

热轧工艺对TA5板材组织及性能的影响

张野¹ 王安国² 宿纯文² 张薇³ 戴山¹

(1 中铝沈阳有色金属加工有限公司, 沈阳 110117)

(2 沈阳航空航天大学, 沈阳 110136)

(3 沈阳飞机工业(集团)有限公司, 沈阳 110086)

文 摘 通过不同热加工工艺板材的组织性能对比,避免冷轧,最终获得极优工艺方案,解决了4.0 mm TA5板材力学性能与折弯工艺性能间不能良好匹配的问题,促进其高品质工业化量产。研究表明, β 淬火加550℃温轧后可快速细化板坯组织,引入多位错及亚结构从而提升样品强度;无 β 淬火工序样品,延伸率及折弯性能呈现提升趋势,样品的折弯性能与延伸率基本呈现正相关;TA5铸锭经锻造单相区热轧开坯至9 mm后940℃轧至5 mm,550℃从5 mm轧至4 mm,650℃保温40 min后空冷可得均匀细小等轴组织。

关键词 TA5板材,热轧,组织,性能,折弯

中图分类号: TG335.11

DOI:10.12044/j.issn.1007-2330.2025.02.008

Effect of Hot Rolling Process on Microstructure and Performance of TA5 Plate

ZHANG Ye¹ WANG Anguo² SU Chunwen² ZHANG Wei³ DAI Shan¹

(1 Chinalco Shenyang NON-FERROUS Metals Processing Co. Ltd., Shenyang 110117)

(2 Shenyang Aerospace University, Shenyang 110136)

(3 Shenyang Aircraft Industry (Group) Co. Ltd., Shenyang 110086)

Abstract Through comparative analysis of microstructural properties of sheets processed via different hot working processes while avoiding cold rolling, an optimal process scheme was developed to address the poor matching between mechanical properties and bending formability of 4.0 mm TA5 sheets, thereby facilitating high-quality industrial mass production. The research indicates that β -quenching combined with warm rolling at 550℃ can rapidly refine slab microstructure by introducing multi-dislocations and substructures, effectively enhancing sample strength. For samples without β -quenching treatment, elongation and bending performance exhibit upward trends, showing a fundamentally positive correlation between bending formability and elongation. When TA5 ingots undergo hot breakdown rolling in the single-phase region to 9 mm, followed by 940℃ rolling to 5 mm, then warm rolling at 550℃ from 5 mm to 4 mm, and finally 650℃ annealing for 40 minutes with air cooling, uniform fine equiaxed microstructures can be achieved.

Key words TA5 sheet, Hot rolling, Tissue, Property, Bend

0 引言

TA5钛合金是一种全 α 型钛合金,由于其中等强度、良好焊接性、高疲劳寿命及耐海水腐蚀能力是航空发动机与船用金属结构材料的理想选择^[1],被广泛应用于航空发动机风扇、舰船烟囱蒙皮、桅杆等零部件^[2],还被应用在船舶的系泊装置及发射装置上^[3-4]。该合金在室温下具有密排六方(hcp)结构,滑移系统少,在加工过程中极易形成织构,从而导致力学性能各向异性。TA5合金最典型的板材厚度为4.0 mm,

按照常规加工工艺应由冷轧产出,但由于TA5处于hcp结构的 α (Ti)相区,冷轧退火加工极易产生晶粒择优取向,产生织构,这种晶粒择优取向会对板材延伸率、折弯性能产生不利影响,同时变形抗力大也导致该牌号薄板难以冷轧加工,轧程太长^[5-7]。虽然一些高校、实验室已制定4.0 mm TA5板材冷轧成型工艺并经退火成功获得试制样件,但在工业化量产中难以达到实验室设计的轧制参数,导致多次轧制、多次中间退火,成品4.0 mm冷轧退火板材出现折弯不

收稿日期:2023-05-30

第一作者简介:张野,1989年出生,工程师,研究方向为钛、镍、铜等合金熔炼及压力加工。E-mail:740569019@qq.com

通信作者:王安国,1979年出生,教授,材料成型及控制工程。E-mail:13604188303@163.com

合格问题。因此,解决4.0 mm TA5 板材冷加工难变形、易开裂等问题,确保其高品质工业化量产的研究意义重大。本文采用淬火、热轧、温轧之间不同工艺组合对比试验的方式,探究并得出4.0 mm 厚度TA5 钛合金板材抗拉强度、屈服强度、延伸率、折弯性能达到最佳匹配的工艺路线,有效避免了TA5 板材室温变形抗力大难于冷轧、冷轧工序流程长需要多次中间退火、冷轧容易开裂及冷轧板型差不易矫平等问题。

1 实验

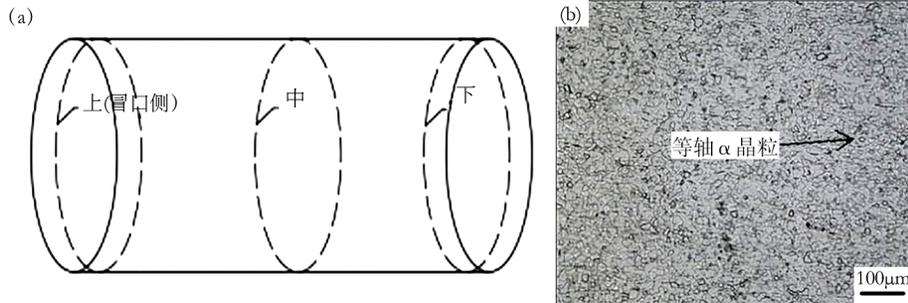


图1 铸锭取样位置示意图及坯料原始组织

Fig. 1 Ingot sampling position schematic diagram and original structure of billet

表1 TA5 钛合金化学成分配比

说明	O	N/10 ⁻³	H/10 ⁻³	C/10 ⁻³	Fe	Al	B/10 ⁻³	Ti
标准 GB3620.1	≤0.15	≤0.04	≤15	≤80	≤0.30	3.3~4.7	5	余量
图1 位置								
上	0.14	13	0.9	6.9	0.24	4.39	3.9	-
中	0.13	4.9	0.4	7.3	0.25	4.38	3.4	-
下	0.15	7.9	0.9	6.0	0.25	4.38	4.4	-

1.2 试验方法

本实验抗拉强度、屈服强度及伸长率测试满足 GB/T228. 1—2010 《金属材料拉伸试验》要求,弯曲测试满足 GB/T232—2010 《金属材料弯曲试验方法》的规定,弯曲弯头直径为 10 mm、跨距为 52 mm、速度为 5 mm/min。试验设备为万能试验机 CMT5105。

为避免冷轧,本实验采用淬火、热轧、温轧、退火随机组合的方式开展,探究最佳工艺路线。根据前期试验结论,淬火温度设置为 990℃、单相区热轧温度设置为 980~990℃、两相区热轧温度设置为 940℃、温轧温度设置为 550℃、退火温度设置为 650℃。

2 结果与讨论

2.1 初步对比试验

采用如下 3 种工艺开展初步对比试验,见表 2,得到板材力学性能曲线见图 2,样品晶界分布图见图 3。由图 2 可见,2# 样品屈服强度最高,达到 720 MPa 以上。由图 3(2#) 可知样品的组织中存在许多纵横交错片层 α 晶粒,且晶粒的内部存在较多的位错亚结构,这些现存的位错亚结构会限制位错的运动,进

1.1 材料

实验材料为中铝沈阳有色金属加工有限公司 9.0mm TA5 板材,板材生产工艺为:真空自耗炉熔炼(两次)→多火次开坯锻造→铣面(规格约 215 mm×1 500 mm×2 500 mm)→热轧开坯(至 40 mm)→矫直、分切→抛丸→热轧(至 20 mm)→在线炉加热→热轧(至 9 mm)。材料相变点为 950℃,如图 1(a)所示各部分化学成分见表 1,原始组织为等轴 α 晶粒,如图 1(b)所示。

一步使屈服强度升高。

表2 1#~3#样品工艺对比

样品	工艺
1#	990℃保温 1h 水淬(后文均简称作“β 淬火”)+550℃温轧至 4mm(道次间重新回炉保温 5min 后继续轧制)空冷+650℃保温 40min 空冷(后文简称“退火”)
2#	β 淬火+980℃经几道次轧至 5mm+保温 5min 水淬+550℃轧至 4mm+650℃保温 40min 水淬
3#	980℃从 9mm 轧到 5mm 空冷+550℃从 5mm 轧至 4mm+退火

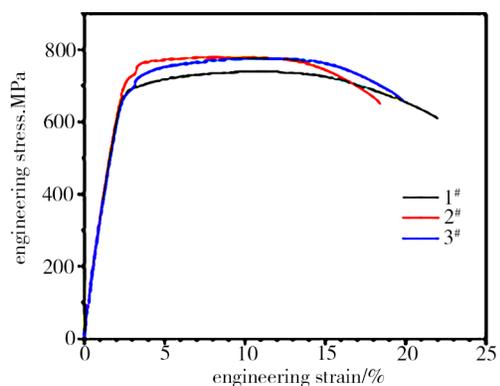


图2 1#~3#样品拉伸曲线

Fig. 2 Tensile curves of 1#~3# samples

1# 轧制退火板材屈服强度与 3# 相近,可见虽然 1# 轧制退火板材由于发生再结晶使得晶粒细化,但同时位错亚结构也急剧减少(与文献[8]研究结论相一致),而 3# 晶粒尺寸较大,只发生少量的再结晶,但

错亚结构含量相对较高,见图3(1[#]、3[#],红色线为位错亚结构,黑色线为晶界)。3[#]样品屈服后应变硬化速率高,故抗拉强度高。通过2[#]、3[#]的对比可知3[#]均匀

化与等轴化程度更高,这是由于3[#]在相对缓慢冷却过程中,显微组织中的 α 相进一步球化长大,并且有长大趋势^[9]。

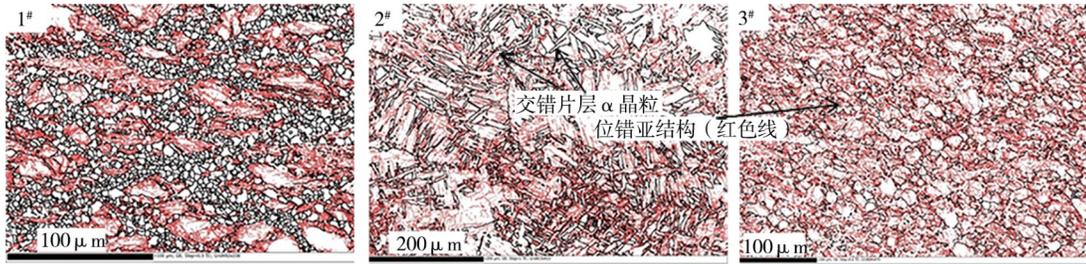


图3 1[#]~3[#]样品晶界分布图

Fig. 3 Grain boundary distribution of 1[#]-3[#] samples

2.2 扩大对比试验

将2[#]轧制工艺温度980℃改为990℃及轧到5 mm后直接空冷,其他相同,仍然以2[#]表示。3[#]轧制工艺温度980℃改为990℃,其他不变,仍然以3[#]表示。

同时增加其他工艺对比试验,见表3,经轧制后,所有板材在650℃保温40 min后空冷。得到板材力学性能拉伸曲线见图4,样品显微组织图见图5。

表3 2[#]~8[#]工艺对比

Tab. 3 Process comparison of 2[#]-8[#]

样品	工艺
2 [#]	β 淬火+990℃从9mm轧至5mm空冷+550℃从5mm轧至4mm空冷+退火
3 [#]	990℃从9mm轧至5mm空冷+550℃从5mm轧至4mm空冷+退火
4 [#]	β 淬火+990℃从9mm轧至4mm空冷+退火
5 [#]	β 淬火+990℃从9mm轧至6.5mm空冷+940℃从6.5mm轧至4mm空冷+退火
6 [#]	β 淬火+990℃从9mm轧至6.5mm+ β 淬火+940℃从6.5mm轧至4mm空冷+退火
7 [#]	β 淬火+940℃从9mm轧至4mm空冷+退火
8 [#]	β 淬火+940℃从9mm轧至5mm空冷+550℃从5mm轧至4mm空冷+退火

由图4、图5可知,轧后强度较好的2[#]样品轧制工艺下,板材的组织为交错分布的片状 α 相,部分片状组织发生破碎以及轻微的弯折,形成细小的晶粒。4[#]轧制工艺,板材在990℃轧至4 mm后空冷下来,为 β 转变的二次 α 层片魏氏组织,其片层间距较2[#]样品宽,晶粒比较粗大。对比4[#]轧制工艺与2[#],差别在于4[#]轧制工艺一直在990℃从9 mm轧至4 mm,而2[#]在990℃轧至5 mm后,又在550℃从5 mm轧至4 mm,这说明高温轧制后,空冷下来的板材经过温轧可以细化组织,对材料的强度有显著的提升作用。3[#]样品靠近板材表面部分出现大量的等轴状的动态再结晶晶粒,而在板材中间部位,其组织与2[#]样品板材接近,2[#]片状组织细长而3[#]片层较宽且长度较短。这种组织导致3[#]板材的强度与2[#]相近,但伸长率不高,表面边部的等轴组织不能承受高的强度而较早地萌生裂纹,导致伸长率降低。5[#]样品在990℃轧至6.5 mm后空冷得到为粗大的魏氏组织,而6[#]样品在990℃轧至6.5 mm水淬,片层组织来不及长大而得到细长的片状 α 相,另外,可以观察到粗大的晶界 α 相以及一些球化的细小等轴状 α 晶粒分布在层片之间。6[#]样品

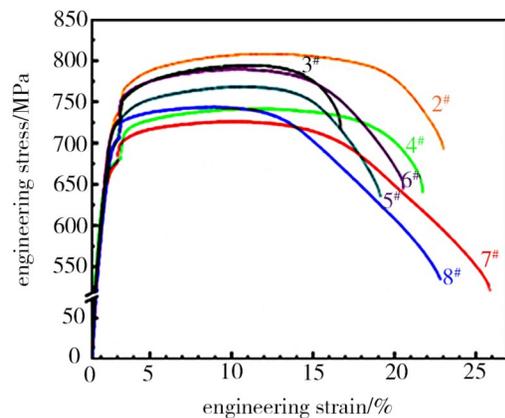


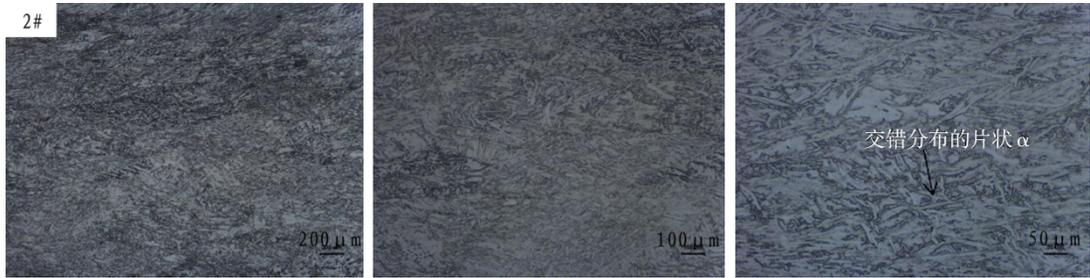
图4 2[#]~8[#]样品拉伸曲线图

Fig. 4 Tensile curves of 2[#]-8[#] samples

处理工艺相对于5[#]样品,使强度和塑性均得到提高,但弯曲性能较5[#]样品差。7[#]样品组织为等轴状的 α 晶粒,等效晶粒尺寸为15.6 μm 。8[#]样品组织呈流线型,晶粒有沿轧制方向被拉长的趋势,8[#]样品经过550℃温轧,晶粒尺寸反而较粗大,这表明7[#]样品轧制工艺动态再结晶更加充分,再结晶形核率更高,所以再结晶的细小等轴晶粒更多,使得晶粒尺寸较8[#]样品细小。而8[#]样品经过温轧,位错亚结构密度较7[#]

高,因而8#轧制样品的强度更高。7#样品热轧过程产生的热能更高,存储于晶粒内部的能量更大,为热变形过程中晶粒的回复和长大提供较高的能量^[10],在轧后冷却和退火过程中部分被破碎的细小晶粒可得到重新长大,促进组织均匀等轴化^[11-12],这与图5中

7#样品、8#样品显微组织对比下7#样品晶粒更均匀、等轴程度更高相匹配。随着等轴晶粒数量增多、材料的变形协调性增加,改善了材料的塑性。另一方面,晶粒尺寸的增大导致材料内部相界面减少,对于位错的钉扎作用减弱,造成材料强度的下降^[13-14]。



(a) 2#样品



(b) 3#样品



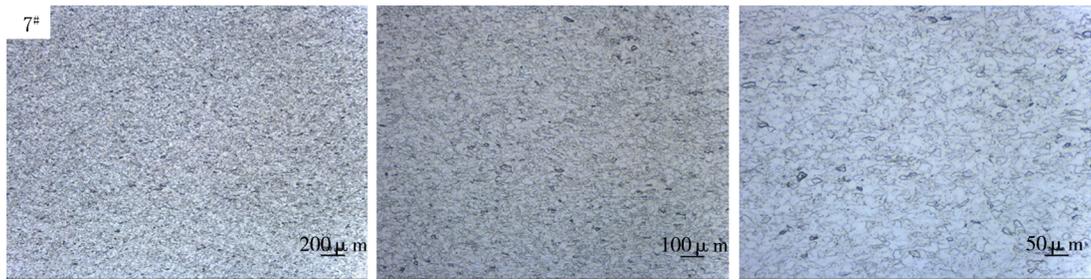
(c) 4#样品



(d) 5#样品



(e) 6#样品



(f) 7#样品



(g) 8#样品

图5 2#~8#样品显微组织图(从左至右50×、100×、200×)

Fig. 5 Microstructure of 2#~8# samples (50×, 100×, 200× from left to right)

上述样品经过弯头直径10 mm进行折弯试验仅7#样品其中一根折弯角度达到60°标准要求,这与7#样品延伸率最高达到25%以上相互验证,见图6。

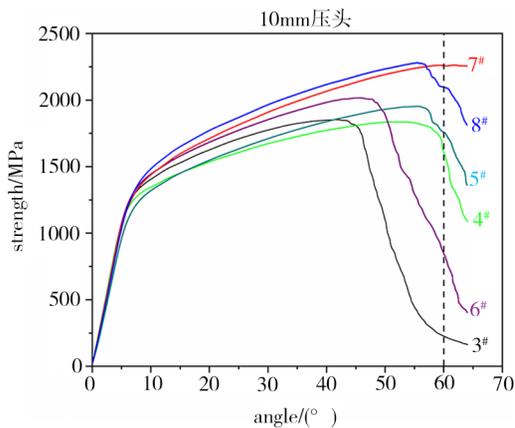


图6 样品弯曲角度—抗弯强度曲线

Fig. 6 Sample bending angle—bending strength curves

2.3 补充对比试验

将2.2中4#、7#、8#样品β淬火去掉,仍采用原编号,工艺对比见表4,所有轧后板材均在650℃保温40 min后空冷。得到板材力学性能拉伸曲线见图7,样品显微组织图见图8,样品弯曲角度—抗弯强度曲线见图9。

由图7及图8对比2.2中实验结果可知,淬火流程取消后样品延伸率普遍得到提升,7#、8#样品强度呈下降趋势,原因在于取消淬火后热轧前并无粗大β转变组织,样品热轧过程晶粒破碎,热轧后余热及退火过程中晶粒回复再结晶相对充分,得到等轴晶粒

表4 4#、7#、8#样品工艺对比

Tab. 4 Process comparison of 4#, 7# and 8# samples

样品	工艺
4#	990℃从9mm轧至4mm空冷+退火
7#	940℃从9mm轧至4mm空冷+退火
8#	940℃从9mm轧至5mm空冷+550℃从5mm轧至4mm空冷+退火

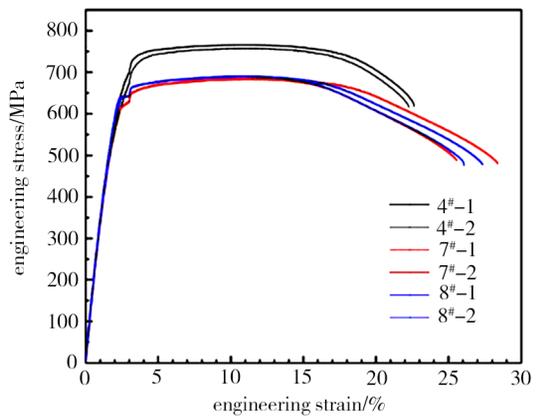


图7 4#、7#、8#样品拉伸曲线

Fig. 7 Tensile curves of 4#, 7# and 8# samples

且相比有淬火流程有增大趋势。4#样品取消淬火后由于轧制温度高,样品退火后依然为β转变的二次α层片魏氏组织,所以样品组织及强度方面基本与淬火前一致。由图9可知取消淬火后4#、7#、8#样品均可以达到折弯要求。但4#样品折弯性能偏差,7#、8#样品折弯性能优异,但7#样品强度略低于标准685 MPa的要求。

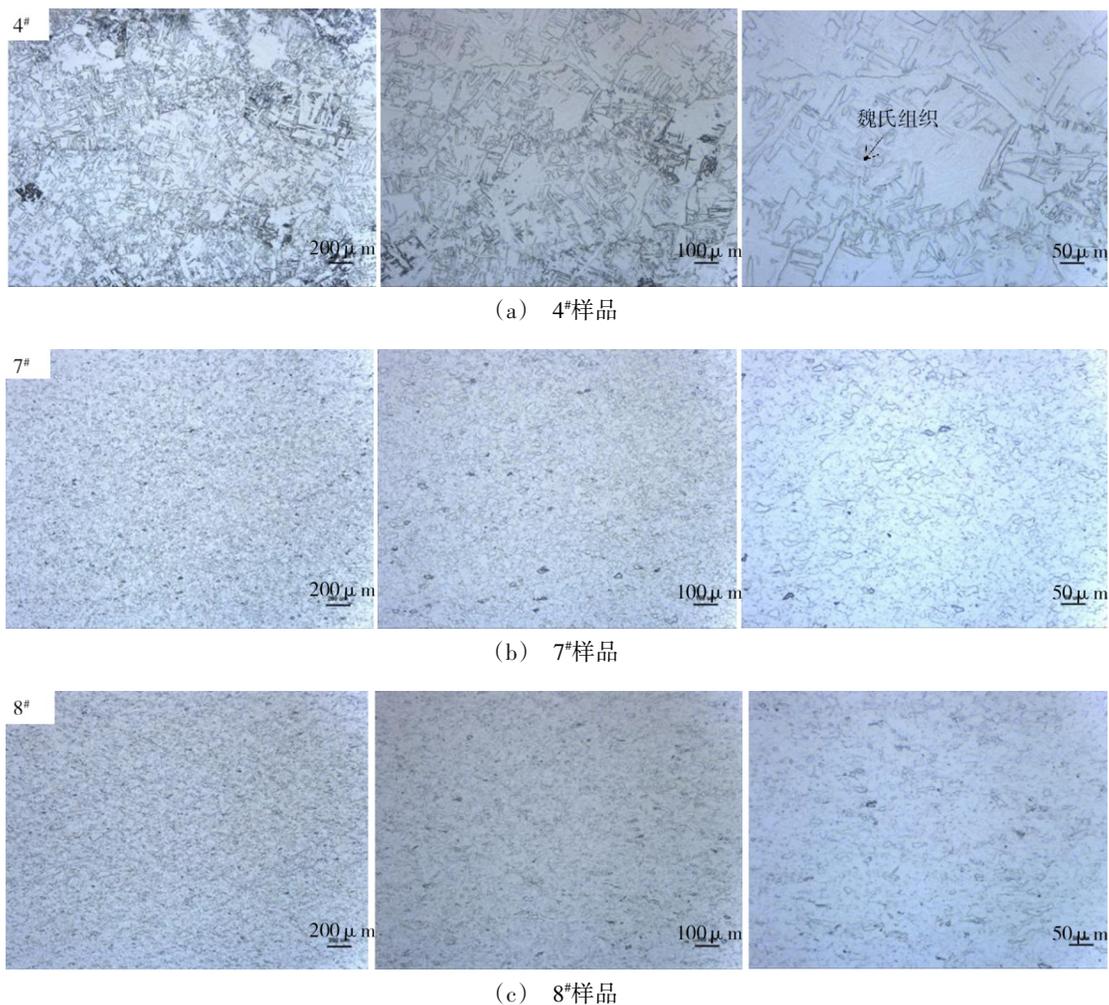


图8 4#、7#、8#样品显微组织图(50×、100×、200×)
Fig. 8 Microstructure of 4#, 7# and 8# samples (50×、100×、200×)

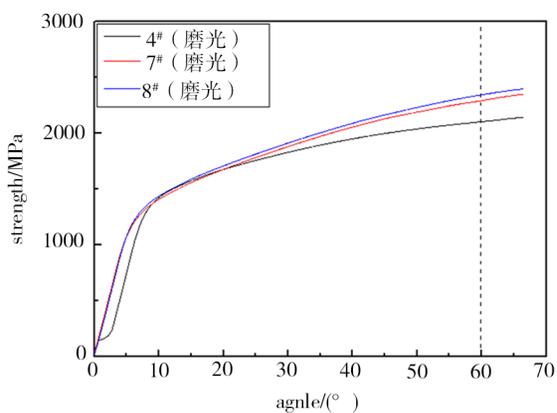


图9 4#、7#、8#样品弯曲角度–抗弯强度曲线
Fig. 9 Bending angle–bending strength curves of 4#, 7# and 8# samples

3 结论

(1)在 β 淬火后经 550°C 温轧后可以快速细化板坯组织,引入更多位错及亚结构,使得样品强度得到进一步提升,但大幅度的晶格畸变经过 650°C 退火热处理后可能不能完全再结晶,一定程度表现为流线组织,对延伸率指标产生一定影响。

(2)样品在 β 淬火后产生了粗大的魏氏组织,未充分破碎的魏氏组织残留退火后成为二次 α 层片魏氏组织,会对延伸率的提升起到不利影响。

(3)TA5铸锭经锻造单相区热轧开坯至9 mm后在 940°C 轧至5 mm,空冷,在 550°C 从5 mm轧至4 mm,空冷,再通过 650°C 保温40 min后空冷热处理后可以得到均匀细小的等轴组织,强度、塑性、折弯性能等均能达到标准要求。

参考文献

- [1] GAO F Y, GUO Y F, QIU S W, et al. Fracture toughness of friction stir welded TA5 titanium alloy joint [J]. Materials Science & Engineering A, 2020, 776 : 13896.
- [2] 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.
- [3] ZHAO Y Q. Major innovative marine titanium alloys and their applications in China [J]. Material Progress in China, 2014, 33(7): 398–404.
- [3] 夏申琳, 王刚, 杨晓, 等. 钛及钛合金在船舶中的应用 [J]. 金属加工(冷加工), 2016(19): 40–41.

- XIA S L, WANG G, YANG X, et al. Application of titanium and titanium alloys in ships [J]. Metal Processing (Cold Processing), 2016 (19): 40-41.
- [4] 张世进, 李凯, 易丹青, 等. 冷轧TA5钛合金退火过程的再结晶行为及织构演变[J]. 金属热处理, 2022, 47(2): 1-8.
- ZHANG S J, LI K, YI D Q, et al. Recrystallization behavior and texture evolution during annealing of cold-rolled TA5 titanium alloy [J]. Metal heat treatment, 2022, 47(2): 1-8.
- [5] 郝晓博, 张强, 陶会发, 等. 轧制工艺对TA5钛合金薄板组织与性能的影响[J]. 热加工工艺, 2019, 48(19): 119-120.
- HAO X B, ZHANG Q, TAO H F, et al. Effect of rolling process on structure and properties of TA5 titanium alloy sheet [J]. Hot Working Process, 2019, 48(19): 119-120.
- [6] 万国喜, 刘艳红, 刘鹏, 等. 轧制工艺对高强度车轮AG650LW轮辋钢的组织性能的影响[J]. 特殊钢, 2023, 44(01): 83-88.
- WAN G X, LIU Y H, LIU P, et al. Effect of rolling process on structure and properties of wheel rim steel AG650LW for high strength wheel [J]. Special Steel, 2023, 44(01): 83-88.
- [7] 朱立光, 李港湾, 郑亚旭, 等. 薄带铸轧流程制备含钕3% Si取向硅钢的组织织构研究[J]. 特殊钢, 2022, 43(05): 14-22.
- ZHU L G, LI G W, ZHENG Y X, et al. Microstructure and texture of yttrium bearing 3% Si oriented silicon steel fabricated by thin strip casting rolling process [J]. Special Steel, 2022, 43(05): 14-22.
- [8] YU W X, LU Y F, LI S K, et al. Mechanism of the anisotropy of yield ratio in TA5 titanium alloy plates [J]. Materials Science & Engineering A, 2015, 639: 314-319.
- [9] 王媛, 董健, 谢力, 等. 化学成分及热处理工艺对TA5合金棒材力学性能的影响[J]. 材料开发与应用, 2021, 36(02): 35-38.
- WANG Y, DONG J, XIE L, et al. Effect of chemical composition and heat treatment process on mechanical properties of TA5 alloy bars [J]. Development and Application of Materials, 2021, 36(02): 35-38.
- [10] 廖强, 谢文龙, 曲恒磊, 等. 热轧温度对TA5-A钛合金板材组织及拉伸性能的影响[J]. 热加工工艺, 2012, 41(16): 50-52.
- LIAO Q, XIE W L, QU H L, et al. Effect of hot rolling temperature on structure and tensile properties of TA5-A titanium alloy plate [J]. Hot working process, 2012, 41(16): 50-52.
- [11] 王媛, 董健, 关玉龙, 等. TA5合金板材工艺对显微组织和力学性能的影响[J]. 材料开发与应用, 2022, 37(04): 61-64.
- WANG Y, DONG J, GUAN Y L, et al. Effect of process on microstructure and mechanical properties of TA5 alloy sheets [J]. Development and Application of Materials, 2022, 37(04): 61-64.
- [12] 孙虎代, 王田, 陶海林, 等. 轧制温度及退火温度对TA5钛合金棒材组织和性能的影响[J]. 中国钛业, 2017, (4): 40-43.
- SUN H D, WANG T, TAO H L, et al. Influence of rolling temperature and annealing temperature on the microstructure and properties of TA5 titanium alloy bars [J]. China Titanium Industry, 2017, (4): 40-43.
- [13] 康聪, 李进元, 任驰强, 等. 成形及退火温度对TA5钛合金显微组织和力学性能的影响[J]. 湖南有色金属, 2021, 37(01): 50-52.
- KANG C, LI J Y, REN C Q, et al. Influence of forming and annealing temperatures on the microstructure and mechanical properties of TA5 titanium alloy [J]. Hunan Nonferrous Metals, 2021, 37(01): 50-52.
- [14] 刘慧丹, 尹利成, 朱继乔, 等. 时效轧制温度对低温取向硅钢组织、织构及磁性能的影响[J]. 特殊钢, 2024, 45(03): 80-84.
- LIU H D, YI L C, ZHU J Q, et al. Effect of aging rolling temperature on the microstructure, texture and magnetic properties of Low-temperature Grain-oriented silicon steel [J]. Special Steel, 2024, 45(03): 80-84.