

过热度与组合电磁搅拌交互作用对重载钢轨钢铸坯组织及均质性的影响

李红光

(攀钢集团攀枝花钢铁研究院有限公司, 钒钛资源综合利用国家重点实验室, 四川 攀枝花 617000)

摘 要: 为探究过热度及连铸组合式电磁搅拌交互作用对超大断面重载钢轨钢铸坯凝固组织及 C、Mn 元素宏观偏析的影响, 在特定组合电搅工艺条件下, 开展了不同过热度的工艺对比试验; 通过数值模拟计算, 定性分析了过热度对连铸坯冷却凝固及组织构成的影响; 在此基础上解析过热度与电磁搅拌交互作用对铸坯凝固组织及 C、Mn 元素宏观偏析的实际影响。探讨性的提出提高大方坯重载钢轨钢铸坯均质性及致密性技术思路。

关键词: 重轨钢; 连铸; 过热度; 电磁搅拌; 凝固组织; 均质性

中图分类号: TF777 文献标志码: A 文章编号: 1004-7638(2020)02-0114-06

DOI: 10.7513/j.issn.1004-7638.2020.02.021

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



听语音
与作者互动
聊科研

Effect of Interaction Between Superheat Degree and Combined EMS on Dendritic Structure and Homogeneity of Heavy Rail Steel Bloom

Li Hongguang

(State Key Laboratory of Vanadium and Titanium Resource Comprehensive Utilization, Pangang Group Panzhihua Research Institute of Iron and Steel Co., Ltd., Panzhihua 617000, Sichuan, China)

Abstract: In order to determine the effect of interaction between superheat degree and combined EMS on dendritic structure and C, Mn homogeneity of heavy rail steel bloom, comparing experiment for different superheat degrees were carried out based on the specific combined EMS process. The effects of superheat degrees on the solidifying process and dendritic structure of bloom was qualitative analyzed by numerical simulate; the actual effects of interaction between superheat degree and combined EMS on dendritic structure and C, Mn macro segregation of bloom were further analyzed. Based on the analysis results the technical process improving the homogeneity and intensity of heavy rail steel bloom has been proposed.

Key words: heavy rail steel, continuous casting, superheat degree, EMS (electro-magnetic stirring), dendritic structure, homogeneity

0 引言

随着铁路运输的不断发展,对钢轨质量要求越来越高。钢轨均质性的提高对母材及焊接热影响区组织控制具有积极意义。铸坯偏析主要受凝固过程影响,涉及工艺参数包括连铸电磁搅拌、过热度、冷却强度等^[1-4],其中关于过热度对铸坯质量的影响主要体现于对铸坯心部质量及凝固组织影响^[7-11]。重轨钢铸坯均质性的有效控制是钢轨均质性保障的重要基

础,笔者基于国内某厂大方坯重轨连铸装备技术条件,以重载钢轨钢为对象,探究考察连铸中包钢液过热度与组合式电磁搅拌交互作用对铸坯 C、Mn 合金元素宏观偏析及宏观凝固组织的影响,为大方坯重轨钢铸坯均质性及致密性提升的控制提供一定参考。

1 试验研究

1.1 试验铸机装备技术条件

试验铸机为国内某厂大方坯连铸机,铸机为全

弧形多点矫直连铸机,基本半径 14 m,配备有凝固末端轻压下及组合式电磁搅拌装备,具体为结晶器电磁搅拌与凝固末端电磁搅拌组合。

试验基于实际条件探究 30、20 ℃ 及 5 ℃ 过热度工况。在实际生产过程中,过热度在 15~35 ℃ 条件下根据炉机匹配原则制定拉速并进行恒速浇铸,极低过热度条件下通过提高拉速以保障浇铸过程完成。

1.2 试验结果

对试验铸坯进行中心纵向低倍检验及代表区域宏观组织枝晶腐蚀检验,检验试样取样位置及检验面如图 1 所示。

1.2.1 铸坯低倍检验

铸坯中心纵向低倍检验面位于铸坯宽度方向中心位置且平行于铸坯窄面(厚度方向)。铸坯中心纵向低倍检验典型结果如图 2 所示。由图 2 可知,过热度为 5 ℃ 浇铸条件下,铸坯中心缩孔严重,相同

维度条件下疏松带宽达到 125 mm;过热度为 30 ℃ 条件下疏松带宽为 75 mm,中心出现间断的缩孔;20 ℃ 过热度条件下疏松带宽为 70 mm。此外,30 ℃ 过热度条件下铸坯 V 型偏析最不明显,20 ℃ 过热度条件对应铸坯次之,过热度为 5 ℃ 最明显。

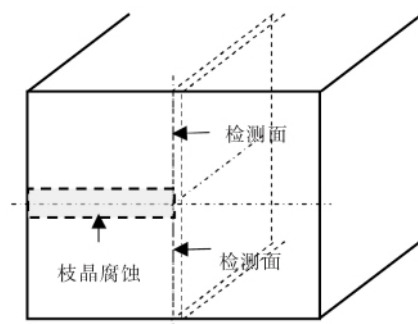


图 1 铸坯检验取样示意

Fig.1 Sampling diagram of test samples for experiment blooms

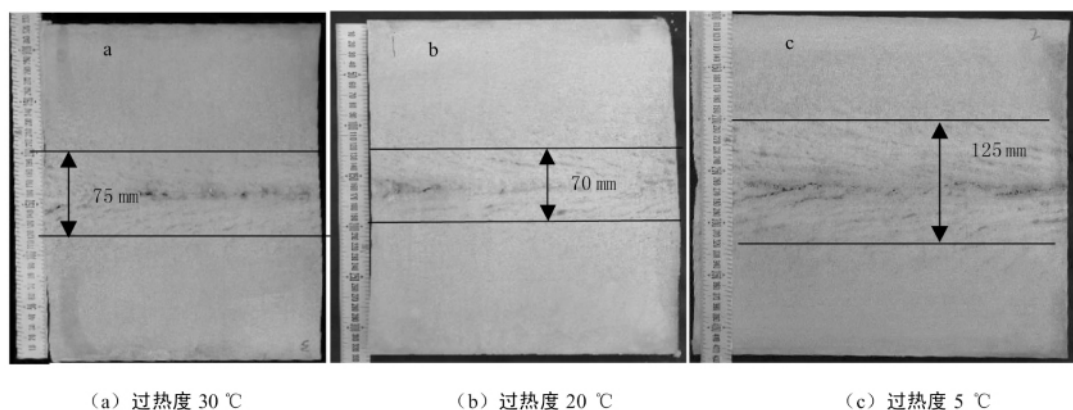


图 2 铸坯中心纵向低倍典型照片

Fig.2 Typical macro photograph of blooms center

1.2.2 凝固组织检验

对铸坯代表区域进行宏观凝固组织枝晶腐蚀检验,结果如图 3 所示,由图 3 可知,过热度 30 ℃ 条件下铸坯柱状晶区截止于距离铸坯表面约 50 mm 位置,混晶区带宽度约为 47 mm,混晶与等轴晶分界较明显,等轴晶区半长轴长约 108 mm;20 ℃ 过热度条件下铸坯柱状晶区截止于距离铸坯表面约 52 mm 位置,混晶区与等轴晶区分界不清晰;5 ℃ 过热度条件下铸坯柱状晶区截止于距离铸坯表面约 38 mm 区域,混晶区带宽度约为 60 mm,等轴晶区半长轴长约 114 mm,等轴晶晶粒粗大且中心疏松严重。此外,20 ℃ 过热度条件下铸坯等轴晶区晶杆较 30 ℃

过热度试验工艺条件下晶杆粗大,过热度 5 ℃ 条件下铸坯等轴晶区遗留明显的弧形痕迹。

1.2.3 铸坯代表合金元素偏析检验

对试验铸坯进行钻样偏析化学检验,取样钻头尺寸 $\varnothing 5$ mm,取样位置位于铸坯厚度方向中心线,从距离铸坯表面 5 mm 处向铸坯中心推移。铸坯 C、Mn 元素偏析化学检验结果如图 4 所示。

由图 4(a) 可看出,过热度 5 ℃ 与 20 ℃ 工艺相比,距离铸坯表面 10~60 mm 区域内 C 元素负正偏析交替较为显著,即结晶器电磁搅拌冲刷效果显著,而在距离铸坯表面 120~150 mm 区域的凝固末端电磁搅拌影响区负正偏析交替基本一致。过热度 30 ℃ 与

20℃工艺相比,从铸坯表面到距离表面60 mm区域内偏析演变一致,随着凝固往铸坯中心推移,凝固组织从柱状晶过渡到混晶并向等轴晶转变,偏析演变规律发生差异性变化,30℃过热度条件下溶质凝固前沿推进速度相对20℃较慢,结晶器电磁搅拌作用所致的距离表面60 mm处富集的溶质逐渐扩散,呈现较大区域(距离表面60~100 mm)的正偏析,而20℃过热度条件下凝固前沿推进速度相对较快,距离表面60 mm处富集的溶质被捕捉后,后续区域溶质扩散速度小于凝固前沿推进速度而向负偏析快速过渡。在凝固末端电磁搅拌作用区域,30℃过热度工艺条件下,铸坯负正偏析交替不明显。由图4(b)可看出,Mn元素偏析度演变规律与C元素相似。

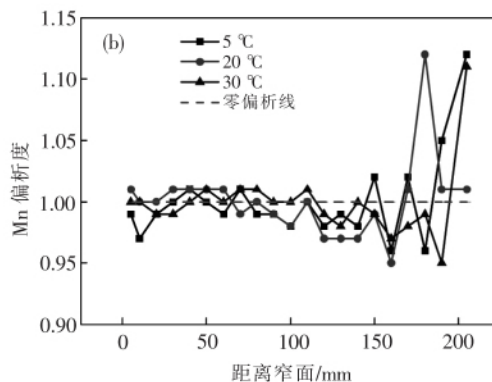
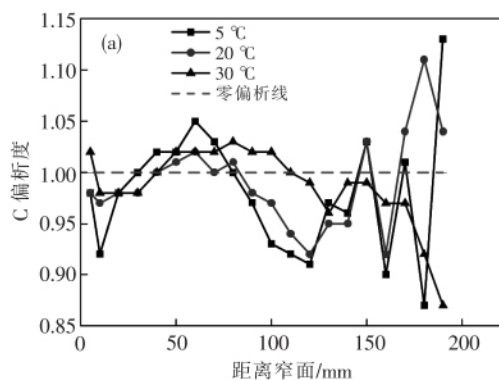


图4 不同浇铸温度条件下C、Mn元素偏析检验结果

Fig.4 C and Mn macro segregation results of blooms produced with different superheat degree

偏析检验结果表明,随着钢液温度的降低则连铸电磁搅拌对溶质元素的扩散及宏观区域分配影响作用更显著。具体的,过热度5℃与20℃条件下,结晶器电磁搅拌影响作用差异明显,而凝固末端电磁搅拌作用效果无差异;20℃与30℃条件下,结晶器电磁搅拌影响作用无差异,但凝固末端电磁搅拌作用影响差异明显。即低温钢液在凝固前阶段即表现出凝固差异,而高温钢液则在凝固后阶段才表现出凝固差异。此外,后阶段凝固钢液在凝固末端电磁搅拌作用下,负正偏析交替距离较凝固初期阶段更短,即负正偏析交替演变更加迅速,溶质浓度梯度更大,均质性控制更不利。

2 凝固组织模拟计算与分析

2.1 铸坯凝固组织模拟计算

为定性分析过热度对凝固组织的影响,在不考虑连铸电磁搅拌作用的条件下,对铸坯四分之一代

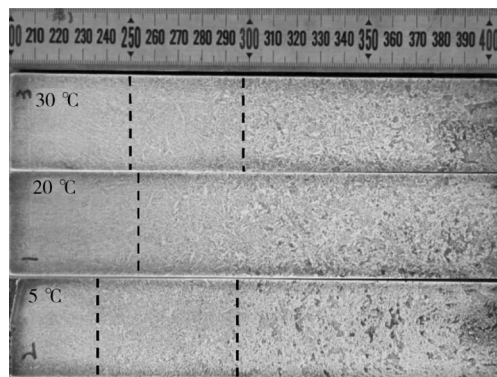


图3 代表区域宏观凝固组织典型结果

Fig.3 Typical results of dendritic structure of representative area in blooms

表区进行凝固组织模拟计算,凝固传热数值模拟计算模型校验结果如图5所示。由图5可知,凝固传热数值模拟模型可靠。

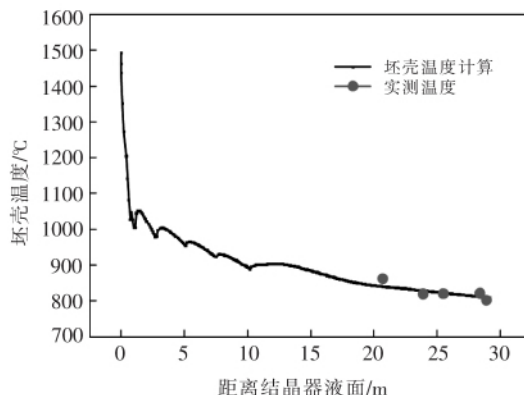


图5 铸坯坯壳温度计算结果与测定结果

Fig.5 Temperature results of bloom surface for numerical simulation and actual measurement

采用校验后的模型进行铸坯宏观凝固组织数值模拟计算,以定性分析过热度对超大断面重载钢轨钢铸坯凝固组织的影响,结果如图 6 所示。

由图 6 可看出,随着浇铸钢液过热度从 5 ℃ 提高到 30 ℃,铸坯柱状晶更加发达,低过热度条件下铸坯等轴晶比例高。

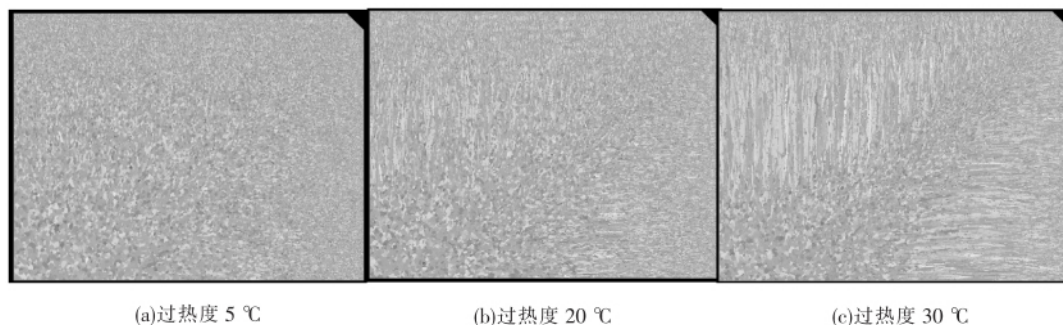


图 6 浇铸钢液过热度对铸坯凝固组织的影响计算结果

Fig.6 Numerical simulation results of the effect of superheat degrees on blooms' dendritic structure

2.2 试验结果分析

对于不同过热度与组合式电磁搅拌交互作用下铸坯凝固组织表现的差异,笔者认为: 相同搅拌电流强度条件下,过热度为 30 ℃ 及 20 ℃ 时,铸坯柱状晶区冷却凝固较快,凝固传热方向性较强,柱状晶较发达,在搅拌作用下晶杆受冲刷,生长方向偏移; 而过热度为 5 ℃ 时,钢液过热度较低,凝固传热强度相对较低,柱状晶不发达。

等轴晶区晶粒尺寸的大小与晶粒生长时间有重要关系,钢液过热度对心部钢液局部凝固时间 t_f (局部钢液固相率从 $f_s > 0$ 且无限接近于 0 开始至 $f_s = 1$ 的过程所持续的时间,单位: s) 的关系模拟计算结果如图 7 所示。由图 7 可知,钢液过热度越低,心部钢

液的局部凝固时间越长。因此,随着凝固不断从铸坯表面向中心推移,相同冷却水量条件下,过热度 30 ℃ 浇铸条件下心部钢液温度较高,电磁搅拌冲刷熔断枝晶产生的晶核存活率低即凝固发生较晚,凝固持续时间短,故晶粒长大不充分而呈细小状; 相反过热度为 5 ℃ 工艺条件下,铸坯心部钢液温度较低,产生的晶核存活率高且长大更充分,凝固发生较早,持续时间较长,晶粒长大充分而呈粗大形态。此外,过热度为 5 ℃ 工艺条件下,在凝固末端电磁搅拌作用下心部糊状钢液被强制扰动,当搅拌作用消失后,钢液流动能被高粘度钢液快速耗散而停滞,进而遗留明显的搅拌流动痕迹,这对搅拌促进溶质扩散的作用产生抑制作用。

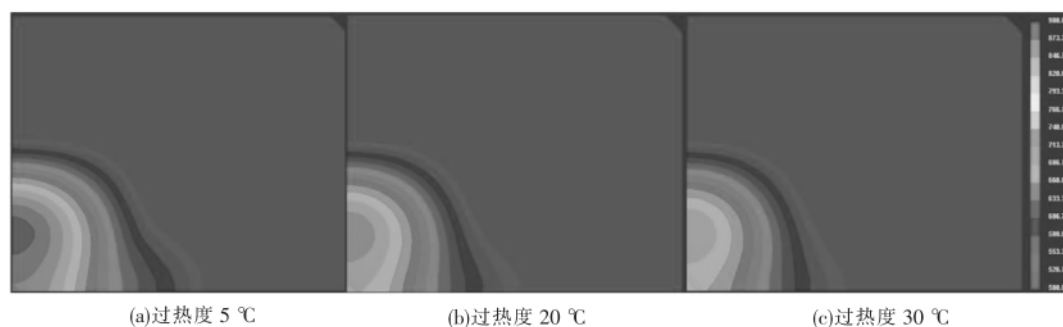


图 7 过热度与局部凝固时间 t_f 的关系

Fig.7 Relationship between superheat degree and local solidification time t_f

研究^[13]指出,随着冷却速度的增加,局部凝固时间 t_f 减小,二次枝晶臂间距 λ_{2F} 降低。由此可知,高过热度浇铸,铸坯心部钢液局部凝固时间短,凝固

速度快,二次枝晶臂间距较小,均质性较好。局部凝固时间与二次枝晶臂间距的理论模型数学表达式^[13-15]如表 1 所示。

表1 二次枝晶臂间距理论模型的数学表达式
Table 1 Mathematic expressions of three theoretic models

理论模型	二次臂间距与凝固时间的关系
Furer-Wunderlin 模型	$\lambda_{2F} = 24.14 t_f^{1/3}$
Kirkwood 模型	$\lambda_{2F} = 22.81 t_f^{1/3}$
Mortensen 模型	$\lambda_{2F} = 20.33 t_f^{1/3}$

基于上述分析,关于电磁搅拌与钢液过热度交互作用下铸坯C、Mn元素偏析度演变控制效果的差异,笔者认为:这主要由于低温钢液粘度较高,凝固前沿富集溶质在电磁搅拌作用下产生强制对流扩散,但高粘度钢液快速耗散钢液流动能,溶质扩散驱动力快速降低,加之低温钢液凝固速度较快,高溶质浓度钢液被快速捕捉,故表现出明显的负正负偏析交替。高温浇铸条件下,通过前阶段凝固传热,后阶段钢液温度降低而表现出与低温钢液浇铸初期类似的差异。

因此,钢液低温状态下浇铸并进行电磁搅拌对均质性控制不利,一方面钢液温度低粘度高,弱搅拌无法有效驱动钢液促进对流传质;另一方面,若增加搅拌强度则富集溶质的钢液流失去搅拌作用后扩散驱动力快速耗尽,加之低温钢液凝固前沿推进较快,综合导致搅拌直接作用带及后续作用延续区负正偏析交替明显,区域跨度小,溶质浓度梯度大,均质性差。反之,在高过热度条件下浇铸,铸坯强制冷却增

大温度梯度,促进致密柱状晶生长,当凝固组织由柱状晶向混晶过渡结束并准备向等轴晶转变时,对钢液进行电磁搅拌,以实现凝固前沿富集溶质对流扩散的同时促进晶核向中心区域转移,随继进行强制冷却,以实现钢液快速凝固,达到抑制等轴晶晶杆粗化改善晶间弥散偏析的目的。

3 结论

1) 过热度为5℃浇铸条件下铸坯中心缩孔严重,V型偏析严重;过热度30℃浇铸条件下铸坯等轴晶晶粒细小,过热度为5℃浇铸条件下铸坯柱状晶不发达,等轴晶比例极高。

2) 特定工艺条件下,铸坯C、Mn元素偏析曲线演变规律一致,浇铸过热度及组合式电磁搅拌交互作用对C、Mn元素偏析度演变的影响一致。

3) 电磁搅拌对低过热度钢液偏析演变的影响作用较高过热度钢液更显著,搅拌直接作用带及后续作用延续区的负正偏析交替更明显,溶质浓度变化梯度更大,均质性更差。

4) 采用高过热度浇铸,同时进行强冷却并配合适当强度的二冷电磁搅拌,对促进柱状晶生长,细化等轴晶晶粒有利,对提高大方坯重轨钢铸坯均质性及致密性有利。

参考文献

- [1] Zeng Jie, Chen Weiqing. Formation mechanism of center negative segregation in continuous casting of high carbon rectangular billet with soft reduction [J]. Journal of Iron and Steel Research, 2016, 28(3): 51-55.
(曾杰, 陈伟庆. 高碳钢矩形坯轻压下中心负偏析形成机理 [J]. 钢铁研究学报, 2016, 28(3): 51-55.)
- [2] Zhang Yuhai. Effect of CC process on carbon segregation [C] // Symposium of Steelmaking Branch of China Metal Society. China Metal Society, 2013.
(张玉海. 连铸工艺对铸坯碳偏析的影响 [C] // 中国金属学会炼钢分会年会论文集. 中国金属学会, 2013.)
- [3] Xu Weiyang, Cao Zhigang, Yan Huicheng, et al. Macro segregation in cast bloom of gear steel and its formation mechanism [J]. Steelmaking, 2011, 27(5): 63-67.
(许伟阳, 曹志刚, 颜慧成, 等. 齿轮钢大方坯宏观碳偏析及形成机制 [J]. 炼钢, 2011, 27(5): 63-67.)
- [4] Li Guozhong, Chen Feng, Chen Weiqing, et al. Effect of mould electromagnetic stirring on carbon segregation of medium carbon continuous casting bloom [J]. Steelmaking, 2008(1): 40-43.
(李国忠, 陈峰, 陈伟庆, 等. M-EMS 对中碳钢连铸方坯碳偏析的影响 [J]. 炼钢, 2008(1): 40-43.)
- [5] Feng Jun, Chen Weiqing. Effect of high secondary cooling intensity on solidification structure and center carbon segregation of high carbon steel billet [J]. Special Steel, 2006(4): 42-44.
(冯军, 陈伟庆. 高强度二冷对高碳钢小方坯凝固组织和中心碳偏析的影响 [J]. 特殊钢, 2006(4): 42-44.)
- [6] Limoges J, Beitelman L, Bai Jing. The effect of secondary cooling intensity and mole electromagnetic stirring on carbon segregation and solidification structure of high carbon steel [J]. Tianjin Metallurgy, 2002(4): 40-45.

- (里摩吉斯 J, 贝特曼 L, 白静. 二次冷却和结晶器电磁搅拌对高碳钢碳偏析及其凝固结构的影响 [J]. 天津冶金, 2002(4): 40-45.)
- [7] Luo Xuechao, Wang Wanlin. Effect of overheating and oxygen partial pressure on undercooling degree of liquid steel in contact with Al_2O_3 substrate [J]. Metal Materials and Metallurgy Engineering, 2015, 43(3): 24-26, 31.
- (罗薛超, 王万林. 过热度、氧分压对钢液与氧化铝之间过冷度的影响 [J]. 金属材料与冶金工程, 2015, 43(3): 24-26, 31.)
- [8] Yang Wu, Qiu Shengtao, Tao Hongbiao, et al. Effect of degreasing superheat temperature on solidification structure of billet [J]. Iron and Steel, 2010, 45(2): 45-48.
- (杨武, 仇圣桃, 陶红标, 等. 降低过热度对方坯凝固组织的影响 [J]. 钢铁, 2010, 45(2): 45-48.)
- [9] Yi Bo. Control superheat of molten steel and promote quality and output of continuously cast slab [J]. China Metallurgy, 2008(10): 43-45.
- (依波. 控制钢液过热度提高连铸坯质量与产量 [J]. 中国冶金, 2008(10): 43-45.)
- [10] Lu Lu, Lu Kaiyi. Influence of controlling molten steel superheat on technology of continuous casting and quality of billet [J]. Special Steel, 2008(5): 50-51.
- (鲁路, 鲁开崴. 钢液过热度控制对连铸工艺和铸坯质量的影响 [J]. 特殊钢, 2008(5): 50-51.)
- [11] Wang Jinping, Jiang Xudong. Control for degree of superheat of continuous casting liquid steel for high carbon steel [J]. Liugang Scientific, 2007(4): 4-7.
- (王金平, 蒋旭冬. 高碳钢连铸钢液过热度的控制 [J]. 柳钢科技, 2007(4): 4-7.)
- [12] Li Chenxi, Guo Taiming, Li Rongde, et al. Research on secondary dendrite arm spacing [J]. Foundry, 2004(12): 1012.
- (李晨希, 郭太明, 李荣德, 等. 二次枝晶臂间距的研究 [J]. 铸造, 2004(12): 1012.)
- [13] Feurer U, Wunderlin R. Metal solidification [M]. Stuttgart: DGM Fachber, 1977.
- [14] Kirkwood D H. Three-dimensional growth morphologies in diffusion-controlled channel growth [J]. Phys Rev E Stat Nonlin Soft Matter Phys, 1997, 55(6): 7789-7792.
- [15] Mortensen A. Secondary Arm Spacing [M]. New York: McGraw-Hill Inc., 1991.

编辑 张继东

“攀西第一丝”走出裂谷闯市场

4月12日,位于攀宝钛金属深加工产业园的驰辉钛锆金属材料有限公司生产交付攀西地区首张钛丝订单,这标志着“攀西第一丝”正式进入全国钛丝市场,“攀枝花造”钛材产品向钛丝“空白区”迈出了关键一步。

近年来,攀枝花东区着力建设“钒钛战略资源创新开发核心区”,在攀枝花创新开发产业园区内规划建设攀宝钛金属深加工产业园,重点用于承接钛材深加工产业项目。2020年4月1日,占地面积约2 000 m²的驰辉钛锆公司开始组织生产,仅用4d时间,就将钛丝冷拔、钛丝热拔、超细水拉丝等生产线安装调试成功,于4月5日正式投产,产出的首批钛丝产品将用于国内化工及民用领域。

目前,驰辉钛锆公司正在赶制富士康的钛丝订单。下一步,该公司将新上一批拥有自主知识产权的超细水拉丝生产线,逐渐替换钛丝冷拔生产线,预计年产值将突破3 000万元。

(摘自 <http://www.panzhihua.gov.cn/zwgk/gzdt/bdyw/1567251.shtml>)