

冷轧过程中 CT20 钛合金斜轧穿孔管坯的组织演化

杜 宇, 刘 伟, 郭荻子, 杨海瑛, 毛小南

(西北有色金属研究院, 西安 710016)

摘 要: 研究斜轧穿孔方式制备的 CT20 钛合金管坯在开坯、精轧一系列冷轧变形过程中的组织演化和室温力学性能变化。结果表明: 斜轧穿孔制备的 CT20 合金管坯, 其组织为有明显 β 晶界的粗大片状组织。对管坯进行大于 70% 冷变形率的两辊开坯轧制, 无法充分破碎粗大的片状组织, 能够获得等轴晶与变形片状共存的组织。

关键词: 钛合金; 斜轧穿孔; 管材; 组织演化; 冷轧

中图分类号: TG35

文献标志码: A

Microstructural evolution of mannesmann piercing mill of CT20 alloy tube blank during cold rolling process

DU Yu, LIU Wei, GUO Di-zi, YANG Hai-ying, MAO Xiao-nan

(Northwest Institute for Nonferrous Metal Research, Xi'an 710016, China)

Abstract: The microstructural evolution and mechanical properties of the tube used as the Mannesmann piercing mill tube blank were investigated. The results show that the CT20 alloy billet pierced in the β field has a coarse widmanstatten structure with the original β grain boundary. The 70% or higher processing deformation degree does not lead to the fragmenting of the coarse widmanstatten structure in the billet, and the final microstructure of the tubes is the combination of the equiaxed α -grains and the colonies of deformed α -lath.

Key words: titanium alloy; Mannesmann piercing mill; tube; microstructure evolution; cold processing

CT20 钛合金属近 α 型中强钛合金, 是由西北有色金属研究院研制成功用于 20 K 液氢环境下的低温材料, 该合金具有良好的冷加工性能, 可用于制备管材、三通和异型管件等^[1-5]。该合金通常采用挤压管坯经冷轧的方式制备成品管材, 但挤压法制备管坯生产成本高、坯料加工周期长, 而斜轧穿孔法成本低、有助于提升管材的生产效率和成材率。本文作者选择斜轧穿孔管坯为研究对象, 分析该类型管坯在冷轧加工及热处理过程中 α 相的尺寸、形貌变化以及相关力学性能, 力图揭示 CT20 钛合金在该工艺加工过程中的组织演变规律。

1 实验

采用 0 级海绵钛、Al-Mo 中间合金、Al 豆和原子能级海绵锆, 通过真空自耗电弧炉进行 3 次熔炼, 得到 CT20 合金铸锭。铸锭经开坯、锻造成试验用棒坯。采用相变点以上斜轧穿孔制备 $d118\text{ mm} \times 9\text{ mm}$ 管坯, 经两道次两辊开坯和一道次多辊精轧、多次中间和成品热处理后获得 $d85\text{ mm} \times 2.5\text{ mm}$ 成品管材。

在本实验中, 选用的 CT20 合金的相变温度为

(940 ± 5) $^{\circ}\text{C}$ 。斜轧穿孔变形率为70%,两道次开坯轧制总变形率 $\varepsilon_t=70\%$,精轧变形率 $\varepsilon=31.1\%$ 。管材的退火在真空管式退火炉中进行,中间道次真空热处理温度为750 $^{\circ}\text{C}$ 。对管坯及各道次热处理前后的管材沿轴向进行剖条取样,在MTS 810万能拉伸试验机上测试拉伸性能;在OLYMPUS PMG3光学显微镜和JSM-6460型扫描电子显微镜上进行显微组织观察;利用FEI Titan 80-300型透射电子显微镜进行相结构分析。

2 结果与分析

2.1 管坯的组织形态及力学性能

图1所示为CT20合金斜轧穿孔管坯的显微组织。

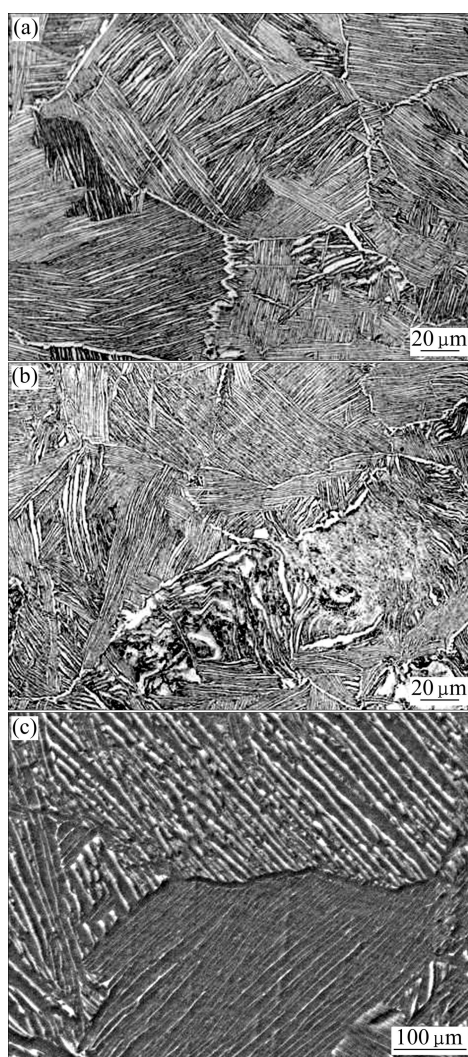


图1 CT20合金管坯的显微组织

Fig. 1 Microstructures of CT20 alloy tube blank: (a), (c) Cross direction of Mannesmann piercing mill tube; (b) Axial direction of Mannesmann piercing mill tube

斜轧穿孔后的横向(图1(a))和纵向(图1(b))组织均为魏氏组织。CT20合金退火态的显微组织的细节在图1所示的SEM照片中反映更清楚。图1(c)所示为斜轧穿孔后获得的全片状组织,原始 β 晶界清晰可见, α 相呈粗片状集束形貌,同一束内的 α 片具有相差不大的取向, α 集束大小约为80~100 μm 。

斜轧穿孔管坯的制备温度高于合金相变点,管坯变形时间短、温降小,变形处于合金的 β 相区。合金晶粒的破碎程度在高温下完全被抵消,形成了明显的 β 晶界,最终呈现出较粗大的魏氏组织。斜轧穿孔变形为径向单向压应力状态,不同于正挤压变形时的三向压应力状态,因此,尽管加工变形率很大,但在管坯轴向和横向方向的变形程度接近,晶粒没有明显的取向性;同时,在棒坯穿孔强力变形时,不同部位的晶粒变形程度不同,这一变形特点造成管坯各个部位晶粒破碎程度不同,加之 β 相区高温和变形热的影响呈现了晶粒尺寸的不均匀^[6]。

2.2 开坯冷轧后管材的组织形态及力学性能

图2所示为管坯经过两道次两辊开坯冷轧变形管材的退火前后的组织形貌。具有魏氏组织的穿孔管坯在经过大变形量冷轧之后,已有约80%的 α 片充分破

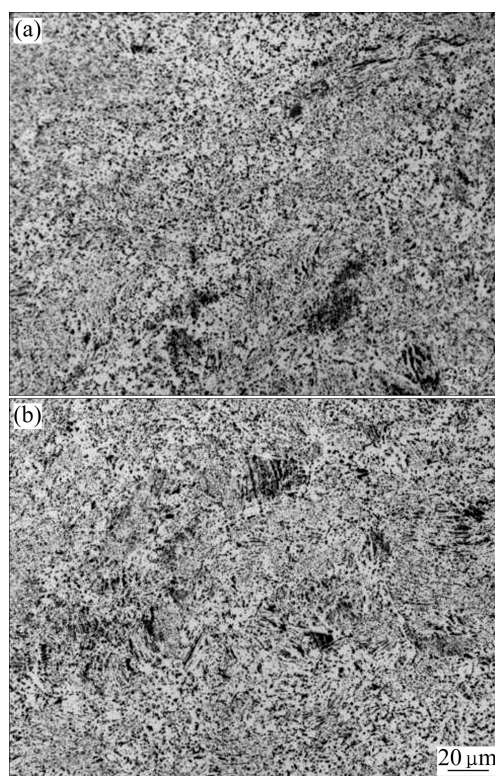


图2 CT20合金开坯后管材的显微组织

Fig. 2 Microstructures of CT20 alloy tube after blooming: (a) Cold rolling; (b) Annealing

碎为与图 2(a)相同的弥散分布的细晶组织,但仍残留有未完全破碎的变形 α 集束,呈现出拉长、压扁及扭转状,组织不均匀。管材经过 750 °C 热处理后,其组织形貌与冷轧态的组织形貌基本一致,如图 2(b)所示。这是由于 750 °C 的退火温度处于该合金的组织回复阶段,在此温度下合金不会发生再结晶,因此组织形貌并没有明显变化。

图 3 所示为 CT20 合金管材加工过程中不同状态的室温拉伸性能,其中图 3 中的横坐标中 a、b 对应的分别是斜轧穿孔管坯热加工态和开坯轧制管材退火态的室温拉伸性能。结果表明,开坯后管材体现出的抗拉强度高出斜轧穿孔管坯 50 MPa,而屈服强度将低了 20 MPa,塑性水平相稍有下降。开坯轧制管材退火后具有细晶组织,管材合金的强度随晶粒大小一般符合 Hall-Patch 关系,即晶粒长大时强度下降^[7]。穿孔管坯的片状组织中同一 α 集束具有相同的惯析面,使得拉伸过程中滑移一开始就能毫无阻碍地穿过互相平行的 α 束而形成快速发展的粗滑移带,且在晶界 α 处易产生位错塞积出现微区变形不均匀,促使空洞提前形成和发展,从而导致其强度降低^[8-9];但轧制管材中所存在的未破碎片状 α 会使微区变形不均匀,导致样品拉伸时变形不均而塑性下降。

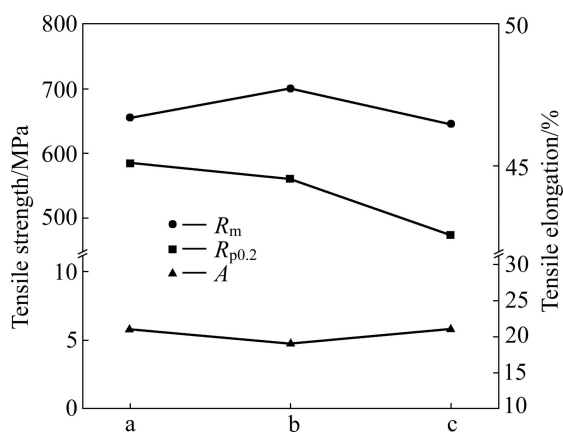


图 3 CT20 合金管材的室温拉伸性能

Fig. 3 Tensile properties at RT of CT20 alloy tube blanks: (a) Tube blank; (b) Bloomed tube after annealing; (c) Rolled tube after annealing

2.3 精轧后管材的组织形态及力学性能

图 4 所示为多辊冷轧变形管材退火前后的组织形貌。图 4(a)所示的轧态管材的组织与上道次的轧态相比基本没有变化,仍为弥散 β 相的细晶组织,晶粒度约 5 μm ,同时仍保持约 13% 的变形 α 片集束。图 4(b)和(c)所示的穿孔坯料轧制管材的退火组织由再结晶

等轴 α 晶粒与穿孔残留的变形 α 片构成,等轴晶粒度大小为 10 μm ,变形的 α 片集束在经过 $\epsilon=31.1\%$ 的冷变形轧制后,部分垂直于轧制方向的片状层扭曲断裂为呈竹节状,平行于轧制方向的片状组织被拉长、压扁。

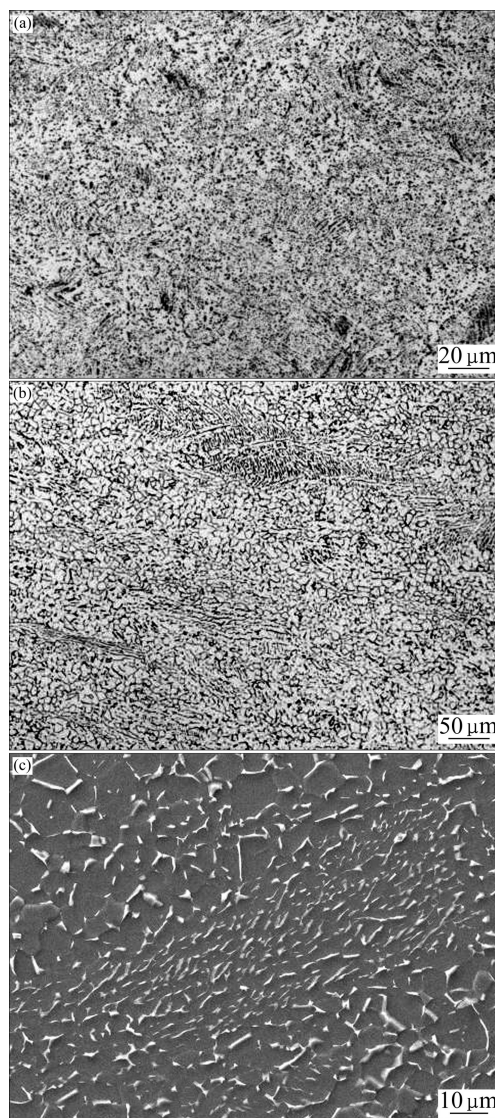


图 4 CT20 合金精轧管材的显微组织

Fig. 4 Microstructures of CT20 alloy tubes after cold rolling: (a) Before annealing; (b), (c) After annealing

由图 4 可以看出,斜轧穿孔管坯经 3 道次轧制,片状 α 破碎趋势增加,等轴化程度相比开坯增大。其主要原因是由于变形程度越大,位错密度越高,晶内缺陷越多,储存在变形合金内的畸变能越大,即再结晶驱动能较大^[10]。同时,大变形也能使更多的滑移系的位错源启动,产生相应的滑移,更利于片状 α 等轴化。另外,变形程度的增大受流动应力被切断的片状 α 数量增多,也为再结晶提供更多的形核机会。

斜轧穿孔管坯本身具有较粗大的晶粒, 虽然累计变形率已达 70%, 但变形率对破碎晶粒中与轧向平行或与轧向角度相对较小时破碎仍较困难。这是因为与轧向平行的 α 片束更易使滑移穿过晶粒, 进而形成塞积在 α 片束两端, 在晶粒内部无法形成足够的再结晶驱动力, 从而无法破坏晶粒形貌, 在宏观上表现为晶粒的扭转、变形, 而不会发生分离、球化。

图 3(c)所示为精轧的 $d85\text{ mm} \times 2.5\text{ mm}$ 管材经 $900\text{ }^{\circ}\text{C}$ 退火后管材的室温拉伸性能。结果表明: 管材在相对前一道次塑性有所提高。这主要是由于约 30% 的冷变形进一步增大了对残留 α 片的变形程度, 但这个变形程度仍然不足, 导致晶内储存的变形能低, 某些部位仍未达到新晶粒成核所需的激活能, 因此, 再结晶不易发生, 等轴化程度小, 从而导致斜轧穿孔坯料制备的成品管材组织不均, 影响其塑性表现。

图 5 所示为成品管材三叉晶界的显微照片。由晶界相的衍射斑点可知该相为具有体心立方结构的 β 相, 电子束的入射方向 $B=[111]$ 。由图 5 可知, β 相主要以条状分布在等轴晶界上。

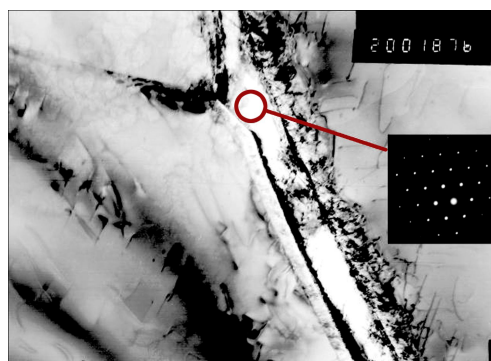


图 5 晶界 β 相的衍射花样和形貌

Fig. 5 Diffraction pattern and morphology of grain boundary β phase

条塞满初始 α 晶并以此形成一个个“集团”, 如图 6(b) 所示, 继续加热并有变形外力作用时, 这些“集团”相互“吞噬”, 使得“集团”之间的界限变得不规则, 最终得到界面不规则的魏氏 α 片层组织, 如图 6(c) 所示。

魏氏组织经过大变形率开坯冷轧制后, 大部分粗的 α 片充分破碎形成均匀分散的 α 碎片, 少部分 α 片由于位向和受力不均的原因近发生了变形, 未达到破碎的程度(图 6(d)); 由于随后的去应力退火温度较低, 各种形式存在的 α 结构尺度基本没有改变(图 6(d)); 继续进行变形率约 30% 的多辊精轧后, α 碎片再次变形破碎为更加细小的 α 颗粒, 原来残留的少部分 α 片部分变形碎裂为不连续的碎片(图 6(e)); 通过进行接近 $T_{\alpha+\beta/\beta}$ 温度的长时间保温热处理, 细小的 α 颗粒再结晶

2.4 斜轧穿孔管材加工过程组织演变模型的建立

研究 CT20 合金管材加工过程中的组织演变均对该合金建立合理的管材加工工艺有重要的意义, 总结以上的试验结果和分析讨论, 可建立如图 6 所示的管材在加热和冷却、冷加工变形整个流程的组织转变模型。

对于加工温度达到 $\alpha \rightarrow \beta$ 完全转变温度 $T_{\alpha+\beta/\beta}$ 以上的斜轧穿孔变形, 试样首先转变为完全 β 组织, β 片

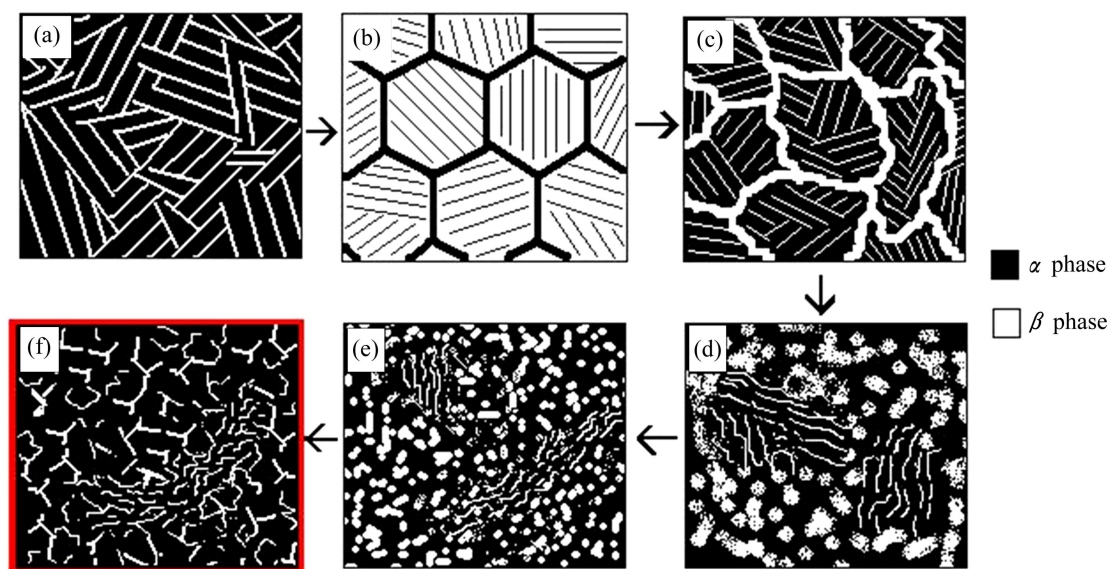


图 6 CT20 管材轧制过程中组织演变示意图

Fig. 6 Schematic diagrams of microstructural evolution of CT20 alloy during tube processing

形成等轴晶粒,不连续的 α 碎片储存的变形能不足以发生再结晶,如图6(f)所示。

3 结论

1) 对管坯进行大变形率($\epsilon > 70\%$)的两辊开坯轧制,无法充分破碎粗大的片状组织,能够获得等轴晶与变形片状共存的组织。

2) 多辊精轧对CT20合金管材组织形貌的影响不大。

3) 要获得组织均匀的细等轴组织CT20钛合金管材,需增加对斜轧穿孔方法制备CT20钛合金管坯的冷轧道次,并增大单道次变形率并辅以再结晶热处理。

REFERENCES

- [1] 杨冠军, 赵永庆, 于振涛, 周 廉. 钛合金研究、加工与应用的新进展[J]. 材料导报, 2001, 15(10): 19–21.
YANG Guan-jun, ZHAO Yong-qing, YU Zhen-tao, ZHOU Lian. New advances in titanium alloy research, processing and applications [J]. Materials Review, 2011, 15(10): 19–21.
- [2] 杜 宇, 郭荻子, 刘 伟, 戚运莲, 卢亚锋. 冷变形及退火参数对CT20钛合金管材组织和拉伸性能的影响[J]. 中国有色金属学报, 2010, 20(S1): s1045–s1049.
DU Yu, GUO Di-zi, LIU Wei, QI Yun-lian, LU Ya-feng. Effects of parameters of cold deformation and annealing on microstructure and tensile properties of CT20 alloy tube [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2010, 20(S1): s1045–s1049.
- [3] 刘 伟, 杜 宇, 卢亚锋, 毛小南, 戚运莲, 郭 萍. CT20钛合金管材的冷弯成型[J]. 中国有色金属学报, 2010, 20(S1): s743–s747.
LIU Wei, DU Yu, LU Ya-feng, MAO Xiao-nan, QI Yun-lian, GUO Ping. Cold bending of CT20 titanium alloy tubes [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2010, 20(S1): s743–s747.
- [4] 范承亮, 杨冠军, 于振涛, 蔡学章, 杜 宇, 刘 伟. CT20合金的不同显微组织与拉伸性能研究[J]. 稀有金属, 2004, 28(2): 330–333.
FAN Cheng-liang, YANG Guan-jun, YU Zhen-tao, CAI Xue-zhang, DU Yu, LIU Wei. Various microstructures and tensile properties of CT20 alloy [J]. Chinese Journal of Rare Metals, 2004, 28(2): 330–333.
- [5] 赵 彬, 杨英丽, 赵恒章, 杜 宇, 郭荻子. 低温用CT20钛合金的电子束焊接工艺[J]. 中国有色金属学报, 2010, 20(S1): s838–s842.
ZHAO Bin, The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2010, 20(S1): s838–s842.
- [6] 田 党, 张根良, 卜玉钦. 二辊斜轧穿孔时高合金钢圆坯的变形分布及分层形成机制[J]. 钢铁, 1995, 30(1): 7–9.
TIAN Dang, ZHANG Gen-liang, BO Yu-qin. Deformation distribution and lamination mechanism of high alloy steel round billet during double-roll cross piercing [J]. Steel, 1995, 30(1): 7–9.
- [7] 石德珂. 材料科学基础[M]. 北京: 机械工业出版社, 2002: 178.
SHI De-ke. Fundamental of materials science and engineering [M]. Beijing: China Machine Press, 2002: 178.
- [8] H. 米兰格比. 材料的塑性变形与断裂[M]. 颜鸣皋, 译. 北京: 科学出版社, 1998: 12–13.
H Mig. Plastic deformation and fracture in material [M]. YAN Ming-gao, transl. Beijing: Science Press, 1998: 12–13.
- [9] 束德林. 金属力学性能[M]. 北京: 机械工业出版社, 1999: 29–33.
SHU De-lin. Mechanical property in metal [M]. Beijing: China Machine Press, 1999: 29–33.
- [10] 刘 伟, 卢天健, 杨冠军, 王 飞, 卢亚锋, 毛小南, 杜 宇, 奚正平. CT20钛合金管材的冷轧工艺及组织性能的研究[J]. 钛工业进展, 2009, 26(6): 15–18.
LIU Wei, LU Tian-jian, YANG Guan-jun, WANG Fei, LU Ya-feng, MAO Xiao-nan, DU Yu, XI Zheng-ping. Correlation between processing and mechanical properties of CT20 cryogenic titanium alloy tubes [J]. Titanium Industry Progress, 2009, 26(6): 15–18.

(编辑 李艳红)