

## 薄壁白铜管坯电磁连铸

李新涛<sup>1,2</sup>, 郭照相<sup>1</sup>, 赵祥伟<sup>1</sup>, 李廷举<sup>2</sup>

- (1. 高新张铜股份有限公司, 张家港 215600;
2. 大连理工大学 铸造中心, 大连 116024)

**摘要:** 为获得高质量的薄壁白铜管坯, 提出了在水平连铸过程中施加旋转电磁场的管坯连铸新方法, 并采用 BFe10-1-1 合金进行实验, 考察了电磁场对白铜管坯表面质量、凝固组织和力学性能的影响。结果表明: 在连铸过程中施加旋转电磁场能够提高金属液的流动性和充型能力, 消除表面裂纹缺陷, 从而制备出表面光滑的薄壁白铜管坯; 在电磁力的作用下管坯凝固组织显著细化, 富镍相由针状转化为团块状, 同时铸造应力由未施加电磁场时的 7.2 MPa 下降至 0.32 MPa; 随着凝固组织的改善, 施加磁场的管坯抗拉强度和伸长率与未施加磁场管坯的相比分别提高 5% 和 36%。

**关键词:** 白铜合金; 管坯; 连铸; 旋转电磁场

中图分类号: TG 249.7

文献标识码: A

## Thin-walled tube billets of cupronickel alloy by electromagnetic continuous casting

LI Xin-tao<sup>1,2</sup>, GUO Zhao-xiang<sup>1</sup>, ZHAO Xiang-wei<sup>1</sup>, LI Ting-ju<sup>2</sup>

- (1. Gaoxin Zhangtong Co. LTD, Zhangjiagang 215600, China;
2. Research Center of Foundry Engineering, Dalian University of Science and Technology, Dalian 116024, China)

**Abstract:** A new method was proposed by imposing a rotating electromagnetic field during horizontal continuous casting of thin-walled cupronickel tube billets. The effects of electromagnetic field on the surface quality, solidification structure and mechanical properties were investigated experimentally by use of BFe10-1-1 alloy. The results show that, when the electromagnetic field was applied, the flowability and filling capacity of cupronickel alloy are increased, the surface cracks are eliminated, and the thin-walled cupronickel tube billets with smooth surface can be obtained due to the increase of flowability and filling capacity of cupronickel alloy. The solidification structure of the tube billets is evidently refined, the shape of Ni-rich phase changes from needle-like to bulk and the casting stress declines from 7.2 to 0.32 MPa. With the structure improving, the tensile strength and elongation increase by 5% and 36%, respectively, than those of ordinary continuously cast tube billets.

**Key words:** cupronickel alloy; tube billets; continuous casting; electromagnetic field

冷凝管是制作管式热交换器的关键部件, 在热交换器工作过程中冷凝管内通冷却介质, 管外是处于高温和高压状态的蒸汽。在船舶、核电站、海水淡化等行业中一般以海水作为热交换器的冷却介质, 由于海水的腐蚀性较强, 因此, 冷凝管的工作环境十分恶劣。

白铜是以镍为主要合金元素的铜基合金, 具有良好的热传导性能, 同时又具有较强的耐水质腐蚀和抗海水冲击腐蚀能力, 能够满足冷凝管苛刻的使用条件, 因此, 得到了广泛应用<sup>[1-2]</sup>。目前, 白铜冷凝管的生产主要采用半连续铸造实心锭→挤压穿孔→轧制→拉拔的

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50474055); 中国博士后科学基金资助项目(20070410347); 江苏省博士后科研基金资助项目(0602044B)

收稿日期: 2007-06-19; 修订日期: 2007-12-02

通讯作者: 李廷举, 教授, 博士; 电话: 0411-84708940; E-mail: tjul@dlut.edu.cn

工艺, 不仅工序复杂, 且能耗大、金属利用率低<sup>[3]</sup>。为缩短冷凝管制备工艺, 李丘林等<sup>[4]</sup>和李新涛等<sup>[5]</sup>研究了水平连铸空心铜及铜合金管坯来取代挤压管坯的近终形连铸技术。但由于白铜合金高温流动性差, 充型困难, 迄今为止尚未见到采用水平连铸法制备薄壁空心白铜管坯的报道。

电磁场具有传递能流密度大、无接触及可控制等特点, 近年来, 随着电磁技术的不断发展, 电磁场已经被广泛应用于冶金领域, 并在实际生产中取得了良好的经济效益<sup>[6-13]</sup>。为了制备高质量薄壁白铜管坯, 本文作者提出了在水平连铸过程中施加旋转电磁场的新技术, 并采用实验的方法制备规格为  $d90\text{ mm} \times 12\text{ mm}$  的 BFe10-1-1 白铜管坯, 考察旋转电磁场对管坯表面质量、凝固组织及力学性能的影响, 并对其作用机理进行探讨。

## 1 实验

实验所用 BFe10-1-1 白铜合金的实际成分为(质量分数): Ni 10.0%, Fe 1.0%, Mn 1.0%, 余量为 Cu。图 1 所示为空心管坯水平电磁连铸装置的示意图, 结晶器由带芯子的石墨模具和水冷套组成, 型腔高度为 12 mm。旋转电磁场由置于凝固前沿的三相三极对感应线圈产生。

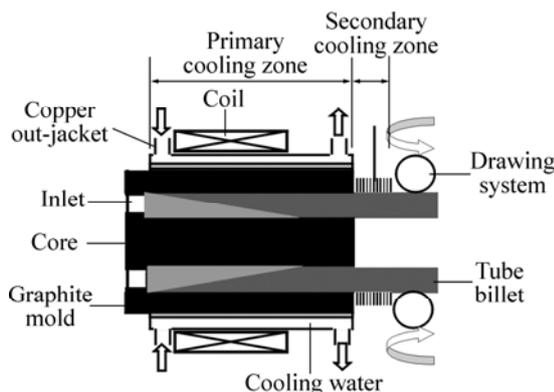


图 1 空心管坯水平电磁连铸装置示意图

Fig.1 Schematic diagram of horizontal continuous casting of tube billets

在实验过程中, 合金经中频熔化炉熔化后倒入保温炉保温, 当金属液温度达到  $1\ 250\text{ }^{\circ}\text{C}$  时启动拉坯机开始拉坯, 采用拉—停—反推—停的拉坯制度, 拉坯速度为  $270\text{ mm/min}$ 。用转子流量计分别控制一冷区和二冷区冷却强度, 冷却水温度控制在  $30\sim 40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。当拉

坯稳定运行一段时间后施加电磁场, 励磁电流为三相工频交流电, 电流为  $100\text{ A}$ 。实验结束后分别从未施加及施加了电磁场的管坯上取试样进行分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 表面质量

表面质量是衡量白铜管坯质量的一个重要指标, 良好的表面可减少管坯轧制前的铣面量, 提高了金属的利用率。图 2 所示为电磁场对管坯表面质量的影响。由图 2 可看出, 未施加电磁场时管坯表面粗糙, 有明显的振痕和横裂纹; 在相同的铸造条件下, 施加电磁场后消除了表面裂纹, 管坯表面质量较普通连铸坯明显改善。

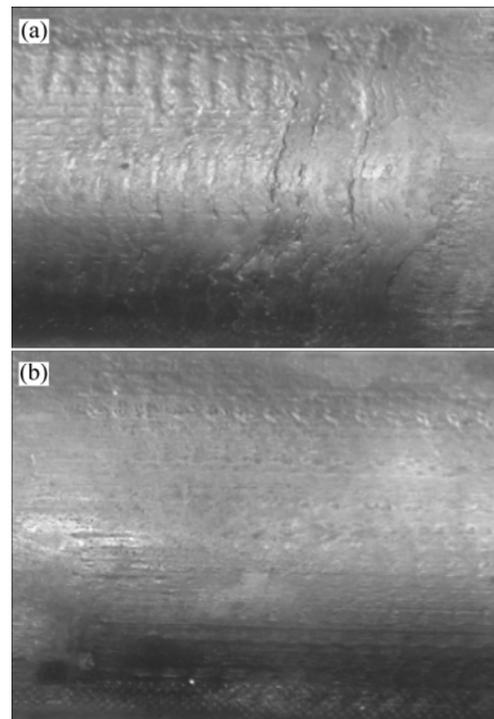


图 2 管坯外表面照片

Fig.2 Surface appearance of tube billets absence(a) and presence(b) of electromagnetic field

从管坯裂纹处线切割取样, 用超声波清洗机把试样表面的污垢及油渍等杂质洗掉, 然后, 用稀硝酸和冰醋酸混合液腐蚀。对制备好的裂纹试样进行扫描电镜分析, 结果如图 3 所示。由图 3 可看出, 裂纹是沿着晶界开裂的。

表面横裂纹的形成可以采用撕裂机理解释<sup>[14]</sup>。在水平连铸过程中, 靠近石墨模具内壁的金属液在冷却

水的作用下凝固形成初始坯壳, 初始坯壳在金属液静压力的作用下与石墨模具内壁粘结在一起<sup>[15]</sup>。当拉坯机向外牵引时带着粘结的坯壳一起运动, 当坯壳的高温强度低于拉应力时坯壳将被撕裂。未施加电磁场时, 由于靠近坯壳内层的低温金属液粘性大、流动性差, 难以完全填充于裂缝处, 从而在管坯表面形成横裂纹。

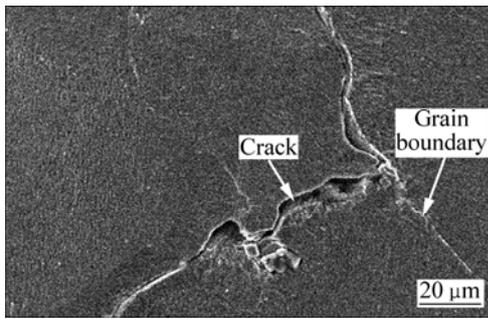


图 3 表面裂纹微观形貌

Fig.3 Micrograph of surface crack

根据麦克斯韦电磁场理论, 在凝固前沿施加了旋转电磁场后金属熔体中产生感应电流  $I$ , 感应电流与磁场相互作用, 产生作用于熔体上的洛仑兹力  $f$ 。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  $B_\theta$ , 故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  $f_\theta$  作用, 其中:

$$f_\theta = I \times B_r \quad (1)$$

$$f_r = I \times B_\theta \quad (2)$$

在切向力  $f_\theta$  的作用下结晶器内金属液受迫流动, 提高了熔体的温度均匀性, 从而提高了金属液的流动性和充型能力, 在拉坯过程中, 当初始坯壳被撕裂后, 靠近坯壳内层的金属液能够迅速填充裂缝, 从而抑制了表面裂纹的形成, 提高了管坯表面质量。

### 2.2 凝固组织

图 4 所示为施加及未施加电磁场条件下制备的空心管坯的宏观组织照片。由图 4(a)可以看出, 未施加电磁场管坯横截面上除了外侧由于激冷作用产生少量的细等轴晶外, 其他基本都是粗大的柱状晶, 穿晶现象非常明显, 且晶粒尺寸不均匀。施加了电磁场后, 晶粒得到了明显的细化, 穿晶现象消除, 在管坯内侧出现了等轴晶层, 且晶粒尺寸更加均匀(见图 4(b))。

管坯凝固时熔体热量主要经石墨模具壁沿径向导出。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, 形成了粗大的柱状晶。在连铸过程中施加旋转电磁场后, 熔体在电磁力

的作用下强迫流动, 提高了金属液的温度均匀性, 促使熔体趋于同时凝固, 从而抑制了粗大柱状晶的生长。同时, 强烈的流动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, 最终液穴内中因存在大量晶核而促使等轴晶形成。

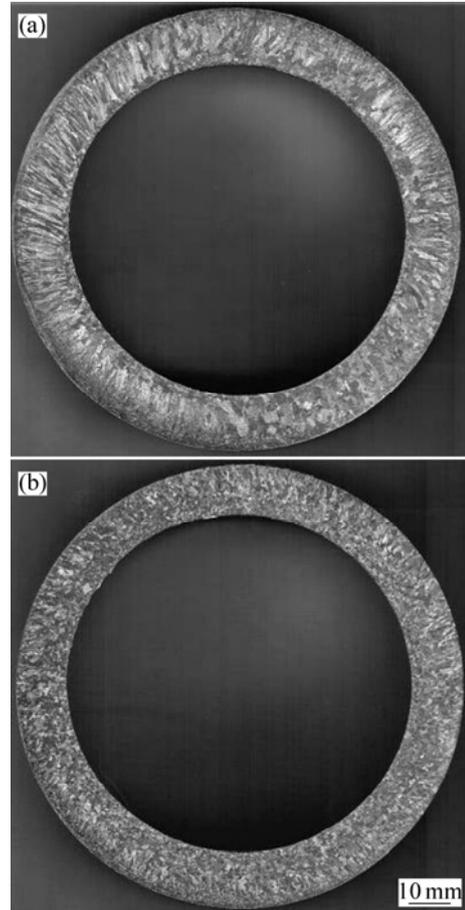


图 4 施加及未施加电磁场时管坯的凝固组织

Fig.4 Solidification structures of tube billets without(a) and with(b) electromagnetic field

在连铸过程中, 由于冷却不均导致管坯存在铸造应力。如果铸造应力过大, 会导致管坯变形, 且在后续冷轧过程中有可能造成应力破裂。为考察电磁场对管坯铸造应力的影响, 采用文献[16]中的方法将管坯沿纵向用线切割剖开, 分别测量剖开前、后管坯的外径, 并按照式(3)进行计算:

$$\sigma_c = \frac{Eh}{1-\nu^2} \left( \frac{1}{D_0} - \frac{1}{D_1} \right) \quad (3)$$

式中  $\sigma_c$  为铸造应力;  $E$  为弹性模量;  $\nu$  为泊松系数;  $h$  为管坯壁厚度;  $D_0$  为剖开前管坯的外径;  $D_1$  为剖开后管坯的外径。

经测量计算, 未施加电磁场的普通连铸管坯铸造

应力为 7.2 MPa; 施加电场后, 随着凝固组织的改善, 管坯的铸造应力降至 0.32 MPa。

镍元素在白铜合金中主要起到固溶强化、提高合金耐腐蚀性能的作用。由于铜、镍元素均为面心立方晶格结构, 且原子半径相近, 因此, 可以互溶, 形成单一的  $\alpha$  相。但由于镍元素在铜中的扩散速度很慢, 因此, 白铜合金凝固组织呈现典型的树枝状偏析<sup>[17]</sup>。采用扫描电镜考察电磁场对富镍相微观形貌的影响, 结果如图 5 所示。

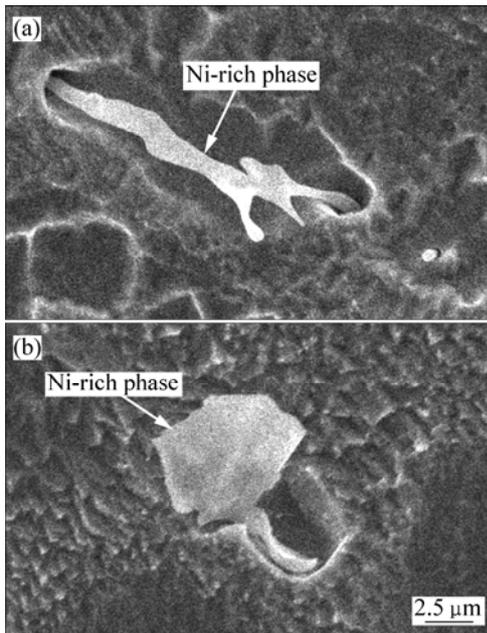


图 5 电磁场对富镍相形貌的影响

**Fig.5** Effect of electromagnetic field on Ni-rich phase: (a) Without electromagnetic field; (b) With electromagnetic field

由图 5 可看出, 未施加电磁场时, 基体上有针状富镍相析出; 而施加了电磁场后, 在电磁回旋驱动力的作用下结晶区域内熔体温度趋于均匀, 富镍相的定向生长趋势受到抑制, 从而转变为团块状形貌。

### 2.3 力学性能

管坯的力学性能对后续轧制和拉拔加工具有重要影响。考虑到水平连铸时重力对凝固组织的影响, 分别从未施加及施加了电磁场两种管坯的上、下和侧面取试样进行拉伸实验, 取其平均值进行比较, 结果如表 1 所列。由表 1 可看出, 施加电磁场后, 随着凝固组织的改善, 管坯的力学性能得到提高, 其中抗拉强度提高 5%, 而伸长率则提高 36%。

表 1 电磁场对管坯力学性能的影响

**Table 1** Effect of electromagnetic field on mechanical properties of tube billets

Sample	Tensile strength, $\sigma_b$ / Pa	Elongation, $\eta$ /%
Without EMF	264	33
With EMF	278	45

采用扫描电镜对管坯的拉伸断口进行分析, 结果如图 6 所示。由图 6 可看出, 两种管坯的断裂机制均为韧性断裂, 未施加电磁场的试样断口存在微裂纹, 而电磁连铸试样断口主要由等轴深韧窝组成, 进一步表明电磁连铸制备的管坯具有良好的韧性。

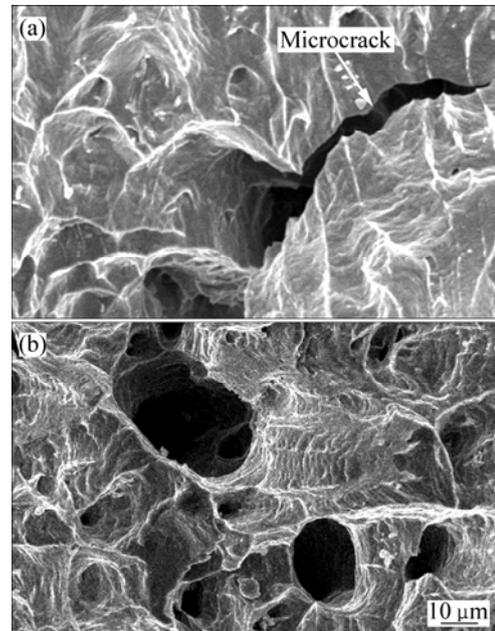


图 6 拉伸断口形貌

**Fig.6** SEM images of tube billets: (a) Without electromagnetic field; (b) With electromagnetic field

未施加电磁场时管坯内存在针状富镍相, 在拉应力的作用下富镍相附近易形成微裂纹, 并随着拉应力的增加扩展成为断裂源, 从而降低了管坯的力学性能。施加了电磁场后, 在电磁力的作用下, 一方面富镍相变为团块状, 有利于抑制微裂纹的形成; 另一方面, 随着凝固组织的细化, 相邻晶粒间形变协调性得到提高, 因此, 管坯的力学性能尤其是塑性得到显著提高。

## 3 结论

1) 在水平连铸过程中施加旋转电磁场能够提高

金属液流动性和充型能力,从而制备出表面光滑无裂纹的薄壁白铜管坯。

2) 施加旋转磁场后,在电磁力的作用下,BFe10-1-1白铜管坯晶粒明显细化,组织均匀性得到提高,针状富镍相转化为团块状,同时,显著降低了管坯的残余应力。

3) 随着凝固组织的改善,管坯的力学性能得到提高,抗拉强度和伸长率较未施加电磁场的管坯分别提高5%和36%。

## REFERENCES

- [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,潘志勇,李宏英.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,2005,15(11): 1692-1698.  
DENG Chu-ping, HUANG Bo-yun, LI Wei, PAN Zhi-yong, LI Hong-ying. Corrosion characteristics of white copper condenser tube under different serving conditions[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2005, 15(11): 1692-1698.
- [3] 余业球,赵锋,黎沃光.白铜管热型连铸的温度场[J].铸造技术,2005,26(11): 1054-1057.  
YU Ye-qiu, ZHAO Feng, LI Wo-guang. Temperature field in the heated mold continuous casting of cupronickel tubes[J]. Foundry Technology, 2005, 26(11): 1054-1057.
- [4] 李丘林,李新涛,李廷举,金俊泽,刘伟,鲍崇高.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, JIN Jun-ze, LIU Wei, BAO Chong-gao. Electromagnetic effect during horizontal electromagnetic continuous casting of hollow copper tube[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2005, 39(9): 1003-1006.
- [5] 李新涛,李廷举,张兴国,周文龙,殷国茂,谭建昌,郑龙,宋蕊丽,高林汉. BF30-1-1铜合金空心管坯水平连铸探索[J].稀有金属材料与工程,2006,35(11): 1806-1808.  
LI Xin-tao, LI Ting-ju, ZHANG Xing-guo, ZHOU Wen-long, YIN Guo-mao, TAN Jian-chang, ZHENG Long, SONG Rui-li, GAO Lin-han. Study of horizontal continuous casting of hollow billets of BF30-1-1 alloy[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2006, 35(11): 1806-1808.
- [6] 王忠军,乐启焱,郭世杰,崔建中,张彩碛.低频电磁铸造AZ41镁合金的热压缩流变与组织[J].中国有色金属学报,2006,16(1): 123-129.  
WANG Zhong-jun, LE Qi-chi, GUO Shi-jie, GUI Jian-zhong, ZHANG Cai-bei. Thermal compressing flow and microstructure of AZ41 magnesium alloy cast by low frequency electrical magnetic field[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2006, 16(1): 123-129.
- [7] 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.
- [8] HARADA H, TAKEUCHI E, ZEZE M, TANAKA H. MHD analysis in hydromagnetic casting process of clad steel slabs[J]. Applied Mathematical Modelling, 1998, 22(11): 873-882.
- [9] TOH T, TAKEUCHI E, HOJO M, KAWAI H, MATSUMURA S. Electromagnetic control initial solidification in continuous casting of steel by low frequency alternating magnetic field[J]. ISIJ International, 1997, 37(11): 1112-1119.
- [10] WANG Qiang, HE Ji-cheng, KAWAI S, IWAI K, ASAI S. 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.
- [11] 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.
- [12] VIVES C. Electromagnetic refining of aluminum alloys by the CREM process: part I. Working principle and metallurgical results[J]. Metal Trans, 1989, 20B(8): 623-629.
- [13] VIVES C. Effects of forced electromagnetic vibrations during the solidification of aluminum alloys: part I. Solidification in the presence of crossed alternating electric fields and stationary magnetic fields[J]. Metal Mater Trans, 1996, 27B(4): 445-455.
- [14] SAVAGE J. A new reciprocation mould cycle to improve surface quality of continuous casting steel[J]. Iron and Coal Trade Review, 1961, 182(4): 787-795.
- [15] 孟祥宁,朱苗勇,程乃良.高拉速下连铸坯振痕形成机理及振动参数优化[J].金属学报,2007,43(8): 839-846.  
MENG Xiang-ning, ZHU Miao-yong, CHENG Nai-liang. Formation mechanism of oscillation marks and optimization of oscillation parameters for slab continuous casting with high casting speed[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2007, 43(8): 839-846.
- [16] 李耀群,易茵菲.现代铜盘管生产技术[M].北京:冶金工业出版社,2005: 142-143.  
LI Yao-qun, YI Yin-fei. Technology of modern copper lengths[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2005: 142-143.
- [17] 余业球,赵锋,黎沃光.热型连铸BF30-1-1白铜管的组织与性能[J].热加工工艺,2005,34(11): 8-9.  
YU Ye-qiu, ZHAO Feng, LI Wo-guang. Microstructure and performance of BF30-1-1 cupronickel tubes[J]. Hot Working Technology, 2005, 34(11): 8-9.

(编辑 李艳红)