

·技术讲座·

连铸电磁冶金技术

第四讲:板坯连铸结晶器电磁制动技术

毛 斌

(中国科学院力学研究所)

Electromagnetic metallurgical technology for continuous casting

Lesson four

Mold electromagnetic brake for continuous casting of slab.

Mao Bin

(Institute of Mechanics Chinese Academy of Sciences)

1 发展背景

对连铸生产的要求归结到一点就是高生产率下确保高质量。决定铸坯质量的重要因素之一是结晶器内钢水的流动和传热。结晶器内的流动支配着结晶器内夹杂物和气泡的上浮分离;弯月面附近的流动又支配着保护渣的卷吸及保护渣层熔融和铺展。因此,提高铸坯质量的关键是有效地控制结晶器内钢水的流动。

由磁流体力学理论可知,一定构形的外加恒定磁场有阻滞导电液体的流动和抑制湍流的作用。基于这一思路,将磁流体力学(MHD)和冶金学结合,开发成板坯连铸结晶器电磁制动技术。目前,它已成为控制高速板坯连铸结晶器内钢水流动获得优质铸坯的重要技术手段。

80年代初,ABB公司和日本川崎公司合作开发成局部区域电磁制动(Electromagnetic Brake: EMBr)技术;90年代初又开发成全幅一段电磁制动(Electromagnetic Mold Brake Ruler: EMBr-Ruler)技术,工业应用都取得了较好的冶金效果。需要指出的是,前者不能制动整个结晶器宽度的流动,使水口下方和窄面附近分流过强;后者不能有效制动向上的反转流股和窄面附近的通道流动。为了克服两者的

不足之处,90年代中川崎公司独立开发成全幅二段电磁制动(Flow Control Mold: FC Mold)技术,其中上段磁场位于弯月面附近,用于抑制弯月面的波动;下段磁场位于水口下方,用于制动从水口吐出的高速流股,并在其下游获得“活塞”流动。工业应用表明,FC Mold比前两者具有更好的冶金效果。

据不完全统计,至1996年在国内范围内已有近30套各种类型的电磁制动装置用于板坯和薄板坯连铸。

从80年代末起,国内也相继开展了各种类型电磁制动的实验和理论研究。90年代初研制成国内第一台板坯连铸结晶器局部区域电磁制动装置并进行实机应用,取得了改善铸坯表面质量和减少内部夹杂的良好效果。

2 工作原理

电磁制动过程含有两个基本效应,即制动效应和搅拌效应。电磁制动的工作原理是在板坯结晶器的两个宽面处,外加一对恒定磁场,其方向从一个宽面垂直穿过钢水到达另一个宽面。从浸入式水口(SEN)的两个侧孔吐出的流股,以相当大的速度垂直切割外加的恒定磁场,就在其中感应起电势 \vec{E} 。因钢水有导电率 σ ,由此感生起感应电流

$$\vec{j} = \sigma \vec{E} = \sigma \vec{V} \times \vec{B}$$

其中 \vec{V} —流股速度, \vec{B} —外加的恒定磁感应强度。感应电流的方向与流股的方向和外加磁场方向相垂直,符合 Fleming 右手定则。该感应电流与外加恒定磁场的相互作用,在流股上产生电磁力

$$\vec{f} = \vec{j} \times \vec{B}$$

它们也相互垂直,符合 Fleming 左手定则。电磁力是体积力,作用在流股的体积元上。它们的相互关系见图 1。

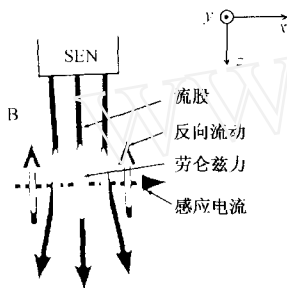


图 1 电磁制动的工作原理

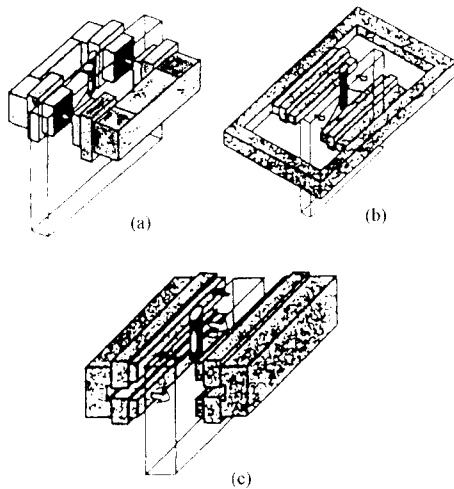


图 2 三种类型电磁制动装置示意图

由图可见,电磁力与流股的方向相反,从而制动了流股,这是制动效应。由于制动的结果,流股分裂造成分散的流动,这是搅拌效应。借助这两个效应控制结晶器内钢水的流动,就是板坯连铸结晶器电磁制动的工作原理。

3 电磁制动技术的演变

板坯连铸结晶器电磁制动技术的演变可以从两个方面来了解,即各种类型的电磁制动装置及相应的结晶器内钢水流场的数值模拟。

3.1 各种类型的电磁制动装置

3.1.1 局部区域电磁制动装置 EMBR

EMBR 构成的示意图见图 2(a)。其磁场特点是:有两个方向相反的局部的磁场作用区,分别位于 SEN 的左右两侧,俗称局部区域。尽管两个磁场作用区内的磁场方向相反,根据其工作原理,感应电流方向也相反,在流股中感生的电磁力的方向始终与各自的流股方向相反,从而能有效地制动由 SEN 两个侧孔吐出的流股。

根据实践,电磁制动器采用分体式结构,而结晶器水箱采用分层式结构,可以比较合理地解决结晶器冷却和制动器安装之间的矛盾,而当 EMBR 拆下时,结晶器水箱可以继续使用,这种结构形式特别有利于现有连铸机采用电磁制动装置。

无论哪种类型的电磁制动装置都采用直流电源激磁,在结晶器内建立恒定磁场,由于它不随时间交变,当它穿过结晶器铜板时,其强度不受影响,故结晶器铜板厚度可以保持不变。但在电磁制动器附近的一定距离内,结晶器的一些构件如结晶器水箱、压紧装置、调宽装置等等都应采用非磁性不锈钢制成,以避免磁路短路,降低结晶器内磁场强度,影响制动效果。

3.1.2 全幅一段电磁制动装置 EMBR-Ruler

EMBR-Ruler 的示意图见图 2(b)。其磁场特点是在结晶器内建立覆盖整个结晶器宽度的一个水平磁场,俗称全幅一段;磁场经由结晶器框架制成的磁轭构成闭合磁路。

3.1.3 全幅二段电磁制动装置 FC Mold

FC Mold 构成的示意图见图 2(c)。它与 EMBR 相类似也有两个方向相反的覆盖整个结晶器宽度的磁场作用区。与 EMBR 不同的是,两个磁场作用区分别位于水口侧孔的上下方。由图 2(c)可见,FC Mold 有上、下两段磁场,它们起了不同的作用:上段磁场主要用于稳定弯月面,下段磁场主要用于制动向下侵入流动。

3.2 各种类型电磁制动数值模拟的结果

3.2.1 EMBR 的流场特征

图 3 是基于济钢板坯连铸工艺参数,在有或无 EMBR 的流场数值模拟的一个结果。济钢板坯连铸工艺参数是:板坯尺寸 $200 \times 1400\text{mm}^2$,水口侧孔倾角向下 30° ,拉速 $1\text{m}/\text{min}$, $B_m = 0.15\text{T}$ 。图 3(a)是无 EMBR 工况的流场形貌。其特征是过热钢水从水口侧孔吐出,以高速冲向窄面,在窄面附近分裂成向上的反转流股和向下的侵入流股,它们分别在主流股的上、下形成两个环流区。由于过热流股对窄面的冲击,易使初生坯壳重熔,向下侵入的流股冲向液相

穴深处,向上反转流动使得在弯月面附近流速过高,湍流过大,导致弯月面波动较大,特别是在窄面附近弯月面的拱起。

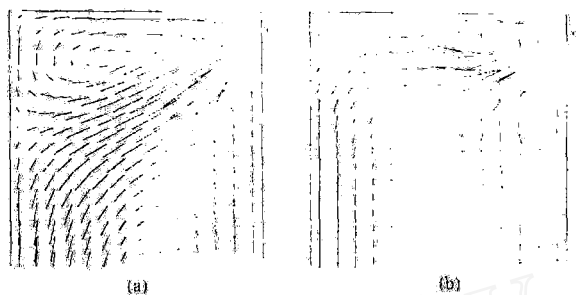


图3 EMBR的流场形貌

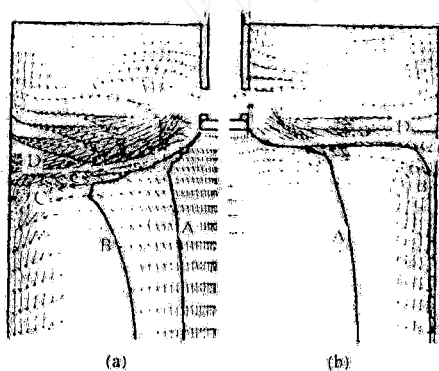


图4 有或无 EMBR-Ruler 的流场形貌

图3(b)是EMBR的一个流场形貌,由图可见,与图3(a)比较,结晶器内流场有明显的变化:

- 在磁场作用下,从SEN侧孔吐出的流股受到制动,有效地减小流股速度,减速率可达50%;
- 向上的反转流股减弱,上环流区位置提高,范围缩小;
- 下环流区基本上不出现,向下的流动速度降低,流动分布比较均匀。但是EMBR的一些不足之处是:
 - 局部区域磁场主要集中于水口附近,只能制动从水口侧孔吐出的流股,不能有效制动整个宽度的流动;
 - 当磁场超过一定强度时,水口下方和窄面附近分流过强。
 - 由于上环流区在磁场作用区上方且靠近弯月面,弯月面附近的流动不能得到充分制动,使弯月面波动和湍流仍然过大。

3.2.2 EMBR-Ruler 的流场特征

图4是R.H.M.G.Nabben基于Hoogoven Bos的连铸机的工艺参数,在有或无EMBR-Ruler的流场数

值模拟的一个结果。其工艺参数是:板宽1300mm,拉速1.57m/min, $B_m = 0.24T$ 。由图4可见,EMBR-Ruler对结晶器内钢水流动的主要影响是:

- 从SEN吐出的向上流股受水平磁场的排斥作用,向上提升,使上环流区位置提高。
- 从SEN吐出的流股必须经过水平磁场作用区才能向下流动,使向下流动大大减速,分布也较均匀,下环流区几乎不出现。
- 沿窄面向下的流动大大减小。
- 由于向下流动减速,钢水在磁场作用区上面的滞留时间增加,提高弯月面附近的温度。

计算表明,EMBR-Ruler的一些不足之处是:

- 在窄面附近流动形成旁路,即通道流动,磁场越强通道流动也越严重,使流动均匀性总体上变差。
- 磁场太强,流股在充分减速之前就被水平磁场推出来,从而造成弯月面附近流速增加,使弯月面湍流和脉动加剧。

3.2.3 FC Mold 的流场特征

图5是基于攀钢的工艺参数,在有和无FC Mold的流场的数值模拟的结果。其工艺参数是:板宽1200mm,拉速1.7m/min,水口侧孔倾角向下 15° , $B_m = 0.30T$ 。由图5可见,FC Mold流场形貌的特征是:

- 从SEN吐出的流股受上、下段磁场的制动,使钢水在两个磁极间环流;
- 在下段磁场下方,不再出现环流,形成均匀的“活塞”流动;
- 弯月面附近的流动大大地减小。

与EMBR Ruler比较,只要磁场足够大,在窄面附近不会形成强的向下通道流动;也不会引起弯月面的过大波动。

FC Mold的不足之处是,从冶金学分析,弯月面附近要保持适当的流动,使过热钢水能将热量传递给弯月面,这就要求上段磁场不能太强。而从制动效果分析,又要求下段磁场足够强,使其下方形成均匀的“活塞”流动,但FC Mold结构特点做不到这一点。

3.3 影响电磁制动效果的参数

在上述数值模拟中,分别尝试用各种连铸工艺条件和电磁制动工艺参数对制动效果的影响作分析计算。初步判定下列参数在选择和使用电磁制动技术时需要慎重考虑。这些参数分别是:

连铸工艺参数:板宽、拉速、SEN角度和浸入深度等;

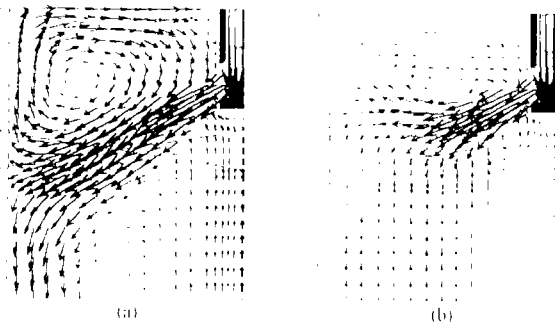


图5 有或无 FC Mold 的流场形貌

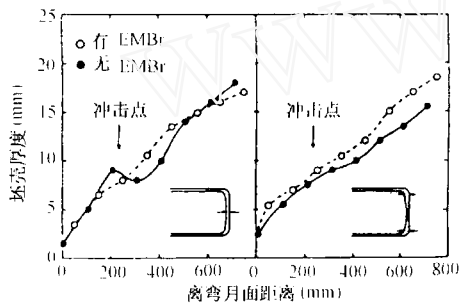


图6 EMBR改进坯壳均匀生长

电磁制动参数:磁极位置、磁极间距、磁极宽度和磁场强度等。

4 电磁制动的冶金效果

从上述各类电磁制动的数值模拟中,可以清晰地看出,尽管它们之间的流场形貌有所不同,但都有一些共同的特点,这些共同特点构成电磁制动的冶金效果的基础。

4.1 冶金效果

4.1.1 促进坯壳均匀生长

过热的钢水流股对窄面的冲击消失,消除了窄面的初生坯壳的重熔,使坯壳生长均匀,因而漏钢和角裂的危险大大减少。EMBr对窄面坯壳生长的影响见图6。

4.1.2 降低弯月面下的水平流速

和稳定弯月面。

向上反转流动的减速,弯月面下的水平流速和湍流大大降低,实践表明,无论哪种类型电磁制动都可使弯月面下的水平流速降低一半,从而稳定了弯月面,见图7。弯月面的稳定不仅防止保护渣的卷吸,而且也使保护渣铺展均匀,从而减少铸坯表面的纵向和横向裂纹,因此,弯月面下水平流速的降低和弯月面的稳定是电磁制动的主要效果之一。

4.1.3 减小流股的向下速度和侵入深度

图8表示在EMBr下沿窄面向下流动的速度分布,由图可见,在EMBr下沿向下流动速度大大降低,使流股侵入深度由4m减小到2m;FC Mold使侵入深度由6m减小到3.5m;EMBr Ruler使侵入深度由6~8m减小到4~6m。

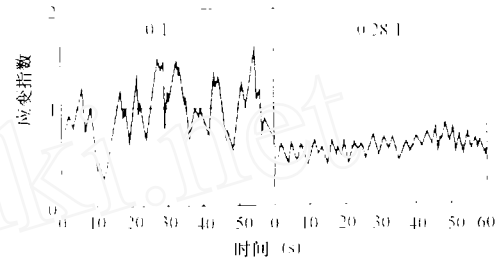


图7 FC Mold的弯月面的脉动

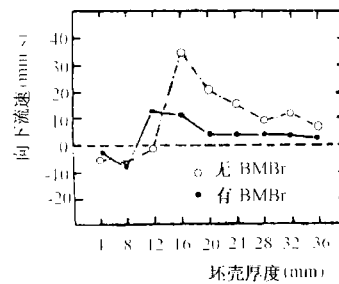


图8 在EMBr下沿窄面向下的流速分布

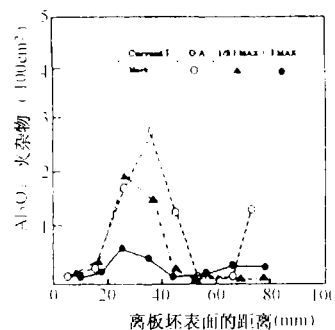


图9 有和无EMBr时铸坯内部夹杂物分布

4.1.4 提高弯月面下的钢水温度

由于向下流股侵入深度变浅,使从SEN吐出的过热钢水在结晶器上部滞留时间延长,过热度在结晶器内被分散,使弯月面附近钢水变得更热。实践表明,EMBr使弯月面下钢水温度提高约8~10℃,EMBr-Ruler使钢水温度提高约5~15℃,而FC Mold则提高8~10℃。

弯月面下钢水温度提高,保护渣的熔融充分,有利于吸收上浮的非金属夹杂物,同时也增加保护渣的流动性,有利于减少表面纵向裂纹和横向裂纹。

4.1.5 减少铸坯内部夹杂物

由于向下流股侵入深度变浅,有利于夹杂物上浮分离;也由于弯月面下水平流速降低和弯月面的稳定,使保护渣卷吸减少,两者都有利于减少铸坯内部非金属夹杂物。图 9 表示有、无 EMBr 时铸坯内部的夹杂物分布。由图可见,EMBr 能较大幅度的减少内部夹杂物而且使其分布均匀,显示了 EMBr 提高铸坯内部清洁度的良好效果,这也是电磁制动的重要效果之一。

4.1.6 提高拉速

由于电磁制动控制了结晶器内钢水流动的行为,使坯壳生长均匀、弯月面水平流速减小、弯月面稳定、侵入深度变浅等等,从而减小了对拉速的限制,有利于提高生产率。

4.2 提高最终产品的质量

4.2.1 对表面质量的影响

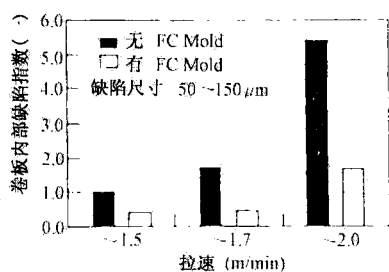


图 10 FC Mold 对冷轧卷板表面质量的作用

图 10 表示在有和无 FC Mold 时汽车用超低碳钢卷板的表面缺陷指数与拉速的关系。由图可见,当拉速 $< 1.7\text{m/min}$ 时,两者表面缺陷指数只相差一半左右;而当拉速 $> 1.7\text{m/min}$ 时,无 FC Mold 的表面缺陷发生率急剧上升,与使用 FC Mold 相比,表面缺陷指数上升 5 倍以上。这个结果表明,由于 FC Mold 的上段磁场的作用,降低了弯月面下的流速和湍流,减小弯月面的波动,使保护渣卷吸明显减少。

4.2.2 对内部质量的影响

图 11 表示有和无 FC Mold 时用磁粉探伤(MT)检测的制罐用马口铁薄板内部缺陷的结果。由图可见,当使用 FC Mold 时,其内部缺陷比不使用 FC Mold 时明显减少。这个结果表明,由于 FC Mold 下段磁场的作用,使钢水向下侵入深度变浅,使非金属夹杂物易于上浮,铸坯内部夹杂物大大减少,提高了钢的清洁度,使最终产品的内部缺陷大大减少。

5 正在探索的新的电磁制动技术方案

5.1 直通单孔浸入式水口的电磁制动技术

目前川崎公司正在开发直通单孔浸入式水口的

结晶器电磁制动技术,该方案采用直通单孔浸入式水口与 FC Mold 结合,见图 12。在千叶厂 3# 连铸机上作实机验证表明,水口堵塞现象消除;板坯表面缺陷指数减少,特别是气孔指数大大降低;表面温度比常规连铸提高约 10°C 。这些结果初步验证了该技术方案实机应用的可能性。

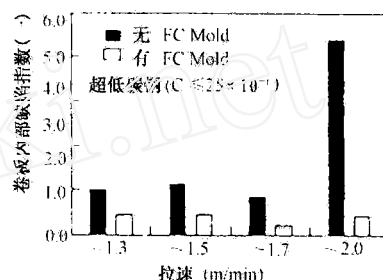


图 11 FC Mold 对冷轧薄板内部质量的影响

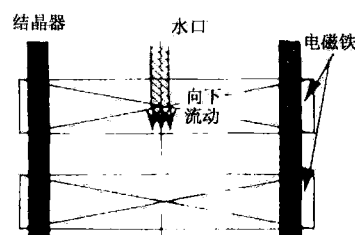


图 12 直通单孔浸入式水口电磁制动示意图

5.2 全幅三段变磁通量电磁制动技术

连铸实践表明,冷轧卷板表面缺陷的发生频率与铸造时的结晶器窄面附近波高有一定关系。波高过大或过小,表面缺陷发生的频率变高,日本 NKK 的实机试验统计表明,波高在 $5 \sim 9\text{mm}$ 之间,表面缺陷发生的频率几乎接近于零。

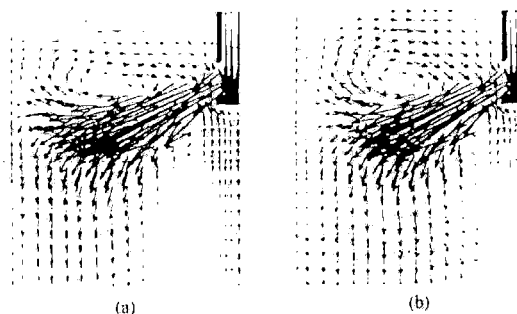


图 13 全幅三段变磁通量电磁制动流场形貌

由上所述,在弯月面附近保持一定的流速,要求 FC Mold 的上段磁场要小一些,而要使向下侵入流动尽可能小,又要求下段磁场尽可能大。这就要求上下两段磁场强度各不相同,但由于 FC Mold 的结构特点,不可能做到这一点。为此提出全幅三段变

磁通量电磁制动方案,见图 13。该方案的特点是采用两个 E 形电磁铁,分别配置在结晶器的两个宽面上,垂直地相对而立,构成上中下三个闭合磁路;上、下两段磁通量比中间一段磁通量小一半。上段用于稳定弯月面,中段实施一次制动,下段实施二次制动,这样既可使弯月面附近保持一定的流速,又可使向下侵入流动得到有效制动。数值模拟结果表明,在相同的参数条件下,全幅三段电磁制动改善了弯月面下的流动,总体上比 FC Mold 要好一些,特别是在高拉速时,其效果更为明显。

(上接第 26 页)

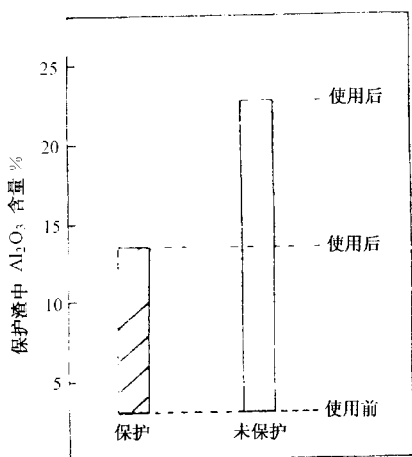


图 5 保护渣中 Al₂O₃ 含量变化

流得以保护,从而减轻了钢中铝的氧化,使得钢中(Al₂O₃)含量减少,所以保护渣经使用后,(Al₂O₃)含量同未保护时相比相应下降。而普碳钢未发现此种现象。由于结晶器保护渣中(Al₂O₃)增量减少,其流动性较未保护时改善,从而有利于结晶器的均匀传热,减少纵裂和漏钢的发生。

4.4 硫印检验

从硫印试片上看,保护浇注与未保护浇注时板坯组织、缺陷基本一致,但未保护浇注的硫印试片上存在明显的针孔缺陷。

4.5 高倍检验

取铸坯(内弧至外弧)样进行高倍观察,经分析,未保护的连铸板坯夹杂物数量较多,尺寸约为 0.15~0.16mm,而经保护的连铸板坯夹杂物数量明显减少,而且夹杂物尺寸较小,约为 0.08~0.03mm。

保护和未保护船用板坯轧制的中板高倍夹杂物评级结果见表 3。

参考文献

- 1 J Nagai et al. Iron and Steel Engineer, 1984, 5: 41 ~ 47
- 2 毛斌等 连铸, 1998, 1: 16 ~ 18.
- 3 R H M G Nabben et al. Ironmaking and steelmaking, 1998 vol 25 (5): 403 ~ 406.
- 4 K H Moon et al. 1997 Steelmaking conference proceedings, 173 ~ 181.
- 5 井户川聪ウ. 川崎制铁技报, 1996 vol 28 (1): 46 ~ 51
- 6 Kazuhro et al. 1994 Steelmaking conference proceedings, 53 ~ 58.
- 7 何达等 1999 年中国钢铁年会论文集.
- 8 奈良正功ウ. 材料与プロセス, 1997 vol. 10: 764 ~ 767.
- 9 毛斌等 第六届全国连铸年会论文集, 1999, 235 ~ 238
- 10 Kouji TaKaTaNi et al. 1989 vol. 29: 1063 ~ 1068

表 3 高倍检验结果

项目	硅酸盐类(级)		氧化铝类(级)		球状氧化物类(级)		硫化物类(级)		检验样品数
	细系	粗系	细系	粗系	细系	粗系	细系	粗系	
保护	/	/	0.5	/	0.5	0.5	1.0	/	10
未保护	/	/	2.0	/	1.5	1.0	1.0	/	10

由表 3 可知,经保护浇注后,氧化铝类夹杂的级别较之未保护时下降,说明保护浇注有利于减少钢中氧化铝类夹杂。这也进一步验证了前述结果。

5 结论

1) 马钢三钢厂超低头板坯连铸机钢包钢流采用长水口保护适合厂情,所研制的保护浇注操作机构能满足工艺要求,结构简单、操作方便、易于掌握。

2) 钢包水口与长水口接缝采用研制的专用密封剂密封,具有良好的保护效果,且简化了操作。

3) 连铸钢包钢流采用保护浇注技术后,取得了下列保护效果:

(1) 有效地避免了钢包钢流的二次氧化,与未保护相比,钢中氧含量下降约 20%,且较为稳定。

(2) 钢水纯净度提高,铸坯质量改善。与未保护相比,电解夹杂总量下降约 30%,且铸坯内弧侧夹杂物偏聚现象大大改善,有利于夹杂物在铸坯断面上的均匀分布。高倍检验也表明,钢中夹杂物数量明显减少,夹杂物尺寸也明显减小。

(3) 船用钢经保护浇注后,结晶器保护渣经使用后,其渣中(Al₂O₃)增加量较未保护时下降,使结晶器保护渣的流动性改善。高倍检验表明,钢中氧化铝类夹杂级别也相应下降,而普碳钢无此现象。

(4) 连铸钢包钢流采用保护浇注已成为马钢三钢厂提高产品质量,开发连铸新品种一项不可缺少的工艺技术,且经济效益显著。