

# 热轧温度对 TC20 合金坯料冷轧成形性的影响

罗锦华<sup>1</sup>, 朱燕丽<sup>1,2</sup>, 侯峰起<sup>1</sup>, 张铁邦<sup>2</sup>, 田 成<sup>1</sup>, 李英浩<sup>1</sup>

(1. 西部超导材料科技股份有限公司, 陕西 西安 710018)

(2. 西北工业大学材料学院, 陕西 西安 710072)



罗锦华

**摘 要:** 研究了在 1000, 940, 850 °C 不同温度热轧的 TC20 合金坯料在冷连轧过程中的变形与失稳情况, 结合热轧棒材组织和室温压缩的实验结果, 表明: 热轧温度越低, 冷轧成形性越差。850 °C 热轧的 TC20 合金棒坯纵向组织中  $\alpha$  相呈连续纤维状, 冷连轧成形性比较差, 极限变形量仅 40% 左右; 1000 °C 的热轧坯料组织中  $\beta$  相占比增加, 冷连轧变形量可以达到 60%, 同时, 其室温压缩实验过程中断裂压缩率高, 塑性变形阶段加工硬化速率较小。通过室温压缩实验可直观评价 TC20 合金丝材的冷轧成形性能。

**关键词:** TC20 钛合金; 热轧温度; 冷轧成形性; 显微组织; 室温压缩

**中图分类号:** TG335.6 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-3962(2018)07-0538-05

## Effect of Hot Rolling Temperature on Cold Roll Formability of TC20 Alloy

LUO Jinhua<sup>1</sup>, ZHU Yanli<sup>1,2</sup>, HOU Fengqi<sup>1</sup>, ZHANG Tiebang<sup>2</sup>, TIAN Cheng<sup>1</sup>, LI Yinghao<sup>1</sup>

(1. Western Superconducting Technologies Co., Ltd., Xi'an 710018, China)

(2. School of Materials Science and Engineering, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

**Abstract:** In this paper, the deformation and destabilization of cold rolling TC20 alloy bars which were hot-rolled at 1000, 940 and 850 °C, were analyzed and compared. Combined with the microstructure of hot-rolled bars and room temperature compression experiments, the result showed that the lower hot-rolling temperature, the poorer the cold-rolling formability. The bar hot-rolled at 850 °C possessed the longitudinal microstructure of continuous fibrous  $\alpha$ -phase, and cold deformation property was poor, about 40%. The bar hot-rolled at 1000 °C possessed more  $\beta$ -phase, the cold deformation reached up to 60%, and showed higher compression rate and lower work-hardening rate. The cold-rolling formability of TC20 alloy bar had a strong correlation with its room temperature compression performance, the bars with higher compression rate and lower hardening rate in the plastic deformation stage had better cold roll formability.

**Key words:** TC20 titanium alloy; hot rolling temperature; cold roll formability; microstructure; room temperature compression

## 1 前 言

钛合金弹性模量与人体骨接近, 耐蚀性优良, 是目前已知的生物相容性最好的医用金属之一, 在医疗植入物领域有着广阔的应用前景。TC20 合金是基于纯钛和 Ti6Al4V 等第一代生物医用钛合金开发的新型合金, 合金中所含 Nb 元素的 5 价阳离子细胞毒性非常弱, 与人体相容性好, 且 Nb 元素取代 V 元素后, 合金的腐蚀性能

没有显著变化, 这对临床应用更有利, 因此, TC20 合金是一种理想的外科植入物用钛合金<sup>[1-5]</sup>。此外, 骨针、骨钉等植入物需要合金良好塑韧性匹配度和相对稳定的塑性指标。据报道, 在工业生产条件下, 热拉拔得到的 TC20 丝材, 抗拉强度为 1020 MPa<sup>[6]</sup>, 为得到抗拉强度大于 1200 MPa 高强度的 TC20 丝材, 冷加工是比较理想的变形方式。本文通过不同温度下热轧的 TC20 合金坯料的冷连轧实验, 结合组织、室温压缩实验分析, 对比分析其冷连轧极限变形能力及影响因素。

## 2 实 验

本文采用 TC20 合金为研究对象, 通过电极压制、三次真空熔炼等工序完成铸锭制备, 金相法测定合金的  $\beta$  转

收稿日期: 2018-06-03

基金项目: 陕西省科技统筹创新工程计划(2016KTCQ01-81)

第一作者: 罗锦华, 男, 1964 年生, 高级工程师, Email:

luojinhua@c-wst.com

DOI: 10.7502/j.issn.1674-3962.2018.07.06

变温度为 1010~1015 ℃，化学成分见表 1。铸锭扒皮后采用多火次锻造得到等轴组织棒坯。而后分别在 1000，940，850 ℃ 温度下热轧，得到不同组织状态的冷轧坯料。

表 1 TC20 铸锭化学成分

Table 1 Chemical composition of the TC20 ingot ( $\omega/\%$ )

Element	Ti	Al	Nb	O
Top	Bal.	6.17	7.02	0.159
Middle	Bal.	6.20	7.04	—
Bottom	Bal.	6.16	7.04	0.162
GB/T13810	Bal.	5.5~6.75	6.5~7.5	$\leq 0.20$

冷轧坯料在西部超导材料科技股份有限公司的 90D 型冷连轧设备上加工，道次减面率为 10.5%。在 OLYMPUS 光学显微镜下分析、比较丝棒材组织。依据 GB/T 228-2011 和 GB/T 7314-2005 标准，在 Instron 万能实验机上进行室温拉伸和压缩实验。变形后的试样经超声清洗后在 JEOL JSM-6460 扫描电子显微镜下观察断口。

### 3 结果与讨论

#### 3.1 不同温度热轧得到的冷轧坯料组织与性能

图 1 为不同温度热轧得到的坯料的横向金相组织。从横向组织来看，随着轧制温度的降低，坯料组织更为细碎，且相比例变化明显。1000 ℃ 轧制的棒材横向组织 (图 1a) 为大尺寸片层状的初生  $\alpha$  相，占比约 30%，细小

等轴的次生  $\alpha$  相呈点状分布在  $\beta$  转变组织中；轧制温度为 940 ℃ 时 (图 1b)，棒坯组织略微细化，片层状初生  $\alpha$  相整体尺寸较小；850 ℃ 轧制时 (图 1c)，组织明显更为细碎，初生  $\alpha$  相为细条状和椭球状。图 2 是热轧后的棒材纵向金相组织，图 2a 显示高温轧制棒材纵向组织中  $\alpha$  相呈粗大的纺形，断续分布在  $\beta$  转变组织基体中，且  $\beta$  转变组织含量较高。轧制温度为 940 ℃ (图 2b)，纵向组织中  $\alpha$  相含量略有增加，拉长  $\alpha$  相的长宽比增加且更为连续。轧制温度降低至 850 ℃ 时，图 2c 显示  $\alpha$  相呈连续纤维状，且相含量最高。

这是由于在高温下进行热轧，片状  $\alpha$  相破碎不完全且在动态回复作用下会快速长大，最终保留在组织中。随着轧制温度的降低， $\alpha$  相被细化、拉长，组织明显被破碎。这一结果与文献[7]中热模拟实验数据吻合：在两相区变形，接近相变点比如 1000 ℃ 时，变形的主要是  $\beta$  相，而  $\alpha$  相变形困难；在两相区温度范围如 850 ℃ 下变形， $\alpha$  相细化为扭曲薄片和细小片层，球化程度有限<sup>[7]</sup>。

不同温度下热轧的棒材的室温拉伸性能如表 2 所示，随着轧制温度的降低，抗拉强度和屈服强度逐渐升高，而延伸率和断面收缩率没有明显变化，塑性水平相当。结合图 1 和图 2 组织来看，高温轧制棒材组织中  $\beta$  相含量较高，因此强度较低；而低温轧制获得的具有较高的  $\alpha$  相含量的细碎纤维状组织保障了棒材较高强度。

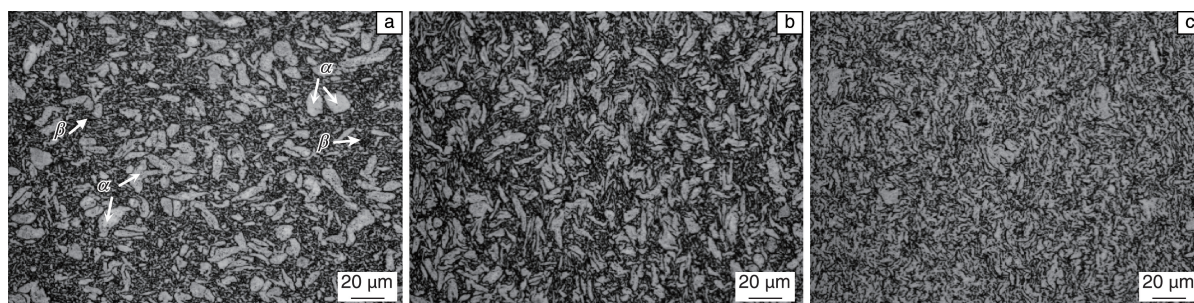


图 1 不同温度轧制的 TC20 坯横向金相组织照片

Fig. 1 Cross-sectional metallographs of TC20 alloy after being hot rolled at different temperatures: (a) 1000 ℃, (b) 940 ℃, (c) 850 ℃

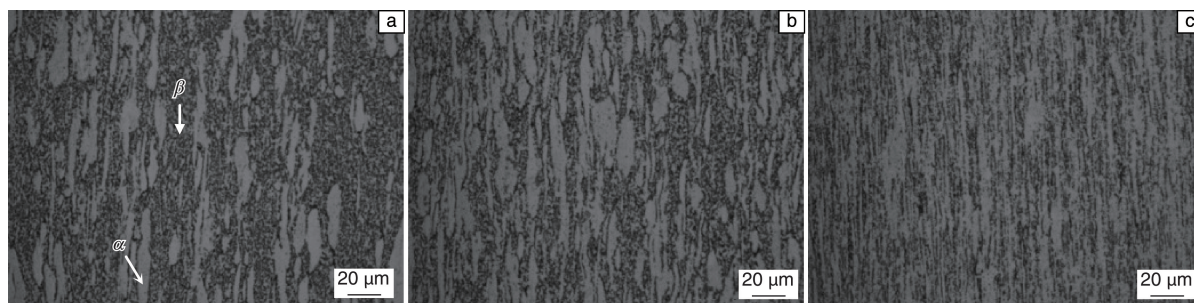


图 2 不同温度轧制的 TC20 坯纵向金相组织照片

Fig. 2 Longitudinal metallographs of TC20 alloy after being hot rolled at different temperatures: (a) 1000 ℃, (b) 940 ℃, (c) 850 ℃



表 2 不同温度轧制 TC20 棒材的室温拉伸性能

Table 2 Tensile properties of TC20 bars rolled at different temperatures

Rolling temperature/℃	$R_m$ /MPa	$R_{p0.2}$ /MPa	$A$ /%	$Z$ /%
1000	984.5	852.5	16.3	46.5
940	1042.5	872.5	18.2	49
850	1090	933	16.8	47.5

3.2 不同热轧棒坯的冷连轧成形性能

不同温度下热轧的 TC20 棒材采用连续冷轧的方法进行冷加工, 结果显示, 不同坯料的冷加工性能差异较大。3 种温度轧制的坯料在进行 30% 变形时, 丝材外观均正常, 将丝材横截面放大 50 倍, 未观察到缺陷。850 ℃ 轧制的棒材, 冷加工量到 36% 时, 表面出现了肉眼可见裂纹; 加工量为 42% 时, 发生断裂, 丝材内部裂纹已贯穿。940 ℃ 轧制的棒材, 变形量到 48.6% 发生断裂。1000 ℃ 轧制的棒材, 经 59% 的变形, 表面萌生裂纹, 发现可视缺陷, 变形至 63% 才发生断裂。比较来看, 高温轧制的棒坯, 表现出较高的冷连轧变形能力; 低温轧制的棒坯, 冷连轧时更容易开裂, 塑性变形能力较差。

金属热加工过程中, 在变形的同时会发生动态回复和动态再结晶, 同时伴随有加工硬化和流变变化现象。TC20 棒材在相变点附近加热, 变形温度较高, 棒坯在热轧过程中充分回复, 过程中软化作用更显著, 畸变能较低,  $\beta$  相含量较高, 更有利于其后面冷加工过程塑性变形。而热变形温度低, 棒材在热加工过程中组织充分破碎, 内部晶体缺陷大量增殖, 位错密度增大, 在晶界及其附近聚集, 运动过程中彼此交截, 形成割阶, 使位错的可动性减小, 许多位错交互作用后, 缠结在一起, 形成位错缠结, 使位错运动变得十分困难, 同时, 又没有足够的驱动力进行动态回复, 变形抗力快速增大, 塑性变形能力降低, 造成后面冷连轧成形性较差。

1000 ℃ 热轧坯经 45% 的冷连轧变形后, 横向金相组织(图 3a)演变为弥散分布  $\alpha+\beta$  相, 并夹杂少量尺寸略大的点状  $\alpha$  相, 纵向金相组织照片(图 3a)显示  $\alpha$  相沿轧制方向拉长。与图 1a 和图 2a 的坯料组织相比, 冷轧后丝材组织在破碎和细化的同时, 纵向  $\alpha$  相的连续性增强。

表 3 为 1000 ℃ 热轧坯经 45% 的冷连轧变形得到的丝材的室温拉伸性能, 丝材抗拉强度超过 1230 MPa, 屈服强度在 1000 MPa 以上, 延伸率达 12%, 断面收缩率约 38% 左右, 与一般热加工得到的丝棒材抗拉强度 $\geq 900$  MPa, 断面收缩率 $\geq 25\%$ 相比, 冷加工丝材的塑性水平与之相当, 没有明显降低, 而抗拉强度和屈服强度明显增高, 综合力学性能良好。这是因为冷连轧得到的丝材, 加工硬化

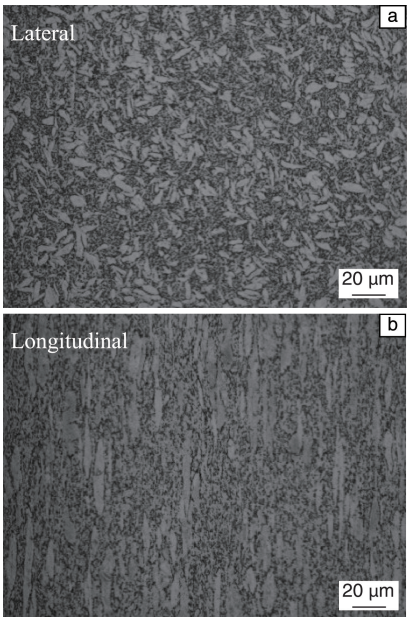


图 3 冷加工态 TC20 丝材金相组织照片

Fig. 3 Metallographs of cold-rolled TC20 wire: (a) lateral, (b) longitudinal

表 3 冷加工态 TC20 丝材室温力学性能

Table 3 Mechanical properties of cold-rolled TC20 wire

Processing technology	$R_m$ /MPa	$R_{p0.2}$ /MPa	$A$ /%	$Z$ /%
Cold-rolled $\Phi 6.4$ mm	1240	1003	12.5	38
	1232	1032	12	38
Hot-rolled $\Phi 6.1$ mm	1015	870	11.5	40

提高了其强度, 同时细小均匀的组织可以保证其相对较优的塑性, 得到理想的综合性能匹配, 可以满足血管内导丝等对强度和塑性要求较高的医疗器械产品。

3.3 分析和讨论

为进一步分析坯料组织状态对坯料冷加工成形性能的影响, 分别对不同温度轧制的棒材进行了室温压缩实验。图 4 是不同温度轧制的热加工态 TC20 合金的室温压缩应力应变曲线。可以看出, 1000 ℃ 热轧的棒材的压缩率最高, 在抗压强度超过 1160 MPa 的情况下, 断裂压缩率达到了 60%。而 850 ℃ 轧制的棒材的压缩曲线显示, 断裂时抗压强度高达 1250 MPa, 压缩率减至 40%, 塑性变形能力较低。

结合图 5 的棒坯压缩试样塑性变形阶段应力-应变曲线来看, 高温轧制的棒材, 缓慢进入塑性变形阶段, 在塑性变形过程中, 抗压强度逐渐上升, 加工硬化速率较慢, 对图 5 的 1000 ℃ 热轧坯塑性变形阶段应力-应变曲线拟合, 近似一条直线, 斜率为 1.96; 对 940 ℃ 热轧坯

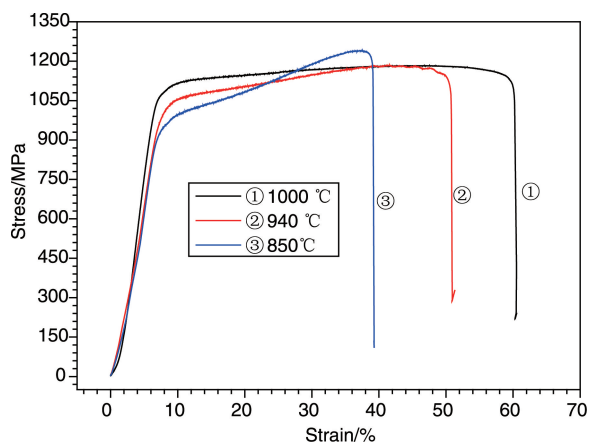


图 4 不同温度轧制的 TC20 棒材室温压缩应力应变曲线

Fig. 4 Stress and strain curves of TC20 rods hot rolled at different temperatures

塑性变形阶段应力-应变曲线拟合，直线斜率为 4.25，加工硬化速率提高；低温轧制的棒材，快速进入塑性变形阶段，塑性变形阶段拟合直线的斜率达 9.57，抗压强度快速攀升，棒材急速发生加工硬化，并很快产生了断裂。比较来看，高温轧制棒材，加工硬化率较低，可以持续发生塑性变形，维持较大的变形量；而低温轧制的棒材则相反，塑性变形阶段较短，材料快速硬化、失效，抵抗变形能力更强，不利于后期冷轧变形。

对不同温度轧制的棒材进行室温压缩实验，断口与试样轴线夹角约为  $45^\circ$ ，属于剪切断裂。1000 °C 热轧坯及 850 °C 热轧坯的室温压缩断口扫描电镜照片分别如图 6

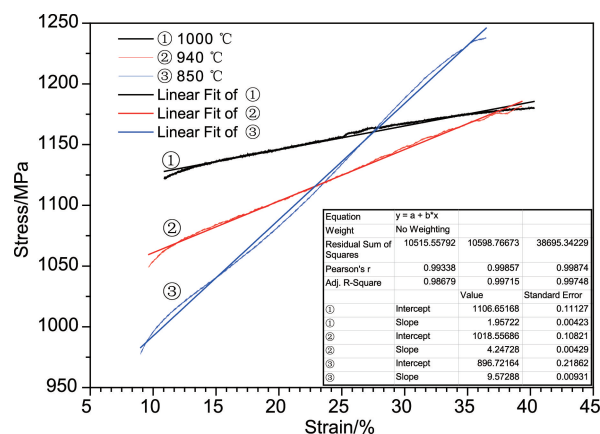


图 5 不同温度轧制的 TC20 棒材塑性变形阶段压缩应力应变曲线

Fig. 5 Stress and strain curves during plastic deformation stage of TC20 rods hot rolled at different temperatures

和图 7 所示。可以看到，TC20 棒坯压缩断裂后均为典型的切应变断口，图 6b 和图 7b 显示断口中部断裂区由大大小小的韧窝组成；进一步放大，图 6c 和图 7c 是抛物线形剪切韧窝，在切应力作用下，显微空洞沿剪切方向被拉长，图 6d 和图 7d 是细长舌状的剪切平面，相对光滑。

与 1000 °C 热轧坯的压缩断口相比，850 °C 热轧坯压缩断口，光滑的剪切平面占比更大，只有少量的抛物线形的塑性断裂韧窝。说明 1000 °C 轧制的 TC20 棒材，塑性更佳。低温轧制的棒材，可能因为位错密度大，成核中心多，间距小，则韧窝更容易相互连接，韧窝浅平，材料的塑性变形能力弱。

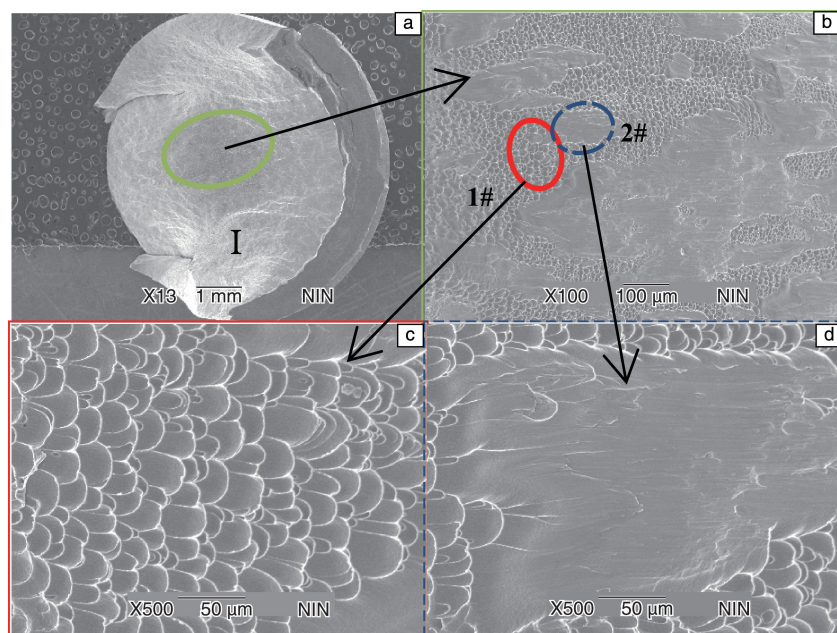


图 6 1000 °C 热轧坯压缩断口形貌

Fig. 6 Compression fracture morphology of TC20 bar rolled at 1000 °C



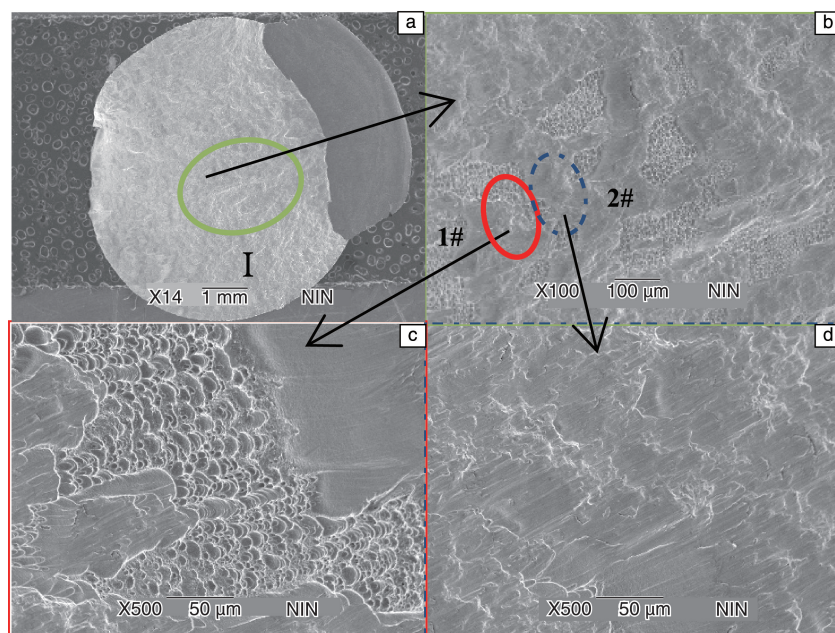


图 7 850 °C 热轧坯压缩断口形貌

Fig. 7 Compression fracture morphology of TC20 bar rolled at 850 °C

结合图 2 坯料纵向组织看, 不同的温度下轧制的棒材, 纵向微观组织均有加工流线。高温轧制的坯料, 纵向  $\alpha$  相为纺锤形, 流线断断续续, 连续性不强, 可以维持较大冷变形量; 低温轧制的坯料, 纵向流线是连续线状,  $\alpha$  相比比例增加, 在冷连轧过程中容易开裂, 冷加工成形性不佳。结合文献[8]来看, 断续的  $\alpha$  相, 应力集中概率低, 比较不容易被撕裂, 可以实现较大的变形<sup>[8]</sup>。因此, 纵向连续纤维状的  $\alpha$  相组织的存在对丝材冷连轧变形不利。

金属材料的晶体结构不同, 其应变硬化系数也不同<sup>[9]</sup>。钛合金中  $\alpha$  相是密排六方结构,  $\beta$  相是体心立方结构, 高温下加工的丝棒材,  $\beta$  相占比较高, 因此塑性变形能力更好。

综合而言, 高温热轧变形的棒材, 变形热可以给予较大的补偿, 变形后加工硬化程度弱, 缺陷率低,  $\alpha$  相含量低且不连续分布在  $\beta$  相基体上, 在后续冷连轧加工过程中, 可以实现更大程度的变形。

## 4 结 论

本文研究分析了不同温度热轧的具有不同组织状态的 TC20 钛合金棒坯的冷成形性能, 得到如下结论:

(1) 热轧温度对 TC20 合金棒坯冷轧成形性影响较大。坯料的显微组织和相组成是影响 TC20 合金冷轧成形性的关键因素。1000 °C 热轧的 TC20 棒坯,  $\beta$  相含量较高,  $\alpha$  相为纺锤形, 不连续, 冷轧变形率可达 60%。

(2) 冷连轧丝材抗拉强度约 1230 MPa, 屈服强度在

1000 MPa 以上, 延伸率达 12%, 断面收缩率约 38%, 与热拉拔丝材相比, 综合力学性能良好。

(3) 室温压缩性能可直观表征棒坯的冷轧成形性能, 室温压缩实验过程中, 1000 °C 热轧的棒材断裂压缩率较高, 塑性变形阶段硬化较慢, 冷轧成形性更好。

## 参考文献 References

- [1] Hanawa T. *Science & Technology of Advanced Materials* [J], 2002, 3 (4): 289-295.
- [2] Eisenbarth E, Velten D, Müller M, et al. *Biomaterials* [J], 2004, 25 (26): 5705-5713.
- [3] Kawashima A, Watanabe S, Asami K. *Materials Transactions* [J], 2005, 44(7): 1405-1411.
- [4] Choubey A, Balasubramaniam R, Basu B. *Journal of Alloys & Compounds* [J], 2004, 381(1-2): 288-294.
- [5] Li Kai (李 凯). *Dissertation for Master* (硕士论文) [D]. Xi'an: Fourth Military Medical University, 2007: 2-51.
- [6] Wang Weimin (王卫民), Lin Haifeng (林海峰), Luo Binli (罗斌莉), et al. *Titanium Industry Development* (钛工业进展) [J], 2013, 30(2): 11-16.
- [7] Pilehva F, Zarei-Hanzaki A, Moemeni S, et al. *Journal of Materials Engineering & Performance* [J], 2015, 25(1): 1-13.
- [8] Wu Chongzhou (吴崇周), Huang Xu (黄 旭). *Function Materials* (功能材料) [J], 2004, 35(21): 2143-2145.
- [9] Tan Shusong (谭树松). *Nonferrous Metal Materials Science* (有色金属材料科学) [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1993: 12-16.

(编辑 惠 琼)