

钢的软接触电磁连铸技术的研究进展

王宏明 李家旺 徐明喜 李桂荣
(江苏大学材料科学与工程学院, 镇江 212013)

摘 要 钢的软接触电磁连铸技术(Soft-Contact Electromagnetic Continuous Casting)是利用高频交变电磁场在结晶器内铸坯初始凝固区施加电磁压力来减少钢液与结晶器壁的接触压力,从而减小结晶器振动对铸坯表面质量的影响,降低拉坯阻力和减弱初始凝固点的传热来提高铸坯表面质量。分析了实现钢的软接触电磁连铸在结晶器结构、材质以及电磁场参数等方面需要解决的问题,并介绍了该技术的最新研究成果:高频调幅磁场及无结晶器振动的电磁连铸技术。

关键词 软接触 电磁连铸 铸坯 表面质量

Advance in Research of Soft-Contact Electromagnetic Continuous Casting Technology for Steel

Wang Hongming, Li Jiawang, Xu Mingxi and Li Guirong
(School of Material Science and Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013)

Abstract The soft-contact electromagnetic continuous casting for steel is a technology using high frequency alternating electromagnetic field to load a electromagnetic force on initial solidification zone of billet in mold decrease contact pressure between liquid steel and mold wall, thus reducing the effect of mold oscillation on surface quality of billet, decreasing billet casting friction drag and lowering heat transfer at initial solidification point to advance the surface quality of billet. The issues that need to be resolved including structure and material of mold and parameters of electromagnetic field to realize soft-contact electromagnetic continuous casting are analyzed and the latest research outcomes- high-frequency amplitude- modulated field and mold oscillation-less electromagnetic continuous casting are presented in this paper.

Material Index Soft-Contact, Electromagnetic Continuous Casting, Casting Billet, Surface Quality

为了提高连铸坯的表面质量,生产出直接轧制或直接热装轧制所需要的无表面缺陷的高温连铸铸坯,提出了钢的软接触电磁连铸技术(Soft-contact Electromagnetic Continuous Casting)。该技术是利用交变电磁场在结晶器内铸坯的初始凝固区施加电磁压力来减少液体金属与结晶器壁的接触压力,从而减小结晶器振动对铸坯表面质量的影响,并增加了铸坯与结晶器间的润滑,降低拉坯阻力和减弱初始凝固点的传热来提高铸坯的表面质量。此外,该技术在轻金属连铸上应用的实践还表明,它可以大幅度提高结晶器的寿命,从而提高连铸机的作业率和生产率,这一效果也是目前钢连铸发展所必需的。

由于软接触电磁连铸的诸多优点,使得该技术一经提出^[1],就受到世界连铸技术工作者的重视,并投入大量人力、物力进行相关技术的研究开发^[2-5]。目前,日本和韩国在小尺寸圆坯和方坯钢的连铸实验上相继获得了成功^[6,7],韩国已在埔

项钢厂成功地进行了工业试生产^[8]。

国内一些高等院校和企业也通力合作,开展了一系列基础研究和应用研究,取得了丰硕的成果,目前该技术正处于产业化攻关阶段,实现工业化主要存在的问题是结晶器的材质、结构和磁场参数的控制^[9-11]。

本文介绍了该技术的近期发展状况,分析了该技术的最新发展动向和所存在的主要问题,以给该技术的研究和应用提供参考。

1 软接触电磁连铸技术的原理

软接触电磁连铸施加的是高频电磁场,为使高频磁场得以穿透结晶器壁,在结晶器壁沿铸坯方向上设有割缝,如图 1 所示。

当感应线圈在结晶器内产生高频电磁场 B 时,在金属液内诱发感应电流 J ,两者交互作用在熔体中产生电磁力 $F = J \times B$,若介质的磁导率为 μ ,则根据麦克斯韦方程组得:

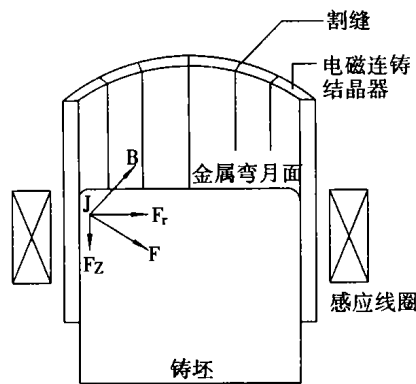


图 1 软接触电磁连铸原理示意图

Fig. 1 Schematic of principle of soft-contact electromagnetic continuous casting

$$F = J \times B = -\frac{\nabla B^2}{2\mu} + \frac{(B \cdot \nabla) B}{\mu} = F_r + F_z$$

方程的第一项是垂直熔体侧表面指向液芯的电磁力的径向分力 F_r ，它降低了熔体与结晶器之间的接触压力，因此称为软接触；第二项旋度不为零，它是使熔体旋转的周向力 F_z ，对熔体起电磁搅拌的作用。根据 Maxwell 方程， F_r 与 F_z 的关系为：

$$\left| \frac{F_r}{F_z} \right| \approx \frac{L}{\delta}$$

式中： L —铸坯的特征长度，即铸坯横断面尺寸； δ —集肤层厚度，材料一定时，主要与磁场频率有关，计算式如下，式中 σ 、 μ 、 f 分别表示金属的电导率、磁导率和磁场频率。

$$\delta = \sqrt{\frac{1}{\pi \cdot \sigma \cdot \mu \cdot f}}$$

因此，磁场频率越高，集肤层厚度 δ 就越小，电磁压力 F_r 与电磁搅拌 F_z 的比值越大，电磁力主要表现为电磁压力。相反，频率低，则电磁力表现为周向的电磁搅拌力。这就是要实现电磁软接触必须采用高频电磁场的道理。另一方面，磁场的频率越高，由于集肤效应，磁场受到严重的屏蔽，损失在结晶器壁上的能量越多，这会使得电磁压力降低。因此，对不同材质和结构的结晶器，实现软接触所最适宜的磁场频率也存在很大差异。一般认为：软接触高频磁场的适宜频率范围在 1 ~ 20 kHz^[2,4,6,12]，但日本研究者最近的研究打破了这一范围，使用 100 kHz 的超高频磁场，并在钢连铸上成功的应用，得到表面光洁、无裂纹等缺陷的

钢坯，并且他们认为，提高磁场的频率，有助于提高钢液面的稳定性，因此更好的控制了初期凝固，但其结晶器材质没有报道^[7]。

2 软接触电磁连铸技术研究的主要内容和存在问题

2.1 软接触电磁连铸结晶器的研究

软接触电磁连铸技术对结晶器的一般要求是：(1) 结晶器的透磁率要高，高频磁场在结晶器壁上的损耗要小，以保证在铸坯表面形成软接触所需的电磁压力；(2) 结晶器要有足够的强度和抗热震性，不易产生变形和热应力裂纹，内腔面光滑；(3) 结晶器要有良好的冷却效果，保证铸坯得到足够的冷却强度，以免发生铸坯变形和拉漏事故。由于钢的温度高，浇铸量大，作业的连续性强，且钢的密度大，所需要的电磁压力非常大，因此钢的电磁软接触连铸对结晶器的上述要求更严格，成为该技术能否在工业生产中成功应用的关键。因此，软接触电磁连铸结晶器的开发是目前的主要研究课题^[13]。研究的主要方向为在结晶器强度满足指标的前提下，尽量提高结晶器的透磁率和结晶器内磁场的合理分布。

软接触结晶器在结构上分为割缝式 and 无缝式两类。

2.1.1 割缝式软接触电磁连铸结晶器

割缝式结晶器是通过在结晶器壁上沿一定方向切出数条缝隙，使电磁场穿透结晶器直接作用在钢液上，同时由于结晶器壁被分割，减弱了感应涡流的形成，从而减小结晶器壁对磁场的屏蔽作用。割缝式软接触结晶器的主要设计参数是割缝数目、割缝宽度、割缝角度和割缝部位，研究这些参数对结晶器透磁率、结晶器内磁场分布特性和结晶器强度的影响与工业上的可应用推广性。

研究表明^[14]，增加割缝数，可提高结晶器的透磁率和结晶器内磁场分布的均匀性；但当割缝数达到一定数量后，结晶器内磁场得到最大值，而且从结晶器的加工难易和强度的角度考虑，割缝数目也不应过多。

关于割缝宽度，研究发现，割缝宽度增加，对结晶器内部磁通密度增加效果不大，而且使结晶器内磁场分布不均匀，恶化铸坯的表面质量，而且容易引起漏钢事故。李廷举等的研究认为^[15]，割缝在 0.5 mm 为宜。

关于割缝角度,多数软接触结晶器的割缝均平行于铸坯方向排列,这种切缝使得结晶器内磁场很难均匀分布,任忠鸣等发明了一种斜切缝式软接触电磁连铸结晶器,其切缝于结晶器轴线成一定的角度,有利于提高结晶器内磁场分布的均匀性^[16]。

关于切缝部位,一种是通体割缝结晶器,一种是半割缝结晶器;前者割缝从中部开始到结晶器顶,这种结晶器加工容易,但整体强度低,对工业生产带来不稳定性;后者距结晶器顶部5 mm左右距离不开缝,强度较好,冷却水回路复杂,加工困难,也不容易维护,给生产带来不便。

总之,割缝式结晶器有效提高了透磁率,但结晶器内磁场分布受割缝参数影响很大,需要在这方面多下功夫。同时,由于割缝的存在,不可避免地降低了结晶器的强度,增加了设计加工及生产上维护的难度,所以一些研究者把目光转向了无缝式结晶器。

2.1.2 无缝式软接触电磁连铸结晶器

无缝式软接触电磁连铸结晶器可归结为两种设计构想。(1)分段式无缝软接触结晶器;(2)整体式无缝软接触结晶器。

分布式结晶器是结晶器内钢液面以上采用不锈钢材质以增加透磁性和结晶器的强度,在金属液面以下部分采用铜质,如图2所示。研究表明^[17],在相同磁场条件下,此种分段式结晶器内的磁通密度是普通铜质结晶器内磁通密度的1.8倍,在结晶器内部产生的电磁力是普通结晶器的3.4倍。但该结晶器存在两种不同材质处平滑衔接的困难,由于热物性的差异,在高温热应力冲击下,容易给铸坯带来严重缺陷。

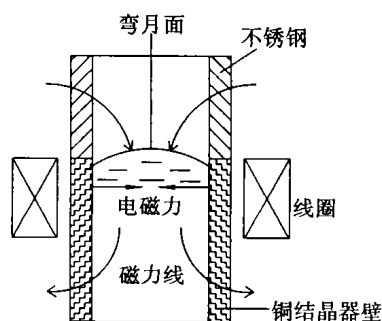


图2 分段式无缝软接触结晶器

Fig.2 Schematic of subsection style slit-less soft-contact mold

整体式无缝软接触结晶器是在高电导率的铜或铜质合金之间填充高电阻率的铜合金粉末,经热等静压烧结加工成一体^[18]。这种结晶器在强度上有很大提高,但目前仍没有完全解决大幅度提高透磁率和磁场均匀化的难题,因此,结晶器材质的选择问题,即选择一种导热性能好,且透磁率高和强度好的材料来制作结晶器,东北大学提出选用梯度复合材料已取得一些进展。

2.2 电磁场工艺参数对铸坯表面质量的影响

2.2.1 磁场分布特性

由于电磁边缘效应使得线圈内磁感应强度在轴向上的分布并不均匀,在空载条件下,多位研究人员研究试验证实:在拉坯方向上,磁感应强度在线圈中心处出现最大值,并向两端递减;当结晶器内有金属液时,线圈轴向上的最大磁感应强度值点位置上移到弯月面下方附近,而且有金属浇铸时,同一线圈高度面上磁场的分布也与空载时不同,但具体的变化情况与结晶器的结构、材质和浇铸金属有关,研究者得出的结论并不一致,而这些对充分发挥软接触的作用又是至关重要的^[14]。因此对于浇铸状态下,结晶器内磁场分布特性还有待进一步研究。这也是目前实现电磁软接触的难点之一。

2.2.2 最佳电磁参数

高频磁场的频率为18 kHz时,输入电流增加,铸坯的表面光洁度明显提高,但存在最大值。研究表明^[10],当结晶器内的磁感应强度小于0.075 T时,随输入电流增加,磁感应强度增加,铸坯表面质量提高;当磁感应强度超过0.075 T后,增加输入电流,可以观察到结晶器内液面发生明显的波动,拉出的铸坯表面粗糙度增加。因此,控制输入线圈的功率,从而控制结晶器内的磁感应强度是控制铸坯质量的关键。

3 软接触连铸技术的最新发展方向

最新研究认为:在施加高频(1~20 kHz)磁场的同时,施加一个频率和连铸系统的固有频率接近的间断磁场即低频(4~5 kHz)磁场,用来调节高频磁场的幅值,对提高铸坯的表面质量有更好的效果,这就引入了高频调幅磁场。试验证明:调幅磁场的频率和施加的时间对铸坯表面质量有重要影响,与结晶器振动同步的调幅磁场具有良好的效果,在结晶器处于正滑脱期时施加调幅磁场

的效果明显优于在结晶器处于负滑脱期施加。对于该项技术,上海大学的雷作胜、任忠鸣等作了系统的研究,已取得很大进展,并在此基础上,对高频调幅磁场下,无结晶器振动的电磁连铸技术进行了研究^[19,20],这在日本也有相关的报道^[21]。可以说优化磁场的施加方式,最终取代结晶器振动,彻底消除连铸坯表面振痕是高效、高质量铸坯连铸的发展方向之一。

参考文献

- 1 Vives C. Electromagnetic Refining of Aluminum Alloys by the CREM Process: Part I. Working Principle and Metallurgical Results. Metallurgical and Materials Transactions B, 1989, 20B(10): 623
- 2 Tanaka T, Kurita K, Kuroda A. Mathematical Modeling for Electromagnetic Field and Shaping of Melts in Cold Crucible. ISIJ International, 1991, 31(4): 350
- 3 Nakata H, Kokita M, Morisita M, et al. Improvement of Surface Quality of Steel by Electromagnetic Mold. International Symposium on Electromagnetic Processing of Material. ISIJ International, 1994, 34(3): 161
- 4 Park J, Sim D, Jeong H, et al. Effect of High Frequency Electromagnetic Field on Continuously Cast Billet. ISIJ International, 1999, 39(12): 57
- 5 任忠鸣,董华锋,邓康,等.软接触结晶器电磁连铸中初始凝固的基础研究.金属学报,1999,35(8):851
- 6 Park J, Kim H, Jeong H, et al. Initial Solidification Control of Continuous Casting Using Electromagnetic Oscillation Method. ISIJ International, 2003, 43(6): 807
- 7 Nakata H, Inoue T, Mort H, et al. Improvement of Billet Surface Quality by Ultra-high-frequency Electromagnetic Casting. ISIJ International, 2002, 42(3): 264
- 8 Kim H, Park J, Jeong H, et al. Continuous Casting of Billet with High Frequency Electromagnetic Field. ISIJ International, 2002, 42(2): 171
- 9 于光伟,贾光霖,王恩刚,等.方坯软接触电磁连铸实验研究.钢铁,2002,37(5):19
- 10 雷作胜,任忠鸣,阎勇刚,等.软接触结晶器电磁连铸保护渣道的动态压力.金属学报,2004(5):546
- 11 周月明,张永杰.软接触电磁连铸技术及工业应用前景.宝钢技术,2003(1):1
- 12 董华锋,任忠鸣,钟云波,等.软接触结晶器电磁连铸中磁场的均匀化.钢铁研究学报,1998,10(2):5
- 13 王玮,王强,邓安元,等.钢的软接触电磁连铸结晶器的

4 结束语

钢的软接触电磁连铸技术是大幅度提高铸坯表面质量的一项可行技术,对软接触电磁连铸结晶器和电磁场参数已经作了很多研究工作,但距离实现钢连铸的工业化生产还有待对结晶器设计、电磁参数控制等问题作大量系统的、量的研究工作。

- 研究进展.铸造,2003,52(6):379
- 14 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.金属学报,2002(2):208
- 15 李廷举,佐佐健介,浅井滋生.间断高频磁场作用下连铸铸型内金属液的运动和铸坯的表面质量.金属学报,1997,33(5):524
- 16 任忠鸣,邓康,周月明,等.软接触电磁连铸结晶器.中国专利 96222452,1996.9
- 17 钱忠东,李本文,赫冀成.电磁连铸复合式结晶器内电磁场的数值模拟.东北大学学报,2001,22(1):79
- 18 Suzuki T, Shibata T, Mori H. The Slit2 Less Mold with the Composite Material for the Electromagnetic Casting. The 3rd International Symposium on Electromagnetic Processing of Materials EPM 2000. Nagoya, Japan, ISIJ International, 2000, 402
- 19 雷作胜.连铸坯表面振痕形成机理及其电磁控制技术.上海大学博士学位论文,2004
- 20 Lei Zuosheng, Ren Zhongming, Deng Kang, et al. Experimental Study on Mold Oscillation-less Continuous Casting Process under High Frequency Amplitude-modulated Magnetic Field. ISIJ International, 2004, 44(11): 1842
- 21 Sumi Ikuhiro, Shimizu Hiroshi, Nishioka Shinichi. Initial Solidification Control of Continuous Casting Using Electromagnetic Oscillation Method. ISIJ International, 2003, 43(6): 807

王宏明(1974-),男,讲师,上海大学博士生,2001年包头钢铁学院硕士毕业,从事炼钢和连铸技术研究。

收稿日期:2005-01-19

下 期 要 目

800 MPa 级超细晶粒钢研究现状和发展趋势	宋立秋
合金钢连铸中间包流场的数值模拟和应用	王硕明等
高氮 Fe-Cr-Mn-Ni 系奥氏体不锈钢的加压感应熔炼	张峰等
形变对无取向硅钢 50W470 组织和力学性能的影响	孙述利等
RH-PTB 真空精炼装置内粉剂混合特性的水模型研究	杜成武等
高碳钢连铸坯加热脱碳的有限元模拟	黄灿等
冷镦钢冶炼用新型复合脱氧剂的研究	王厚昕等