

EB 炉熔炼 TA1 铸坯在热轧过程中的组织演变

崔 岩¹ 孙新军² 张志波³ 雍岐龙²

(1. 华北理工大学冶金与能源学院, 河北 唐山 063210; 2. 钢铁研究总院工程用钢研究所, 北京 100081; 3. 昆明理工大学冶金与能源工程学院, 云南 昆明 650093)

摘 要: 通过热轧试验和组织观察, 研究了热轧变形温度、单道次压下率等对 EB 炉铸态板坯在热轧过程中的组织演变和再结晶的影响规律。发现经过热轧前的板坯加热, EB 炉铸坯比 VAR 锻坯的晶粒尺寸大几百倍, 粗大的 EB 炉铸坯晶粒组织不利于热轧过程中发生再结晶。通过提高热轧温度 ($\geq 850\text{ }^{\circ}\text{C}$)、减小单道次压下量、降低热轧变形速度, 可以促使热轧组织充分再结晶; 探讨采用薄坯高温开轧、高温终轧、高温卷取, 争取热轧卷获得较大比例的再结晶组织, 从而可以省略传统的热轧板退火再结晶工艺。发现当热轧温度为 $850\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时, 存在一个细化再结晶晶粒的临界压下率 (43.6%), 当热轧压下率低于 43.6% 时, 提高热轧压下率可显著细化热轧卷中再结晶晶粒, 超过临界压下率, 热轧卷中再结晶晶粒尺寸几乎保持不变。当热轧温度 $\leq 810\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时, 存在一个临界压下率启动再结晶形核过程, 随着热轧温度降低, 临界压下率逐渐增大。

关键词: TA1; 板坯; EB 炉; 热轧; 再结晶

中图分类号: TF823, TG335.11

文献标志码: A

文章编号: 1004-7638(2020)03-0053-06

DOI: 10.7513/j.issn.1004-7638.2020.03.008

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



听语音
与作者互动
聊科研

Microstructure Evolution during Hot Rolling of TA1 Slab Produced by EB Furnace Smelting

Cui Yan¹, Sun Xinjun², Zhang Zhibo³, Yong Qilong²

(1. College of Metallurgy and Energy, North China University of Science and Technology, Tangshan 063210, Hebei, China; 2. Institute of Structural Steels, Central Iron and Steel Research Institute, Beijing 100081, China; 3. Faculty of Metallurgical and Energy Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, Yunnan, China)

Abstract: The influences of hot rolling deformation temperature and single pass reduction rate on the microstructure evolution and recrystallization of EB furnace slab during hot rolling were studied by hot rolling experiments and microstructure observation. It is found that the grain size of EB furnace slab is hundreds of times larger than that of VAR forging slab after heating the slab before hot rolling, and the coarse grain structure of EB furnace slab is not conducive to recrystallization during hot rolling. By increasing the rolling temperature ($\geq 850\text{ }^{\circ}\text{C}$), reducing the single pass reduction and decreasing the hot rolling deformation speed, the hot rolling structure can be fully recrystallized. The high-temperature start rolling, high-temperature finishing rolling and high-temperature coiling of thin slab were discussed to obtain a large proportion of recrystallization structure of the hot rolling coil, so that the traditional annealing recrystallization process of hot rolling plate can be omitted. It is found that when the hot rolling temperature is $850\text{ }^{\circ}\text{C}$, there is a critical reduction rate (43.6%) for refining recrystallized grains. When the reduction rate is lower than 43.6%, increasing the reduction rate can significantly refine recrystallized grains in the hot rolling coil, which exceeds the critical reduction rate, and the recrystallized grain size in the hot rolling coil almost remains unchanged. When the hot rolling temperature is lower than $810\text{ }^{\circ}\text{C}$, there is a critical reduction rate to start recrystallization nucleation. With the decrease of the hot rolling temperature, the critical reduction rate increases gradually.

Key words: TA1 slab, EB furnace, hot rolling, recrystallization

收稿日期: 2020-03-21

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFB0301200); 河北省自然科学基金项目(E2016209390)。

作者简介: 崔 岩(1979—), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为钛及钛合金、金属基复合材料、钢铁材料, E-mail: jack-cui5090@163.com。

0 引言

钛及钛合金具有比强度高、耐高温、耐蚀性能好和生物相容性高等优点,是性能优异的结构材料^[1-3]。近年来,随着我国航空航天、核潜艇、船舶、海水淡化、岛礁建设、海洋风力发电等领域快速发展,对于大卷重宽带材的钛及钛合金需求日益增大^[4-9]。目前,传统的宽板坯采用真空自耗电弧熔炼(VAR)法熔炼圆铸锭,然后锻造开坯成板坯^[10-11]。这种工艺工序多且复杂、能耗大、成材率低、成本高,而因VAR法滴铸工艺难以避免造成高低密度夹杂等铸造缺陷^[12-14]。电子束冷床炉熔炼(EBCHM)在减少高低密度夹杂能力等方面远优于3次真空自耗熔炼,且熔铸成方坯可以直接用于热轧,减少了几次熔铸及锻造开坯等工序,缩短了工艺

流程、增大了成材率并降低成本,在我国云钛等企业得到了广泛应用^[15-18]。

然而,EB炉熔铸制造的板坯铸造组织极其粗大,与传统“VAR法熔铸+锻造”得到的细小锻造组织差异较大。在热轧过程中,粗大铸造组织的变形、回复、再结晶等规律必将有其自身特点,从而对热轧产品组织和性能产生影响。由于我国引进电子束冷床熔炼炉时间较短,相关研究涉及较少。因此需要研究EB法铸坯热轧过程的组织演变规律,为生产和工艺设计提供支持,笔者对此进行了研究。

1 试验材料和方法

试验材料为云钛提供的“VAR炉冶炼+锻造”、“EB炉熔铸”两种方式生产的TA1板坯,其化学成分如表1所示。

表1 云钛EB炉、VAR炉两种冶炼方式生产的TA1坯料化学成分(质量分数)
Table 1 Chemical compositions of TA1 billet produced by EB furnace and VAR furnace

冶炼方式	组织状态	Fe	C	H	N	O	Ti
EB炉熔铸	铸造组织	0.016	0.007 2	0.000 92	0.004 7	0.045	余量
VAR炉熔铸	锻造组织	0.063	0.007 4	0.001 23	0.18	0.004 9	余量

①从EB炉铸坯、VAR锻坯直接取金相样,用于观察和对比EB炉铸坯和VAR锻坯的金相组织。

②为了观察和模拟热轧前的板坯加热组织,将小块的EB炉铸坯和VAR锻坯放入670℃的电阻炉中,随炉升温(耗时36 min)加热到880℃,保温3 min后水冷,热取金相样。

③从EB炉纯钛铸坯上线切割取样,制成4个楔形样,用于模拟不同温度(850、810、770、740℃)和不同压下率,每个楔形样均有6个阶梯,阶梯厚度分别为24、16、14、12、10、9 mm。将EB炉铸坯楔形样放入670℃的电阻炉中,随炉升温(耗时36 min)加热到880℃,保温3 min,随炉分别降温到850、810、770、740℃后立即在试验轧机上热轧,轧至约8 mm,在铁板冷床上快速空冷,取金相样,用于观察不同热轧温度、不同热轧压下率的热轧金相组织。

将①、②、③三种工艺得到的金相样打磨抛光后,采用体积比为8:7:85的氢氟酸、硝酸和蒸馏水进行金相腐蚀,在金相显微镜下观察纵切面的金相组织。其中EB炉铸坯组织非常粗大,难以用金相显微镜进行观察,因此采用1.2:1的氢氟酸、硝酸溶液进行酸洗,采用相机拍照观察其粗大铸态组织。为了得到平均晶粒尺寸,采用Nano Measurer软

件测量晶粒直径。

2 试验结果和分析

2.1 EB炉粗大铸坯组织和VAR锻坯组织

由图1可见,EB炉铸坯晶粒组织很大,测得的平均晶粒尺寸在3.2 cm,达到厘米级别;而VAR炉锻坯组织晶粒尺寸只有18 μm。作为热轧原料,EB炉铸坯晶粒尺寸比VAR炉锻坯晶粒尺寸大3个数量级。

采用“880℃×3 min+水冷”模拟热轧厂板坯加热过程。经过测量发现EB炉铸坯880℃加热后晶粒尺寸为38 mm,几乎没有显著变化;但VAR炉锻坯晶粒尺寸长大到81 μm左右,可见VAR锻坯组织长大了4.5倍。作为热轧原料,EB炉铸坯加热组织比VAR炉锻坯加热组织晶粒尺寸大几百倍。

2.2 热轧温度及单道次压下率对热轧组织的影响

2.2.1 850℃热轧单道次变形量对热轧板组织演变的影响

由图2可见,EB炉铸坯在850℃不同压下率(7.1%~68.5%)下进行热轧得到的组织为“再结晶组织+未再结晶纤维”,但再结晶程度却存在较大差异。当单道次热轧压下率为7.1%~21.9%时,热轧

组织接近完成了再结晶过程,很少出现残留的未再结晶纤维组织;当单道次压下率为34.5%~68.5%时,随着压下率逐渐增大,未再结晶纤维组织比例越来越高。由此可见850℃下热轧压下率越大,越难以充分发生动态再结晶。这个规律与楔形样热轧时

变形速度不同有关:热加工温度较低,变形速度高时,一般不发生动态再结晶,而容易出现动态再结晶的条件是高温低速的条件^[19]。采用楔形样热轧,阶梯厚度越大,单道次压下率越高,变形速度越快,越难以发生动态再结晶。

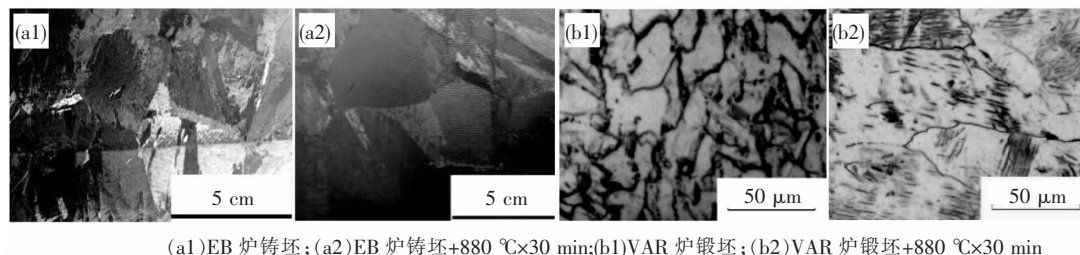


图1 热轧所用坯料组织

Fig.1 Microstructure of slabs for hot rolling

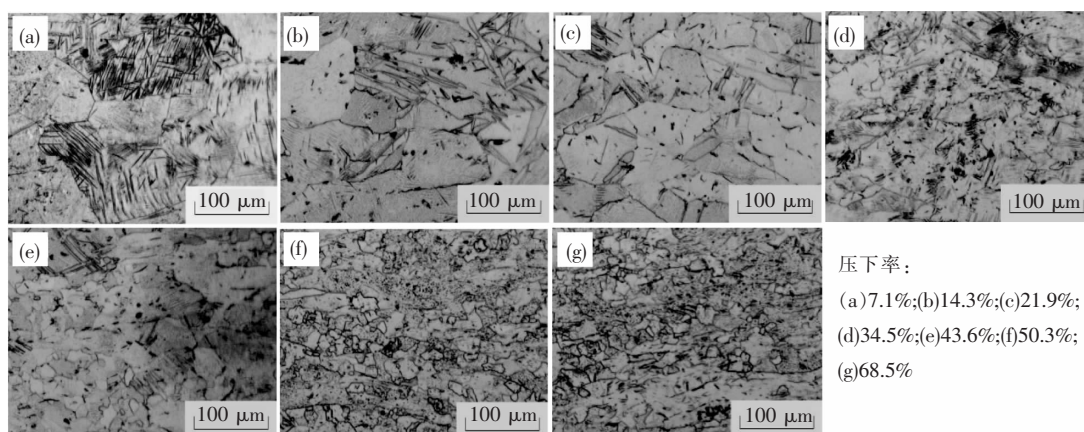


图2 850℃不同压下率热轧后的金相组织

Fig.2 Microstructure of hot rolling at 850℃ with different reduction rates

由图3可见,随热轧压下率从7.1%增加到68.5%,再结晶晶粒尺寸的变化分为急剧和平缓两个阶段:第一阶段,热轧单道次压下率从7.1%增加到43.6%,再结晶晶粒尺寸从129 μm减少到只有31 μm,此时随着热轧压下率的增加,晶粒尺寸急剧减小;第二阶段,热轧压下率从43.6%增加到68.5%,再结晶晶粒尺寸继续减小,但幅度很小,只有6 μm。由此可见当热轧压下率小于43.6%时,热轧板再结晶晶粒尺寸受到热轧压下率波动的影响较大。随着热轧压下率从7.1%增加到43.6%,形变储能的逐渐增大不仅提高了形核率,也使得高形变储能的微区形变储能逐渐增大,导致临界晶粒尺寸减小,从而导致再结晶晶粒尺寸逐渐减小。当压下率大于43.6%时,虽然提高了金属的整体形变储能,但是某些局部高储能微区的形变储能达到饱和不再增大,临界晶

核尺寸不再减小,从而导致再结晶晶粒尺寸不再减小。

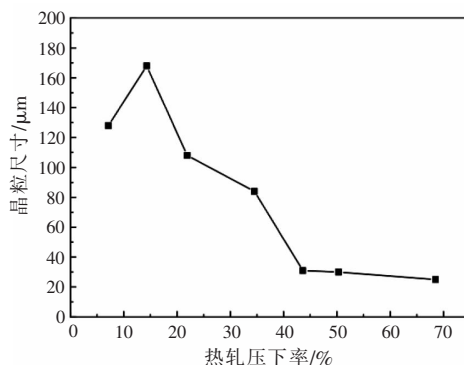


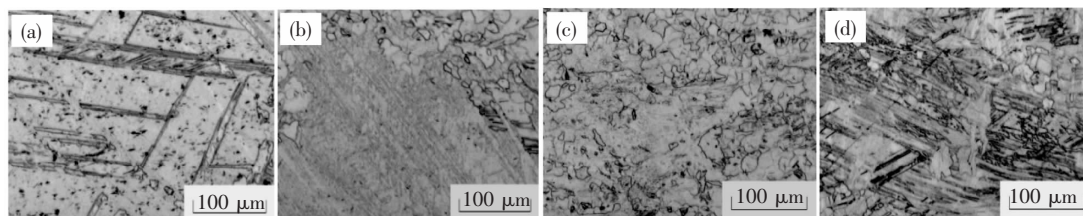
图3 EB炉铸坯热轧(850℃)压下率与晶粒尺寸关系
Fig.3 Relationship between grain size and hot rolling reduction rate at 850℃

一般来说,为了减小单道次压下率过高对板型的损害,工厂热轧单道次压下率低于50%。热轧压下率从14%增加到43.6%,再结晶晶粒尺寸从169 μm 减小到31 μm ,仍然有5倍的差距,可见工业化热轧生产时单道次压下率对热轧板再结晶晶粒尺寸影响很大。

2.2.2 热轧温度和单道次压下率对再结晶的影响

由图4~6和表2可见,随着热轧温度逐渐降

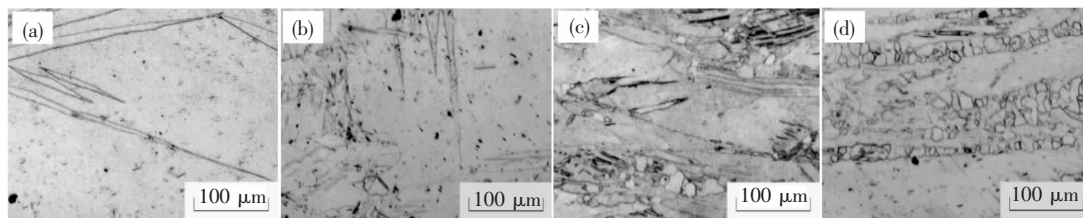
低,发生再结晶所需要的临界压下率逐渐增大,且继续增加热轧压下率,再结晶晶粒体积分数逐渐增大。由此可见,当热轧温度较低时,需要更高的热轧单道次压下率才能促进再结晶形核。再结晶形核驱动力为形变储能,随着温度逐渐降低,再结晶形核难度增大,但通过提高道次压下率增加形变储能可增大再结晶驱动力,促进再结晶形核。



压下率: (a)22.5%;(b)35%;(c)44.5%;(d)69.7%

图4 810 °C不同压下率热轧板的金相组织

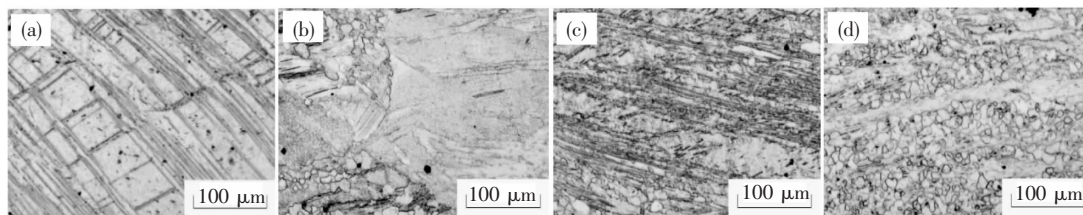
Fig.4 Microstructure of hot rolled plates with different reduction rates at 810 °C



压下率: (a)21.5%;(b)33.6%;(c)43.6%;(d)67.9%

图5 770 °C不同压下率热轧板的金相组织

Fig.5 Microstructure of hot rolled plates with different reduction rates at 770 °C



压下率: (a)34.8%;(b)43.9%;(c)51.1%;(d)68.8%

图6 740 °C不同压下率热轧板的金相组织

Fig.6 Microstructure of hot rolled plates with different reduction rates at 740 °C

表2 温度和热轧压下率对再结晶的影响
Table 2 Effect of temperature and hot rolling reduction on recrystallization

$T/^\circ\text{C}$	开动再结晶临界 热轧压下率/%	完全再结晶临界 热轧压下率/%
850		7.1
810	35	
770	33.6	
740	43.9	

3 讨论

3.1 粗大铸态晶粒组织对热轧组织演变的影响

经过板坯加热后,EB炉铸坯作为热轧原料晶粒尺寸达到厘米级别,是传统VAR炉锻坯晶粒尺寸的几百倍。在热轧过程中,EB炉铸坯粗大晶粒的形变储能小,其再结晶驱动力将小于VAR炉锻坯,这对

于动态和静态再结晶都是不利的。

3.2 高温、低速、低压下率热轧可实现热轧板的充分再结晶

试验发现 EB 炉铸锭需要在 850 °C、低压下率、低速热轧才会得到充分再结晶组织,而当热轧温度 ≤ 810 °C 在任何变形道次下都不会发生充分的再结晶,表明在高温下热轧有可能直接生产出完全再结晶或者高比例再结晶组织的热轧板;低速轧制可以实现充分的再结晶,而高速轧制再结晶比例较低。因为容易发生动态再结晶的条件是高温低速^[19],所以采取减小单道次压下率,降低轧制变形速度有利于提高热轧板再结晶比例。

在热轧生产过程中,可以考虑采用薄坯高温开轧、高温终轧、高温卷取,争取获得较多的再结晶组织,从而可以省略传统的热轧板退火工艺,降低生产工艺成本。但现有生产线很难实现高温终轧,需要对热轧生产线进行改造才可以实现。

3.3 低温热轧需提高单道次压下率才能促进再结晶形核

当轧制温度小于等于 810 °C 时,主要再结晶方式很可能是静态再结晶。静态再结晶需要增大变形储能,才能提供充分的再结晶驱动力,所以通过提高单道次压下率可促使静态再结晶形核。实际生产中,一些钛材对塑韧性要求并不高,所以可以省略热轧卷退火工艺,通过增大单道次压下率促使发生部分再结

晶,从而一定程度降低冷加工硬化并改善塑韧性。

4 结论

1) EB 炉铸坯比 VAR 锻坯的晶粒尺寸大 3 个数量级。经过热轧前的板坯加热,EB 炉铸坯比 VAR 锻坯的晶粒尺寸大几百倍。粗大的 EB 炉铸坯晶粒组织不利于热轧过程中再结晶形核。

2) 发现通过提高终轧温度(≥ 850 °C)、减小单道次压下量、降低热轧变形速度,可以促使热轧组织发生充分再结晶。设想采用薄坯高温开轧、高温终轧、高温卷取,争取热轧板获得较大比例的再结晶组织,从而可以省略传统的热轧板退火再结晶工艺。

3) 发现在 850 °C 热轧存在一个细化再结晶晶粒的临界压下率(43.6%),当 850 °C 的热轧压下率低于 43.6% 时,提高压下率可显著细化热轧板中再结晶晶粒,继续增大压下率,再结晶晶粒尺寸几乎保持不变。分析认为当达到临界压下率以后,高缺陷微区形变储能达到饱和,继续增大热轧压下率再结晶临界晶核尺寸将不再变化。

4) 当热轧温度 ≤ 810 °C,存在一个临界压下率开动再结晶形核。随着热轧温度降低,发生再结晶的热轧临界压下率逐渐增大。在较低热轧温度下(≤ 810 °C),可通过增大单道次压下率促进发生部分再结晶,从而一定程度降低冷加工硬化并改善塑韧性。

参考文献

- [1] Zhou Lian, Zhao Yongqing, Wang Xiangdong. Titanium alloy material and application in China [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2012.
(周廉, 赵永庆, 王向东. 中国钛合金材料及应用发展战略研究 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2012.)
- [2] Cai Jianming, Li Zhenxi, Ma Jimin, et al. Research and development of 600 °C high temperature titanium alloys for aeroengine [J]. Materials Review, 2006, 19(1): 50-53.
(蔡建明, 李臻熙, 马济民, 等. 航空发动机用 600 °C 高温钛合金的研究与发展 [J]. 材料导报, 2006, 19(1): 50-53.)
- [3] Leyen S C, Peter S M. Titanium and titanium alloys [M]. Chen Zhenghua. Beijing: Chemical Industry Press, 2005.
(Leyen S C, Peter S M. 钛和钛合金 [M]. 陈振华译. 北京: 化学工业出版社, 2005.)
- [4] Chen Xiaofu, Li Xiangming, Jiang Yehua, et al. Effects of drawing velocity and casting temperature on solidification interface of the flat titanium [J]. Special Casting and Nonferrous Alloys, 2016, 36(4): 412-415.
(陈晓夫, 李向明, 蒋业华, 等. 牵拉速度和浇注温度对钛扁锭凝固界面的影响 [J]. 特种铸造及有色合金, 2016, 36(4): 412-415.)
- [5] Mo Wei. Titanium ingots and forging [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2012.
(莫畏. 钛铸锭和锻造 [M]. 北京: 冶金工业出版社, 2012.)
- [6] Wang Dingchun. Development and application of high-strength titanium alloys [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2010, 20(S1): 958-963.
(王鼎春. 高强钛合金的发展与应用 [J]. 中国有色金属学报, 2010, 20(S1): 958-963.)

- [7] Li Mingli, Shu Ying, Feng Yijiang *et al.* Application status on domestic titanium and titanium alloys plate and strip [J]. Titanium Industry Progress, 2011, 28(6): 14–17.
(李明利, 舒滢, 冯毅江, 等. 我国钛及钛合金板带材应用现状分析 [J]. 钛工业进展, 2011, 28(6): 14–17.)
- [8] Boyer. An overview on the use of titanium in the aerospace industry [J]. Materials Science and Engineering, 1996, A213(1–2): 103–114.
- [9] Zhao Yongqing. The new main titanium alloys used for shipbuilding developed in China and their applications [J]. Materials China, 2014, 33(7): 398–404.
(赵永庆. 我国创新研制的主要船用钛合金及其应用 [J]. 中国材料进展, 2014, 33(7): 398–404.)
- [10] Zhao Yongqing, Ge Peng. Current situation and development of new titanium alloys invented in China [J]. Journal of Aeronautical Materials, 2014, 34(4): 51–61.
(赵永庆, 葛鹏. 我国自主研发钛合金现状与进展 [J]. 航空材料学报, 2014, 34(4): 51–61.)
- [11] Huang Haiguang, Cao Zhanyuan, Li Zhimin *et al.* Hot continuous rolling slab of TA10 titanium alloy by electron beam cold hearth single melting [J]. Special Casting and Nonferrous Alloys, 2016, 36(1): 90–93.
(黄海广, 曹占元, 李志敏, 等. 电子束冷床炉单次熔炼 TA10 合金热连轧板坯 [J]. 特种铸造及有色合金, 2016, 36(1): 90–93.)
- [12] Luo Lei, Mao Xiaonan, Yang Guanjin. Research on composition uniformity of TC4 alloys during electron beam cold hearth melting [J]. Metallurgical Engineering, 2014(1): 28–34.
(罗雷, 毛小南, 杨冠军. TC4 钛合金电子束冷床熔炼成分均匀性研究 [J]. 冶金工程, 2014(1): 28–34.)
- [13] Chang Hui, Kou Hongchao, Zhao Xiaohua *et al.* Solidification structure and segregation behavior of Ti–1023 alloy during VAR process [J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2010, 30(12): 1079–1082.
(常辉, 寇宏超, 赵小花, 等. VAR 过程中 Ti–1023 合金凝固组织和偏析行为的研究 [J]. 特种铸造及有色合金, 2010, 30(12): 1079–1082.)
- [14] Qin Guihong, Wang Wanbo, Ji Bo *et al.* Introduction and application of industrial cooling hearth melting technology [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2010, 20(S1): 877–880.
(秦桂红, 王万波, 计波, 等. 工业化冷床熔炼技术的引进与应用 [J]. 中国有色金属学报, 2010, 20(S1): 877–880.)
- [15] Tian Shifan, Ma Jimin. Development and applications of electron beam cold hearth melting [J]. Journal of Materials Engineering, 2012(2): 77–85.
(田世藩, 马济民. 电子束冷床熔炼 (EBCHM) 技术的发展与应用 [J]. 材料工程, 2012(2): 77–85.)
- [16] Paton B E, Trygub M P, Akhonin S V. Electron beam melting of titanium zirconium and their alloys [M]. Fan Wensheng, Wang Dianru, Zhang Haifeng *et al.* Beijing: China Machine Press, 2014.
(Paton B E, Trygub M P, Akhonin S V, 等. 钛、锆及其合金的电子束熔炼 [M]. 樊文生, 王殿儒, 张海峰, 等译. 北京: 机械工业出版社, 2014.)
- [17] Chen Feng, Chen Li, Guo Bin *et al.* Advantages and disadvantages of electron beam cold hearth melting [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2010, 20(S1): 873–876.
(陈峰, 陈丽, 国斌, 等. 电子束冷床熔炼的优与劣 [J]. 中国有色金属学报, 2010, 20(S1): 873–876.)
- [18] Lei Wenguang, Yu Lanlan, Mao Xiaonan *et al.* Numerical simulation of continuous casting solidification process of TC4 titanium alloy during EBCHM [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2010, 20(S1): 381–386.
(雷文光, 于兰兰, 毛小南, 等. 电子束冷床熔炼 TC4 钛合金连铸凝固过程数值模拟 [J]. 中国有色金属学报, 2010, 20(S1): 381–386.)
- [19] Zhao Zhiye. Plastic deformation and rolling of metal (the second edition) [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2012.
(赵志业. 金属塑性变形与轧制理论 (第2版) [M]. 北京: 冶金工业出版社, 2012.)

编辑 杨冬梅