

电磁搅拌对 BFe10-1-1 白铜管坯的影响

李新涛^{1,2}, 郭照相¹, 赵祥伟¹, 李廷举²

(1. 高新张铜股份有限公司 技术中心, 江苏 张家港 215600, E-mail: xtleee63@sina.com;

2. 大连理工大学 铸造中心, 辽宁 大连 116024)

摘要: 采用试验的方法研究了在水平连铸过程中施加工频旋转电磁场对 BFe10-1-1 白铜管坯表面质量、凝固组织和力学性能的影响, 并考察了电磁搅拌对管坯室温拉伸性能的影响。结果表明, 采用水平电磁连铸短流程工艺能够制备出高质量的白铜管坯, 电磁搅拌能够避免管坯表面热节瘤等缺陷的形成, 同时促使粗大柱状晶发生细化, 并使溶质元素宏观偏析得到了抑制; 电磁搅拌能够提高管坯的抗拉强度和塑性, 当线圈电流为 100 A 时管坯抗拉强度较普通连铸坯提高了 9%, 而延伸率则提高了 55%。

关键词: 电磁搅拌; 水平连铸; BFe10-1-1 合金; 空心管坯

中图分类号: TG249.7 **文献标识码:** A **文章编号:** 1005-0299(2009)04-0504-04

Effect of electromagnetic stirring on tube billets of BFe10-1-1 alloy

LI Xin-tao^{1,2}, GUO Zhao-xiang¹, ZHAO Xiang-wei¹, LI Ting-ju²

(1. Gaoxin Zhangtong Co. Ltd, Technology Center, Zhangjiagang 215600, China, E-mail: xtleee63@sina.com; 2. Dalian University of Science and Technology, Research Center of Foundry Engineering, Dalian 116024, China)

Abstract: Effects of electromagnetic stirring with commercial frequency on the surface quality, microstructures and tensile properties of BFe10-1-1 tube billets during the horizontal continuous casting were studied by experiment. Results indicate that cupronickel tube billets with high quality can be obtained by the shortened processing technique. Electromagnetic stirring can eliminate surface defects such as heat-burl. After conducting the electromagnetic stirring, coarse columnar grains are refined and solution elements distribute more homogeneously over the cross section. In addition, effects of electromagnetic stirring on the tensile properties of tube billets were investigated. It can be concluded that both tensile strength and ductility of the billets are enhanced with the application of electromagnetic stirring. When the input current is 100 A, the tensile strength and elongation are increased by 9% and 55%, respectively.

Key words: electromagnetic stirring; horizontal continuous casting; BFe10-1-1 alloy; tube billet

BFe10-1-1 合金是以 Ni 为主要元素的白铜合金, 具有优良的导热性能和耐海水冲击腐蚀性能, 因此, 作为换热器冷凝管被广泛应用于船舶、电站和海水淡化等行业^[1,2]。目前, 白铜管的生产普遍采用半连续铸造实心锭, 经挤压穿孔成为空心管坯后轧制、拉拔加工而成。由于 BFe10-1-1 合金强度高, 变形抗力大, 增加了挤压难度,

致使管材制备过程中能耗很大, 同时金属利用率很低。与传统生产方式相比, 采用水平连铸直接制备空心管坯的技术在提高金属利用率、简化工序、节能降耗等方面都具有显著优势, 日益受到生产企业的关注^[3]。目前, 空心白铜管坯水平连铸技术的研究在我国处于起步阶段, 有些关键技术尚未掌握, 同时由于影响空心管坯水平连铸工艺的因素较多, 采用该技术制备的管坯存在表面粗糙、凝固组织分布不均匀、力学性能差等缺陷, 严重制约着管坯的质量, 为后续加工带来弊端。因此, 深入研究空心 BFe10-1-1 白铜管坯水平连铸技术, 对改善管坯质量, 提高金属利用率以及降低生

收稿日期: 2007-02-05.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50474055); 江苏省博士后科研资助计划项目(0602044B).

作者简介: 李新涛(1976-), 男, 博士后;

李廷举(1958-), 男, 教授, 博士生导师.

产成本等具有重要意义。

随着磁流体力学在冶金工业中应用的不断深入,在连铸过程中通过施加电磁场来改善铸坯质量的电磁连铸技术得到了很大的发展.其中,电磁搅拌(electromagnetic stirring,简称 EMS)技术因能够显著改善连铸坯的质量而备受重视,目前已成为最重要的连铸相关技术之一.电磁搅拌的主要方式有结晶器搅拌(M-EMS)、二冷区搅拌(S-EMS)和凝固末端搅拌(F-EMS).此外,按照磁场的移动形态又可分为旋转形搅拌和线形搅拌.旋转电磁搅拌的工作原理与三相异步电动机相似.目前,旋转电磁搅拌在钢坯连铸中有着广泛的应用,搅拌器的结构也在向组合式方向发展^[4,5],但迄今尚未见在白铜合金连铸过程中施加旋转电磁搅拌的报道.本文实验研究了在结晶器内进行旋转电磁搅拌对水平连铸空心 BFe10-1-1 管坯表面质量、凝固组织及力学性能的影响,并对其作用机理进行了探讨.

1 实验

空心管坯水平电磁连铸装置主要包括工频保温炉,结晶器、电磁系统和牵引系统.结晶器由带有芯子的石墨模具、铜套和冷却水套组成,为避免凝固时管坯收缩包覆芯子,增大摩擦阻力,芯子设计成一定的倒锥度.管坯规格为 $\Phi 90 \text{ mm} \times 14 \text{ mm}$.搅拌磁场由置于凝固前沿的感应线圈产生.用转子流量计控制结晶器冷却强度.合金经中频熔化炉熔化后在保温炉内保温,达到浇注温度时启铸,金属液经直浇道进入结晶器,在水冷作用下凝固成型,管坯出结晶器后直接喷水冷却.采用拉-停-反推-停的牵引模式,拉坯速度为 250 mm/min . BFe10-1-1 合金的化学成分见表 1.

表 1 BFe10-1-1 合金化学成分

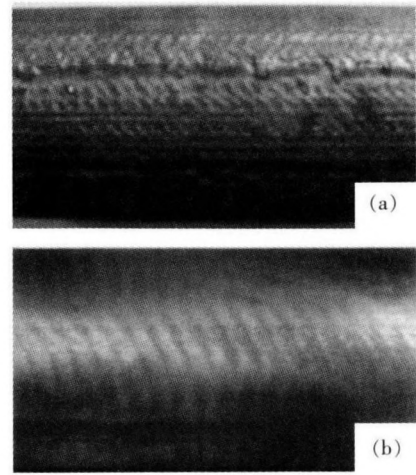
Ni	Fe	Mn	Cu
9.0~11.0	1.0~1.5	0.5~1.0	余量

2 结果与讨论

图 1 示出了有无施加电磁搅拌条件下空心管坯的表面照片.

在连铸过程中金属液经 4 个水平布于模具端部的直浇道以一定的速度进入结晶器.由于液流的动量冲击造成液穴内熔体波动,影响了初始坯壳的稳定生长,因此,在管坯表面形成了波痕带.此外,在金属液的冲击下液穴内与浇道相对应的位置处形成 4 个热节.由于结晶器内的熔融金属只存在自然对流,使热节处的热量大量聚集.当冷却强度低时热节

处的坯壳易被重熔,从而形成线状的热节瘤,如图 1(a)所示.理论上降低金属液的浇注温度可以抑制或消除热节瘤,但是降低浇注温度容易导致直浇道凝结而影响连铸正常进行.



(a) $I=0 \text{ A}$; (b) $I=100 \text{ A}$

图 1 空心管坯表面照片

连铸过程中在凝固前沿施加旋转电磁场后,根据麦克斯韦电磁场理论,结晶器内的金属熔体中产生感应电流(J),感应电流与旋转磁场相互作用,产生作用于熔体上的洛仑兹力.由于任一熔体微元处的磁感应强度可分解为径向分量(B_r)和切向分量(B_θ),则熔体微元受到两个洛仑兹分力,即离心电磁力(f_r)和切向的电磁力(f_θ),其中, $f_\theta = J \times B_r$, $f_r = J \times B_\theta$.金属熔体在切向电磁力 f_θ 的作用下旋转着进入结晶器,减少了射流深度,削弱浇注液流对液穴内熔体波动的影响,因此,避免了波痕带的产生^[6-8].同时强迫对流也减小了热节处的热量积聚,从而避免了热节瘤的形成,如图 1(b)所示.

管坯壁厚均匀程度对后续铣面、轧制工序有着重要影响.本文测量了电磁搅拌对管坯壁厚的影响,结果见图 2.其中与 0° 相对应的位置为管坯底部,与 180° 相对应的位置为管坯顶部.由图 2 可以看出:未施加电磁场时管坯顶部较底部厚;而施加了电磁场后,一方面管坯平均壁厚略有增大,另一方面壁厚均匀性明显提高.

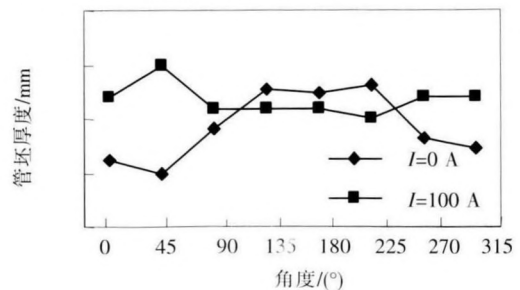
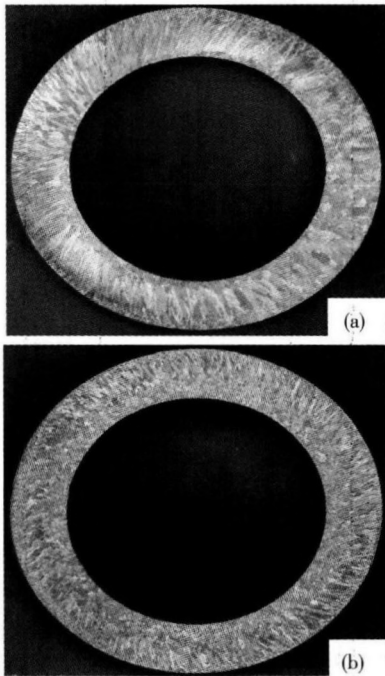


图 2 电磁搅拌对管坯壁厚均匀性的影响

水平连铸过程中,当初始坯壳形成后,在重力作用下底部与石墨模具直接接触,因此,导热性能良好.顶部由于凝固收缩,在坯壳与模具内壁之间形成气隙,大大增加了热阻,因此,与底部相比管坯顶部凝固滞后.由于芯子有锥度,所以形成的管坯顶部壁厚大于底部.施加电磁场后,在搅拌力 f_b 作用下液穴内熔体均匀性得到了提高,另一方面在离心电磁力 f_r 的作用下有利于减小坯壳顶部与模具之间的气隙,从而促使液穴内的金属液趋于同时凝固,进而使管坯壁厚均匀性得到了改善.

管坯凝固过程中除了受到电磁力的作用外,还受到电磁感应热的作用,感应加热功率可近似表示为 $P = I^2 R$,其中 R 为熔体电阻.在感应热的作用下坯壳初始凝固位置向外迁移,从而导致管坯厚度较未施加电磁场时增大.

图 3 给出了不同铸造条件下制备的空心管坯的宏观组织照片.未施加磁场时,管坯整个横截面上基本都是粗大的柱状晶,穿晶现象非常明显,而且晶粒分布不均匀,如图 3(a)所示.而施加了电磁场后,柱状晶得到了明显细化,穿晶现象得到消除,在管坯内侧出现了等轴晶层,而且晶粒分布均匀,如图 3(b)所示.



(a) $I = 0$ A, (b) $I = 100$ A

图 3 电磁搅拌对管坯凝固组织的影响

采用光谱仪考察了施加不同电流强度电磁搅拌对溶质元素在管坯径向分布的影响.为减小测量误差,管坯同一位置测量 5 次,然后取其平均值进行比较,结果见图 4,可以看出,连铸过程中进行电磁搅拌后 Ni、Fe 和 Mn 元素分布均匀性有所

提高,尤其是当电流为 100 A 时,溶质元素宏观偏析得到了明显的抑制.

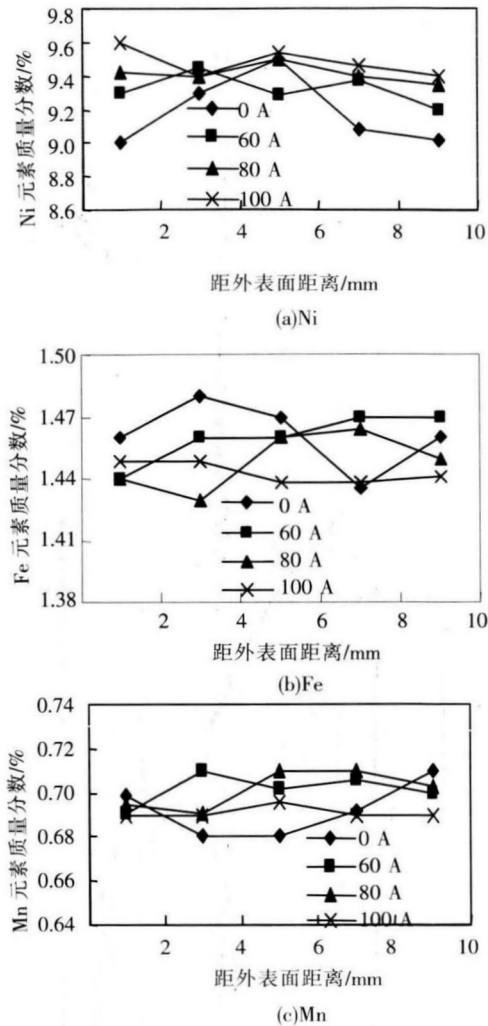


图 4 不同电流强度下溶质元素沿管坯径向的分布

水平连铸时熔体热量主要经结晶器壁沿径向导出.未施加电磁场时,熔体内部只存在自然对流,径向上存在很大的温度梯度,因此,形成了粗大柱状晶.在连铸过程施加电磁搅拌后,熔体在搅拌力的作用下强迫对流,使得结晶器内温度场更加均匀,促使凝固过程趋于同时凝固,从而抑制了粗大柱状晶的生长.同时强烈的对流有利于冲刷凝固前沿,将初生枝晶打碎并随液流进入未凝固的熔体中成为晶核,最终液穴内因大量晶核的存在而促使等轴晶形成.

此外,熔体的强迫对流有效地均匀了液穴内的含量场,减小了凝固前沿的含量梯度,使得各晶粒间成分近似,并且具有相对均匀的微区成分.在凝固后期随着等轴晶的形成,熔体产生晶间流动的阻力大大增加,抑制了熔体在两相区内的远程流动,因此,元素的宏观偏析得到了减小.

图 5 给出了电磁搅拌对水平连铸 BFe10-1 白铜管坯室温拉伸性能的影响,可以看出未

施加电磁场时管坯的抗拉强度为 255 MPa, 延伸率为 25%。施加电磁场后, 随着电流强度的增加, 合金的抗拉强度和延伸率均得到提高。当输入电流为 100 A 时抗拉强度较未施加电磁搅拌时提高了 9%, 而延伸率则提高 55%。

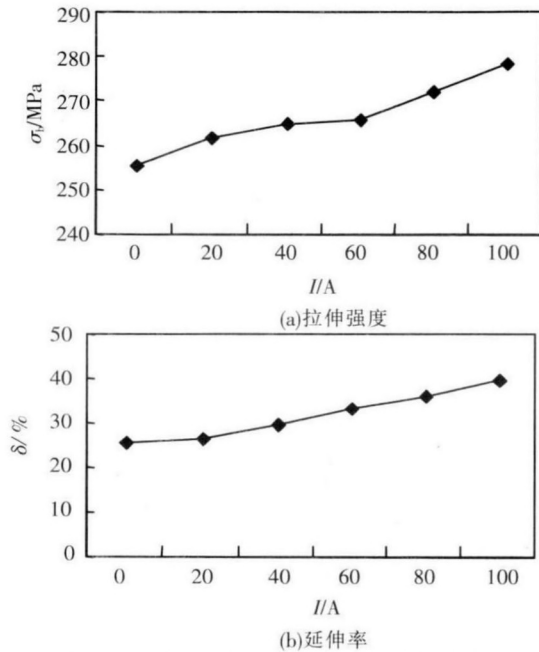


图5 电磁搅拌对管坯拉伸性能的影响

3 结 论

1) 在空心 BFe10-1-1 白铜管坯水平连铸过程中施加旋转磁场进行电磁搅拌, 能够削弱浇注液流对液穴内熔体波动的影响, 减小热节处的热量积聚, 有利于改善管坯的表面质量。

2) 施加电磁搅拌, 增强了液穴内熔体的流动, 改变了凝固前沿的温度分布和成分分布, 从而

抑制了粗大柱状晶的形成和溶质元素的宏观偏析。

3) 施加电磁搅拌有利于改善管坯的室温拉伸性能, 尤其是塑性的提高。

参考文献:

- [1] AULT J P, JR GEHRING G A. Statistical analysis of pitting corrosion in condenser tube [J]. ASTM Special Technical Publication, 1997, 3: 109 - 121.
- [2] 邓楚平, 黄伯云, 李卫, 等. 不同服役条件下冷凝器白铜管的腐蚀特性 [J]. 中国有色金属学报, 2005, 11 (11): 1692 - 1698.
- [3] AKIRA Ishizaka, MINORU Tawara, HIROSHI Kodama, et al. Production of billets for steel seamless tube by a horizontal continuous casting process [C] // Proceedings of the Sixth International Iron and Steel Congress. Nagoya: [S. n.] 1990. 676 - 683.
- [4] GELFGAT Yu M. Rotating magnetic fields as a means to control the hydrodynamics and heat/mass transfer in the processes of bulk single crystal growth [J]. J Cryst Growth, 1999, 19B(199): 165 - 169.
- [5] SPITZER K H. Multi-frequency electromagnetic stirring of liquid metals [J]. ISIJ Int, 1996, 36(5): 487 - 492.
- [6] YOKOYA S. Swirling effect in immersion nozzle on flow and heat transport in billet continuous casting Mold [J]. ISIJ International, 1998, 38(8): 827 - 833.
- [7] YOKOYA S. Swirling flow effect in immersion nozzle on flow in slab continuous casting mold [J]. ISIJ International, 2000, 40(6): 578 - 583.
- [8] YOKOYA S. Development of swirling flow generator in immersion nozzle [J]. ISIJ International, 2000, 40(6): 584 - 588.

(编辑 吕雪梅)

(上接第 503 页)

带直, 且与基体组织界限清晰, 剪切带周围没有塑性变形引起的纤维组织。

2) 基体和剪切带之间的过渡区晶粒被拉长, 晶粒长度尺寸 < 500 nm, 宽度 < 100 nm. 剪切带中心是由细小的等轴晶组成, 晶粒直径大约在 50 ~ 400 nm.

3) 剪切带内发生了以亚晶的机械转动以及随后由扩散和湮没为主要机制的动态再结晶。

参考文献:

- [1] XUE Q, MEYER M A, NESTERENKO V F. Self organization of shear bands in stainless steel [J]. Materials Science and Engineering, 2004, 384A, 35 - 46.
- [2] PARK S W, XIA Q, ZHOU M. Dynamic behavior of concrete at high strain rates and pressures: II. Numerical

simulation [J]. Int J Impact Engng, 2001, 25(9): 887 - 891.

- [3] 胡八一, 董庆东, 韩长生, 等. TC4 钛合金及 40Cr 钢破片中绝热剪切的 TEM 分析 [J]. 高压物理学报, 1996, 10(3): 37 - 43.
- [4] XUE Q, MEYERS M A, NESTERENKO V F. Self organization of shear bands in titanium and Ti - 6Al - 4V alloy [J]. Acta Mater, 2002, 50(3): 575.
- [5] WRIGHT T W. On the speed of an unconstrained shear band in a perfectly plastic material [J]. International journal of solids and structure, 2003, 40, 871 - 879.
- [6] BASSIM M N. Study of formation of adiabatic shear bands in steel [J]. Journal of materials processing Technology, 2001, 119: 234 - 312.

(编辑 吕雪梅)