为沿晶界形成尺寸较大的块状 α 相。

(2) Ti-1300 合金棒材经不同工艺锻造及相同条件热处理后表现出的性能差异是初生 α 相和次生 α 相共同作用的结果。近 β 和 β 锻造后合金的抗拉强度高于 $\alpha + \beta$ 锻造约 40 MPa。 β 锻造后合金表现出较高的断裂韧性, 近 β 锻造次之, $\alpha + \beta$ 锻造最低。本实验条件下, 经 β 锻造的 Ti-1300 合金棒材抗拉强度达到 1390 MPa, 断裂韧性超过 $70 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$, 是最优的锻造工艺。

参考文献 References

[1] 陈福文, 徐广龙, 周科朝, 等. Ti-55531 升温条件下球状和片状 α 生长及回溶动力学[J]. 稀有金属材料与工程, 2020, 49(4): 1220 - 1226.

[2] 王凯旋, 王涛, 邵晖, 等. 细小等轴 α 相对 Ti-55531 合金静态再结晶行为的影响[J]. 钛工业进展, 2020, 37(6): 1 - 6.

[3] Jones N G, Dashwood R J, Jackson M, et al. β phase decomposition in Ti-5Al-5Mo-5V-3Cr[J]. Acta Materialia, 2009, 57: 3830 - 3839.

[4] 付艳艳, 惠松骁, 叶文君, 等. 冷却速度对 VST55531 钛合金的显微组织和力学性能的影响//第十四届全国钛及钛合金学术交流会论文集(下册)[C]. 上海: 中国有色金属学会, 2010: 134 - 138.

[5] 赵永庆. 我国创新研制的主要船用钛合金及其应用[J]. 中国材料进展, 2014, 33(7): 398 - 404.

[6] 周义刚, 张宝昌. 钛合金近 β 锻造研究[J]. 航空学报, 1989, 10(1): A60 - A66.

[7] 赵兴东, 魏鑫, 曾卫东, 等. β 锻造工艺对 TC17 钛合金显微组织的影响[J]. 钛工业进展, 2019, 36(5): 13 - 17.

[8] 葛鹏, 周伟, 赵永庆. 热处理制度对 Ti-1300 合金组织和力学性能的影响[J]. 中国有色金属学报, 2010, 20(S1): S1068 - S1072.

[9] 万明攀, 赵永庆, 曾卫东, 等. Ti-1300 合金室温变形行为研究[J]. 稀有金属材料与工程, 2015, 44(10): 2519 - 2522.

[10] 戚运莲, 辛社伟, 杜宇, 等. Ti-1300 钛合金挤压管材组织性能研究[J]. 有色金属材料工程, 2019, 40(4): 6 - 12.

[11] 刘晰. Ti-1300 合金组织转变研究[D]. 贵阳: 贵州大学, 2015.

[12] 王世洪, 沈桂琴. Ti-10V-2Fe-3Al 合金的固溶时效及其组织与性能[J]. 稀有金属材料与工程, 1990, 19(4): 26 - 35.

[13] 雷锦文, 曾卫东, 朱知寿, 等. TC21 钛合金 β 锻造大块 α 相研究[J]. 材料热处理学报, 2009, 30(5): 14 - 18.

[14] 张旺峰, 曹春晓, 李兴无, 等. 钛合金断裂韧性与屈服差的关系初探[J]. 稀有金属材料与工程, 2005, 34(4): 549 - 551.

[15] 李鹤飞. 高强度钢断裂韧性与裂纹扩展机制研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2019.

2020 年 7—12 月日本海绵钛产销数据统计

日期	海绵钛产量/t	国内海绵钛出货量/t	国外海绵钛出货量/t	海绵钛出货量合计/t
2020 年 7 月	4003	689	386	1075
2020 年 8 月	3676	505	183	688
2020 年 9 月	3299	913	346	1259
2020 年 10 月	3158	568	851	1419
2020 年 11 月	2683	758	1028	1786
2020 年 12 月	2706	876	993	1869
合计	19 525	4309	3787	8096