

不同轧制工艺对 Gr.38 钛合金板材组织性能的影响

Effect of Different Rolling Processes on Microstructure and Properties of Gr.38 Titanium Alloy Sheet

供稿|景亚婷, 杨铮, 胡雅歌 / JING Yating, YANG Zheng, HU Yage

内容导读

通过 2450 mm 轧机对 Gr.38 进行轧制加工, 对比分析了 6 种不同轧制工艺对 Gr.38 板材的显微组织、力学性能、冲击韧性和硬度等方面的影响。结果表明: 两相区轧制+普通退火态的板材强度、塑性以及韧性匹配要优于近 β 和准 β 轧制的板材, 且经过高温淬火+低温轧制的板材各向异性明显小于纯低温轧制的板材, 说明高温淬火可以削弱织构, 减小横纵向性能差异。高温淬火+900 °C 低温变形和 880 °C 低温大变形换向轧制的板材横纵向力学性能均能满足指标要求。采用低温大变形换向轧制工艺生产的普通退火态 Gr.38 钛合金板材防弹效果最好。

钛合金具有较高的强度密度比, 优异的耐腐蚀性能、焊接性能, 因此在航空、航天、兵器、舰船、民用等领域得到了广泛的应用^[1-4]。钛合金与钢相比结构减重可达 30% 以上, 与铝合金相比, 同等质量的钛合金装甲比铝合金装甲防护力提高 30% 以上, 因此钛合金成为世界各装甲强国为减轻整车质量和提高防护能力所竞相采用的主要材料之一^[5]。

Gr.38 钛合金是美国 Allegheng 技术公司 (ATI) 开发的一种新钛合金, 可代替通用的中高强钛合金, 其名义成分为 Ti-4Al-2.5V-1.5Fe-0.25O, 是一种 $\alpha+\beta$ 型高强钛合金。和 TC4 合金相比, Gr.38 合金利用铁代替较高成本的钒作为 β 稳定元素, 其强度与 TC4 合金相当, 伸长率相当或略高。但与之不同的是 Gr.38 钛合金既能热加工又能冷加

工, 可制成薄板、卷材、条材、精密热轧带材、厚板、无缝管材以及铸件和工程化产品。鉴于 Gr.38 钛合金具有极佳的超塑成形性和开孔疲劳性能, 还可进行摩擦搅动焊接, 其用途十分广泛, 颇适合用来取代钢、铝、纯钛材及其他钛合金, 特别是在航空航天以及军事防御系统方面有极其广阔的应用前景^[6]。

实验材料与方法

试验用 Gr.38 钛合金板材采用 3 次真空自耗电弧熔炼 $\phi 220$ mm 铸锭, 在铸锭上扒皮后取样检测其相变点 (T_{β}) 温度为 990 °C。相变点以上开坯, 两相区反复锻拔锻造成厚度约 144 mm 的板坯, 后经两次加热轧制成板。Gr.38 钛合金板材的化学成分见表 1, 板坯在两相区开坯轧制至 40 mm, 显微组织见图 1,

作者单位: 新疆湘润新材料科技有限公司, 新疆 哈密 839000

表1 化学成分 (质量分数) %

Al	V	Fe	O	C	N	H	Ti
4.41	2.48	1.42	0.258	0.029	0.014	0.001	余量

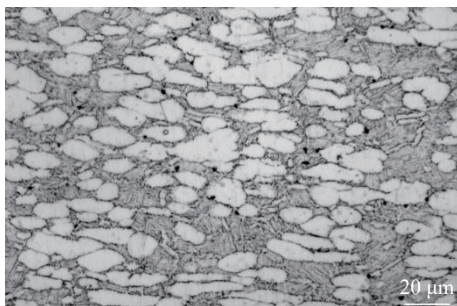


图1 Gr.38 钛合金开坯轧制后显微组织

为典型的两相钛合金组织。

然后经火焰切割机下料, 随后按照表2经过6种工艺轧制厚度为7.0~8.2 mm 钛合金热态板材, 其中1#~4#工艺成品轧制均采用7个轧制道次, 道次变形量约12%, 5#和6#工艺的区别在于热轧道次及变形量不同, 5#工艺采用6个轧制道次, 道次变形量约15%, 6#工艺采用4个轧制道次, 道次变形量约20%。将热态板材在750℃温度下退火处理60 min后空冷, 采用2450 mm四辊可逆热轧机对Gr.38钛合金板材进行轧制, 24 m辊底式电阻退火炉对Gr.38钛合金板材进行热处理, 在成品板材整体热处理后取试样进行力学性能及金相检测。采用CMT5205电子万能试验机、NEXUS3001XLM-IMP硬度计进行力学性能测试, ICX41M光学显微镜进行显微组织观察。

表2 Gr.38 钛合金板材轧制工艺

编号	轧制工艺
1#	近β轧制 ($T_{\beta}-10^{\circ}\text{C}$)
2#	准β轧制 ($T_{\beta}+20^{\circ}\text{C}$)
3#	高温淬火 ($T_{\beta}+20^{\circ}\text{C}$) + 低温轧制 ($T_{\beta}-90^{\circ}\text{C}$)
4#	低温轧制 ($T_{\beta}-90^{\circ}\text{C}$)
5#	低温大变形换向轧制 ($T_{\beta}-90^{\circ}\text{C}$)
6#	低温大变形换向轧制 ($T_{\beta}-110^{\circ}\text{C}$)

实验结果与讨论

轧制工艺对显微组织的影响

Gr.38 板材经过近β轧制: 980℃轧制 (1#工艺), 退火后获得初生等轴α相 (体积分数10%~

15%) + β转变组织典型双态组织 (图2(a)), β转变组织中的次生条状α相细密且交织成网状。两相钛合金在α+β两相区变形过程中, 片层α相的等轴化是其塑性变形过程的重要行为, 动态再结晶被认为是片层组织等轴化的重要机制^[7]; Gr.38 板材经过准β轧制: 1010℃轧制 (2#工艺), 退火后获得典型的片层组织 (图2(b)), β晶粒沿金属流动方向被压扁拉长, 在β晶粒中产生了明显的弯曲变形带, 在变形晶粒的交叉处以及变形带上有部分细小的等轴晶粒, 发生了部分动态再结晶; Gr.38 板材经过高温淬火+低温轧制: 1010℃淬火+900℃轧制 (3#工艺), 退火后获得细小混乱交织的网篮组织 (图2(c)), 高温淬火形成的原始β晶界获得充分破碎, 无明显细晶界α存在; Gr.38 板材经过低温轧制: 900℃轧制 (4#工艺) 退火后获得典型的等轴组织 (图2(d)), 初生α相含量增多, 低温轧制导致金属加工流线更明显, 且拉长的层状α增多; Gr.38 板材经过5#和6#轧制工艺下退火后获得的组织α相被拉长, 排列更加有序, 体现在横向和纵向力学性能各向异性更加明显。经对比发现, 880℃低温大变形换向轧制获得的板材组织, 初生层状α相相对更加细小, 长宽比更大, 次生α相呈细密混乱交织状。而900℃轧制的板材组织中, 初生α相粗大且呈云朵状, 次生α相沿金属加工流线方向呈条状且混乱交织程度较小。

轧制工艺对力学性能的影响

工艺决定组织, 组织决定性能, 轧制工艺对钛合金板材力学性能有着很大的影响。图3是Gr.38钛合金板材经不同轧制工艺后的力学性能表现, 由图3看出, 对比1#和2#工艺的力学性能, 随着轧制温度的升高, 材料的强度指标急剧下降, 表明过高的轧制温度不利于改善材料的综合力学性能。3#工艺表明材料在高温淬火后进行低温轧制, 抗拉强度、屈服强度均有所提升。经过工艺4#~6#轧制, 材料性能相对工艺3#来说变差。

Gr.38 钛合金板材进行不同的轧制工艺处理后, 其性能测试结果如表3所示。由表3可以看出, 并非所有结果都能达到标准, 具体来说, 1#、2#、4#工艺轧制后的板材均未能满足既定的性能要求, 仅3#和6#工艺符合预定指标要求。对于3#和6#工艺,

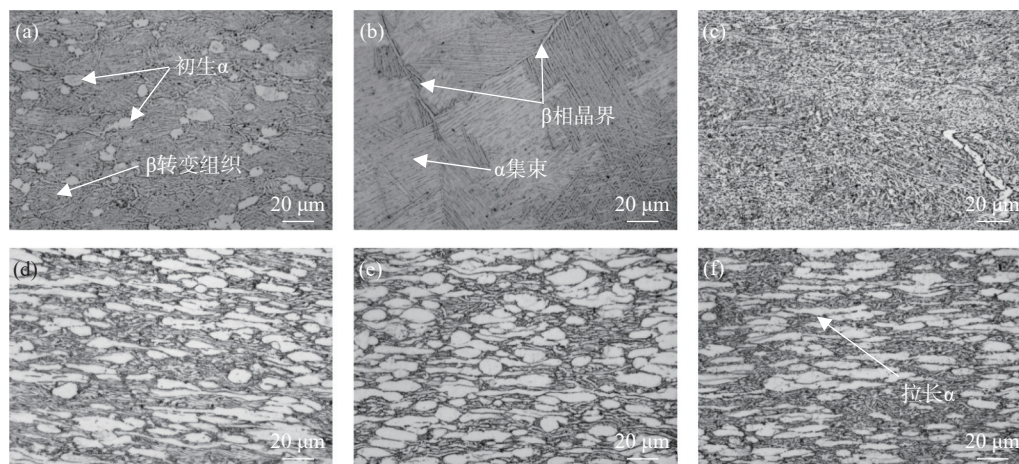


图2 Gr.38 钛合金板材不同工艺轧制后的显微组织: (a) 1[#]; (b) 2[#]; (c) 3[#]; (d) 4[#]; (e) 5[#]; (f) 6[#]

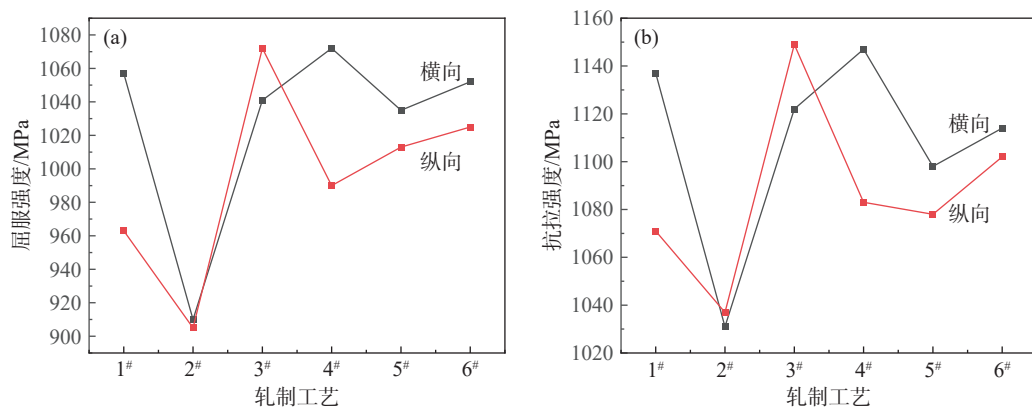


图3 轧制工艺对 Gr.38 钛合金力学性能的影响: (a) 屈服强度; (b) 抗拉强度

表3 Gr.38 钛合金不同工艺拉伸性能及硬度

工艺	方向	抗拉强度/MPa	屈服强度/MPa	断后伸长率/%	断面收缩率/%	冲击功/J	硬度, HBW
指标	—	≥1080	950~1095	≥15	≥45	≥22	≥320
1 [#]	横向	1137	1057	17	43	23	331
	纵向	1051	943	15	34	25	
2 [#]	横向	1031	910	12	20	21	327
	纵向	1017	885	14	28	24	
3 [#]	横向	1122	1091	17	45	22	343
	纵向	1129	1092	16	46	25	
4 [#]	横向	1147	1072	16	43	23	330
	纵向	1063	970	16	40	26	
5 [#]	横向	1098	1035	16	45	25	333
	纵向	1058	993	17	45	28	
6 [#]	横向	1114	1052	18	50	25	340
	纵向	1082	1005	18	48	28	

注: 该性能指标要求为内部自研项目, 依据产品用途预设的指标。

在强度方面 3[#]工艺稍强于 6[#]工艺, 但在塑性-韧性-硬度方面工艺 6[#]工艺要优于 3[#]。综合来说, 在符合

指标要求的情况下, 6[#]工艺性能匹配最佳。近一步分析发现, 6 种轧制工艺生产的板材在纵向方向上均表

现出比横向更高的冲击韧性,高出约 2~3 J。这一现象可以归因于纵向方向上长条 α 的交叉排列,这种排列在冲击过程中增加了断裂裂纹的扩展路径,从而使得裂纹扩展所需的能量逐级增加^[8],最终导致合金板材的冲击韧性得到提升。在硬度方面,3[#]和 6[#]工艺生产的板材硬度相对较高。特别值得注意的是,3[#]工艺,即高温淬火 ($T_{\beta}+20^{\circ}\text{C}$) + 低温轧制 ($T_{\beta}-90^{\circ}\text{C}$) 生产的板材在力学性能的各向异性方面表现出明显的优势,因为板材中的织构是影响合金力学性能各向异性的主要因素之一^[9]。Cheng 等^[10]对 TA32 高温钛合金的研究表明:随着退火温度升高, α 相中逐渐形成 R 型织构, B 型织构逐渐减弱,织构强度的差异主要与初生 α 相和转变 β 相体积分数有关。通常,基面织构会削弱各向异性,而 R 型织构和 T 型织构会增加各向异性。通过对 4[#]和 6[#]工艺的力学性能数据进行对比,发现换向交叉轧制可以减小力学性能的各向异性,这也符合薄东明等^[11]对 ZK60 镁合金的研究:交叉轧制可以削弱基面织构,削弱板材各向异性,使材料组织更加均匀,提高断后延伸率。在结合 3[#]工艺,可以给出结论:高温淬火和换向交叉轧制能够有效消弱织构,从而减小横纵向性能的差异。

综上所述,通过对 Gr.38 钛合金板材的不同轧制工艺下组织及力学性能进行对比和分析发现,首先 3[#]和 6[#]工艺轧制的板材各项性能均满足指标要求;其次适当的高温淬火和低温换向轧制工艺对于提高材料的力学性能和减少性能各向异性具有重要作用。这些发现对于优化钛合金板材的生产和应用具有重要的指导意义。

抗弹性能

打靶测试选用了各项力学性能均满足预期研发指标要求的 3[#]和 6[#]工艺生产的 Gr.38 钛合金板材,板材热处理后表面进行抛丸酸洗处理。按照 GJB59.18—1998 进行打靶测试,射击参数:100 m 射距,53 式 7.62 mm 普通弹,经过 5 发子弹射击后,打靶测试结果见图 4,3[#]工艺高温淬火 ($T_{\beta}+20^{\circ}\text{C}$) + 低温轧制 ($T_{\beta}-90^{\circ}\text{C}$) 生产的板材经 5 发子弹射击后,3 发直接侵彻贯穿板材,两发弹坑较深,背面开裂,防护等级较低;6[#]工艺低温大变形换向轧制 ($T_{\beta}-110^{\circ}\text{C}$) 生产的板材经 5 发子弹射击后,板材正面 4 发子弹弹坑较浅,1 发子弹弹坑较深,板材背面均未出现开裂。测试结果表明在综合性能匹配最佳的情况下,防弹效果最好,这与王幸运等^[7]的研究结果一致。

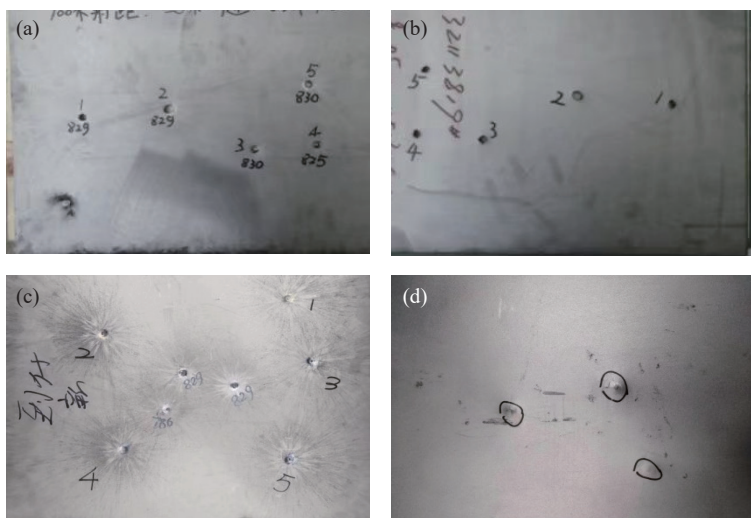


图 4 打靶测试宏观图:(a-b) 分别为 3[#]工艺靶材受子弹冲击后的正面和反面;(c-d) 分别为 6[#]工艺靶材受子弹冲击后的正面和反面

结论

(1) 经过不同轧制工艺研究发现,两相区轧制+普通退火态(3[#]~6[#]工艺)的板材强度、塑性以及

韧性匹配要优于近 β 和准 β 轧制的板材,且经过高温淬火+低温轧制的板材各向异性明显小于纯低温轧制的板材,说明高温淬火可以消弱织构,减小横纵

向性能差异。

(2) 随着轧制温度的升高, Gr.38 钛合金板材的强度和塑性指标急剧下降, 过高的轧制温度不利于改善材料的综合力学性能。

(3) 3[#]工艺高温淬火+低温变形和 6[#]工艺低温大变形换向轧制的板材纵横力学性能均能满足指标要求, 考虑到工程化应用的便捷性, 选择 6[#]工艺低温大变形换向工艺进行 Gr.38 钛合金板材的轧制。

(4) 6[#]工艺生产的 Gr.38 钛合金板材在强度、塑性、冲击韧性、硬度综合性能匹配最佳的情况下, 防弹效果最好。

参考文献

- [1] 李毅, 赵永庆, 曾卫东. 航空钛合金的应用及发展趋势. 材料导报, 2020, 34(S1): 280
- [2] 邹武装. 钛及钛合金在航天工业的应用及展望. 中国有色金属, 2016(1): 70.
- [3] 陈京生, 孙葆森, 安康. 钛合金在兵器装备上的应用. 兵器装备工程学报, 2020, 41(12): 14
- [4] 常辉, 王向东, 周廉. 钛合金及其在舰船装备上的应用现状与趋势. 中国材料进展, 2014, 33(Z1): 603
- [5] 朱知寿, 商国强, 王新南, 等. 低成本高性能钛合金研究进展. 钛工业进展, 2012, 29(6): 1
- [6] 李永林, 袁红君, 朱宝辉, 等. Gr. 38 钛合金的退火工艺. 金属热处理, 2014, 39(11): 117
- [7] 王幸运, 雷文光, 岳旭, 等. 低成本 XRF001 钛合金抗弹性能研究. 钛工业进展, 2022, 39(3): 7
- [8] 马英杰, 刘建荣, 雷家峰, 等. 多重热处理对 TC4 合金的组织力学性能的影响. 材料研究学报, 2008(5): 555
- [9] 吴汐羽, 陈志勇, 程超, 等. 热处理对 Ti65 钛合金板材的显微组织、织构及拉伸性能的影响. 材料研究学报, 2019, 33(10): 785
- [10] Cheng C, Feng Y, Chen Z Y, et al. Effect of annealing temperature on microstructure, texture and tensile properties of TA32 plate. Mater Sci Eng A, 2021, 826(4): 141971
- [11] 薄东明, 卢遥, 孙静娜, 等. 轧制方式对 ZK60 镁合金组织与性能的影响. 精密成形工程, 2023, 15(12): 1

作者简介: 景亚婷 (1994—), 女, 甘肃省武威市人, 本科, 助理工程师, 主要从事钛合金质量管理工作。
通信地址: 新疆维吾尔自治区哈密市伊州区花园乡重工业园区新疆湘润新材料科技有限公司; E-mail: 2047207106@qq.com。