TC4钛合金热轧无缝管组织性能分析与控制*

董恩涛[1,2],余 伟[1],米永峰[3],蔡庆伍[2],史佳新[1]

(1. 北京科技大学工程技术研究院,北京 100083;
2. 钢铁共性技术协同创新中心,北京 100083;
3. 内蒙古包钢钢联股份有限公司钢管公司,内蒙古 包头 014010)

摘 要: 采用光镜、扫面电镜研究不同规格的热轧TC4钛合金无缝管的金相组织,并对钛合金管材进行力学性能测试,此外还研究了不同热处理及酸洗工艺对管材组织性能的影响。研究发现,不同规格的钛合金管材热轧态组织差异显著,而且穿孔后的毛管头部的外径和壁厚都比尾部的大。经不同温度的两相区退火工艺后得到的退火态组织没有显著变化。酸洗工艺虽然可以有效去除钛管表面氧化产物,但酸洗的时间参数十分重要,否则会造成钛管表面质量恶化。

关键词: TC4钛合金; 无缝管; 组织性能; 热处理; 酸洗

中图分类号: TG113.1 TG146.2^{+3} **文献标识码:** B **文章编号:** 1009-5438(2019)04-0004-06

DOI:10.13647/j.cnki.btgkj.2019.04.002

Analysis and Control for Microstructure and Properties of TC4 Titanium Alloy Hot-rolled Seamless Tube

Dong En-tao[1,2], *Yu Wei*[1], *Mi Yong-feng*[3], *Cai Qing-wu*[2], *Shi Jia-xin*[1]

(1. *Institute of Engineering Technology, University of Science and Technology Beijing, Beijing* 100083, *China*;
2. *Collaborative Innovation Center of Steel Technology, Beijing* 100083, *China*;
3. *Steel Tube Co. of Inner Mongolia Baotou Steel Union Co., Ltd., Baotou* 014010, *Inner Mongolia Autonomous Region, China*)

Abstract: The metallographic structure of hot-rolled TC4 titanium alloy seamless tubes with different specifications was studied with the light microscope and scanning electron microscope as well as the mechanical properties of titanium alloy tube were tested. Moreover, the effects of different heat treatment and pickling processes on the microstructure and properties of tube were also studied. It was found that the differences of as-hot-rolled microstructure of titanium alloy tubes with different specifications were significant as well as the outer diameter and wall thickness of the head of tubular billet after perforation were larger than those of the tail. The annealed microstructure obtained by the two-phase region annealing process at different temperatures did not change significantly. Although the oxidation products on the surface of titanium tube could be effectively removed with the pickling process, the time parameters of pickling process were very important, otherwise, the surface quality of titanium tube would be deteriorated.

Key words: TC4 titanium alloy; seamless tube; microstructure and properties; heat treatment; pickling

---

* **收稿日期:** 2019-06-05

作者简介: 董恩涛(1989-),男,山东省聊城市人,博士研究生,现从事金属材料的组织性能控制研究。

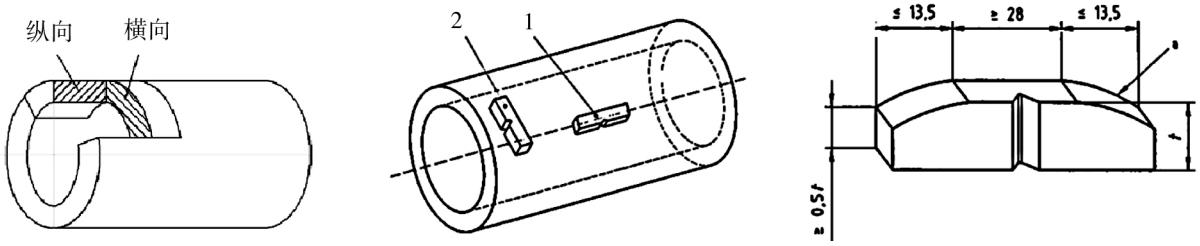
中国知网 https://www.cnki.net

钛是 20 世纪 50 年代发展起来的一种重要的结构金属，钛及其合金具有密度小，比强度、比刚度高，抗腐蚀性能、高温力学性能、抗疲劳和蠕变性能好等优良的综合性能[1-3]。钛合金被誉为继钢铁、铝材之后处于发展中的“第三金属”和“战略金属”。世界上许多国家如中、美、德、俄等国都认识到钛合金材料的重要性，并相继对其进行了研究开发。钛合金在航空、航天、船舶、石油、化工、兵器、电子、医疗等军事工业及民用领域得到高度重视和广泛应用。在我国，低强、低合金化钛合金无缝管生产技术已经成熟。然而，中、高强钛合金管材生产技术尚不成熟[4-6]。在国际上，钛无缝管正逐步取代焊管，从安全因素考虑，如在航空液压管路系统、火箭发动机管件和石油套管等其他重要装备上要大量使用无缝管材，这样一来，具有较好匹配的强度、断裂韧性和疲劳裂纹抗力的钛合金无缝管材的研究和应用越来越受到重视[7]。

对于钛合金无缝管的制备加工目前已有许多研究，其中热轧是当前普遍采用的方法，相比于挤压工艺，其可显著简化流程，提高生产效率[8,9]。本文主要通过对不同规格高强 TC4 钛合金无缝管热轧态组织性能进行分析，并探索热处理工艺对热轧态管材组织性能的影响，还着重分析了斜轧穿孔毛管头尾的组织变化，并对研究酸洗工艺对管材表面质量的作用，以期为钛合金无缝管最终加工工艺的确定以及机理研究提供依据。

1　实验材料与方法

所采用的材料均为热轧 TC4 钛合金无缝管，其中包括产品规格为外径 219 mm × 16 mm 穿孔后毛管的头尾端，外径 159 mm × 12.5 mm 热轧管材，外径 139.7 mm × 7.72 mm 热轧管材。管材的金相试样为管材横向截面和纵向截面进行线切割取样，对管材横向和纵向截面及横向 V 槽冲击试样取样方法如图 1 所示。



（a）管材金相试样　　（b）冲击试样取样　　（c）横向冲击试样示意图

图 1　冲击试样取样方法

金相试样经磨制抛光后采用 kroll 试剂腐蚀，在光学显微镜或电子显微镜下观察组织形貌。冲击实验在 0 ℃条件下进行。为研究退火工艺对管材组织性能的影响，外径 159 mm 管材退火温度分别为 680 ℃、750 ℃、800 ℃，外径 139 mm 管材退火温度分别为 750 ℃、800 ℃，保温时间均为 1 h。退火后后管材同样进行金相及冲击性能测试（根据管壁厚度，冲击试样分别取全尺寸 10 mm × 10 mm × 55 mm，3/4 尺寸 7.5 mm × 10 mm × 55 mm，1/2 尺寸 5 mm × 10 mm × 55 mm）。酸洗实验使用外径 159 mm管材，先用丙酮酒精除油，酸洗试剂体积比为 HF∶HNO_3∶H_2O = 1∶1∶3，将试样浸泡在酸洗液中，每隔一段时间取出，在光学显微镜下观察渗氧层变化。

2　结果与分析

2.1　钛合金管材组织性能分析

表 1 为外径 219 mm 穿孔后毛管的头尾端尺寸数据，穿孔后的毛管头部的外径和壁厚都比尾部的大，外径的偏差为 5 mm，壁厚偏差为 1.47 mm。

表 1　穿孔后毛管头尾端测量尺寸

位置	头部/mm	尾部/mm
外径	219	214
壁厚	22.79	21.32

一般是毛管前端直径大，尾端直径小，而中间部分是一致的，如图 2 所示，头部和尾部的晶粒尺寸差不多，晶粒尺寸均为为 150 μm 左右，金相组织为典

中国知网　https://www.cnki.net

型的魏氏组织，原始β相晶粒晶界清晰完整，有连续的晶界α镶边在β晶粒内部有细长平直、互相平行的片状α相。根据表2的数据可以看出：头部和尾部的性能差异不大，而横向和纵向稍有差异，屈服强度和抗拉强度约为10 MPa左右，均满足标准要求。总体来看，说明斜轧穿孔后的毛管两端显微组织较为均匀，横纵性能差异不大。

表2 穿孔后毛管头尾力学性能测试(冲击取全尺寸)

取样位置	屈服强度平均值/MPa	抗拉强度平均值/MPa	冲击功平均值/J	API P110级冲击功要求/J
头纵向	846.27	958.08	34.36	>20
头横向	834.55	945.39	33.76	
尾纵向	843.92	957.12	32.68	
尾横向	830.42	940.22	33.74	

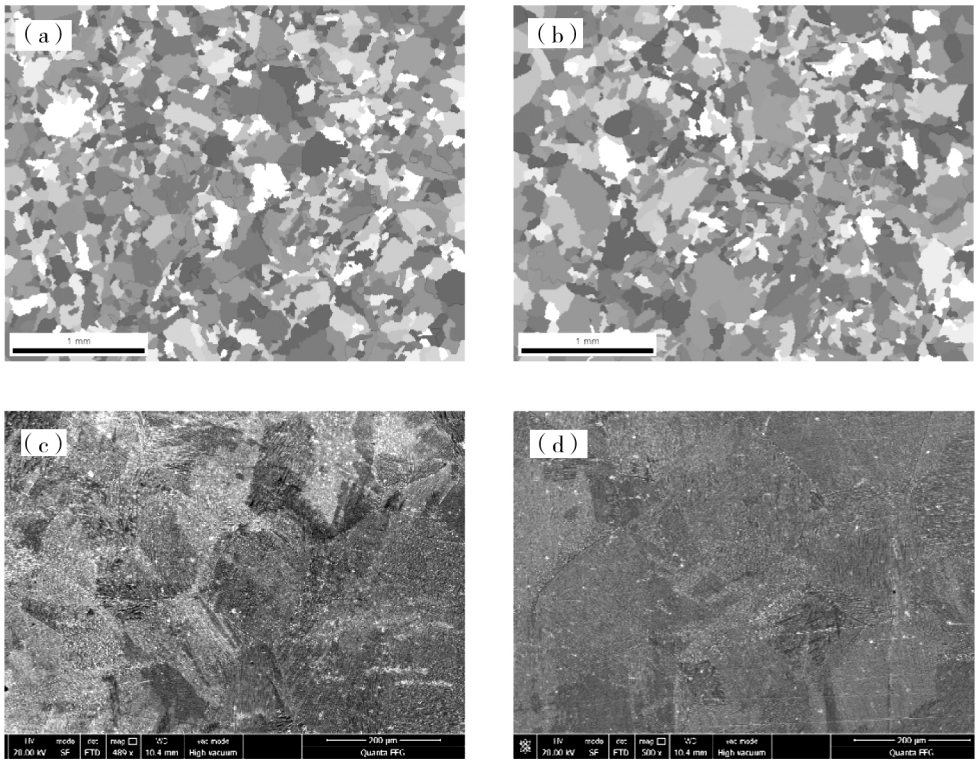


图2 穿孔后毛管头尾端纵向组织EBSD晶粒和SEM照片(ac头部、bd尾部)

通过分别取外径159 mm和139.7 mm热轧态的管材试样进行显微组织分析，结果如图3所示。外径159 mm管与139.7 mm管组织显著不同，外径139.7 mm管组织介于羽毛状的魏氏组织和编织网篮状的α+β两相组织之间，而外径159 mm热轧管横向及纵向显微组织均呈现粗大魏氏组织形态，晶界明显，在β晶界上广泛析出α相，同时晶内有针状α相大量析出，这种魏氏组织中存在的大量针片层状显微结构易导致形成脆弱面，这种组织对管材性能不利，是冲击韧性较低的主要原因，组织成因有可能是在β相区加热后变形量不大且冷速较快形成。根据表3可以看出均满足标准要求，但外径139.7 mm试样的冲击功好于后者，与组织分析相对应。

中国知网 https://www.cnki.net

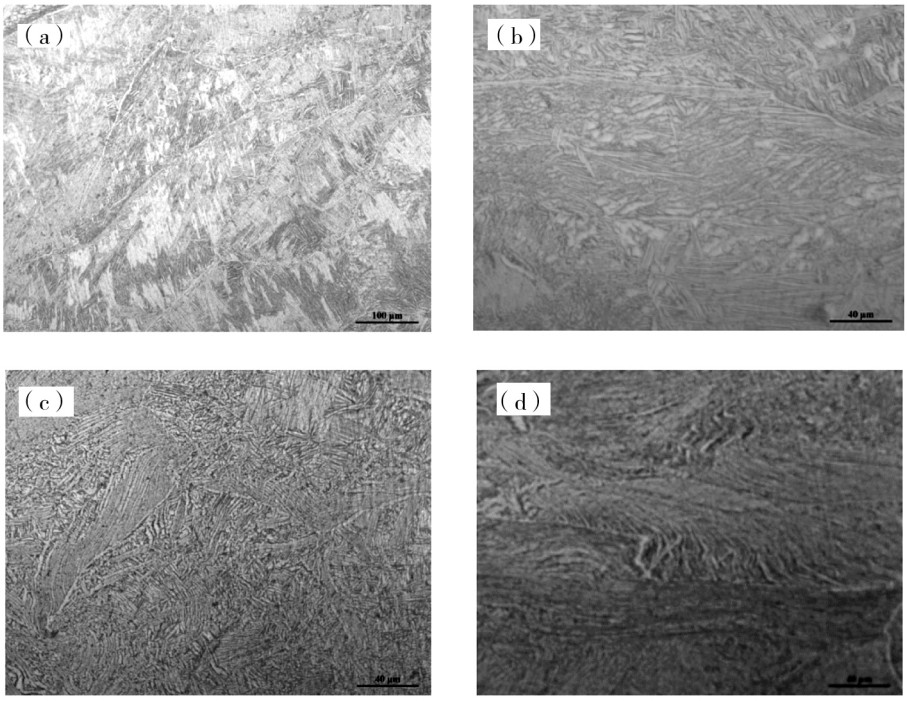


图 3　外径 159 mm 和 139.7 mm 热轧管材横纵向金相组织

(ab: 159 mm,cd: 139.7 mm,ac 横向,bd 纵向)

表 3　外径 159 mm 和 139.7 mm 热轧管材横向冲击功(0 ℃)

试样编号	A_{KV}/J	API P110 级冲击功要求/J
159 mm(3/4 尺寸)	21.2	>16
139.7 mm(1/2 尺寸)	23.0	>11

2.2　退火温度对组织性能影响

图 4 为外径 159 mm 和 139.7 mm 热轧管材退火处理纵向金相组织,热轧 159 mm 退火后的钛合金的显微组织与热轧未退火试样相比,未有明显变化,依然呈现出典型的热加工态组织,纵向中部有明显的轧制流线,其微观组织仍为魏氏组织,且 β 晶粒粗大,β 晶内的 α 片呈相互交错的网篮组织,晶界存在连续的 α 相。外径 159 mm 退火组织未有显著不同,组织依然呈 β 晶界完整粗大魏氏组织,稍有差异的是随着退火温度的升高,在 β 晶界上析出的白色针状 α 组织增多。外径 139.7 mm 退火态由于是空冷冷速较慢,产生的过冷度较小,α 晶核只能在晶界上形成,然后晶界区的 α 晶核向不规则 β 晶内生长,形成位向相同,互相平行的长条状组织,所以从图中可以看出白色针丛状的 α 晶核主要在晶界上形成。

表 4 可以看出外径 159 mm 退火状态下的冲击性能基本相同。冲击试样断口形貌如图 5 所示,各状态形貌基本相似,可知,其断口均为脆性断口,断口则呈短而弯曲的撕裂棱,河流花样不明显,断口微观形貌呈现准解理形貌特征; 魏氏组织片层状导致沿片层方向形成脆弱面,晶界连续 α 相的存在,导致组织不均性增加,裂纹易于沿结晶扩展,对于 α 和 β 两相,α 相的相对量较大时,β 相起到硬脆的作用,晶粒粗大或者晶界粗大,导致晶界处脆弱,裂纹易于发生或发展,均使得 TC4 材料的韧性降低。如果想使退火工艺能有效改善组织,应在热轧阶段使 β 晶粒破碎完全,以消除之后退火时晶界对新析出 α 形核的影响。

表 4　外径 159 mm 热轧管材横向冲击功(0 ℃)

退火试样编号	A_{KV}/J	API P110 级 3/4 尺寸冲击功要求/J
159 mm - 680 ℃	18.8	>16
159 mm - 750 ℃	19.1	
159 mm - 800 ℃	18.4	

中国知网　https://www.cnki.net

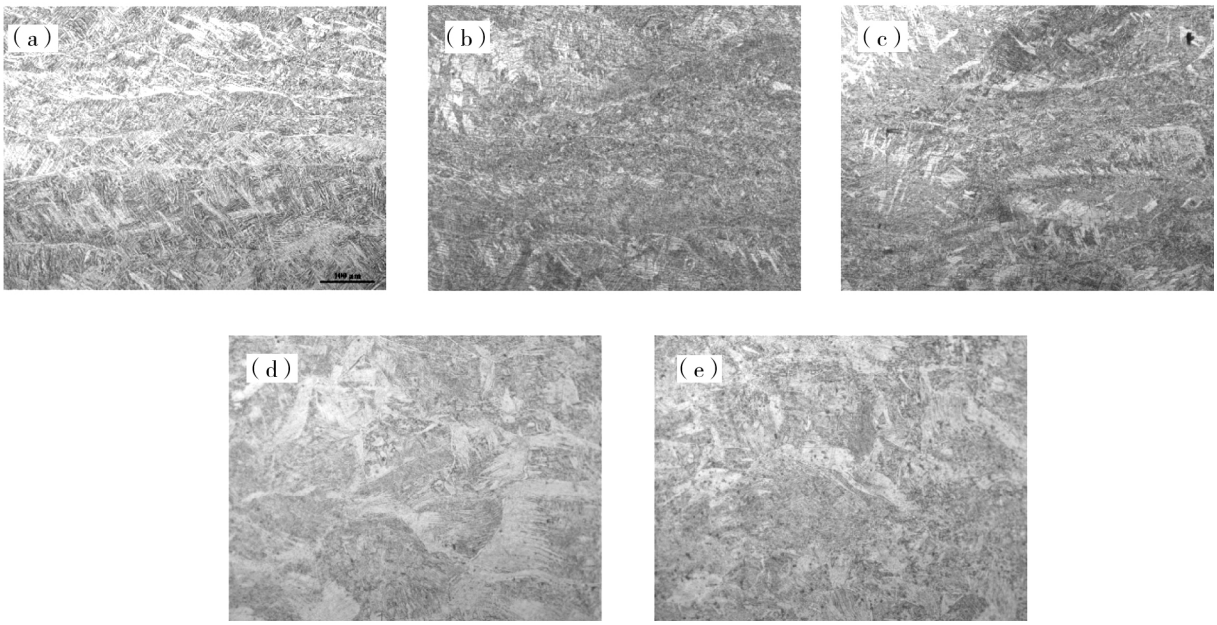


图4 外径159 mm和139.7 mm热轧管材退火处理纵向金相

(外径159 mm: a-680 ℃,b-750 ℃,c-800 ℃;外径139.7 mm: d-750 ℃,e-800 ℃)

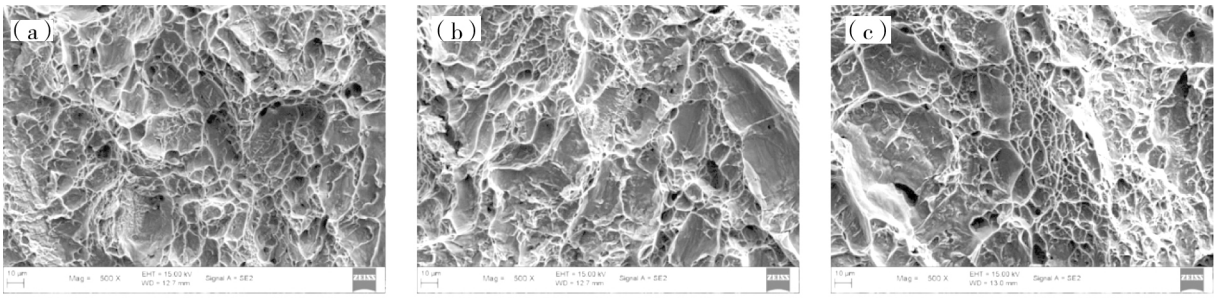


图5 外径159 mm热轧管材横向冲击试样断口

(a-680 ℃,b-750 ℃,c-800 ℃)

2.3 酸洗工艺对表面质量作用

对外径159 mm管材横截面进行磨样抛光侵蚀,在光学显微镜下可观察到管材外壁约1~2 μm厚的亮白色渗氧层,如图6(a)所示。图6(b)、(c)、(d)、(e)分别为酸洗20 s、50 s、160 s、220 s时长后截面渗氧层金相照片。从图中可以看出,随着酸洗时间的延长,亮白色的渗氧层基本消失,所以通过酸洗可以基本去除钛合金表面的渗氧层。但是酸洗时间的增加造成基体也受到侵蚀形成凹坑。所以控制好酸洗时间非常关键,否则TC4钛合金基体表面氧化产物洗掉后会进一步侵蚀TC4钛合金表面,影响合金的力学性能。同时要指出,在有关研究中,酸洗过程中有可能造成钛合金表面吸氢生成氢化物脆性相,对钛合金性能造成不利影响。

3 结论

(1)不同的规格的TC4钛合金无缝管组织差异较大,必须要制定合理热轧工艺,按需增加穿轧工序时的压下量,防止粗大β晶粒的存在影响管材最终性能。

(2)普通两相区退火工艺并不能显著改善管材性能,且应在热轧阶段使β晶粒破碎完全,以消除之后退火时晶界对新析出α形核影响。

(3)酸洗工艺能有效清除钛合金管材表面渗氧层,但必须严格控制酸洗时间,防止基体被腐蚀影响表面质量。

中国知网 https://www.cnki.net

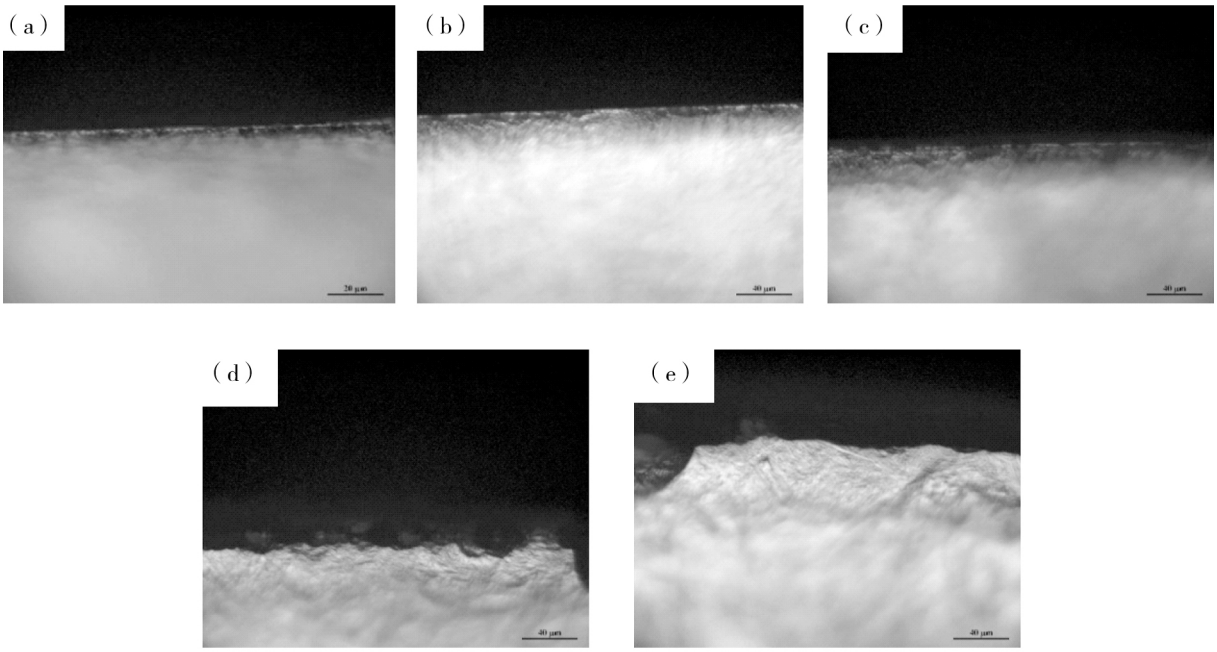


图 6　酸洗后管材外壁渗氧层

(a－未酸洗,b－20 s,c－50 s,d－160 s,e－220 s)

参　考　文　献

[1] 何军利,毛小南,张鹏省. 循环热处理温度对 TC4 钛合金组织和力学性能的影响 [J]. 金属热处理,2013,38(2):62－66.

[2] 顾晓辉,刘君,石继红. 淬火、时效温度对 TC4 钛合金组织和力学性能的影响 [J]. 金属热处理,2011,36(2):29－33.

[3] M. Vanderhasten, L. Rabet, B. Verlinden, Ti－6Al－4V. Deformation map and modelisation of tensile behaviour [J]. Materials and Design, 2008,(29):1090－1098.

[4] 蔡海娇,叶文君,等. 热挤压工艺对 Ti－6Al－4V 钛合金组织与性能的影响 [J]. 北京科技大学学报,2013,(35):895－900.

[5] 王杨,宣天美,郝玥,等. 热处理对冷轧 TC4 钛合金管材组织和性能的影响热加工工艺,2012,(41):165－166,169.

[6] 江学强,吉卫,曹海桥,等. 钛合金常规挤压时冷硬层对成形过程的影响 [J]. 锻压技术,2007,(32):127－130.

[7] 吕祥鸿,舒滢,赵国仙,等. 钛合金石油管材的研究和应用进展 [J]. 稀有金属材料与工程,2014,(43):1518－1524.

[8] 李永林,袁红军,朱宝辉,等. TA18 钛合金斜轧管坯组织与性能研究 [J]. 钛工业进展,2014,(31):23－27.

[9] 赵彬,曾卫东,赵永庆. 加工方法对高强钛合金管坯组织性能的影响 [J]. 热加工工艺,2008,37(4):23－25.

中国知网　https://www.cnki.net