

文章编号: 1004-0609(2006)11-1931-07

软接触电磁连铸结晶器内磁场分布与弯月面行为^①

金百刚, 王 强, 刘 燕, 崔大伟, 吴成涛, 王恩刚, 赫冀成
(东北大学 材料电磁过程研究教育部重点实验室, 沈阳 110004)

摘 要: 通过实验测试和数值模拟的方法研究两段式软接触电磁连铸无缝结晶器结构、线圈位置、电源功率以及弯月面位置等因素对结晶器内高频磁场分布的影响。并采用 Sn 作为钢液的模拟工质测量了不同实验条件下两段式结晶器内的弯月面高度。研究结果表明: 两段式结晶器的透磁效果随着结晶器上半段厚度的减薄而提高; 增加电源功率时, 可以增大高频磁场在铸坯初始凝固区域的强度及作用范围, 有利于弯月面的形成; 线圈位置越靠上, 越有利于磁感应强度透过结晶器, 有助于弯月面高度的增大; 当金属液面位于感应线圈高度中心与线圈顶端位置之间时, 高频磁场作用于初始凝固区域的有效作用较强, 可产生较大的电磁压力, 有助于获得高表面质量的铸坯。

关键词: 软接触电磁连铸; 电磁冶金; 高频电磁场; 两段式; 无缝结晶器; 弯月面

中图分类号: TF 777

文献标识码: A

Magnetic field distribution and molten metal meniscus behavior in soft contact electromagnetic continuous casting mold

JIN Bai-gang, WANG Qiang, LIU Yan, CUI Da-wei, WU Cheng-tao,
WANG En-gang, HE Ji-cheng

(Key Laboratory of National Education Ministry for Electromagnetic Processing of Materials,
Northeastern University, Shenyang 110004, China)

Abstract: The experimental measurement and numerical simulation were used to study the magnetic field distribution in the two-stage soft contact electromagnetic continuous casting slit-less mold. And the height of molten metal meniscus was measured under different magnetic field conditions where Sn was used as the simulated media of molten steel. The results show that the penetration of magnetic field in the mold increases with the thickness of mold upside part decreasing. By increasing the electric power, the intensity and the effective range of the magnetic field in the region of initial solidification become larger. When the coil level gets closer to the mold top, it is much easier for the magnetic field to penetrate into the mold, and the height of meniscus becomes higher accordingly. When the meniscus level is located between the coil top level and coil center level, the effect of the high frequency magnetic field on the region of initial solidification for billet is largest, and the magnetic field distribution becomes uniform, which is helpful to improving the billet surface quality.

Key words: soft contact electromagnetic continuous casting; electromagnetic metallurgy; high frequency electromagnetic field; two-stage; slit-less mold; meniscus

软接触电磁连铸技术能够生产出无振痕、无裂纹等缺陷的优质连铸坯, 同时能大幅度提高连铸拉

速, 近年来已成为连铸技术的研究热点之一^[1-4]。然而软接触电磁连铸技术能否成功应用于实际生

① 基金项目: 国家高技术研究发展计划资助项目(2001AA337040); 辽宁省科技厅科技攻关资助项目(2006221007); 教育部留学回国人员科研启动基金项目

收稿日期: 2006-06-05; 修订日期: 2006-11-17

通讯作者: 王 强, 教授; 电话: 024-83681726; 传真: 024-83681758; E-mail: wangq@mail.neu.edu.cn

产, 关键取决于结晶器是否满足冷却及透磁效果的要求。目前, 软接触电磁连铸的结晶器按材质和结构的不同分为切缝式软接触结晶器和无缝式软接触结晶器两种。切缝式软接触结晶器显著提高了透磁性, 但结晶器内磁场分布不均匀, 结晶器强度下降, 冷却水回路设计复杂^[2~4]。两段式无缝软接触结晶器与切缝式结晶器相比, 不仅具有提高结晶器的整体强度、简化结构和冷却水回路系统的优点, 同时又保证了磁场的穿透性, 并使结晶器内磁场分布均匀, 优势明显^[5~7]。当前软接触技术研究的热点是结晶器内的磁场分布和弯月面的变形规律, 国内外很多学者对此进行了大量的研究^[1~16]。Cha 等^[3]和 Cho 等^[12]对切缝式结晶器内的磁场分布进行了数值计算和实验讨论。Tho 等^[1]通过实验方法对结晶器内弯月面的行为进行了研究, 指出了弯月面行为和铸坯表面质量的关系。Nakata 等^[14]对弯月面和磁感应强度之间的关系进行了探讨。于光伟等^[9, 11]对弯月面和磁感应强度进行了研究。

但是, 以上的研究都是针对切缝式结晶器而进行的, 针对两段式结晶器的研究还报道很少。本文作者对 $d100\text{ mm}$ 圆坯两段式软接触电磁连铸结晶器内磁场分布及弯月面高度进行了实验测试, 考察了两段式结晶器上半段壁厚、电源功率以及线圈位置对两段式结晶器内磁场分布及弯月面高度的影响。并在此研究的基础上, 进一步通过数值模拟的方法研究了液态金属弯月面与感应线圈处于不同相对位置时铸坯初始凝固区域磁感应强度及电磁压力的分布特性, 为软接触电磁连铸用两段式结晶器所需最佳工艺参数的确定提供理论和实验依据。

1 实验

1.1 实验装置及实验条件

两段式结晶器^[6]上部为透磁效果良好的材料, 下部为导热效果良好的磷脱氧铜, 在结晶器外侧设置感应线圈, 并将其与高频电源相连接。由于结晶器的透磁效果与材料的集肤层厚度成正比, 与结晶器厚度成反比, 本研究采用减薄上半段壁厚的方式来提高结晶器的透磁效果, 实验装置及测点分布见图 1。定义结晶器上沿圆心处为坐标原点。实验测试的两段式圆坯结晶器利用不同上半段厚度(0、1.1和2.0 mm)来模拟不同透磁效果的结晶器材料。各实验参数如表 1 所列。

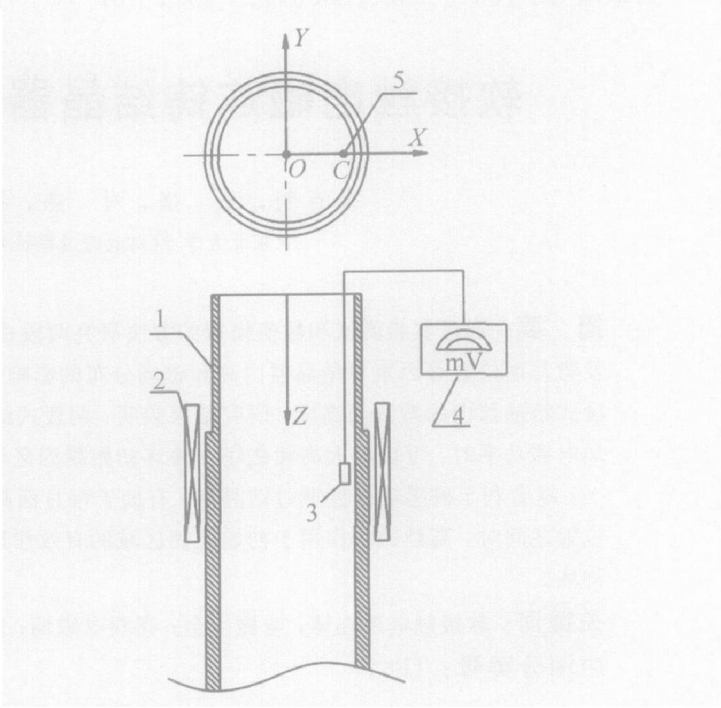


图 1 实验装置简图及实验测点选择

Fig. 1 Experimental apparatus and locations of measurement points
1—Mold; 2—Coil; 3—Sensor;
4—Voltage meter; 5—Measure point

表 1 实验参数

Table 1 Experimental parameters

Mold inner diameter/mm	Mold height/mm	Mold thickness of lower part/mm	Coil height/mm
100	400	10	70
Number of coil turn	Distance between coil top and mold connection/mm	Electric power/kW	Electric frequency/kHz
5	20, 35, 50	10. 2, 19. 8, 30	20

1.2 磁感应强度及弯月面的测试原理

采用小线圈法^[9]测定空载条件下结晶器内磁感应强度。用屏蔽线将探测线圈与交流微伏表相连。由微伏表读出交变磁场在小线圈中感应出的电动势。在软接触电磁连铸中, 由于电磁屏蔽, 对铸坯起主要作用是拉坯方向上的磁场, 因此本文作者主要测试研究靠近结晶器壁面处沿拉坯方向上(z 轴方向)的磁感应强度分布。

采用浸镀^[11]方法来记录相应参数下弯月面的形状。所谓浸镀法是指将紫铜片插入到高温液态合金中, 液态金属与紫铜片间发生轻微合金化反应并附着于其上, 从而获得弯月面形状的方法。实验利用液态低熔点合金锡(密度为 7.3 g/cm^3 , 熔点为 $232\text{ }^{\circ}\text{C}$)作为钢液的模拟工质, 将其盛装在

$d90\text{ mm} \times 5\text{ mm}$ 的非导电石英玻璃容器中, 利用感应线圈产生频率为 20 kHz 的高频交变磁场, 并使之作用于液态金属弯月面区域, 以此研究两段式圆坯软接触电磁连铸结晶器内金属液的行为特征。

2 结果与分析

研究表明, 在软接触电磁连铸生产中, 结晶器结构、电源功率及感应线圈高度等工艺参数将直接影响到弯月面区域的磁场及电磁压力分布, 进而影响到钢液弯月面行为特征和铸坯的表面质量^[4, 9~10]。因此, 本研究对不同参数作用下两段式结晶器内的磁感应强度及弯月面高度进行测试与分析, 为开发高电阻合金结晶器材料提供理论参考依据。

2.1 结晶器上半段厚度变化对内部磁感应强度的影响

为考察不同透磁效果的材料内部磁感应强度的分布特性, 本文作者通过改变结晶器上半段厚度来模拟不同透磁效果的材料, 对空载情况下 3 个不同结构结晶器壁面处纵向磁感应强度的分布进行检测。图 2 所示为电源功率为 30 kW , 线圈顶端距离结晶器上下半段连接处为 20 mm 时, 空载结晶器内沿拉坯方向上的磁感应强度分布。由图 2 可见, 对于本研究所用的两段式软接触电磁连铸结晶器, 在结晶器上半段高度范围内, 结晶器内部磁感应强度沿拉坯方向逐渐增强, 磁场主要集中在结晶器上半段高度范围内, 结晶器下半段高度范围内沿拉坯方向磁感应强度迅速衰减。磁感应强度的最大值出现在线圈顶部与线圈中心位置之间, 在线圈顶部与线圈中心位置之间沿拉坯方向上的磁感应强度分布较均匀, 且磁感应强度较大。因此, 在实际浇注过程中, 应将液面保持在线圈顶部与线圈中心位置之间, 这有利于增强软接触效果。

由于结晶器壁对高频磁场有集肤效应, 因此交变磁场主要通过结晶器上部较薄的部分透入结晶器内部。由图 2 也可看出, 结晶器上半段壁厚越薄, 对高频磁场的屏蔽作用越小, 内部磁感应强度越大, 磁感应强度的作用范围也越大。因此在实际生产过程中, 在满足强度的条件下, 应尽量减小结晶器的厚度, 或者采用高透磁效果的材料。由于 3 个结晶器磁场分布规律一致, 以结晶器上半段壁厚为 0 mm 的结晶器内磁场最为明显, 为准确反映内部磁场随参数变化的规律, 以下实验均采用上半段厚

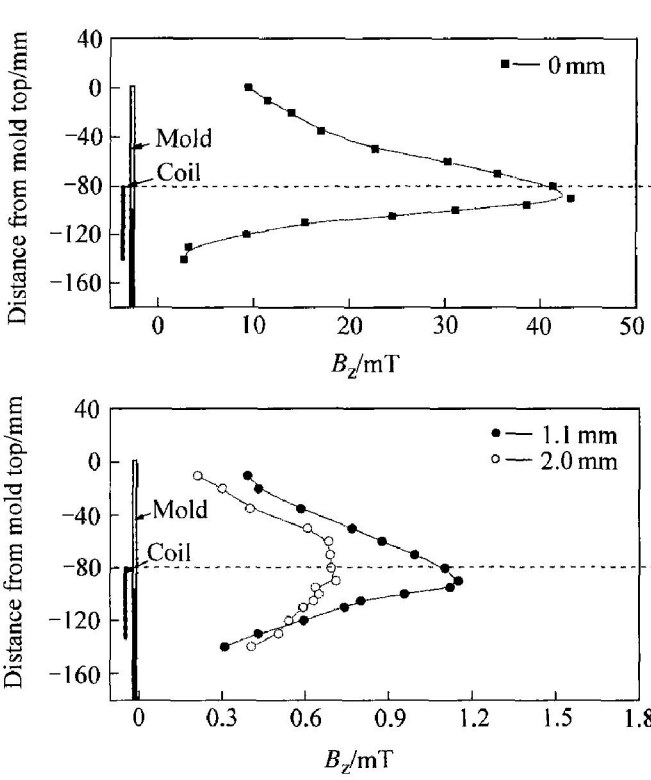


图 2 不同上半段厚度两段式结晶器内纵向磁感应强度的分布

Fig. 2 Distribution of magnetic flux density on vertical direction in two-stage molds with different upside part thickness

度为 0 mm 的结晶器, 即相当于结晶器上半段材料为无磁性的绝缘材料。

2.2 电源功率变化对结晶器内磁场分布及弯月面高度的影响

在线圈顶与结晶器上下半段连接处的距离为 50 mm 条件下, 考察了电源功率变化对空载时结晶器内磁场分布及负载时弯月面高度的影响。图 3(a) 所示为测得的两段式结晶器内纵向磁感应强度分布 (P 表示电源功率)。由图 3(a) 可看出, 在不同功率下, 虽然磁感应强度的峰值仍出现在线圈顶部与线圈中心位置之间, 但是功率变化对磁感应强度影响较大。当功率较低时, 磁感应强度较小, 磁场分布较均匀, 且该均匀区范围比较大; 随着电源功率的提高, 结晶器内的磁感应强度也随之增加, 线圈顶部与线圈中心位置间的磁场变化较为明显。图 3(b) 所示为不同电源功率下两段式结晶器内弯月面高度的测试结果(图中 0 mm 的水平线表示没有磁场时的液面位置, 位于结晶器上下半段的连接处)。由图 3(b) 可看出, 功率较低时, 弯月面高度较小, 且液面比较平稳; 随着电源功率的增加, 弯月面高

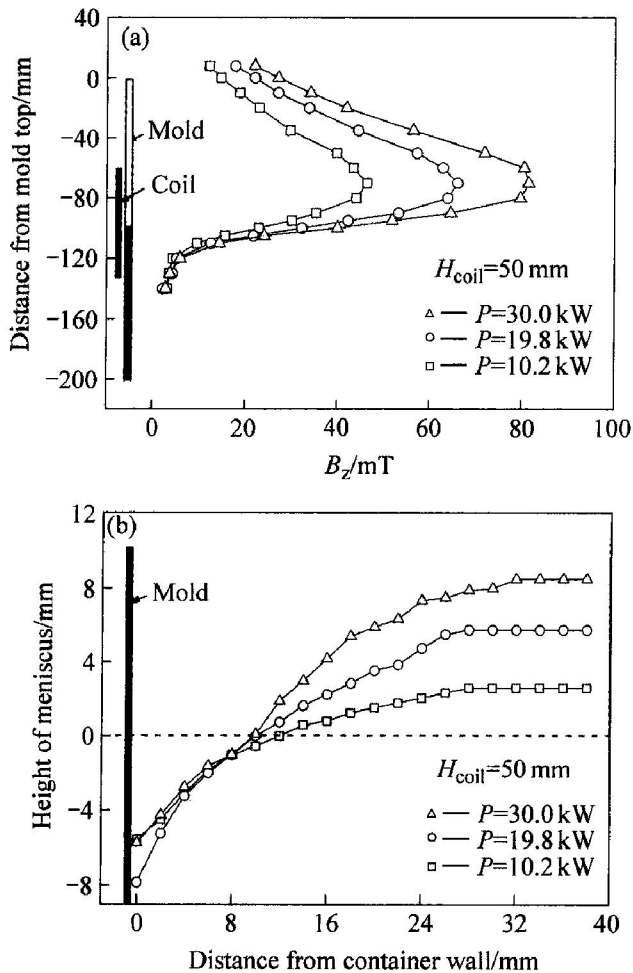


图 3 功率变化对纵向磁感应强度及弯月面的影响

Fig. 3 Effect of power on magnetic flux density (a) and meniscus behavior (b)

度也随之增加,同时,功率的增加又导致弯月面的不均匀性增大。若电源功率过高,易造成弯月面不均匀变形,导致在铸坯表面产生纵向波折等缺陷。因此,在软接触电磁连铸工艺中,提高电源功率固然可以增强结晶器内的磁感应强度和弯月面高度,但从磁场均匀性和弯月面稳定性两方面来看,应该认识到电源功率的增加应该有一个合理的范围,在此范围内通过提高电源功率有利于改善铸坯的表面质量。

2.3 感应线圈位置的改变对结晶器内磁场分布及弯月面高度的影响

在软接触电磁连铸中,感应线圈所产生的高频磁场,其磁感应强度及在空间的分布特性与磁场作用范围内金属导体的位置、形状等因素密切相关。为获得变形较大的弯月面,钢液面位置应在磁感应强度较大处。但线圈的不同安装位置又影响到结晶器内的磁场分布,进而影响到液态金属弯月面的形变特征。当电源功率为 30 kW 时,分别测量了不同

线圈位置时的磁感应强度分布及弯月面高度。线圈所取位置分别为线圈顶端距结晶器上下半段连接处 20、35 和 50 mm 3 种不同情况(图中 H_{coil} 表示线圈顶端距结晶器上下半段连接处的距离)。

线圈位置对结晶器内纵向磁场分布及弯月面高度的影响如图 4 所示。由图 4 可知,虽然磁感应强度的峰值出现在线圈顶部与线圈中心位置之间,但随着线圈上移,磁感应强度的峰值增大,且其位置也随之上移,弯月面高度也逐渐增大。在线圈顶部附近,结晶器内磁感应强度和弯月面高度随线圈的上移而增加。且可以看到,在线圈中心以下,随着线圈的上移,纵向磁场的衰减加快。这是由于结晶器内的电磁场主要由结晶器上半段渗透的磁场,而线圈中心下方的磁场受到结晶器的屏蔽而迅速衰减。

由此可见,线圈位置上移有利于磁感应强度在弯月面区域有效作用范围的增大。综合考虑线圈位置对磁场分布的影响,线圈应该有一个优化的位置,在实际应用中,应尽量将线圈靠近结晶器入口安装。

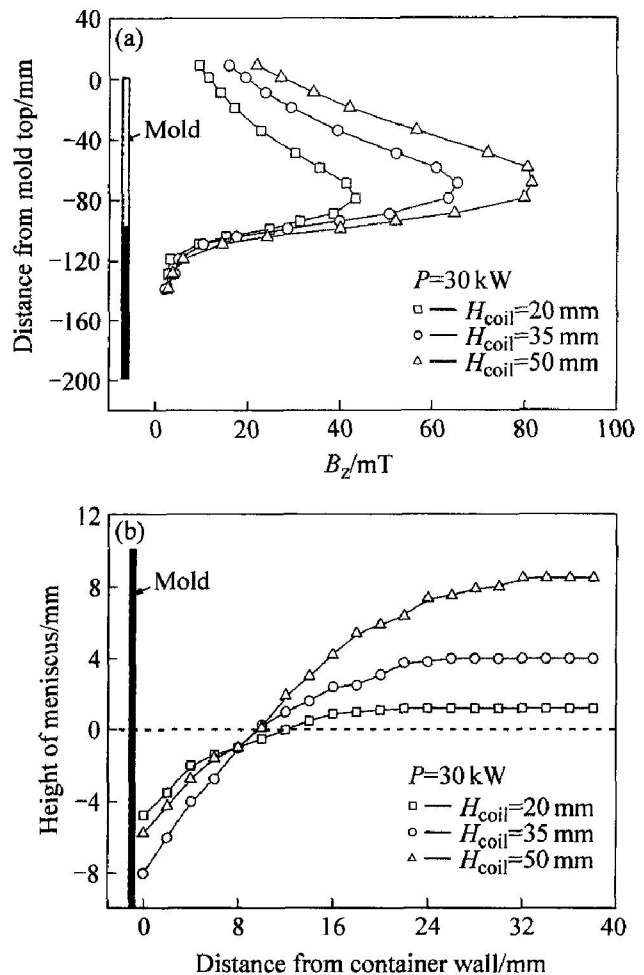


图 4 线圈位置变化对纵向磁感应强度及弯月面的影响

Fig. 4 Effect of coil position on magnetic flux density (a) and meniscus behavior (b)

3 初始凝固区域电磁场分布特性的数值模拟

在软接触电磁连铸过程中, 液态金属弯月面区域的磁场分布特性决定了作用于弯月面及初始凝固区域的电磁压力分布, 并将直接影响到弯月面和初凝壳在拉坯过程中的稳定性及高频磁场的软接触作用效果。因此, 有必要对不同弯月面位置条件下的磁场分布特性做进一步深入研究。由于受检测手段的限制, 通过实验检测定量分析作用于液态金属弯月面区域的磁感应强度的分布特性仍存在一定难度, 因此, 采用大型工程软件 ANSYS 进行模拟研究。

3.1 实体模型的建立及边界条件的确立

ANSYS 三维高频电磁场分析的有限元公式由电磁场的 Maxwell 方程组导出, 并将磁矢势作为电磁场分析的主自由度。考虑到两段式结晶器系统的对称性, 取结晶器的 1/4 作为研究对象, 包括结晶器、感应线圈、结晶器内金属导体以及结晶器周围的空气区域。计算模型的尺寸与实验用结晶器尺寸相同, 上半段采用透磁效果良好的无磁性绝缘材料, 下半段为导热效果良好的铜。模型在对称平面设定磁力线平行条件, 在空气区域边界设定无限远标志, 对结晶器铜壁及结晶器内金属导体设定短路导体条件。耦合感应线圈一端的时间积分电势自由度, 并在某节点施加电流激励。

基本假设: 1) 钢液面为平面, 弯月面对整个磁场分布的影响可忽略^[9]; 2) 结晶器中全部为钢液, 不考虑铸坯的凝固过程; 3) 忽略结晶器的振动; 4) 保护渣层不导电。由于模型对称性, 在对称面设定磁力线平行边界条件, 设定距离结晶器尺寸 5 倍处的磁势为零。电源频率取为 20 kHz, 线圈电流为 2 kA。本研究计算所用的材料物性参数: 钢液 (1520 °C)、结晶器上部材料 (220 °C)、结晶器下部铜管 (220 °C)、感应线圈及空气的电阻率分别为 8.5×10^{-7} 、 1×10^{-20} 、 1.6×10^{-8} 、 3×10^{-8} 和 $1 \times 10^{-20} \Omega \cdot m$, 相对磁导率都为 1。

3.2 计算结果可信度分析

为了确认 ANSYS 电磁场计算结果的可信度, 在首先进行的算例中, 使所建实体模型的结构尺寸与前面所述实验结晶器的结构尺寸完全相同。在空载条件下, 结合 $n=5$ 、 $H_{\text{coil}}=35 \text{ mm}$ 的实验条件进

行对应计算。由于受条件所限, 计算条件与实验条件难以达到一致的效果, 因此只能比较一下两种不同条件下磁场的大致趋势, 趋势一致的话, 我们就可以认为计算结果可以用来预测实验结果, 其差值还需要通过大量的实验研究来进一步验证并进行修正。图 5 所示为结晶器内实验测点 (图 1 中 C 处) 处磁感应强度的数值计算结果和实验检测结果的比较。计算结果表明, 通过数值模拟求得的磁感应强度在结晶器内的分布趋势与实验测得磁场的分布趋势基本一致。由此, 本研究认为可以利用 ANSYS 有限元分析程序进行软接触电磁连铸结晶器内电磁现象的预测。

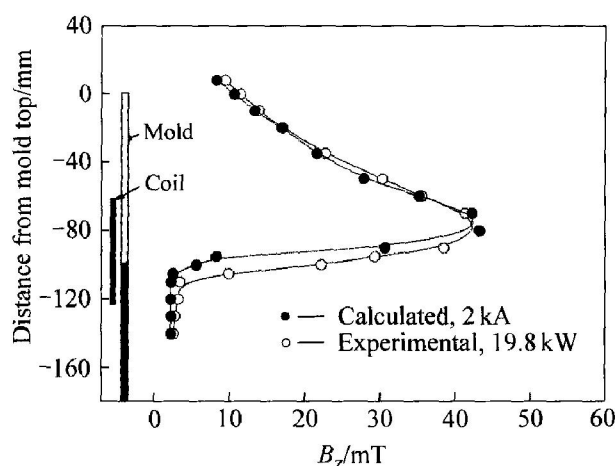


图 5 计算与测量结果的比较

Fig. 5 Comparison between measured and simulated B_z values

3.3 液面位置对铸坯初始凝固区域磁场及电磁压力分布特性的影响

在软接触电磁连铸工艺中, 铸坯的初始凝固开始于液态金属弯月面底部, 正是弯月面下方一定长度范围内作用于液态金属及初生坯壳上的电磁压力减轻了钢水静压力对铸坯初生坯壳的压迫, 拓宽了初凝壳与结晶器壁间的保护渣通道, 对于减轻结晶器周期振动过程中保护渣通道内的动压变化, 保证初始凝固过程的稳定进行起到决定性的作用^[11]。因此, 在固定结晶器结构及感应线圈尺寸的前提下, 对液面与感应线圈处于不同相对位置时初始凝固区域磁场及电磁压力的分布特性进行考察, 为两段式软接触电磁连铸结晶器最佳工艺参数的确定提供了更充分的理论依据。在计算过程中, 结晶器上半段高度取为 100 mm, 感应线圈高度取为 70 mm, 线圈顶距离结晶器连接处 50 mm, 电源频率为 20 kHz, 线圈电流为 2 kA。

图6所示为计算所得不同弯月面位置条件下结晶器内金属导体表面的磁场分布。由图6可看出,当弯月面位于线圈顶部位置附近时,高频磁场的磁感应强度在弯月面处达到最大,并沿拉坯方向逐渐衰减。随着弯月面位置的不断下移,作用于铸坯初始凝固区域磁场的磁感应强度增大,但磁场的有效作用范围减小,磁场沿拉坯方向上的衰减加速。当金属导体弯月面高于感应线圈上沿时,磁场的分布特性发生较大变化,磁感应强度最大值下移至感应线圈中心偏上的某一部位,并在上下两个方向上同时衰减。随弯月面位置的不断提高,作用于初始凝固区域高频磁场的磁感应强度将不断减小。

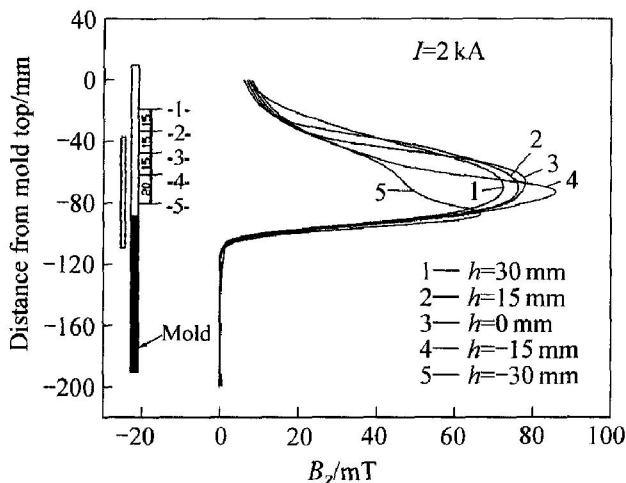


图6 不同弯月面位置条件下的磁感应强度分布

Fig. 6 Calculated magnetic flux density distribution in electromagnetic mold with different meniscus levels
(h is displacement from coil top)

由磁场计算结果,应用公式^[9]: $p_m = B_z^2 / 2\mu$ 。近似计算作用于铸坯初始凝固区域的电磁压力。式中 p_m 表示电磁压力, Pa; B_z 表示铸坯表面纵向磁感应强度, T; μ 表示被测金属的磁导率, H/m。在计算过程中,金属导体的磁导率等于真空磁导率。图7所示为不同弯月面位置条件下的电磁压力分布。由图7可看出,电磁压力在有钢液区域的分布趋势与磁感应强度的纵向分布趋势基本相同。由于 $p_m \propto B_z^2$, 电磁压力纵向分布的不均匀性表现得更为明显。

许多学者^[1-2, 9, 12-13, 15] 在磁感应强度为9.7~40 mT的条件下进行了软接触拉坯实验,并取得了良好的效果。本文作者通过实验和数值模拟对两段式结晶器的研究发现,上半段选择集肤层厚度较大的材料,其透磁效果可以满足软接触结晶器的透磁

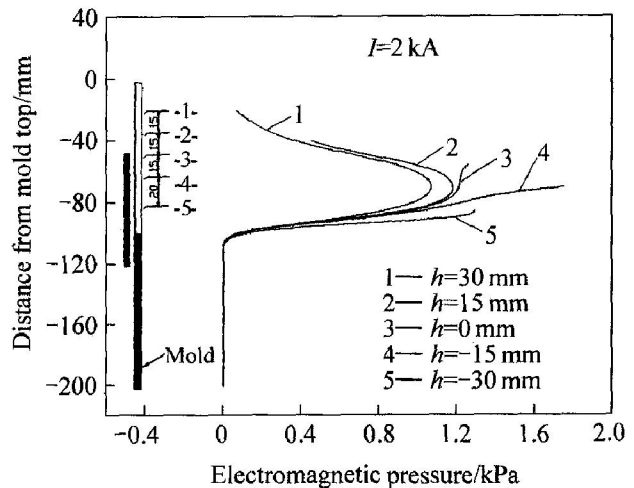


图7 不同弯月面位置条件下的电磁压力分布

Fig. 7 Calculated electromagnetic pressure distribution in region of initial solidification under different meniscus levels
(h is displacement from coil top)

要求,为材料的开发提供了理论和实验依据。

4 结论

1) 结晶器上半段的壁厚越薄,对高频磁场的屏蔽作用越小,结晶器透磁效果越好。因此,在选择结晶器上半段材料时应尽量选择集肤层大,透磁效果良好的材料。

2) 增加电源功率将增大高频磁场在铸坯初始凝固区域的有效作用范围。功率的提高和两段式结晶器内高频磁场磁感应强度的增大有利于液态金属弯月面作用效果的增强及弯月面高度的增大。

3) 线圈越靠近结晶器上沿,越有利于磁感应强度透过结晶器,有助于弯月面高度的增大,在实际应用中,可尽量将线圈靠近结晶器入口安装。

4) 在软接触电磁连铸中,当液态金属弯月面位于感应线圈顶部与线圈中心位置之间时,高频磁场在铸坯初始凝固区域的有效作用范围较大,可产生较大的电磁压力,有助于获得高表面质量的铸坯。

REFERENCES

- [1] Toh T, Takeuchi E, Hojo M. Electromagnetic control of initial solidification in continuous casting of steel by low frequency alternating magnetic field [J]. ISIJ International, 1997, 37(11): 1112 - 1119.
- [2] DENG Kang, REN Zhong-ming, JIANG Guo-chang.

- Theoretical and experimental analysis of continuous casting with soft-contacted mould [J]. *Trans Nonferrous Met Soc China*, 2000, 10(3): 314 - 319.
- [3] Cha P R, Hwang Y S, Nam H S, et al. 3D numerical analysis on electromagnetic and fluid dynamic phenomena in a soft contact electromagnetic slab caster [J]. *ISIJ International*, 1998, 38: 403 - 410.
- [4] Yoshida N, Furuhashi S, Tanaka T. Newly designed stiff EMC mold with imposition of super-high frequency electromagnetic field [A]. *Proceeding of the 3rd International Symposium on Electromagnetic Processing of Materials* [C]. Nagoya: ISIJ, 2000: 388 - 391.
- [5] 王 玮, 王 强, 邓安元, 等. 钢的软接触电磁连铸结晶器的研究进展 [J]. *铸造*, 2003, 52(6): 379 - 383.
- WANG Wei, WANG Qiang, DENG An-yuan, et al. The recent development of soft-contact mold of electromagnetic continuous casting for steel [J]. *Foundry*, 2003, 52(6): 379 - 383.
- [6] 王 强, 赫冀成, 王恩刚, 等. 软接触电磁连铸用无切缝结晶器 [P]. 中国专利: 02132867.6, 2002.
- WANG Qiang, HE Jì-cheng, WANG En-gang, et al. The Slit-Less Mold Used in Soft Contact Electromagnetic Continuous Casting [P]. Chinese Patent: 02132867.6, 2002.
- [7] 金百刚, 王 强, 邓安元, 等. 两段式方坯结晶器内电磁场分布及弯月面行为 [J]. *铸造*, 2005, 54(6): 556 - 559.
- JIN Bai-gang, WANG Qiang, DENG An-yuan, et al. The distribution of magnetic flux density and molten metal meniscus behavior in two-stage billet mold [J]. *Foundry*, 2005, 54(6): 556 - 559.
- [8] 雷作胜, 任忠鸣, 邓 康. 调幅交变磁场下圆柱形金属液内电磁力分布 [J]. *中国有色金属学报*, 2002, 12(5): 30 - 35.
- LEI Zuò-sheng, REN Zhong-ming, DENG Kang. Distribution of electromagnetic force in cylinder shape liquid metal under amplitude modulated alternating magnetic field [J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2002, 12(5): 30 - 35.
- [9] 于光伟, 贾光霖, 王恩刚, 等. 方坯软接触电磁连铸初始凝固区高频磁场的分布 [J]. *金属学报*, 2002, 38(2): 208 - 214.
- YU Guang-wei, JIA Guang-lin, WANG En-gang, et al. High frequency magnetic field distribution in region of initial solidification within soft contact electromagnetic continuous casting mold of billet [J]. *Acta Metall Sin*, 2002, 38(2): 208 - 214.
- [10] 王 辉, 金俊泽, 李廷举. 电磁铸造液柱高度数学模型的建立及应用 [J]. *中国有色金属学报*, 2004, 14(9): 1465 - 1469.
- WANG Hui, JIN Jun-ze, LI Ting-ju. Mathematical modeling for liquid column height in electromagnetic casting and its application [J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2004, 14(9): 1465 - 1469.
- [11] 于光伟, 贾光霖, 王恩刚, 等. 方坯软接触电磁连铸结晶器内钢液弯月面行为的热模拟 [J]. *金属学报*, 2000, 36(12): 1253 - 1257.
- YU Guang-wei, JIA Guang-lin, WANG En-gang, et al. Thermal physical simulation of meniscus behaviors of molten steel in the soft contact electromagnetic continuous casting mold of billet [J]. *Acta Metall Sin*, 2000, 36(12): 1253 - 1257.
- [12] Cho Y W, Oh Y J, Chung S H, et al. Mechanism of surface quality improvement in continuous cast slab with rectangular cold crucible mold [J]. *ISIJ International*, 1998, 38: 723 - 729.
- [13] ZHANG Zhì-feng, LI Ting-ju, WEN Bin, et al. Electromagnetic continuous casting by imposing multi-electromagnetic field [J]. *Trans Nonferrous Met Soc China*, 2000, 10(6): 741 - 744.
- [14] Nakata H, Inoue T, Mor H, et al. Improvement of billet surface quality by ultra-high-frequency electromagnetic casting [J]. *ISIJ International*, 2002, 42(3): 264 - 272.
- [15] Joonpyo P, Hoyoung K, Heetae J, et al. Continuous casting of steel billet with high frequency electromagnetic field [J]. *ISIJ International*, 2003, 43(6): 813 - 819.
- [16] 邓安元, 于光伟, 贾光霖, 等. 软接触电磁连铸结晶器内三维弯月面形状的数值模拟 [J]. *钢铁研究学报*, 2001, 13(3): 10 - 14.
- DENG An-yuan, YU Guang-wei, JIA Guang-lin, et al. Numerical simulation of three-dimensional meniscus shape in electromagnetic soft-contact mold [J]. *Journal of Iron and Steel Research*, 2001, 13(3): 10 - 14.

(编辑 李艳红)