

旋转电磁场对 BFe10-1-1 合金管坯组织及力学性能的影响

李新涛^{1,2}, 赵祥伟¹, 魏 笔¹, 陈凤宝¹, 阎志明², 李廷举²

(1. 高新张铜股份有限公司, 张家港 215600;

2. 大连理工大学 材料科学与工程学院, 大连 116024)

摘 要: 研究旋转电磁场对水平连铸空心 BFe10-1-1 合金管坯凝固组织和力学性能的影响, 并对其机理进行初步的探讨。结果表明: 在工频旋转电磁场的搅拌作用下, BFe10-1-1 合金管坯的凝固组织显著细化, 由粗大的柱状晶完全转化为均匀细小的等轴晶, 同时抑制了 Ni 元素的枝晶偏析; 施加电磁场后管坯的力学性能得到明显改善, 当励磁电流为 80 A 时, 管坯抗拉强度提高了 15.3%, 屈服强度提高了 10.9%, 伸长率提高了 58.6%。

关键词: BFe10-1-1 合金; 空心管坯; 旋转电磁场; 水平连铸

中图分类号: TG 249.7

文献标识码: A

Effect of rotating electromagnetic field on solidification structures and mechanical properties of tube billets of BFe10-1-1 alloy

LI Xin-tao^{1,2}, ZHAO Xiang-wei¹, WEI Bi¹, CHEN Feng-bao¹, YAN Zhi-ming², LI Ting-ju²

(1. Gaoxin Zhangtong Co. LTD., Zhangjiagang 215600, China;

2. School of Materials Science and Engineering,

Dalian University of Science and Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: The effects of rotating electromagnetic field on the solidification structure and mechanical properties of horizontal continuously cast tube billets of BFe10-1-1 alloy were investigated and theoretically interpreted. The results indicate that the conventional coarse columnar grains change to fine equiaxed ones with the application of commercial frequency electromagnetic field during horizontal continuous casting. Meanwhile, the segregation of Ni element is suppressed and distributes more uniformly over the cross section. After the electromagnetic treatment, the tensile strength of the billets are all improved, and when the input current is 80 A, the increase of tensile strength, elongation and hardness are 15.3%, 10.9% and 58.6%, respectively.

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

白铜是以 Ni 为主要元素的铜基合金, 具有良好的导热性能和耐冲击腐蚀性能, 因此作为冷凝管被广泛地应用于船舶、电站和海水淡化等行业^[1-3]。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、刨皮、拉拔、酸洗等 25 道复杂的工序。由于白铜合金强度高, 变形抗力大, 增加了挤压难度, 导致生产效

率和成品率都很低^[4]。与传统生产方式相比, 水平连铸技术在提高金属利用率、简化工序、降低能耗等方面都具有不可比拟的优势, 更能适应现代生产短流程、近终形以及节约能源的要求。因此, 利用水平连铸制备空心管坯的技术日益受到研究者和生产企业的关注^[5-8]。在我国目前空心白铜管坯水平连铸的研究尚处

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50474055)

收稿日期: 2006-11-29; 修订日期: 2007-03-22

通讯作者: 李新涛, 博士; 电话: 0512-58987096; E-mail: xtlee63@sina.com

于起步阶段。BFe10-1-1 是常用的白铜合金牌号之一, 文献[9]对其水平连铸工艺进行了初步的研究。但是采用该工艺制备的空心管坯存在晶粒粗大、分布不均的缺陷, 为后续轧制工序带来不利影响, 因此如何提高空心 BFe10-1-1 管坯的质量还需进一步研究。

磁流体力学(MHD)是研究导电流体在电磁场作用下运动规律的一门学科, 近年来在冶金工业中得到了广泛的应用^[10-16]。随着 MHD 的发展, 电磁场逐渐被应用于空心管坯水平连铸过程中。例如, Rodrigues^[6]在 $d\ 30\ \text{mm}\times 6\ \text{mm}$ 空心铜管坯水平连铸过程中施加工频交变电磁场, 使管坯的凝固组织得到了细化; 李丘林等^[17]研究了中频电磁场对空心铜管坯表面质量及凝固组织的影响。但是在白铜管坯连铸过程中施加电磁场的研究尚未见报道。为探讨 BFe10-1-1 合金管坯电磁连铸工艺, 本文作者研究旋转电磁场(REF)对水平连铸空心 BFe10-1-1 合金管坯凝固组织及力学性能的影响, 并对其作用机理进行初步探讨。

1 实验

BFe10-1-1 合金的实际成分为(质量分数): Ni 10.0%, Fe 1.0%, Mn 1.0%, 余量为 Cu。图 1 所示为主要实验装置的示意图。结晶器由石墨模具和水冷铜套组成, 石墨模具壁厚 16 mm, 型腔高度为 20 mm, 长度为 385 mm, 石墨芯子锥度为 1°。旋转磁场由置于石墨模具外侧的三相三极对感应线圈产生。用转子流量计控制结晶器冷却强度。实验时, 合金经中频熔化炉熔化后在保温炉内保温。达到浇注温度时启动拉坯机, 金属液经进液口进入石墨模具, 在水冷铜套作用下凝固成型, 管坯出结晶器后直接喷水冷却。主要铸造工艺参数如表 1 所列。

在管坯水平电磁连铸时, 电磁场要对熔体发生作

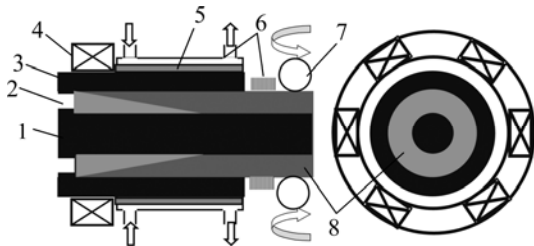


图 1 空心管坯水平电磁连铸装置示意图
Fig.1 Schematic views of experimental apparatus and side view showing three-phase coil: 1—Graphite core; 2—Inlet; 3—Mold; 4—Coil; 5—Copper out-jacket; 6—Cooling water; 7—Drawing machine; 8—Tube billet

表 1 实验条件

Table 1 Experimental conditions

Billet size	Pouring temperature/°C	Casting speed/(mm·s ⁻¹)	Cooling water flow/(m ³ ·h ⁻¹)
$d\ 83\ \text{mm}\times 21\ \text{mm}$	1 250	5.7	1.8

用, 必须克服石墨模具壁和凝固前沿初始坯壳对电磁场的屏蔽。在本实验中电磁场的激发源是以一定频率做正弦振荡的时谐电磁波, 其在介质中传播时磁感应强度 B 衰减规律如式 1 所示。

$$B = B_0 \exp(-r\sqrt{\pi f \mu \sigma}) \tag{1}$$

式中 r 为距管坯表面的距离; f 为电磁场频率; B_0 为管坯表面的磁感应强度。

依据式(1)分别对不同频率的电磁场在石墨-坯壳系统中的衰减情况进行了计算。表 2 所列为计算时采用的材料物性参数值。结果见图 2。

表 2 相关材料物性参数

Table 2 Physical properties of materials

Material	$\sigma/(\text{A}\cdot\text{V}^{-1}\cdot\text{m}^{-1})$	μ_r
Graphite(C)	7.04×10^4	1.0
BFe10-1-1 alloy	2×10^6	1.0

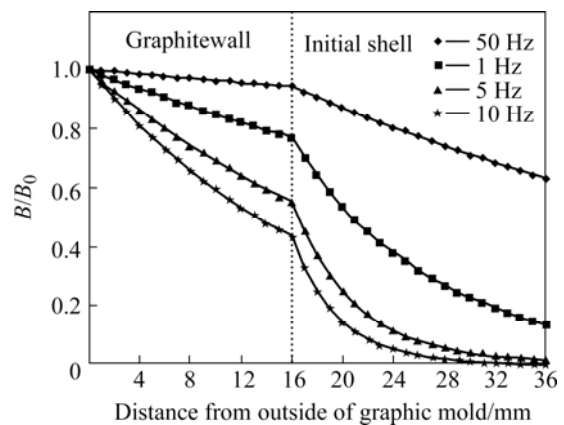


图 2 不同频率电磁场在石墨-坯壳中的衰减曲线
Fig.2 Attenuation curves of electromagnetic field with different frequency in graphite mold and initial shell

由图 2 可以看出, 如果施加 50 Hz 的工频电磁场, 虽然石墨模具壁对磁场有屏蔽作用, 但仍然有相当一部分磁场作用在金属熔体上, 在管坯内壁处磁感应强度还剩余 63.3%; 如果是中频电磁场, 即使当频率为 1 000 Hz 的电磁场渗透到管坯内 8 mm 处时磁感应强度为表面处的 37.6%, 在管坯内壁处磁感应强度仅剩

余 12.9%。因此,为尽可能增强电磁场对管坯凝固前沿金属液的作用,电磁场的频率选择 50 Hz。

2 结果与讨论

铸造过程结束后,分别从未施加及施加了电磁场的管坯上取试样,经切割、磨光、腐蚀后得到管坯的凝固组织。水平连铸时熔体热量主要由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,因此除了管坯外侧由于激冷作用产生少量的等轴晶外,整个横截面上基本都是粗大的柱状晶,而且分布不均匀,如图 3 所示。

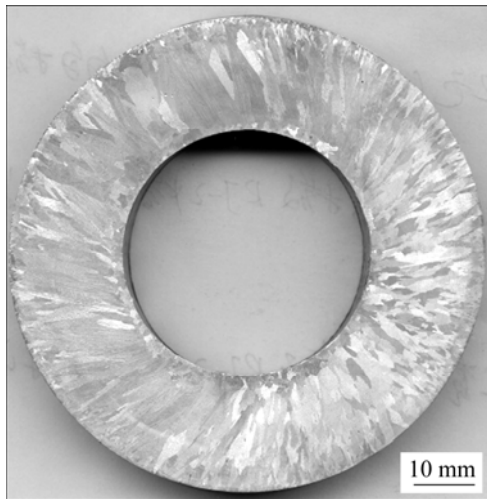


图 3 未施加电磁场时管坯宏观组织

Fig.3 Macrostructure of tube billets without application of REF

施加电磁场后,根据电磁感应定律,有:

$$\nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial \tau} \quad (2)$$

式中 E 为电场强度; B 为磁感应强度; τ 为时间,即变化的磁场产生电场。

在连铸过程中,金属液切割磁力线,产生感应电流,有:

$$E = \sigma J \quad (3)$$

式中 σ 为金属液的导电率; J 为感应电流密度。

感应电流与交变电磁场相互作用,产生 Lorentz 力:

$$F = J \times B \quad (4)$$

在 Lorentz 力作用下,金属熔体在周向上进行强迫对流,其方向与磁场旋转方向相同。这种强迫对流

一方面减小了熔体径向温度梯度,抑制粗大柱状晶的形成;另一方面有利于打碎枝晶,导致晶核数量的倍增,最终凝固区间因大量悬浮晶核的存在,从而形成了均匀细小的等轴晶,如图 4 所示。

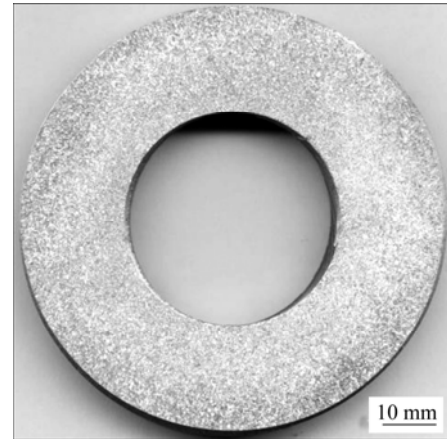


图 4 施加电磁场时管坯宏观组织

Fig.4 Macrostructure of tube billets with application of REF ($I=80$ A)

Ni 元素在白铜合金中主要起到固溶强化、提高合金耐蚀性的作用。采用电子探针考察了电磁场对 Ni 元素分布的影响,结果见图 5。Cu 与 Ni 在元素周期表中位置相近,原子半径差很小,且同为面心立方结构,故能彼此无限互溶,形成 α 固溶体。但由于 Ni 在 Cu 中的扩散速度很慢,因此 BFe10-1-1 合金凝固组织呈现典型的树枝状偏析,如图 5(a)所示。施加电磁场后,Ni 元素均匀地分布在横截面上,如图 5(b)所示。

Ni 元素的固溶程度对合金的力学性能及耐蚀性有着重要影响。固溶实质是溶质原子扩散的过程,根据 Arrhenius 公式,溶质扩散系数 D 为:

$$D = D_0 \exp(-Q/RT) \quad (5)$$

式中 D_0 为扩散常数; R 为气体常数; Q 为激活能; T 为绝对温度。则溶质扩散程度的估计参数 α 可以表示为

$$\alpha = D \frac{\tau}{l^2} \quad (6)$$

式中 τ 为扩散时间,即局部凝固时间; l 为扩散长度,可用半枝晶间距表示。

施加旋转电磁场后,由于细化了晶粒组织,减小了 l 值;所以 Ni 元素偏析得到了显著的抑制。

管坯的力学性能对后续轧制工序具有重要影响。考虑到水平连铸时重力对凝固组织的影响,分别从未施加磁场及施加磁场两种管坯的上、下和侧面取试样进行拉伸实验,取其平均值进行比较,结果见表 3。

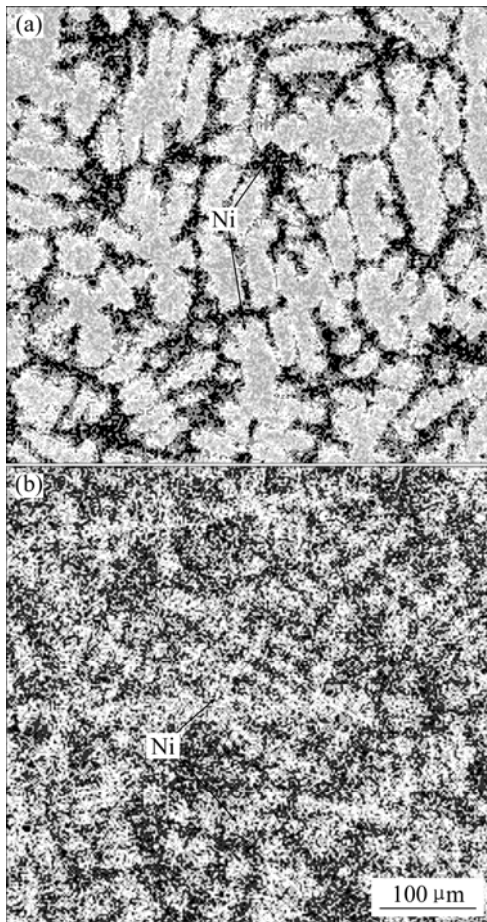


图 5 Ni 元素在 BFe10-1-1 合金中分布的 EPMA 分析
Fig.5 Distribution of Ni on cross-section of BFe10-1-1 alloy by EPMA analysis: (a) Without REF; (b) With REF

表 3 旋转电磁场对管坯力学性能的影响

Table 3 Effect of REF on mechanical properties of tube billets

Sample	Tensile strength, σ_b /MPa	Yield strength, σ_s /MPa	Elongation, δ /%
Without REF	254.3	114.0	21.5
With REF	293.1	126.4	34.1

由表 3 可以看出, 施加电磁场后, 随着凝固组织的改善, 管坯的力学性能明显提高, 尤其是伸长率提高了 58.6%。

图 6 所示为电磁场对拉伸试样断口形貌的影响。很显然, 未施加磁场的断口韧窝小而浅; 而施加电磁场后, 韧窝大而深。由于韧窝的大小和深浅取决于基体的塑性变形能力以及析出相的数量、分布, 所以断口形貌分析结果进一步证明施加电磁场能够改善凝固

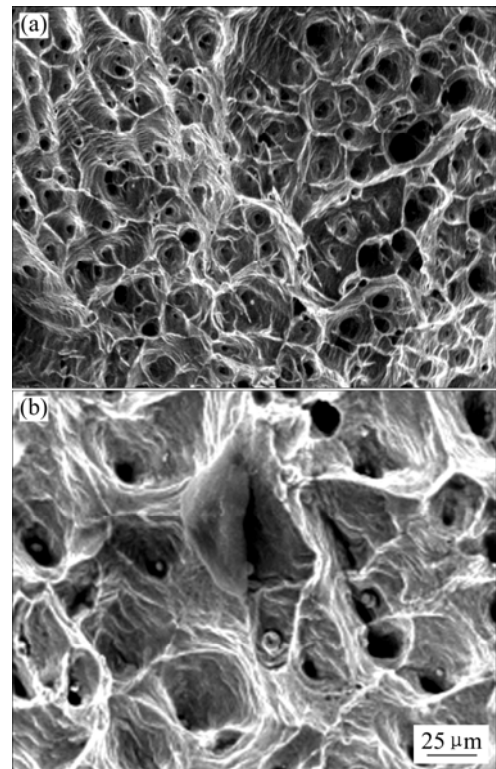


图 6 拉伸试样断口 SEM 形貌
Fig.6 SEM micrographs of fracture surface of tensile samples: (a) Without REF; (b) With REF

组织, 提高成分均匀性, 从而改善合金的力学性能。

3 结论

- 1) 在空心 BFe10-1-1 合金管坯水平连铸过程中施加旋转电磁场, 凝固组织由柱状晶完全转化为均匀细小的等轴晶, 同时 Ni 元素枝晶偏析得到了抑制。
- 2) 施加电磁场后, 管坯的抗拉强度、屈服强度及伸长率均得到明显提高, 其中伸长率提高约 58.6%。

REFERENCES

[1] Ault J P, Gehring G A Jr. 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.

DENG Chu-ping, HUANG Bai-yun, LI Wei, et al. Corrosion characteristics of white copper condenser tube under different serving conditions[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals,

- 2005, 11(11): 1692-1698.
- [3] 赵 锋, 余业球, 黎沃光. BFe30-1-1 白铜杆的热型连铸[J]. 广东工业大学学报, 2002, 19(1): 75-80.
ZHAO Feng, YU Ye-qiu, LI Wo-guang. Heated-mold continuous casting of BFe30-1-1 cupronickel rod[J]. Journal of Guangdong University of Technology, 2002, 19(1): 75-79.
- [4] 赵 锋, 余业球, 黎沃光. 白铜管热型连铸的温度场[J]. 铸造技术, 2005, 26(11): 1054-1057.
ZHAO Feng, YU Ye-qiu, LI Wo-guang. Temperature field in the heated mold continuous casting of cupronickel tubes[J]. Foundry Technology, 2005, 26(11): 1054-1057.
- [5] Ishizaka A, Tawara M, Kodama H, 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, 1990: 676-683.
- [6] Rodriguez J M. Continuous casting of copper tubes[J]. Giessereiforschung, 1994, 46(4): 122-124.
- [7] 王碧文. 中国铜管生产现状及发展趋势-兼论内螺纹铜管突破性进展[C]//中国有色金属加工工业协会. 中国国际精密铜管技术年会, 新乡: 中国科学院精密铜管工程研究中心, 2003: 7-23.
WANG Bi-wen. Present situation and development of copper tube industry in China-discussing the great progress on inner-grooved tube manufacture [C]//China Nonferrous Metals Fabrication Industry Association. China International Precision Copper Tube Technology Annual Symposium Anthology. Xinxiang: Precise Copper Tube Engineering Research Center of Chinese Academy of Sciences, 2003: 7-23.
- [8] 肖克建, 祁 威, 田福生. 铜管连铸连轧生产线的现状与发展[C]//中国有色金属加工工业协会. 中国国际精密铜管技术年会, 新乡: 中国科学院精密铜管工程研究中心, 2003: 230-236.
XIAO Ke-jian, QI WEI, TIAN FU-Sheng. Present situation and development of CCR production line of copper tubes[C]// China Nonferrous Metals Fabrication Industry Association. China International Precision Copper Tube Technology Annual Symposium Anthology. Xinxiang: Precise Copper Tube Engineering Research Center of Chinese Academy of Sciences, 2003: 230-236.
- [9] 李新涛, 李廷举, 张兴国, 等. 水平连铸 BFe10-1-1 白铜管组织及性能[C]//中国机械工程学会年会论文集, 大连: 机械工业出版社, 2004: 152.
LI Xin-tao, LI Ting-ju, ZHANG Xing-guo, et al. Macrostructure and properties of horizontal continuously cast BFe10-1-1 tubes[C]//The Proceeding of Chinese Mechanical Engineering Society, Dalian: China Machine Press, 2004: 152.
- [10] Takeuchi E. Applying MHD technology to the continuous casting of steel slab[J]. The Member Journal of the Minerals, Metals & Materials Society, 1995, 47(5): 42-45.
- [11] Harada H, Takeuchi E, Zeze M, MHD analysis in hydromagnetic casting process of clad steel slabs[J]. Applied Mathematical Modeling, 1998, 22(11): 873-882.
- [12] Toh T, Takeuchi E, Hojo M, et al. Electromagnetic control frequency alternating magnetic field[J]. ISIJ International, 1997, 37(11): 1112-1119.
- [13] WANG Qiang, HE Ji-cheng, Kawai S, et al. Direct generation of intense compression waves in molten metals by using a high static magnetic field and their application[J]. J Mater Sci Technol, 2003, 19(1): 5-9.
- [14] Kolesnichenko A F, Kolesnichenko A A, Buryak V V. Improvement of in-mold electromagnetic stirrer by feeding of magnetic system with polyharmonic current[J]. ISIJ International, 2004, 44(2): 342-349.
- [15] Vives C. Electromagnetic refining of aluminum alloys by the CREM process: part 1. Working principle and metallurgical results[J]. Metall Mater Trans, 1989, B20(8): 623-629.
- [16] Vives C. Effects of forced electromagnetic vibrations during the solidification of aluminum alloys: part 1. Solidification in the presence of crossed alternating electric fields and stationary magnetic fields[J]. Metall Mater Trans, 1996, 27B(4): 445-455.
- [17] 李丘林, 李新涛, 李廷举, 等. 空心铜管坯水平电磁连铸过程的电磁效应研究[J]. 西安交通大学学报, 2005, 39(9): 1003-1006.
LI Qiu-lin, LI Xin-tao, LI Ting-ju, et al. Electromagnetic effect during horizontal electromagnetic continuous casting of hollow copper tube[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2005, 39(9): 1003-1006.

(编辑 何学锋)