

不同连铸工艺生产电工钢的工艺技术比较

Technical Comparison on Production of Electrical Steels
with Different Continuous Casting Process

吴开明

(武汉科技大学 冶金工业过程系统科学湖北省重点实验室
钢铁新材料与焊接技术研究所, 武汉 430081)

WU Kai ming

(Institute of Advanced Steels and Welding Technology, Hubei Province
Key Laboratory of Systems Science in Metallurgical Process, Wuhan
University of Science and Technology, Wuhan 430081, China)

摘要: 结合常规厚板坯工艺、中等厚度板坯工艺和薄板坯工艺生产电工钢的工艺技术特点、板坯铸态组织、析出物的分布和大小、铸坯表面质量等方面进行了工艺技术比较, 为电工钢的生产工艺选择和铸坯质量控制提供技术参考。

关键词: 薄板坯工艺; 厚板坯工艺; 电工钢; 工艺技术比较

中图分类号: TG111; TG142 文献标识码: A 文章编号: 1001-4381(2010)09-0025-04

Abstract: For the production of electrical steels with thin slab, medium thin slab and conventional continuous casting process, technical comparisons were made on their technological aspects such as slab cast microstructures, distribution and size of precipitates, slab surface quality, which can provide technical considerations in choosing production route and slab quality control for electrical steels.

Key words: thin slab process; thick slab process; electrical steel; technical comparison

电工钢, 包括取向电工钢和无取向电工钢, 是制造电机、变压器和镇流器铁芯以及各种电器元件用以节能的最重要的金属功能材料。据统计, 一个国家的60% 以上的电量都是由这些电工钢制造的电机、变压器和电器消耗掉的。近年来我国的发电量以较大的幅度增长, 特别是随着三峡水电工程的投入运行和长江上游大型水力发电系统以及其他大型核电、火电发电系统的建设, 我国的发电量将大幅度增加, 因此必将带动电工钢的强劲需求。随着国民经济的健康快速发展, 国内电能以及电器的消费量不断增加。另外, 我国各类电器的出口量也逐年大幅度增加。因此, 冷轧电工钢的生产和消费在我国还有较大的发展空间。

冷轧电工钢在国内和国际上主要是采用常规厚板坯工艺生产, 如国内最早生产冷轧电工钢的武钢公司和在国际冷轧电工钢方面享有盛名的新日铁公司。随着冶金技术的进步, 近年来由于成本和工艺优势, 薄板坯连铸连轧工艺获得了飞速发展。到目前为止, 薄板坯连铸连轧工艺几乎可以生产常规厚板坯工艺的所有品种。比如, 德国的蒂森公司和意大利的 Terni 公司已经利用薄板坯连铸连轧技术商业生产电工钢和不锈钢等高难品种^[1], 美国 Armco 公司的中等厚度铸坯

的连铸连轧工艺生产少量电工钢^[2]。本工作主要就三种工艺流程(常规厚板坯连铸连轧工艺、中等厚度薄板坯连铸连轧工艺、薄板坯连铸连轧工艺) 生产电工钢(包括低碳低硅电工钢、无取向硅钢和取向硅钢) 的工艺技术特点、板坯铸态组织、析出物的分布和大小、板坯表面质量、成材率以及生产操作等方面及其对电工钢铸坯产量和质量的影响进行综合分析和技术比较。

1 三种工艺的冷却制度对氧化物和硫化物析出的影响

对于薄板坯连铸工艺和中等厚度铸坯连铸工艺, 冷却强度大, 冷却速率快。在快速凝固过程中析出的氧化物多且细小。后滕裕规等^[3]的实验研究表明, 当快速凝固时的冷却速率为 100K/s 时, 氧化物以 0.35~0.75 μm 的粒径为主。北京科技大学的周德光等^[4]和柳得鲁等对珠江钢厂的紧凑式热轧带钢生产(Compact Strip Production, CSP) 工艺中的 Q235 钢的氧化物和硫化物析出行为的研究表明, 铸坯中的氧化物主要为氧化铝和铝酸盐, 尺寸在 10 μm 以内, 大部分在 2~5 μm , 硫化物为 30~200nm 的细小析出物^[5]。

对于取向硅钢,析出的 MnS 和 AlN 等析出物应细小和均匀。对于无取向硅钢,在铸坯中尽量避免存在这样细小的夹杂物,必须采取相应的措施使这些夹杂物粗化。据日本西本昭彦的专利介绍^[6],铸坯采用直接热轧法,铸坯冷到 $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以上(铸坯内部温度为 $1100\sim 1150\text{ }^{\circ}\text{C}$),先经大于 10% 的压下率粗轧到 $30\sim 40\text{ mm}$ 的薄板坯,并在表面温度大于 $950\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时保持 30 s 后再进行精轧,目的就是使铸坯中的夹杂物粗化。

对于厚铸坯连铸工艺,冷却强度小,冷却速率慢,

厚铸坯的凝固冷却速率约为 10 K/s 。在慢速凝固过程中析出的氧化物数量少但粗大。黄宗泽等^[7]对宝钢二炼钢的低碳铝镇静钢中的夹杂物的研究表明,尺寸 $1\sim 10\text{ }\mu\text{m}^2$ 的夹杂物约占 60% , $10\sim 20\text{ }\mu\text{m}^2$ 的夹杂物约占 20% , $20\sim 50\text{ }\mu\text{m}^2$ 的夹杂物约占 20% (表 1)。对于厚铸坯连铸机,铸坯中夹杂物粗大,与薄板坯连铸工艺相比,对无取向硅钢的生产有利。但是对于取向硅钢,厚板坯中的夹杂物尺寸过大。为了使铸坯中的 MnS 和 AlN 溶解,需要采取高温加热工艺。

表 1 三种工艺铸坯中夹杂物的析出行为比较

Table 1 Comparison of precipitation behavior of inclusions for three different processes

Process	Cooling	Amount and size of inclusions
Thin slab continuous casting	Stronger and faster cooling	Al oxide inclusion is $2.5\sim 10\text{ }\mu\text{m}$, sulfide inclusion is $30\sim 200\text{ nm}$
Medium slab continuous casting	Strong and fast cooling	Between thin slab continuous casting and conventional continuous casting
Conventional continuous casting	Weak and slow cooling	$1\sim 10\text{ }\mu\text{m}^2$ sized inclusion amounts about 60% , and $10\sim 20\text{ }\mu\text{m}^2$ sized inclusion about 20% , $20\sim 50\text{ }\mu\text{m}^2$ sized inclusion 20%

2 三种工艺连铸坯的铸态和轧态组织及其对电工钢铸坯质量的影响

由于薄板坯和中等厚度板坯连铸连轧与传统厚板坯工艺在铸坯的冷却制度存在显著不同,连铸板坯的原始铸态组织与厚板坯工艺相比具有较大的差别^[8,9]。由于薄板坯连铸过程中冷却强度大以及带液芯压下,减少了粗大的一次枝晶并使二次枝晶破碎,从而得到形状较规则、晶粒尺寸较细小的铸态组织。文

献报道^[4],其一次枝晶宽度为 $0.25\sim 1.83\text{ mm}$,二次枝晶宽度为 $52\sim 180\text{ }\mu\text{m}$ ^[4],靠近铸坯表面层和中心层的差别很小^[8]。

对于厚板坯连铸工艺,由于冷却强度小,连铸板坯的原始铸态组织粗大,柱状晶发达,一次柱状晶可达几百微米至几毫米,二次枝晶为 $200\sim 500\text{ }\mu\text{m}$ ^[10]。同时,在柱状晶之间存在着显微偏析,中心等轴晶区偏析也较严重(表 2)。因此,在厚板坯连铸工艺中,铸态组织粗大和不均匀。厚板坯连铸带材的力学性能不如薄板

表 2 三种工艺的铸态与轧态组织比较

Table 2 Comparison of cast and hot-rolled microstructures and properties for three different processes

Process	Cast structure	Hot-rolled structure and property
Thin slab continuous casting	Width of the primary dendrite: $0.25\sim 1.83\text{ mm}$; width of the secondary dendrite: $52\sim 180\text{ }\mu\text{m}$; less segregation	Small grains and homogeneous microstructures, improved properties
Medium slab continuous casting	Between thin slab continuous casting and conventional continuous casting	Between thin slab continuous casting and conventional continuous casting
Conventional continuous casting	Width of the primary dendrite: a few hundred microns to several millimeters; width of the secondary dendrite: $200\sim 500\text{ }\mu\text{m}$; serious segregation	Not homogeneous microstructures and properties

坯连铸连轧带材的性能均匀稳定^[11]。

图 1(a) 为传统厚板坯工艺和薄板坯工艺生产的 3% (质量分数,下同) Si 取向硅钢的铸态组织^[12]。由图 1 可以看出,传统厚板坯工艺生产铸坯的铸态组织的柱状晶发达,等轴晶比例较小(约 30%);薄板坯连铸连轧工艺生产铸坯的铸态组织看不出明显的柱状晶,等轴晶比例较大(约 80%)。图 2(a) 为传统厚板坯工艺生产的 $1.45\%Si$ 无取向硅钢的铸态组织(过热度

$20\sim 30\text{ }^{\circ}\text{C}$),图 2(b) 为薄板坯连铸连轧工艺生产的 $1.40\%Si$ 的无取向硅钢的铸态组织^[12]。由图 2 可以看出,传统厚板坯工艺生产的无取向硅钢铸坯的等轴晶比例小,薄板坯连铸连轧工艺生产的无取向硅钢铸坯的等轴晶比例大。

图 3 为薄板坯和传统厚板坯铸坯中碳和硫的偏析对比^[12]。由图 3 可以看出,薄板坯比传统厚板坯铸坯的成分偏析小。由于上述这些变化,薄板坯连铸连轧

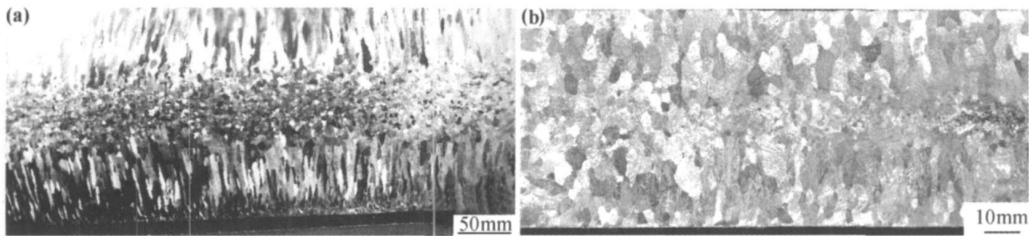


图1 传统厚板坯工艺和薄板坯连铸连轧工艺生产取向硅钢的铸态组织
(a) 传统工艺 210mm 厚铸坯;(b) 实验室模拟薄坯工艺 50mm 厚铸坯

Fig.1 Cast structures of oriented silicon steel produced by conventional continuous casting process and thin slab continuous casting
(a) 210mm-thick slab produced by conventional continuous casting process;
(b) 50mm-thick thin slab continuous casting produced in laboratory

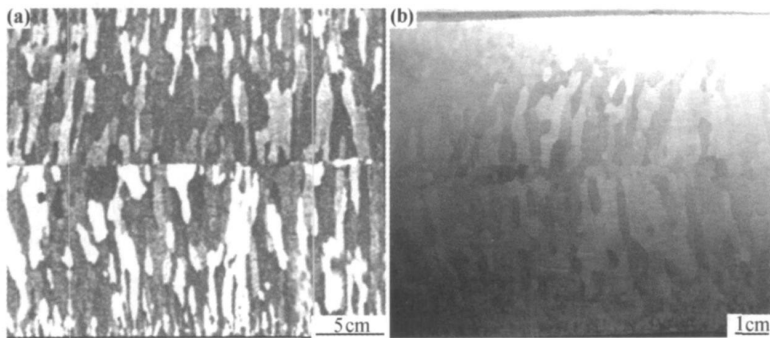


图2 传统厚板坯工艺和薄板坯连铸连轧工艺生产无取向电工钢的铸态组织
(a) 传统工艺生产的 Si 为 1.45% 的无取向电工钢的铸态组织;
(b) 薄板坯工艺生产的 Si 为 1.40% 的无取向电工钢的铸态组织

Fig.2 Cast structures of non-oriented silicon steel produced by conventional continuous casting process and thin slab continuous casting
(a) conventional continuous casting process (1.45%Si); (b) thin slab continuous casting (1.40%Si)

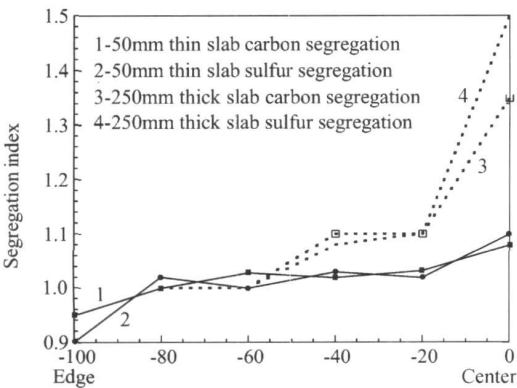


图3 薄板坯和厚板坯连铸坯中的成分偏析对比
Fig.3 Comparison of segregation between thin slab and conventional continuous casting

带材的力学性能较传统工艺带材的性能均匀稳定^[11], 屈服强度和伸长率有较大幅度的提高(对于 Q235 屈服强度提高约 1 倍)^[8]。图 4 为薄板坯连铸连轧产品与传统热轧产品各 20 个普碳钢带卷力学性能的比较^[12]。图 4 说明, 薄板坯连铸连轧带材的力学性能较

传统工艺带材的力学性能均匀。图 5 为传统工艺和薄板坯工艺生产的 1.2% Si 的无取向硅钢的热轧态组织^[12]。从图 5 可以看出, 对于传统工艺, 热轧板中心存在少量的带状组织; 对于薄板坯工艺, 热轧板组织均匀。

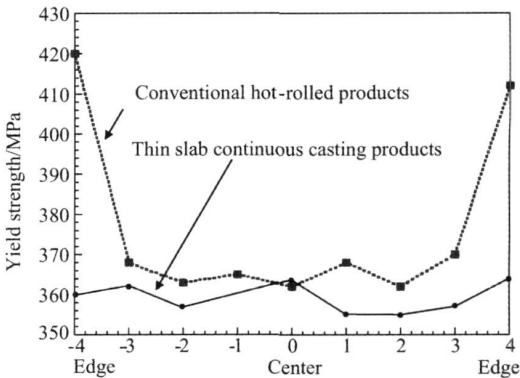


图4 薄板坯与传统热轧产品的力学性能比较
Fig.4 Comparison of mechanical properties between thin slab and conventional continuous casting products

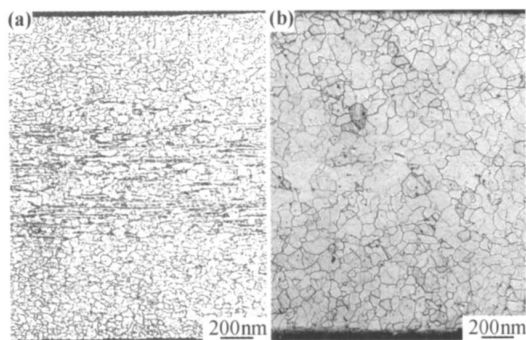


图 5 传统工艺(a)和薄板坯工艺(b)

生产的 1.2% Si 的无取向电工钢的热轧态组织

Fig. 5 Hot-rolled structures of 1.2% Si non-oriented electrical steel produced by different processes

(a) conventional continuous casting;

(b) thin slab continuous casting

从以上分析可以看出,由于薄板坯连铸工艺,铸态组织晶粒尺寸细小,一次枝晶宽度为 0.25~1.83mm,二次枝晶宽度为 52~180 μm ^[4],靠近铸坯表面层和中心层的差别很小^[8],偏析也少,热轧板组织均匀。对于厚板坯连铸工艺,铸态组织粗大,热轧板组织不均匀,导致厚板坯连铸带材的力学性能不如薄板坯连铸连轧带材的性能均匀稳定。

3 三种工艺的铸坯表面质量

对于薄板坯工艺,由于采用漏斗型结晶器和强制冷却制度以及高拉速生产铸坯,铸坯表面容易造成卷渣和夹渣等形成表面缺陷。铸坯温度较高,形成的二次铁皮比传统板坯工艺要稍厚,氧化铁皮压入可造成表面缺陷。总的来说,薄板坯铸坯表面质量不如厚板坯好。但是,经过对薄板坯工艺的不断完善与发展,表面质量不断提高,可达 03 板的要求(标准表面质量,较小暴露件)。由于表面质量的提高,薄板坯工艺生产的热轧板可替代部分冷轧板。德国的蒂森公司已经采用薄板坯商业生产硅钢,2002 年生产了 30 万吨无取向硅钢^[12]。意大利的 Terni 公司也已经采用薄板坯商业生产无取向和取向硅钢,在 2002 年的产量中,硅钢的产量占 12%,无取向和取向硅钢各占一半^[12]。

对于中等厚度规格的薄板坯,由于铸坯厚度增加以及采用直型铜板结晶器,保护渣的卷入及纵裂缺陷减少,表面质量提高。其次,中等厚度的铸坯在凝固过程中避免了强制变形,有利于减少内部和表面裂纹。由于上述特点,中等规格的薄板坯的表面质量几乎可以满足各种钢的要求。但到目前为止,只有美国的 Armco 公司(世界上第一家生产取向硅钢的企业)

1996 年生产了 0.1% 的硅钢(其余为 55.6% 的低碳钢和 35.1% 的不锈钢等)^[13]。

对于厚板坯工艺,由于采用直型结晶器和缓慢冷却制度以及低拉速生产硅钢,铸坯表面质量好。同时,铸坯通过在线或离线的表面清理,可以生产各种优质产品,如硅钢、汽车板、不锈钢等。

基于对上述三种工艺的分析,薄板坯连铸机已经能生产电工钢,其表面质量能满足电工钢的质量要求。除了半工艺电工钢外,取向电工钢和无取向电工钢都有涂层工艺,薄板坯的表面质量对成品的表面质量影响不明显。此外,由于薄板坯连铸连轧工艺生产的产品板形好,比常规厚板坯工艺生产的产品更能满足用户对产品表面平整度的要求。

4 结论

(1) 由于薄板坯连铸工艺冷却强度大、冷却速率快,铸态组织晶粒尺寸细小,一次枝晶宽度为 0.25~1.83mm,二次枝晶宽度为 52~180 μm ,靠近铸坯表面层和中心层的差别很小,偏析少。对于薄板坯连铸工艺,由于铸坯温度较高,形成的二次铁皮比传统板坯工艺要稍厚,氧化铁皮压入可造成表面缺陷,总的来说,薄板坯铸坯表面质量不如厚板坯好。

(2) 由于厚板坯连铸工艺冷却强度小、冷却速率慢,铸态组织粗大,热轧板组织不均匀,导致厚板坯连铸带材的力学性能不如薄板坯连铸连轧带材的性能均匀稳定。对于厚板坯工艺,由于采用直型结晶器和缓慢冷却制度以及低拉速生产硅钢,铸坯表面质量好。同时,铸坯通过在线或离线的表面清理,可以生产各种优质产品,如硅钢、汽车板、不锈钢等。

参考文献

- [1] BRASCUGLI G, MASCANZONI A, QUIX F, et al. First CSP plant for stainless steel at AST, Italy [A]. Proceedings of the Steel Conference "Stahl 2000-Talk about Steel" [C]. Dusseldorf, Germany: The German Iron and Steel Institute (VDEh), 2000.
- [2] 阿姆科. Conroll 连铸连轧厂的运行效果 [J]. 国际钢时代, 1998, 9: 8-12.
- [3] GOTO HIROKI, YAMAGUCHI KOICHI, OGIBAYASHI SHIGEKI, et al. Behavior of oxide precipitation during rapid solidification of steel [J]. Tetsu-to-Hagane, 1997, 83(12): 833-837.
- [4] 周德光, 傅杰, 王中丙, 等. CSP 薄板坯的铸态组织特征 [A]. 2002 年薄板坯连铸连轧国际研讨会 [C]. 广州: 中国金属学会, 2002.
- [5] 柳得鲁, 陈南京, 霍向东, 等. EAF-CSP 工艺低碳钢中的纳米级沉淀粒子研究 [A]. 2002 年薄板坯连铸连轧国际研讨会 [C]. 广州: 中国金属学会, 2002.

(下转第 32 页)

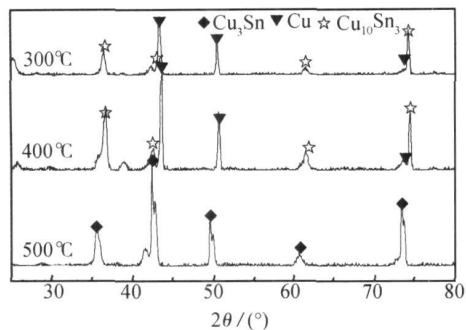


图5 铜含量为 58.05% 的 C 镀层不同温度下的 XRD 图谱

Fig. 5 XRD patterns of plating C with 58.05% Cu at different temperatures

3 结论

(1) 焦磷酸盐 Sn-Cu 合金镀液中焦磷酸铜和焦磷酸钾浓度对 Sn-Cu 合金镀层组成影响显著, 二者浓度提高, 合金镀层中铜含量显著增加。当镀液中焦磷酸铜浓度从 $10\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 增加到 $30\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$, 焦磷酸钾由 $110\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 增加至 $161\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, 镀层中铜含量由 20.18% 提高到 58.05%。

(2) 实验范围内, 合金镀层镀态结构受电化学过程控制, 与镀层铜含量无关, 主要物相为 Cu_6Sn_5 。

(3) 不同组成的 Sn-Cu 合金镀层在 300, 400, 500 $^{\circ}\text{C}$ 不同温度下热处理 1h 后, 均能发生相变, 相对于镀态, 析出电子化合物中铜含量趋于增加。温度变化对铜含量为 20.18% 和 58.05% 的镀层影响较小; 铜含量为 31.01% 的合金镀层, 温度升高, 其组织结构向着铜含量降低的物相结构转变, 有新相生成。

参考文献

[1] 任建国, 何向明, 姜长印, 等. 锂离子电池中纳米 Cu-Sn 合金负极

材料的制备与性能研究[J]. 金属学报, 2006, 42(7): 727-732.

- [2] BAZIN L, MITRA S, TABERNA P L, et al. High rate capability pure Sn-based nano-architected electrode assembly for rechargeable lithium batteries[J]. Power Sources, 2009, 1889(2): 578-582.
- [3] HUANG Ling, ZHENG Xiao-mei, WU Yun-shi, et al. Electrodeposition and lithium storage performance of novel three-dimensional porous Fe-Sb-P amorphous alloy electrode[J]. Electrochemistry Communications, 2009, 11(3): 585-588.
- [4] KE Fei-sheng, HUANG Ling, JIANG Hong-hong, et al. Fabrication and properties of three-dimensional macroporous Sn-Ni alloy electrodes of preferential (110) orientation for lithium ion batteries[J]. Electrochemistry Communications, 2007, 9(2): 228-232.
- [5] 赵海鹏, 何向明, 姜长印, 等. 锂离子电池锡基合金体系负极研究[J]. 化学进展, 2006, 18(12): 1710-1718.
- [6] 关云山, 张爱华, 李晓昆, 等. 锂离子二次电池合金负极材料的研究进展[J]. 化学世界, 2007, (11): 689-693.
- [7] JIANG Tao, ZHANG Shi-chao, QIU Xin-ping, et al. Preparation and characterization of tin-based three-dimensional cellular anode for lithium ion battery[J]. Power Sources, 2007, 166(2): 503-508.
- [8] PU Wei-hua, HE Xiang-ming, REN Jian-guo, et al. Electrodeposition of Sn-Cu alloy for lithium batteries[J]. Electrochimica Acta, 2005, 50(20): 4140-4145.
- [9] 蒲薇华, 任建国, 万春荣, 等. 电沉积制备锂离子电池 Sn-Cu 合金负极及性能研究[J]. 无机材料学报, 2004, 19(1): 86-92.
- [10] 王祝堂, 田荣璋. 铜合金及其加工手册[M]. 长沙: 中南工业大学出版社, 2002. 23-31.

基金项目: 山东省自然科学基金资助项目(ZR2009FM021); 山东省高等学校科技计划项目(J09LD03)

收稿日期: 2010-01-29; 修订日期: 2010-06-29

作者简介: 冯立明(1965—), 男, 硕士, 副教授, 主要从事材料表面处理及新能源材料领域教学与研究. 联系地址: 济南市临港开发区凤鸣路山东建筑大学材料学院(250101), E-mail: flm@sdjzu.edu.cn

(上接第 28 页)

- [6] 西本昭彦, 细谷佳弘, 占部俊明. 无方向性电磁钢板的制造方法[P]. 日本专利: 平 3-260017, 1991-11-20.
- [7] 黄宗泽, 唐海波, 郑建忠. 镀锌板用低碳铝镇静钢钙处理的实验研究[R]. 上海: 宝钢技术中心, 2002.
- [8] 康永林, 柳得楷, 傅杰, 等. 薄板坯连铸连轧 CSP 生产低碳钢的组织特征[J]. 钢铁, 2001, 36(6): 40-43.
- [9] 于浩, 康永林, 王克鲁, 等. CSP 低碳钢薄板连铸坯的连续冷却转变及显微组织细化[J]. 钢铁研究学报, 2002, 14(1): 42-46.
- [10] 刘中柱. 冷轧硅钢中非金属夹杂物及第二相粒子行为研究[D]. 北京: 北京科技大学, 2001.
- [11] 黄刚, 吴开明, 焦国华, 等. 薄板坯连铸连轧低碳微合金高强度钢的力学性能与组织控制[J]. 世界钢铁, 2009, 9(2): 37-39.

[12] 吴开明. 武汉科技大学研究报告[R]. 武汉: 武汉科技大学, 2008.

[13] 谢泰丰, 梁永林. 不同流程连铸连轧工艺的综合经济比较与选择[J]. 轧钢, 2001, 2(18): 25-27.

基金项目: 教育部新世纪优秀人才支持计划(NCET-05-0680); 湖北省自然科学基金计划青年杰出人才基金项目(2006ABB037)

收稿日期: 2010-01-31; 修订日期: 2010-06-02

作者简介: 吴开明(1966—), 男, 教授, 博士, 博士生导师, 主要从事钢铁新材料与焊接技术研究. 联系地址: 湖北省武汉市青山区和平大道 947 号武汉科技大学 8# 信箱(430081), E-mail: wukaiming@wust.edu.cn, wukaiming2000@yahoo.com