

轧制工艺对小规格纯钛棒材微观组织和力学性能的影响

王 海, 樊亚军, 崔文俊, 魏芬绒, 李 雷, 陈志宏

(西安赛特思迈钛业有限公司, 西安 710021)

摘 要: 利用 250 型横列式轧机对边长为 55~60 mm 的 TA2 纯钛方坯采用控温轧制方式轧制成 $\phi 16$ mm 的棒材。结果表明: 控温轧制工艺, 可以有效细化晶粒, 平均晶粒尺寸可以细化至 2~3 μm ; 材料抗拉强度由快速轧制时的 431 MPa 提高到 510 MPa, 升高 18.3%, 同时保持较好延展性。另外, 通过对轧制过程的温度控制, 纯钛棒材的横向、纵向组织趋于一致化。

关键词: 纯钛; 控温轧制; 显微组织; 细晶强化

中图分类号: TG146.2⁺3

文献标志码: A

Effect of rolling process on microstructure and mechanical properties of TA2 rolling bar

WANG Hai, FAN Ya-jun, CUI Wen-jun, WEI Feng-rong, LI Lei, CHEN Zhi-hong

(Xi'an Saite Simai Titanium Industry Co., Ltd., Xi'an 710021, China)

Abstract: The type 250 open-train mill, by controlled rolling on the specifications for each 55 mm TA2 pure titanium billet rolled into $\phi 18$ mm bar. The results show that the temperature control rolling technology can effectively refine the grain size, the average grain size can be refined to 2~3 μm . The tensile strength of material from rapid rolling is improved from 431 MPa to 510 MPa, while maintaining good ductility increases by 18.3%. In addition, through controlling the temperature of the rolling process, the transverse and longitudinal structure of pure titanium bars trends to the line.

Key words: pure titanium; temperature controlled rolling; microstructure; fine grain strengthening

钛是三大轻金属(镁、铝、钛)之一。因为其具有低密度、高强度、耐腐蚀性、良好的生物相容性、无磁性、无毒性、加工成形性较好等优点; 钛及钛合金还有形状记忆、超弹性、超导性以及储氢等特性。所以, 钛及钛合金被广泛地用于航空、航天、医疗、化工、冶金、汽车、建筑、体育休闲等领域^[1-3]。钛由于导热系数低, 纯钛棒材在加热时表面温度高于中心温度, 而在轧制过程中表面温度低于中心温度, 造成中心变形抗力小, 变形较表面容易, 断面变形不均匀, 容易造成组织不均匀, 边部组织和心部组织有差异。目前, 纯钛轧制仍采用钢材生产工艺与设备轧制速度

慢、时间长、轧制温度不能保证。致使纯钛棒材组织晶粒度、均匀性、一致性较差^[4-8]。本文作者通过对 TA2 纯钛轧制过程温度控制, 对经过不同轧制工艺后纯钛棒材显微组织和力学性能进行比对分析, 以期得到最佳的纯钛轧制工艺路线。

1 实验

1.1 实验材料

本实验所用纯钛牌号为 TA2, 化学成分见表 1。

基金项目: 陕西省重大科技创新专项资金计划项目资助(2011ZKC05-13)

收稿日期: 2013-07-28; **修订日期:** 2013-10-10

通信作者: 王 海, 工程师, 硕士; 电话: 029-86550874; E-mail: 342299595@qq.com

TA2 纯钛铸锭首先经开坯、锻造至边长为 120 mm 的方坯, 再利用空气锤改锻至实验所用边长为 55~60 mm 方坯。

表 1 实验用 TA2 纯钛的化学成分

Table 1 Chemical composition of TA2 pure titanium (mass fraction, %)

Alloy	Fe	C	N
GB/T3620.1	≤0.300	≤0.080	≤0.030
As-received	0.090	0.012	0.005

Alloy	H	O	Ti
GB/T3620.1	≤0.015	≤0.250	Balance
As-received	0.001	0.100	Balance

1.2 实验方法

实验采用 250 型横列式轧机, 边长为 55~60 mm 的 TA2 纯钛方坯经过 10 个道次的轧制, 最终轧成 d 16 mm 的棒材。

250 型横列式轧机由人工手操作喂料, 本实验通过对道次间的停顿间歇时间的控制达到控制轧制温度、断面温度均匀化的目的。试验选取了以下 3 组轧棒作为分析对象, 分别编号 1、2 和 3。1 号试样以快速轧制, 每一道次轧制后迅速转入下一道次, 道次间停顿时间只有 1~2 s; 2 号试样以常规轧制间歇时间轧制, 道次间停顿时间约为 4~6 s; 3 号试样以延长道次间停顿时间的方式轧制, 道次间停顿时间约为 12~15 s; 并采用红外在线测温仪对每道次后轧件表面温度进行测量记录。分别对以上 3 种轧制工艺加工后的棒材进行了横向、纵向的显微组织观察和力学性能测试, 分析经过不同轧制工艺的纯钛棒材组织变化规律, 晶粒度大小和所对应的力学性能差异, 确定制备组织均匀, 综合性能优异的纯钛棒材的轧制工艺。

2 结果与分析

2.1 道次变形量和轧材表面温度

表 2 所列为使用红外测温仪测得的轧制各道次轧件表面温度值。由表 2 可见: 前 3 道次轧制, 轧件表面温度呈缓慢下降趋势, 这是因为前 3 道次轧制变形量减小, 轧制变形热产生的温升较轧件表面降温程度

表 2 轧制各道次轧件表面温度

Table 2 Surface temperature of materials each pass

Test point	Pass deformation/ %	Temperature/°C		
		Sample 1	Sample 2	Sample 3
Before rolling		720~750	720~750	720~750
1st pass	31.2	710~735	710~735	710~735
2nd pass	29.7	705~721	685~708	655~687
3rd pass	27.5	700~718	677~708	646~685
4th pass	31.8	710~734	685~710	656~692
5th pass	33.1	715~740	690~713	662~697
6th pass	29.5	720~750	695~729	664~687
7th pass	30.6	720~746	698~727	650~673
8th pass	29.2	724~750	700~723	671~694
9th pass	25.5	730~755	715~730	681~705
Last pass	19.8	733~771	713~735	676~695

低; 4~6 道次后由于变形量逐渐增加, 温度又呈上升趋势; 6 道次轧制后, 轧制变形量在减小, 但是由于轧制速度随着轧件断面尺寸的减少逐渐升高, 产生大量轧制变形热, 轧件温升程度大于轧件温度散失。另外, 方案 2 由于在道次间实行了一定时间停顿降温处理, 每道次轧件表面瞬时温度较方案一低约 30 °C; 方案 3 降温时间更长, 每道次轧件表面瞬时温度较方案一低约 70 °C。

2.2 轧制棒材组织分析

2.2.1 横向显微组织

图 1 所示为 3 组试样热轧态横向显微组织。由图 1 可见: 3 组试样沿横截面方向组织由于发生动态再结晶呈现出局部等轴组织; 随着道次间的间歇时间的增加, 即轧制温度降低, 晶粒尺寸逐渐减小; 通过对 3 组试样晶粒尺寸的测量, 1 号试样(轧制温度约为 730 °C)晶粒尺寸约为 10 μm, 2 号试样(轧制温度约为 700 °C)晶粒尺寸约为 5 μm, 3 号试样(轧制温度约为 670 °C)晶粒尺寸约为 2~3 μm。这是由于终轧温度较高时, 材料发生再结晶及晶粒长大, 晶粒尺寸(相比终轧温度低时)较大^[9-11]。

2.2.2 纵向显微组织

图 2 所示为 3 组试样热轧态纵向显微组织。由图 2 可见: 3 组试样沿轧制方向组织为热加工态组织形貌, 呈现出一定方向性, 同时可以看出较横向组织变

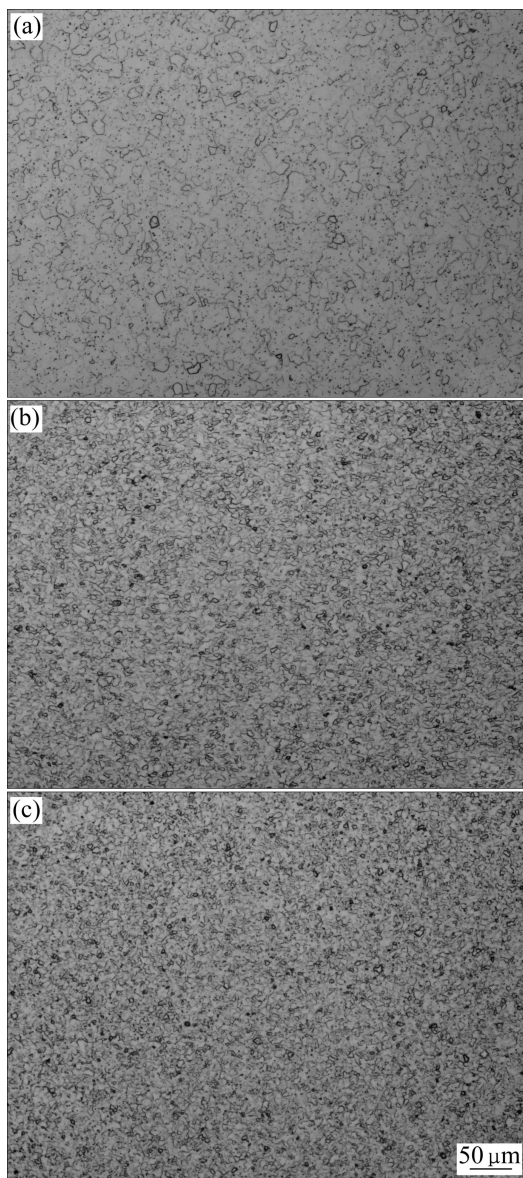


图1 3组试样横向显微组织

Fig. 1 Microstructures of bars for transverse section after rolling: (a) Sample 1; (b) Sample 2; (c) Sample 3

形更剧烈, 晶粒更加细小, 这是因为金属沿轧制方向流动性更好^[12-13]; 随着道次间轧制温度的降低, 晶粒尺寸呈减小趋势, 晶粒度更加致密; 通过对3组试样晶粒尺寸的测量, 1号试样晶粒尺寸约为9 μm, 2号试样晶粒尺寸约为4~5 μm, 3号试样晶粒尺寸约为2 μm。

2.2.3 各组试样横、纵向显微组织对比

图3所示为3组试样热轧态横向和纵向显微组织。由图3可知: 3组试样均呈现出纵向(轧制方向)较横向(横断面)变形大; 1号试样纵向组织表现出一定加工流线(图中箭头所指方向), 即晶粒沿轧制方向拉长、破

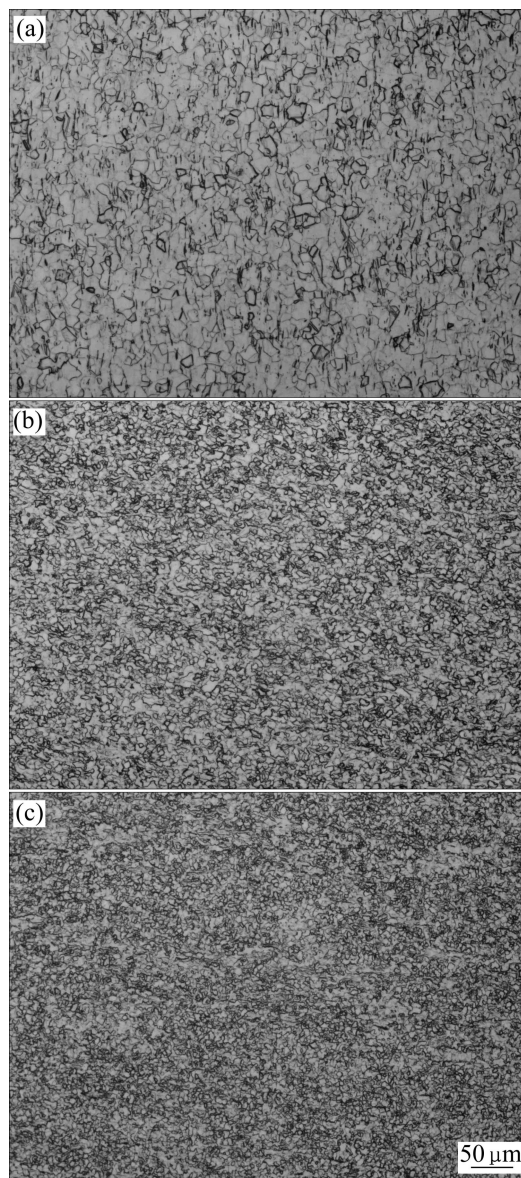


图2 3组试样纵向显微组织

Fig. 2 Microstructures of bars for longitudinal section after rolling: (a) Sample 1; (b) Sample 2; (c) Sample 3

碎; 2号、3号试样由于晶粒尺寸细小, 观察不到明显的加工流线。另外, 随着轧制过程中温度的控制, 即轧制温度的降低, 纯钛棒材的横向、纵向组织有趋于一致化的趋势, 表现为晶粒尺寸的大小基本接近, 组织形貌趋于一致, 等轴组织和加工态的非平衡组织所占比例相近; 这种横向和纵向一致的组织对材料的综合性能非常有利, 材料不会因为轧制方向和垂直轧制方向性能差异而影响材料的使用。

作者认为通过控温轧制的轧制工艺, 由于轧制变形热引起的棒材断面温度不一致在道次间歇时间得到缓解, 材料心部高温逐步向近表面传导, 达到温度一

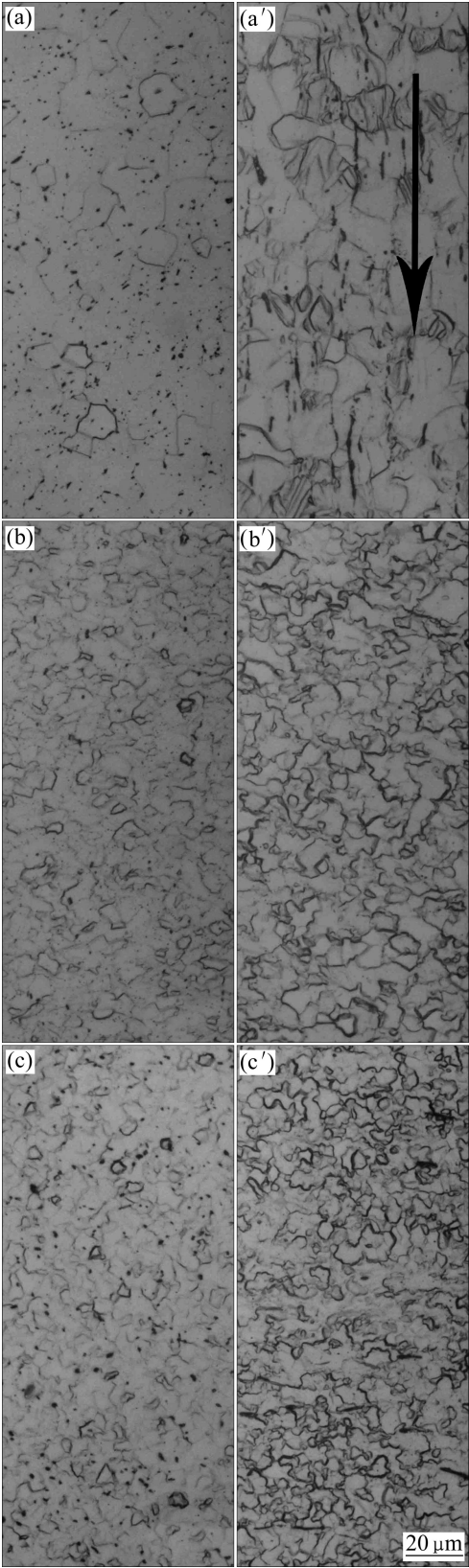


图 3 横向((a), (b), (c))和纵向((a'), (b'), (c'))显微组织

Fig. 3 Microstructures of bars for transverse section ((a), (b), (c)) and longitudinal section ((a'), (b'), (c')) after rolling: (a), (a') Sample 1; (b), (b') Sample 2; (c), (c') Sample 3

致, 材料组织均匀化。这是因为纯钛导热性差, 在轧制过程中, 材料心部温度高于表面, 造成材料截面温度不均匀, 这是影响纯钛材料组织均匀性的主要因素之一。

2.3 轧制棒材力学性能

各试样力学性能如表 3 所示。由表 3 可知: 3 号试样抗拉强度最高, 达到 510 MPa, 伸长率 34%, 综合性能较好, 这个因为 3 号试样晶粒尺寸最小, 平均晶粒尺寸 2 μm; 细小的晶粒产生细晶强化作用, 而细化晶粒是同时提高塑性和强度有效途径。

图 4 所示为 3 组试样抗拉强度和伸长率的变化曲线。由图 4 可见: 随着轧制道次间歇时间的延长, 材料强度提高显著, 材料抗拉强度由 1 号试样的 431 MPa 提高到 3 号试样 510 MPa, 升高了 18.3%; 伸长率变化随轧制道次间歇时间的延长缓慢降低。即轧制温度对材料力学性能影响显著; 结合材料晶粒尺寸变化, 分析认为导致材料强度提高的强化机制是细晶强化, 细化晶粒使材料在提高强度的同时保持较好的塑性。

表 3 实验用 TA2 纯钛的力学性能

Table 3 Mechanical properties of TA2 pure titanium				
Sample No.	σ_s /MPa	σ_b /MPa	δ /%	ψ /%
1	301	431	38.5	71
2	378	500	35.0	67
3	410	510	34.0	67

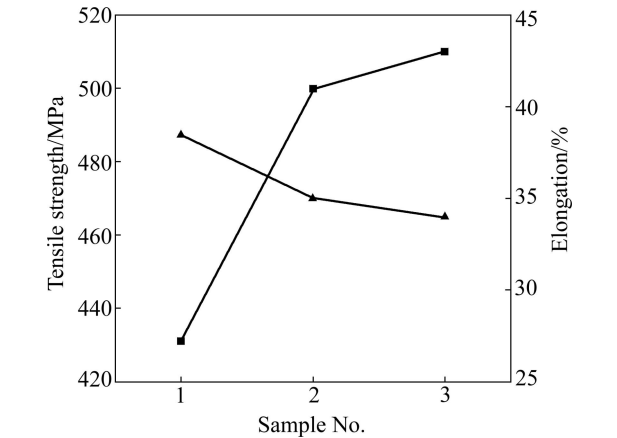


图 4 3 组试样力学性能的变化

Fig. 4 Variations of mechanical properties of TA2 pure titanium

3 结论

- 1) 纯钛棒材的控温轧制工艺, 可以有效改善轧棒

组织, 细化晶粒, 快速轧制后平均晶粒尺寸为 10 μm , 而通过轧制温度的降低, 平均晶粒尺寸可以细化至 2~3 μm 。

2) 控温轧制工艺可以有效提高材料强度指标, 材料抗拉强度由 1 号试样(轧制温度约为 730 $^{\circ}\text{C}$)时的 431 MPa 提高到 3 号试样(轧制温度约为 670 $^{\circ}\text{C}$)的 510 MPa, 升高了 18.3%, 同时保持较好延展性; 细晶强化是提高材料强度的强化机制。

3) 随着轧制温度的降低, 纯钛棒材的横向和纵向组织趋于一致化; 这种横向和纵向一致的组织对材料的综合性能非常有利, 材料不会因为轧制方向和垂直轧制方向性能差异而影响材料的使用。

REFERENCES

- [1] 张喜燕, 赵永庆, 白晨光. 钛合金及应用[M]. 北京: 化工出版社, 2005: 92.
ZHANG Xi-yan, ZHAO Yong-qing, BAI Chen-guang. Titanium alloy and application [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2005: 92.
- [2] SHAO Hui, ZHAO Yong-qing, GE Peng, ZENG Wei-dong. In-situ scanning electron microscope observations of tensile deformation in a lamellar microstructure for TC21 titanium alloy [J]. Materials Science and Engineering A, 2013, 559: 4068–4074.
- [3] SHAO Hui, ZHAO Yong-qing, GE Peng, ZENG Wei-dong. Influence of cooling rate and aging on the lamellar microstructure and fractography of TC21 titanium alloy [J]. Metallography, Microstructure and Analysis, 2013, 2(1): 1–7.
- [4] 王临茹, 赵永庆, 周 廉. 热轧 TC21 板材中 α 相形貌的演变 [J]. 中国有色金属学报, 2011, 21(2): 350–355.
WANG Lin-ru, ZHAO Yong-qing, ZHOU Lian. Evolution of α phase morphology in hot-rolling TC21 titanium alloy plate [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2011, 21(2): 350–355.
- [5] 马英杰, 刘建荣, 雷家峰, 杨 锐. 多重热处理对 TC4 合金的组织 and 力学性能的影响[J]. 材料研究学报, 2008, 22(5): 555–560.
MA Ying-jie, LIU Jian-rong, LEI Jia-feng, YANG Rui. The influence of multi heat treatment on microstructure and mechanical properties of TC4 alloy [J]. Chinese Journal of Materials Research, 2008, 22(5): 555–560.
- [6] 帅美荣, 黄庆学, 秦建平. 钛合金棒材轧制成型研究进展[J]. 材料导报, 2012, 26(3): 111–115.
- SHUAI Mei-ron, HUANG Qing-xue, QIN Jian-pin. Progress on rolling formation of titanium alloy rod [J]. Materials Review, 2012, 26(3): 111–115.
- [7] 卢竹青, 徐铁伟, 王永哲, 王飞云. Ti6Al7Nb 小规格轧制棒材组织与性能的研究[J]. 钛工业进展, 2010, 27(2): 20–23.
LU Zhu-qing, XU Tie-wei, WANG Yong-zhe, WANG Fei-yun. Structure and properties of Ti6Al7Nb small rolling bar [J]. Titanium Industry Progress, 2010, 27(2): 20–23.
- [8] 刘清华, 惠松晓, 叶文君, 王 国, 胡光山. 不同组织状态 TC4ELI 钛合金动态力学性能研究[J]. 稀有金属, 2012, 36(4): 517–522.
LIU Qing-hua, HUI Song-xiao, YE Wen-jun, WANG Guo, HU Guang-shan. Dynamic mechanical properties of TC4ELI titanium in different microstructure states [J]. Chinese Journal of Rare Metals, 2012, 36(4): 517–522.
- [9] 李赛毅, 文 浩, 雷力明, 张慧儒. TC11 合金两相区退火对微观组织与微观组织的影响[J]. 中国有色金属学报, 2012, 22(11): 3022–3028.
LI Sai-yi, WEN Hao, LEI Li-ming, ZHANG Hui-ru. Effect of annealing in two-phase field on microstructure and microtexture of TC11 alloy [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2012, 22(11): 3022–3028.
- [10] 王 海, 樊亚军, 李 雷, 陈志宏, 杨华斌, 曹继敏. 拉拔变形量对 TC4 丝材焊接组织的影响研究[J]. 稀有金属, 2013, 37(3): 505–510.
WANG Hai, LI Lei, FAN Ya-jun, CHEN Zhi-hong, YANG Hua-bin, CAO Ji-min. The influence of drawing deformation to the microstructure of TC4 wire after welding [J]. Chinese Journal of Rare Metals, 2013, 37(3): 505–510.
- [11] MALINOV S, SHA W, GUO Z, TANG C C, LONG A E. Synchrotron X-ray diffraction study of the phase transformations in titanium alloys [J]. Materials Characterization, 2002: 279–295.
- [12] 李长富, 李阁平, 杨 义, 杨 柯. 淬火温度对 Ti-4Al-4.5Mo 合金马氏体类型的影响[J]. 金属学报 2010, 46(9): 1061–1065.
LI Chang-fu, LI Ge-ping, YANG Yi, YANG Ke. Influence of quenching temperature on martensite type in Ti-4Al-4.5Mo alloy [J]. Acta Metallurgica Sinica, 2010, 46(9): 1061–1065.
- [13] 王永哲, 张 鹏, 田 琳. 热处理制度对 TC4 小棒材组织和性能的影响[J]. 中国有色金属学报, 2010, 20(1): 638–640.
WANG Yong-zhe, ZHANG Peng, TIAN Lin. Effect of heat treatment on microstructure and performance of TC4 bars [J]. Chinese Journal of Rare Metals, 2010, 20(1): 638–640.

(编辑 陈爱华)