

TA15 钛合金棒材的热连轧工艺

闵新华, 纪仁峰, 张玩良, 马伟东, 陆汉刚

(宝山钢铁股份有限公司, 上海 200940)

摘 要: 对 TA15 钛合金高温变形机制进行了 Gleeble 热模拟试验, 并利用试验结果设计了在 850~950 °C 范围, 直径为 20 mm 的 TA15 钛合金小规格棒材的新型热连轧生产工艺。试验结果表明: 采用合适的热连轧工艺, TA15 钛合金小规格棒材的组织 and 性能与传统的横列式轧制棒材的相当, 均满足相应的技术要求。

关键词: 钛合金; 热连轧; 组织; 力学性能

中图分类号: TF 804.3

文献标志码: A

Hot continuous rolling process of TA15 titanium alloy

MIN Xin-hua, JI Ren-feng, ZHANG Wan-liang, MA Wei-dong, LU Han-gang

(Baoshan Iron & Steel Co., Ltd., Shanghai 200940, China)

Abstract: The flow stress behavior of TA15 titanium alloy during hot compression was studied on a Gleeble-3800 thermal/mechanical simulator, and the hot continuous rolling process of TA15 small bars was designed at 850~950 °C based on the experimental results. The results show that the microstructure and mechanical properties of TA15 small bars could meet the requirement of the specification after proper continuous hot rolling process.

Key words: titanium alloy; hot continuous rolling; microstructure; mechanical properties

TA15(Ti-6Al-2Zr-1Mo-1V)钛合金是一种与俄罗斯研制的 BT20 钛合金相似的近 α 钛合金, 具有较高的比强度、抗蠕变性、耐蚀性以及良好的焊接性能, 常用于制造工作环境在 500 °C 以上的航空发动机的压气机盘、叶片等重要部件^[1]。

本文作者借助国外引进的高合金钢连续轧制生产线, 初步开发直径为 20 mm 的 TA15 钛合金小规格棒材的热连轧工艺。该连轧生产方式的主要特点是: 生产效率高、棒材的直度好、尺寸精度和表面质量较传统的横列式轧制工艺有优势。本研究通过控制轧制温度和轧制变形量, 研究 TA15 钛合金 $d20$ mm 热连轧棒材的性能和组织。

1 实验

1.1 TA15 钛合金的 Gleeble 热模拟试验

试验用 $d25$ mm 小圆棒, 于 800 °C 退火处理 1.5 h,

再机械加工成 $d8$ mm \times 12 mm 的压缩试样, 上、下两端加工成 $d7$ mm \times 0.2 mm 的浅槽, 以添加 BN 润滑剂减少摩擦, 保证压缩变形的均匀性和稳定性, 防止严重鼓形出现。压缩试验在 Gleeble3800 热/力模拟试验机上进行, 加热速度为 5 °C/s, 至压缩温度后保温 3 min, 然后进行等温压缩。变形温度分别为 800、850、900、950、1 000 和 1 050 °C, 应变速率分别为 0.01、0.1、1 和 10 s⁻¹, 变形过程全部由计算机控制并自动采集有关数据, 最后得到 TA15 钛合金高温压缩变形随变形温度和应变速率变化的真应力—真应变曲线。

1.2 TA15 钛合金 $d20$ mm 棒材的热连轧工艺

结合 Gleeble 热模拟试验结果, 设计热连轧工艺的坯料加热温度、连轧入口变形温度、连轧速率、连轧总变形量等关键工艺参数, 具体的工艺流程是: 三次真空自耗熔炼成直径为 860 mm 的铸锭 \rightarrow 锻至 80 mm \times 80 mm \times 80 mm \rightarrow 打磨去除缺陷 \rightarrow 高合金钢生产

线连续轧制成直径为 20 mm 的成品→磨光→探伤→取样、检测性能和组织→合格入库。

2 结果与讨论

2.1 TA15 钛合金的 Gleeble 热模拟试验

Gleeble 热模拟试验得到 TA15 钛合金高温压缩变形随变形温度和应变速率变化的真应力—真应变曲线,如图 1 所示。

由图 1 可见,TA15 钛合金高温压缩变形时,流变应力的变化规律表现为:1)在峰值点之前,应力随应变变量的增加呈现近线性迅速增大;2)在应变速率一定时,随着变形温度的升高,峰值点呈下降趋势;3)在温度一定时,随着变形速率的增大,峰值点呈上升趋势。另外,由图 1 的曲线可知,随着变形温度的升高,材料的流动应力逐渐降低,并且在不同的温度范围内表现出不同的流动特性:800~950 温度范围内,材料的流变应力到达峰值之后总体呈下降趋势,说明在此温度范围内主要的软化机制可能是动态再结晶;

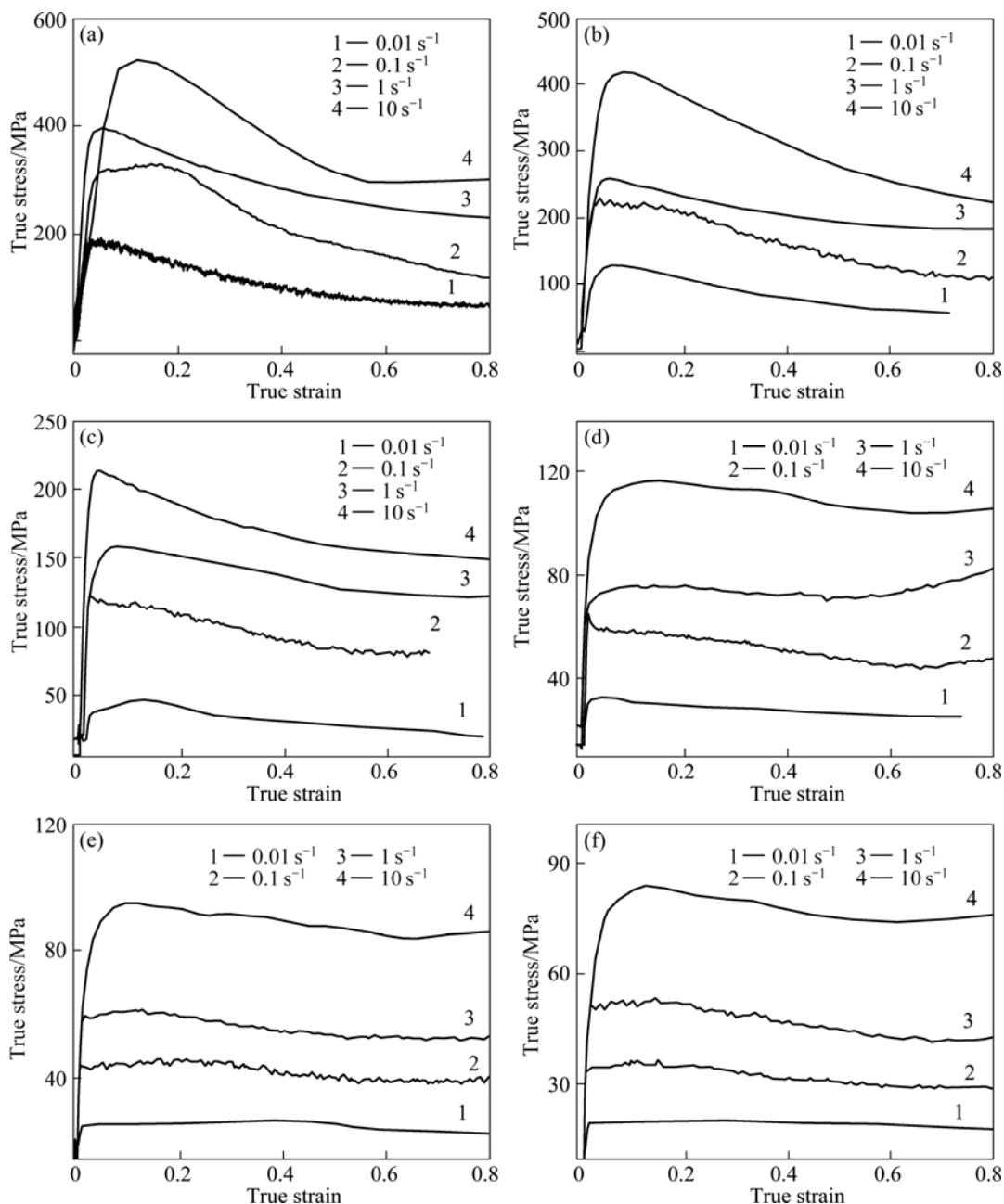


图 1 TA15 钛合金高温压缩变形真应力—真应变曲线

Fig.1 True stress-true strain curves of TA15 alloy compressed at high temperature: (a) 800 °C ; (b) 850 °C ; (c) 900 °C ; (d) 950 °C ; (e) 1000 °C ; (f) 1050 °C

950~1 050 ℃ 时,材料的流动应力几乎稳定在一个定值,表现出动态回复的特征。当 TA15 钛合金高温塑性变形时,在应力峰值点之前,应力随应变量的增加呈现近线性迅速增大,且随着变形温度的升高或应变速率的降低,合金的峰值应力水平不断降低。越过峰值应力点以后,动态回复或动态再结晶软化程度超过了形变硬化,流变应力便逐渐降低或保持动态稳定。同时,在塑性变形过程中,绝大部分能量转化为热能;变形温度越低或应变速率越大,变形抗力也越大,塑性变形过程中消耗的能量就越多,转化成热能的也越多,并且变形温度越低或变形速率越大,单位时间内形变热散失越少,随着变形温度的降低或应变速率的增大,形变热效应越显著。因此,如图 2 所示,至应力峰值点后,在同一应变速率下,随着变形温度的降低,流变应力随应变量的增大而逐步增大^[2-3]。

2.2 热连轧棒材的试验结果与分析

根据热模拟试验结果,考虑变形温度与变形抗力的关系,以及热连轧温升带来的影响,将变形温度设定在 850~950 ℃,选取两批直径为 20 mm 的 TA15 钛合金棒材进行试验,棒材的轧制变形量相同,均在两相区轧制,但工艺 2 的轧入口温度较工艺 1 的高 45 ℃,使表面质量得到改善,但是组织和性能变化不大。热连轧直径为 20 mm 的棒材和横列式轧制直径为 40 mm 的棒材的性能检测结果见表 1,不同轧制工艺获得的显微组织如图 3 所示。

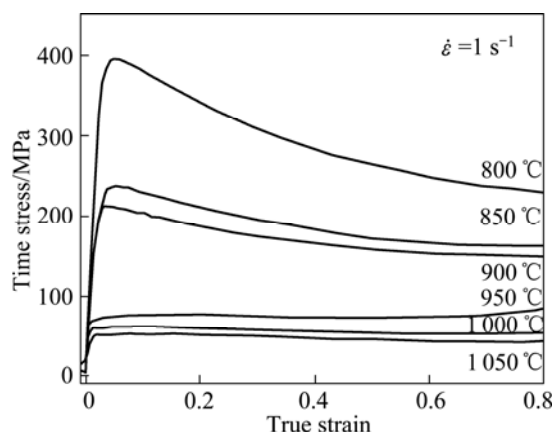


图 2 相同变形速率下 TA15 钛合金的真应力 - 真应变曲线
Fig.2 Stress-strain curves of TA15 titanium alloy in same deformation speed

从表 1 的性能检测结果来看,不同轧制工艺得到的 TA15 钛合金小规格棒材的常规力学性能都能满足相应的技术要求。三种工艺的室温强度、室温塑性与 500 ℃ 高温性能的试验结果相当;而两种热连轧工艺生产的棒材冲击韧性高于横列式轧制工艺生产的棒材,但室温屈服强度低于后者。

从图 3 的显微组织来分析,采用两种热连轧工艺生产的 TA15 钛合金棒材组织主要由初生等轴 α 、片状的次生 α 相和 β 相组成,其中 40%~50% 为等轴 α 相,说明虽然坯料轧制前的加热温度控制在两相区下部,

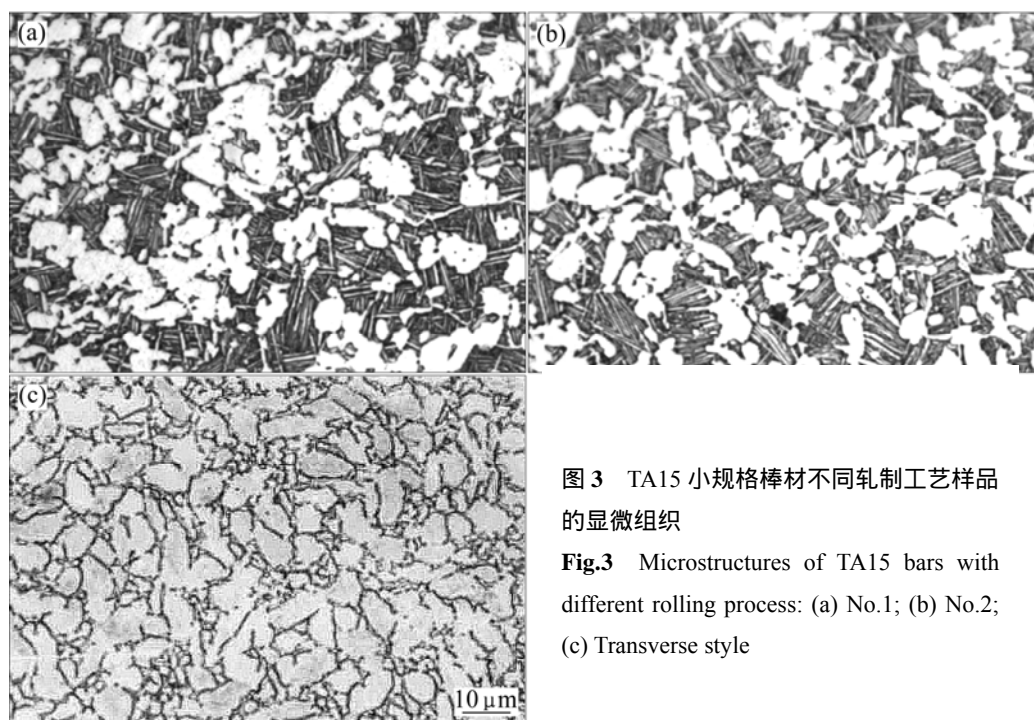


图 3 TA15 小规格棒材不同轧制工艺样品的显微组织

Fig.3 Microstructures of TA15 bars with different rolling process: (a) No.1; (b) No.2; (c) Transverse style

表 1 TA15 钛合金不同轧制工艺棒材的性能

Table 1 Mechanical properties of TA15 bars with different rolling processes

编号	室温性能				500 高温性能				$A_k/(J \cdot cm^{-2})$
	$R_{0.2}/MPa$	R_m/MPa	$A/\%$	$Z/\%$	R_m/MPa	A/MPa	$Z/\%$	持久时间/h	
热连轧工艺 1	915	970	17.5	51.0	700	25.5	65.0	> 51	53
	920	985	18.0	53.5	685	27.0	63.5	> 51	56
热连轧工艺 2	910	975	19.5	54.0	665	24.5	60.5	> 51	54
	905	980	16.0	53.0	685	26.0	63.0	> 51	53
横列式 $d40\text{ mm}$	955	985	15.0	47.0	690	20.0	65.0	> 51	43
	950	995	16.0	48.0	685	21.0	64.0	> 51	44
标准	855	930–1130	10	27	570	—	—	50	40

但是由于是连轧一火成材，其变形速度相当快，变形量也比较大，从而引起轧制过程中棒材温升比较严重，造成一部分初生 α 相溶解，在随后的冷却过程中变成不稳定的 β 相，通过退火分解成片状的次生 α 相。这种组织一般称为双态组织，其强度、塑性和冲击韧性匹配较好^[4]，但是，如果初生等轴 α 相较少的话，其疲劳强度较差。在采用传统的横列式轧制方式生产的 TA15 钛合金棒材组织中，等轴 α 相含量达到 90% 以上，说明在两相区下部加热后的坯料轧制过程中，基本没有变形温升。该类组织的强度、塑性等均较好，但是相比双态组织，其冲击韧性要低一些。

3 结论

- 1) 采用新型的热连轧工艺生产的 TA15 钛合金小规格棒材，其组织和性能均满足相应的技术要求。
- 2) 和传统的横列式轧制生产方法相比，新型热连轧工艺生产效率高，产品的直度和表面质量得到改善，产品的力学性能基本相当。

REFERENCES

[1] 李兴无, 沙爱学, 张旺峰, 储俊鹏, 马济民. TA15 合金及其在飞机结构中的应用前景[J]. 钛工业进展, 2003, 20(4/5): 90–94.

LI Xing-wu, SHA Ai-xue, ZHANG Wang-feng, CHU Jun-peng, MA Ji-min. TA15 titanium alloy and its applying prospects on airframe [J]. Titanium Industry Progress, 2003, 20(4/5): 90–94.

[2] 洪权, 张振祺, 赵永庆, 曲恒磊, 魏寿庸. Ti-6Al-2Zr-1Mo-1V 合金的热压变形特性及塑性流动方程[J]. 广东有色金属学报, 2001, 11(2): 129–133.

HONG Quan, ZHANG Zhen-qi, ZHAO Yong-qing, QU Heng-lei, WEI Shou-yong. Hot compressive deformation behaviors of Ti-6Al-2Zr-1Mo-1V alloy and its plastic flow equation [J]. Journal of Guangdong Non-ferrous Metals, 2001, 11(2): 129–133.

[3] 徐文臣, 单德彬, 李春峰, 吕炎. TA15 钛合金动态热压缩行为及其机理研究[J]. 航空材料学报, 2005, 25(4): 10–15, 19.

XU Wen-chen, SHAN De-bin, LI Chun-feng, LÜ Yan. Study on the dynamic hot compression behavior and deformation mechanism of TA15 titanium alloy [J]. Journal of Aeronautical Materials, 2005, 25(4): 10–15, 19.

[4] 岳强, 王鼎春, 王希哲, 王练, 储茂友, 沈剑韵. 不同轧制工艺制备的 Ti-63 合金棒材显微组织和力学性能[J]. 稀有金属材料与工程, 2008, 37(s3): 283–286.

YUE Qiang, WANG Bing-chun, WANG Xi-zhe, WANG Lian, CHU Mao-you, SHEN Jian-yun. Microstructure and mechanical properties of Ti-63 alloy bars prepared by different rolling processes [J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2008, 37(s3): 283–286.

(编辑 方京华)