

TC4 钛合金卷的热连轧工艺研究

Research on the Hot Continuous Rolling Process for TC4 Titanium Alloy Coil

供稿|周嘉晟, 周洪杰, 冯旺爵, 刘龙祥 / ZHOU Jiasheng, ZHOU Hongjie, FENG Wangjue, LIU Longxiang

内容导读

TC4 轧制(热轧、冷轧)均以单片式轧制为主,产品最终均以单张板形式交货,而单片式轧制时效率低,材料收得率低,为了提高轧制效率和材料收得率,本文利用某钢厂的热连轧装备,研究了 TC4 钛合金卷的热连轧工艺,主要对比两种不同的表面状态和不同粗轧工艺,成功试制出 5.0 mm 卷带,通过最终退火和酸洗后可看出,TC4 表面包覆纯钛层的板坯通过粗轧 7 道次热轧,后续退火酸洗后表面质量较好,力学性能满足 GB/T 3621—2022 要求,为今后的批量工业化生产打下良好的工艺基础。

钛及钛合金因其优异的性能广泛应用于航空、航天、航海、军用装备、医疗器械等尖端科学领域,被誉为“第三金属”和“战略金属”^[1]。TC4 合金作为一种典型的 α - β 型两相钛合金,密度小、比强度高、耐蚀耐热性能好,被广泛应用于航空、航天、军工等领域^[2]。随着越来越多的钛产品涌入民用领域,TC4 钛合金开始被广泛研究,部分研究人员对 TC4 钛合金进行锻造和热处理,研究了其组织演变规律^[3-5]。王小芳等^[6]对 TC4-DT 钛合金高温热变形行为进行研究,分析了该合金的流变应力行为和微观组织演变规律。雷文光等^[7]利用热模拟实验机,对 TC4-DT 高温压缩热变形行为,分析了该合金的流变应力行为以及显微组织演变规律,建立了该合金的本构关系模型以及热加工图。常见的 TC4 加工板加工形式多以单机架可逆式轧机轧制,刘正乔等^[8]虽采用热连轧装备试生产出 TC4 卷带,并测量

热轧卷氧化层厚度和探索了工艺的可行性,但未对宽幅大卷带做连续退火工业化生产实践。

热连轧与传统的单机架可逆式轧机相比,具有生产效率高,能耗低,材料成材率高,批次稳定性及尺寸精度高等优点,本文通过 2 种不同的板坯及粗轧工艺,通过热连轧机组制备出表面和边部质量更加优异的 TC4 卷带,产品性能满足 GB/T3621—2022 要求。

实验材料及过程

工艺流程介绍

本文研究的生产工艺如下:TC4 板坯—步进式加热炉—四辊可逆粗轧机组—飞剪—8 机架精轧机组—板型仪多功能仪—层流冷却—表检仪—卷取机—黑皮打捆喷号—开卷—焊接—退火—拉矫—抛丸—酸洗—质检—白皮成品打包。

实验原料

本次热轧 2 块 TC4 钛合金板坯, 实验坯选用某公司 3 次真空自耗电极熔炼炉 (VAR) 熔炼熔铸、经锻造墩拔后进行扒皮铣面等工序获得的 TC4 板坯, 板坯规格分别是 1[#]7142 mm (长度)×1084 mm (宽度)×185 mm (厚度) 和 2[#]7353 mm (长度)×1078 mm (宽度)×185 mm (厚度), 其中, 1[#]为常规铣面的 TC4 钛合金板坯, 2[#]为表面包覆纯钛的 TC4 钛合金板坯, 其化学成分如表 1 所示, 2 块板坯照片如图 1 所示。

表 1 TC4 钛合金化学成分 (质量分数) %

板坯编号	Fe	C	O	N	H	Al	V
1 [#]	0.041	0.014	0.058	0.007	0.0006	6.11	4.08
2 [#]	0.042	0.014	0.058	0.007	0.0006	6.12	4.06



图 1 TC4 钛合金板坯: (a) 1[#]板坯 (常规铣面); (b) 2[#]板坯 (表面包覆纯钛)

轧制及退火方案

TC4 钛合金板坯在某 1780 热连轧设备上进行轧制, 中间坯厚度为 45 mm, 粗轧和精轧压下分配制度如表 2 和表 3 所示, 2 种板坯的粗轧工艺采用不同方案, 1[#]板坯粗轧采用 5 道次工艺, 2[#]板坯粗轧采用 7 道次工艺, 1[#]和 2[#]板坯精轧工艺一致, 2 块板坯

表 2 粗轧压下制度

粗轧机架	入口厚度/mm		压下率/%		压下量/mm		出口厚度/mm	
	1 [#] 板坯	2 [#] 板坯	1 [#] 板坯	2 [#] 板坯	1 [#] 板坯	2 [#] 板坯	1 [#] 板坯	2 [#] 板坯
R1	185.00	185.00	16	13	29.60	24.05	155.40	160.95
R2	155.40	160.95	28	21	43.51	33.80	111.89	127.15
R3	111.89	127.15	33	27	36.92	34.33	74.96	92.82
R4	74.96	92.82	31	24	23.24	22.28	51.73	70.54
R5	51.73	70.54	13	22	6.72	15.52	45.00	55.02
R6		55.02		11		6.05		48.97
R7		48.97		8		3.92		45.00

表 3 精轧压下制度

精轧机架	入口厚度/mm	压下率/%	压下量/mm	出口厚度/mm
F1	45.00	31	13.95	31.05
F2	31.05	29	9.00	22.05
F3	22.05	26	5.73	16.31
F4	16.31	24	3.92	12.40
F5	12.40	22	2.73	9.67
F6	9.67	20	1.93	7.74
F7	7.74	20	1.55	6.19
F8	6.19	19	1.18	5.00

的成品规格均为 5.0 mm。热轧生产的 TC4 钛合金卷 (俗称为黑皮) 经后续抛丸退火 (退火温度 860 °C, 保温时间 15 min) 及酸洗, 对酸洗后的 TC4 钛合金卷 (即白皮) 进行表面和边部质量检查, 并测定其金相组织和力学性能。

实验结果及分析

TC4 带卷热轧态尺寸精度

使用多功能仪及测宽仪对 1[#]、2[#]带卷测量厚度和宽度如图 2 所示, 从图 2 可以看出厚度和本体宽度控制较为理想, 后续生产时, 需对头尾宽度进行短行程控制, 来改善头尾失宽现象。

TC4 带卷热轧态外观质量

TC4 钛卷的外观质量如图 3 所示, 从图 3 可以看出, 2 种板坯生产出的 TC4 带卷边部两侧均有边裂, 边裂深度 1~3 mm, 这是由于 TC4 钛合金导热性差, 卷带边部冷却较快, 加之 TC4 塑性较差, 边部更容易出现边裂, 后续工业化生产时, 可通过粗轧工艺不变的情况下, 减少板坯厚度, 减少板坯在粗轧每道次绝对压下量, 并尝试投用立辊, 用立辊来改善 TC4 合金带卷边部温降, 进一步改善边部质量。

TC4 卷带酸洗后表面质量

从热轧后的表面来看, 2[#]卷的表面优于 1[#], 1[#]卷表面比较粗糙, 2[#]卷表面比较光滑, 为了验证在黑皮卷上的判断, 因此对热轧的 TC4 (黑皮卷) 进行退火酸洗处理, 来观察酸洗后的表面质量 (白皮卷), 1[#]、2[#]白皮卷表面照片如图 4 所示, 从图 4 中可以看出, 2[#]卷表面质量明显优于 1[#]卷, 与黑皮判

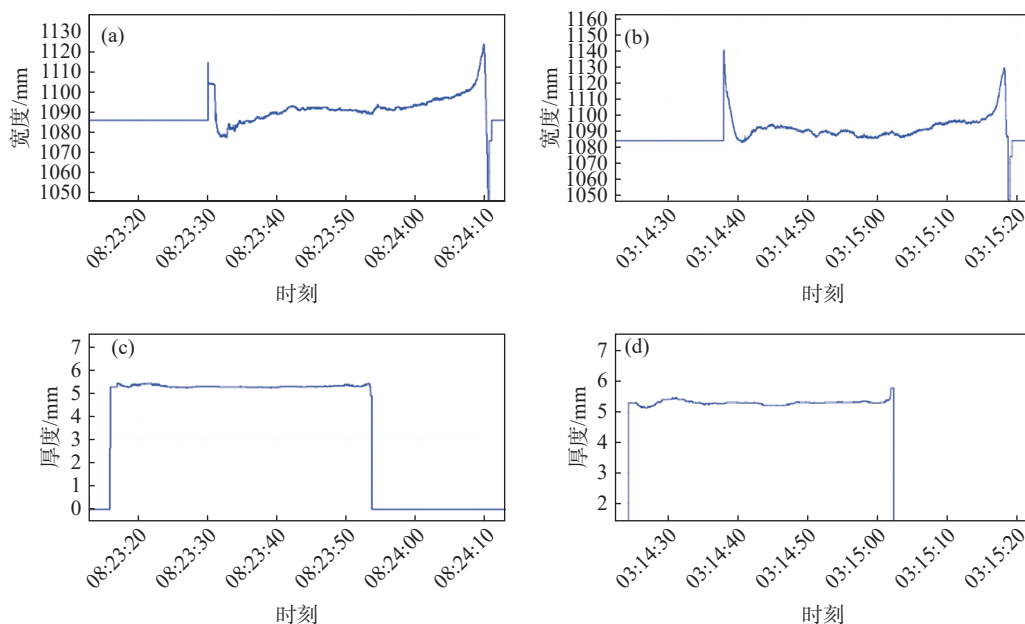


图2 TC4 钛合金带卷宽度及厚度曲线: (a) 1#卷宽度; (b) 2#卷宽度; (c) 1#卷厚度; (d) 2#卷厚度

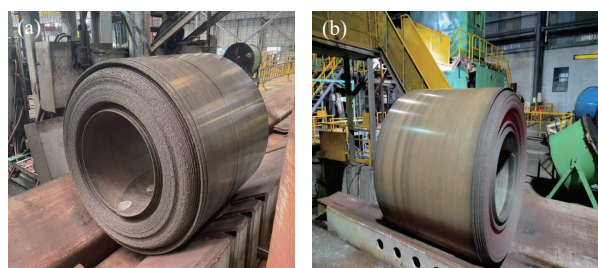


图3 TC4 钛合金带卷外观质量: (a) 1#卷; (b) 2#卷

断完全一致。这是由于2#卷表面包覆了纯钛,加热时纯钛优先氧化形成一层致密的氧化皮,该氧化皮主要有Ti、O 2种元素,成分比较简单,后续该氧化皮经酸洗被去除,因此2#卷表面比较光滑;而没有包覆纯钛的1#卷氧化皮主要有Ti、O、Al、V 4种元素。其中V元素的氧化物为 V_2O_5 , V_2O_5 在700~900℃开始熔化并且挥发^[9],1#卷的板坯加热和热轧过程中,表面氧化皮 V_2O_5 熔化挥发,导致氧化

皮变成疏松多孔结构。此外氧原子沿着孔洞向内扩散,不仅导致氧化皮更加粗糙,而且促使金属加速氧化,因此1#卷表面比较粗糙。

TC4 带卷组织及力学性能

金相组织

对热轧的TC4钛合金卷在连续退火酸洗线上进行退火及酸洗处理,退火温度860℃,退火时间15 min,然后对1#、2#卷分别取样做金相组织分析,金相组织如图5所示,从图5中可以看出部分区域呈现典型的网篮组织形貌,有向魏氏组织发展的趋势,组织以 β 相为主,还有少量的 α 相,还可以看出非平衡凝固的柱状晶区域,中间部分为混晶区域,已经有部分针尖状 α 相,证明发生了少量相转变,中间 α 相进一步长大,导致表层和芯部呈现出中厚板常有的混晶形貌,通过JmatPro软件计算的TC4合金平衡相图如图6所示。从相图中可以看

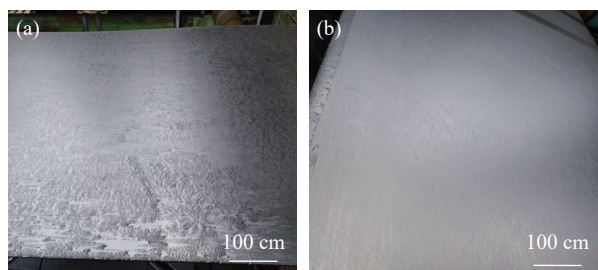


图4 TC4 钛合金卷酸洗后的表面质量: (a) 1#卷; (b) 2#卷

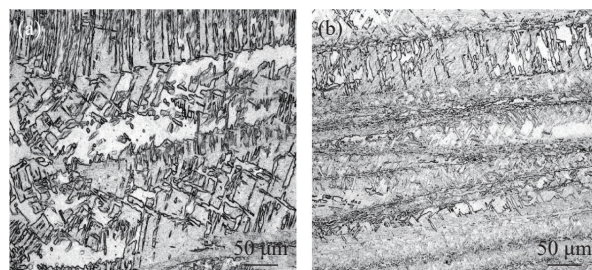


图5 TC4 钛合金卷纵向金相组织: (a) 1#卷; (b) 2#卷

出, 965 °C 以上均为 β 相, 900 °C 时 β 相质量分数 51.08%, 600 °C 时 α 相质量分数 95.58%, 2 种方案的过程温度曲线如图 7 所示, 实际生产时由于在热轧粗轧、精轧过程中的温度较高, 实际粗轧结束温度均在 1000 °C 以上, 精轧开始温度均在 900 °C 以上, 精轧结束温度在 850 °C 以上, 轧制过程温度如表 4 所示, 从板坯到粗轧、精轧到成卷过程共计用时不超过 4 min, 热轧成卷过程较快, TC4 钛合金没有足够的时间发生 $\beta \rightarrow \alpha$ 相大量转变, 因此黑皮卷以大量 β 组织被保留下来, TC4 带卷后续经 860 °C 退火后组织形貌仍以 β 组织为主。后续热连轧生产带

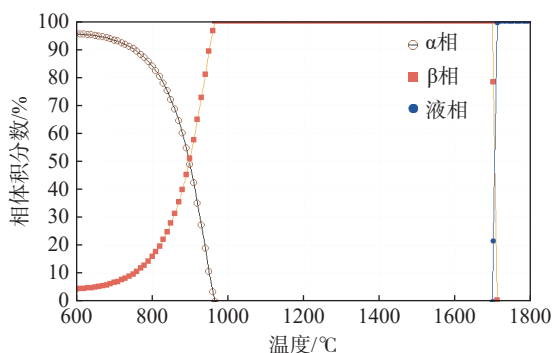


图 6 TC4 钛合金平衡相图

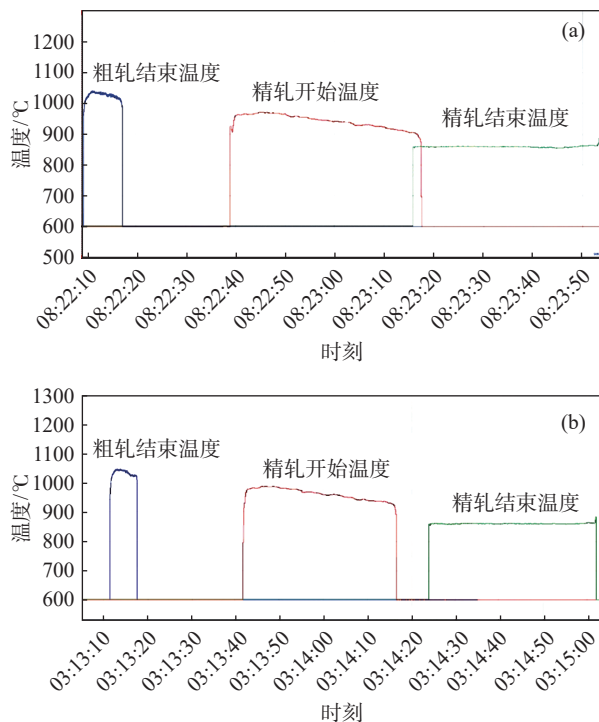


图 7 TC4 钛合金粗轧、精轧过程温度: (a) 1#板坯; (b) 2#板坯

表 4 TC4 钛合金卷带过程温度

板坯编号	粗轧结束温度/°C	精轧开始温度/°C	精轧结束温度/°C
1#	1005~1040	905~970	860
2#	1020~1045	930~990	860

卷时, 在保证设备能力的情况下, 通过降低在粗轧、精轧过程中的温度来改善热轧钛合金带卷及其经连续退火酸洗后的金相组织。

力学性能

对 TC4 钛合金退火态 5 mm 带卷拉伸性能进行测试, 检测结果如表 5 所示。由表 5 可知, 1#、2# TC4 钛合金 5 mm 带卷的横、纵向拉伸性能均达到 GB/T 3621—2022 要求。

表 5 TC4 钛合金卷带力学性能

项目	抗拉强度/MPa	屈服强度/MPa	伸长率/%
1# (横向)	1027	999	12
1# (纵向)	987	928	11
2# (横向)	1033	985	12
2# (纵向)	985	940	11
GB/T 3621—2022	925~1150	≥870	≥10

结论

(1) 1#和 2#板坯通过不同的粗轧工艺制备的 5 mm 规格 TC4 热轧卷力学性能均达到了 GB/T 3621—2022《钛及钛合金板材》标准要求。

(2) 轧制工艺对 TC4 热轧卷带的组织及力学性能均可产生影响, 粗轧 7 道次热轧表面包覆纯钛 (2#板坯) 的 TC4 钛合金卷带, 表面质量更好, 后续热轧工业生产时, 可降低 TC4 板坯厚度, 改善边部质量。

(3) TC4 钛合金卷带经连续退火后, 虽未获得均匀细小的等轴 $\alpha+\beta$ 转变组织, 结合钢厂设备能力, 降低板坯加热温度, 使得 TC4 卷经热连续退火酸洗线工业化生产获得理想组织。

参考文献

- [1] 安成钢. 异步热轧及热处理对钛及钛合金组织性能的影响. 沈阳: 东北大学, 2014
- [2] 黄旭, 朱知寿, 王红红. 先进航空钛合金材料与应用. 北京: 国防工业出版社, 2012
- [3] 王牛俊. TC4 钛合金板热轧过程显微组织研究. 机械设计与制造

- 工程, 2017, 46(6): 81
- [4] 高飞, 雷挺, 苗阳, 等. 齐航热处理对 TC4 钛合金板材韧性的影响. 金属世界, 2022(3): 36
- [5] 岳旭, 马龙, 李瑞, 等. 自由锻工艺及氧含量对 TC4 薄壁环材冲击韧性的影响. 金属世界, 2018(2): 71
- [6] 王小芳, 陈明和, 陈伟, 等. TC4-DT 钛合金高温热变形行为研究. 航空材料学报, 2012, 32(1): 30
- [7] 雷文光, 韩栋, 张永强, 等. TC4-DT 钛合金热变形机制及加工图. 钛工业进展, 2015, 32(1): 20
- [8] 刘正乔, 汪净, 蒋孟玲, 等. 宽幅 TC4 钛合金带卷的研制. 连铸, 2019, 44(2): 7
- [9] Tomasi A, Gialanella S. Oxidation phenomena in a Ti_3Al base-alloy. *Thermochim Acta*, 1995, 269/270: 133

作者简介: 周嘉晟 (1987—), 男, 陕西咸阳市人, 硕士, 工程师, 山东盛阳金属科技股份有限公司。主要研究方向: 钛及钛合金材料加工。通信地址: 山东省临沂市罗庄区傅庄街道土山屯山东盛阳金属科技股份有限公司; E-mail: 459199631@qq.com。