

SPHC 带钢“翘皮”缺陷的工艺控制实践——基于铸坯质量优化

Process Optimization for Reduce Shell Defects in SPHC Strip Steel through Enhanced Billet Quality

供稿|韦耀环, 李文思, 王伟胜, 周律敏, 韦毅, 龙连 / WEI Yaohuan, LI Wensi, WANG Weisheng, ZHOU Lümin, WEI Yi, LONG Lian

内容导读

冷轧带钢在生产中常出现一种名为“翘皮”的表面缺陷, 该缺陷不仅影响产品外观, 更会损害其力学性能, 是制约产品质量提升的关键问题。本文针对 SPHC 系列带钢在生产中频繁出现的夹杂翘皮缺陷, 开展了系统的成因分析与工艺优化实践。通过对缺陷样品进行电镜观察与成分分析, 发现翘皮处存在大量微小夹杂物, 主要成分为氧化铝、二氧化硅、氧化锰等, 部分还含有保护渣特有的氧化钙、氧化钠成分, 说明缺陷主要源于钢液中的氧化物夹杂以及连铸过程中的保护渣卷入。为解决这一问题, 从连铸环节入手, 实施了一系列工艺改进: 选用更大孔径的水口以稳定结晶器内钢液流动; 在中间包内加装挡墙, 优化钢液流场与温度分布; 加强铸机设备精度维护; 细化冷却工艺参数; 并优化排渣操作程序, 减少生产过程中的液面波动。同时, 利用数值模拟软件 FLUENT 对改进前后的中间包流动与传热行为进行了对比分析, 从理论上验证了挡墙对稳定流场、均匀温度的积极作用。实践表明, 上述综合措施实施后, SPHC 带钢的夹杂翘皮缺陷率显著降低, 降幅约达 60%, 有效提升了产品合格率, 为稳定冷轧卷生产、降低生产成本提供了可靠的技术支持。

冷轧工艺作为金属加工领域的关键技术, 在实际生产过程中, 夹杂翘皮为冷轧产品面临的主要问题^[1-4]。该类缺陷不仅影响产品外观, 还严重威胁其力学性能。众多学者深入探究冷轧产品夹杂翘皮问

题后揭示, 大部分冷轧缺陷源自连铸坯的遗传性问题, 其中由铸坯夹杂物引发的冷轧产品表面缺陷占比高达 50%^[5]。此外, 除鳞设备和机间除尘系统运行异常导致的氧化铁皮压入等, 也会产生类似缺陷^[6]。

作者单位: 柳州钢铁股份有限公司, 广西 柳州 545002

王声齐等^[7]与薛正良等^[8]分别对冷轧卷夹杂物及铸坯皮下夹杂进行了详细分析,发现若翘皮部位存在脱碳层,则该缺陷由裂纹引发;若翘皮部位存在保护渣成分,则此类翘皮缺陷往往由卷渣及水口沉积物导致。Souza 等^[9]通过模拟实验探究了气幕挡墙位置与气量对钢中夹杂物去除效果的影响,结果表明,当挡墙位置距离出口 0.56、0.84 m 且气量保持在 3 L/min 时,夹杂物的去除效果最佳。Lei 等^[10]采用分离式中间包结合通道感应加热的创新方法,验证了通道电磁力在夹杂物去除中的作用。荣文杰等^[11]研究不同水口结构对钢液流速及液面波动的影响规律后指出,侧孔面积比过大加剧流场的不对称性,增加卷渣风险,而卷渣可能引发铸坯裂纹、夹渣等严重缺陷^[12]。雷琳琳等^[13]在水口对结晶器流场影响的研究中强调,单一水口设计无法满足所有钢种的生产需求,根据断面及钢种差异选用合适的水口,可有效保障铸坯质量。黄京宇等^[14]通过模拟实验深入研究了无挡墙中间包内的流动情况,发现

无挡墙中间包会扩大包内超低流速区面积,增加回流区及死区面积,进而延长钢液的平均停留时间。

基于上述研究成果,本文针对连铸生产工艺开展优化,以期降低铸坯缺陷率,对提升冷轧产品的整体质量具有重要意义。以某厂板坯连铸机生产的冷轧基板 SPHC 为例,其最高缺陷率达 1.32%,其中夹杂翘皮缺陷出现频次最高,严重影响企业排产计划并增加了生产成本。因此,本文对 SPHC 系列带钢的夹杂翘皮缺陷进行了生产工艺优化实践与探讨。

夹杂翘皮的形貌特征

SPHC 基板夹杂翘皮缺陷的部分特征如图 1 所示(方框区域),此类缺陷从宏观上可分为 2 类:第 1 类缺陷表面相对平滑,但缺陷区域颜色与基体差异明显,呈细长线条状,如图 1(a)所示;第 2 类缺陷部位明显凸起,形成薄片状结构,存在显著分层现象,如图 1(b)~1(d)所示。

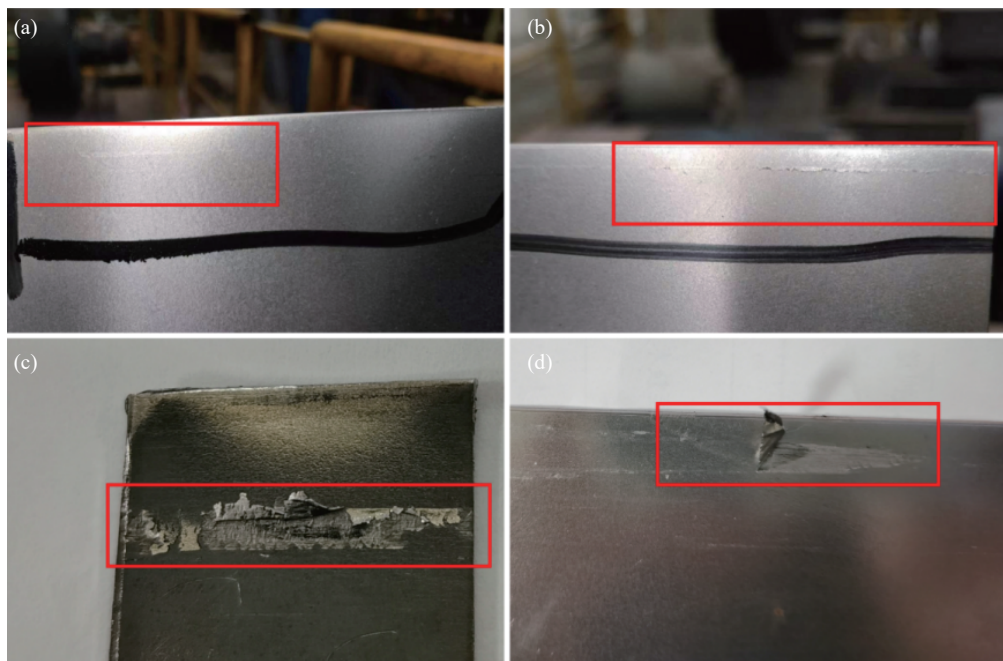


图 1 SPHC 基板夹杂翘皮宏观形貌: (a) 表面平滑; (b~d) 表面分层

图 2 为翘皮部分的横截面微观形貌和宏观形貌,可见翘皮缺陷处存在大量夹杂物;能谱数据如表 1 所示,可见夹杂物主要成分为 Al_2O_3 、 SiO_2 、 MnO ,尺寸基本在 $10\text{ }\mu\text{m}$ 以下,主要集中在靠近表

皮的区域,其来源以钢水中的氧化物为主。需要注意,部分样品翘皮部位的大颗粒夹杂物元素面扫描结果显示,夹杂物主要成分为 CaO 、 SiO_2 、 Na_2O ,成分与连铸保护渣接近,见图 3。此类夹杂物尺寸较

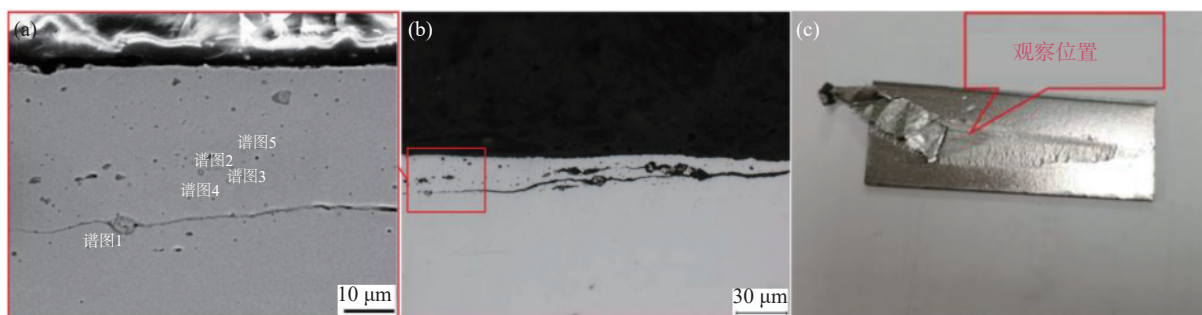


图2 SPHC 基板夹杂翘皮: (a,b) 微观形貌; (c) 宏观形貌

表1 SPHC 基板夹杂翘皮能谱分析 (质量分数)

图2(a)中谱图	O	Al	Si	P	Mn	Fe	%
谱图1	9.31	2.17	2.32	0.65	8.11	77.44	
谱图2	16.35	1.13	0.85		2.83	78.84	
谱图3	9.58				2.08	88.34	
谱图4	6.56	1.28	1.14		4.18	86.84	
谱图5	7.07	0.86	1.89		5.39	84.79	

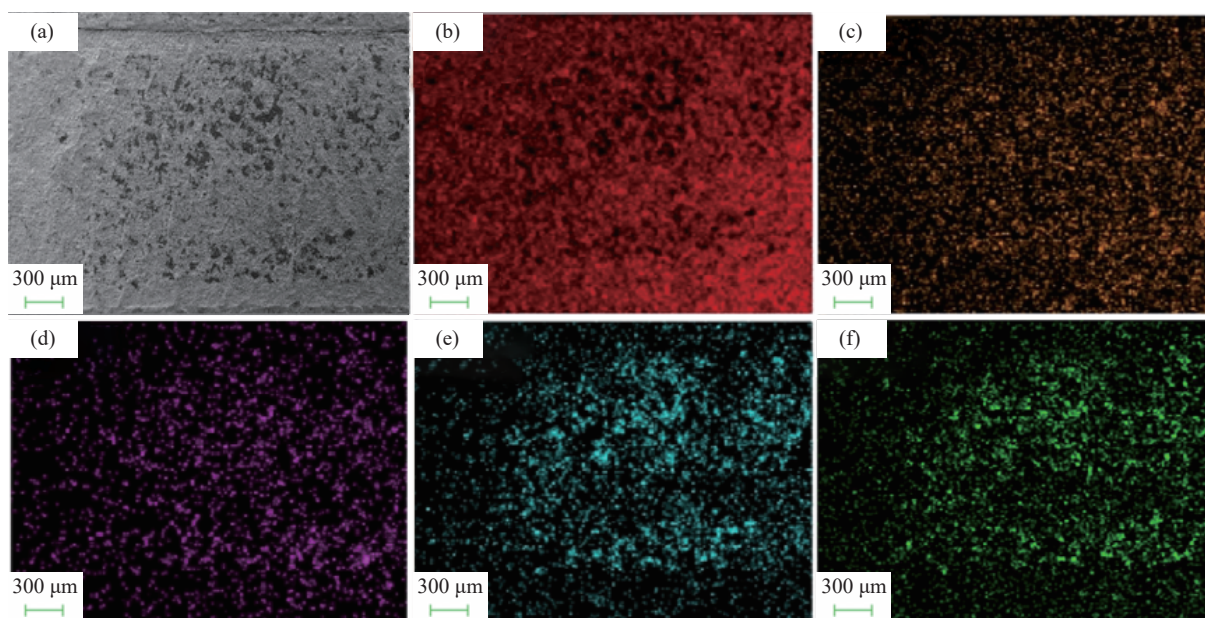


图3 翘皮部位面扫描分析: (a) 微观形貌; (b) Fe; (c) O; (d) Na; (e) Ca; (f) Si

大, 多在 100 μm 左右, 部分甚至超过 300 μm, 严重影响了基体的连续性。综上所述, 翘皮部位的夹杂物成分主要为 Al_2O_3 、 SiO_2 、 MnO 、 CaO 、 Na_2O 等, 其中含保护渣成分的夹杂物尺寸更大。

缺陷分析

翘皮缺陷特征及产生原因

冷轧卷翘皮缺陷的产生原因主要包括铸坯裂

纹、表面氧化铁皮压入、卷渣和夹杂等^[3,5-7]。在轧制过程中, 深宽比较大的裂纹因裂纹处氧化铁与基体的不连续性, 更易在轧材表面形成翘皮, 且此类翘皮部位组织会出现明显的脱碳层及大量氧化质点^[7]。这是由于铸坯在加热炉内加热时, 表面裂纹发生氧化导致裂纹脱碳, 同时在浓度梯度作用下, 氧向钢基体内部扩散, 形成氧化质点。

表面氧化铁皮压入引发的翘皮缺陷, 主要是由

于轧机轧制前，酸洗工序未洗净热轧原料表面的氧化铁皮，后续冷轧过程中氧化铁皮被轧制压入钢板，最终形成缺陷。此类翘皮缺陷处的夹杂物主要成分为氧化铁，无其他夹杂元素^[3]。

卷渣和夹杂是引发冷轧卷翘皮的主要原因。当结晶器液面波动较大时，液面翻滚造成卷渣；卷入的渣随钢液流动被坯壳捕获并残留于铸坯，后续轧制过程中，由于渣的变形性能低于钢基体，卷渣部位出现分层，最终形成翘皮缺陷。由夹渣导致的翘皮缺陷，其夹杂物能量色散谱（EDS）成分与保护渣、水口沉积物接近，且无脱碳层存在。钢水中夹杂物过多时，易聚集长大，部分夹杂物在结晶器内流场作用下与坯壳相遇并被凝固前沿捕获；在轧制过程中，由于夹杂物与钢基体的不连续性，会形成翘皮缺陷，此类翘皮的主要特征是 EDS 检测显示夹杂物为钢中常见夹杂物成分。

图 2、图 3 所示的翘皮部位特征与卷渣及夹杂引发的翘皮特征基本一致，据此可推测，卷渣和夹杂是本文研究的 SPHC 基板翘皮缺陷的主要诱因。此外，由于取样检测具有局限性，铸坯角部裂纹也可能是引发翘皮缺陷的原因^[3-7]。

冷轧缺陷统计数据分析

统计归纳 2024 年 SPHC 基板出现翘皮缺陷时的连铸生产工况（剔除非稳态数据），结果如表 2 所示。可见正常工况下翘皮缺陷占比最高，达 58.72%；其次为拉速调整、排渣及换水口操作工况下翘皮缺陷占比分别为 17.42%、10.47% 和 9.05%。

表 2 不同连铸工况下冷轧产生的翘皮缺陷

操作	缺陷量/t	占比/%
正常工况	846.100	58.72
拉速调整	251.015	17.42
排渣	150.920	10.47
换水口	130.425	9.05
换套管	62.395	4.34
合计	1440.855	100

结合连铸工况与翘皮缺陷的微观特征分析，SPHC 基板翘皮部位均存在大量夹杂物或保护渣成分，且各类非正常工况均会影响结晶器液面的稳定性，进而增加卷渣风险，这表明稳定结晶器液面、

减少钢中夹杂物是降低 SPHC 基板翘皮问题的关键。

改进措施

为减少轧制过程中夹杂翘皮缺陷的发生，提升原料铸坯质量，需结合现场工艺展开分析。正常工况下翘皮缺陷的成因比较隐蔽，主要影响因素包括机械设备工装参数变化、一冷与二冷水的流量匹配度、钢水温度波动、保护渣厚度、中间包流场及结晶器流场等。拉速调整、排渣及换水口操作均会导致中间包流场与结晶器流场发生变化，其中拉速调整需通过调节塞棒开度改变结晶器内钢流大小，易引发液面波动，进而造成卷渣，最终在 SPHC 基板上表现为翘皮缺陷；排渣操作需升高中间包液面，液面升高过程中钢水压力变化会影响结晶器液面稳定性，从而造成卷渣；换水口操作过程涉及拉速变化、保护渣平衡及结晶器液面波动等多重因素，均可能引发卷渣、裂纹等问题。针对上述成因，本文提出以下工艺改进措施。

优化下水口选型

现场正常使用 2 种类型水口，其使用计划主要根据中间包炉龄进行安排，水口形貌如图 4 所示。水口材质为铝锆碳质，长度均为 860 mm，2 种类型的参数差异如下：大孔径水口出口高 75 mm，宽 68 mm，内孔孔径为 75 mm；普通水口出口高 70 mm，宽 60 mm，内孔孔径为 58 mm。生产 SPHC 带钢时，将原有起机换包炉使用大孔径水口、连浇连拉阶段使用普通水口的制度，调整为全程使用大孔径水口。研究表明，大孔径水口能够弱化水口钢流速度，降低钢流对结晶器窄面的冲击，从而减少卷渣风险^[11,13]。

中间包加装挡墙

研究表明，相较于未设置任何控流装置的中间包，内设挡墙的中间包可显著改善钢液流动状态^[14-16]。挡墙可优化中间包内流场，延长钢液流动路径、隔离湍流区和层流区，不仅有利于钢液温度与成分均匀化，而且能促进中大尺寸夹杂物上浮^[16-17]。单流板坯挡墙中间包（以下简称挡墙包）结构如图 5 所示，其包含圆桶状稳流器、一道中间挡墙及底部两道挡坝。高挡坝（ $h=250$ mm）开设 2 个圆孔

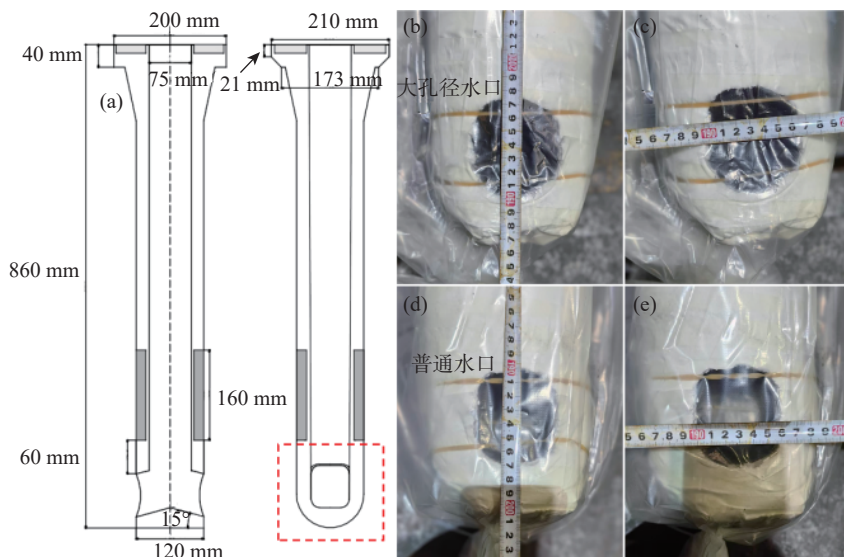


图4 结晶器下水口: (a) 水口结构; (b, c) 大孔径水口形貌; (d, e) 普通水口形貌



图5 挡墙包形貌

($\phi 60$ mm), 抵挡坝 ($h=200$ mm) 中心开设 1 个圆孔 ($\phi 60$ mm); 而普通中间包 (以下简称普通包) 仅设置 1 道高挡坝 ($h=250$ mm, 开设 2 个 110 mm $\times$ 75 mm 方孔) 和 1 个稳流器。

保证铸机精度

铸机精度保障措施改进具体如下:

(1) 强化铸机日常维护, 每次检修需检查直导段、扇形段和喷嘴状况, 避免设备漏水、漏油及喷嘴堵塞等情况发生。

(2) 定期校正结晶器、零段对弧参数, 调整固定部位安装间隙, 确保铸机对弧精度与安装精度良

好, 避免对弧精度不足及直导段移位引发铸坯裂纹、鼓肚等问题。

(3) 定期测量辊缝, 严格控制外弧线和各段辊缝精度, 保证辊缝误差在 ± 0.5 mm 以内, 减少铸坯角部凹陷。

细化冷却制度

调整前, 结晶器水流量分为弱冷和强冷 2 档, 分别对应包晶钢和低碳钢, 宽面水量分别为 $2800 \sim 3200$ 和 $4800 \sim 5400$ L/min; 调整后, SPHC 基板的冷却水量如表 3 所示, 提高了低碳包晶钢中冷水量标准, 同时下调了弱冷窄面足辊水系数。此举旨在

表3 优化后的冷却标准

钢种类别	碳质量分数/%	宽面水量/(L/min)	窄面水量/(L/min)	冷却强度	窄面足辊水系数
低碳钢	≤ 0.07	4800~5400	600~700	强冷	1.0
低碳包晶钢	0.071~0.080	3500~4500	500~600	中冷	1.0
包晶钢	0.081~0.160	2800~3200	400~460	弱冷	0.7

降低冷却强度，避免铸坯角部发生包晶反应，减少铸坯角部裂纹。

优化排渣操作制度

原有制度要求中间包渣厚度达到 60 mm 时进行排渣。考虑到排渣时机与方式对中间包液面的影响，要求在大包浇铸中后期测量渣厚，并将排渣操作安排在该炉浇铸末期。排渣需与换包过程协同进行，缓慢抬高中间包液面，分多次缓慢排出覆盖剂，避免液面剧烈波动导致结晶器液面不稳定，进而引发卷渣。

结果与分析

工艺优化结果

图 6 为 SPHC 基板改进措施实施前后的缺陷数据对比。对比 2024 年 6 月前后 SPHC 钢卷轧制量与缺陷量数据可见，优化连铸工艺和操作制度后，铸坯在冷轧过程中的夹杂翹皮发生率显著降低：6 月之前，缺陷率基本维持在 0.32%~0.41%，其中 3 月缺陷率高达 1.32%，主要原因为新品种试生产阶段工艺参数摸索导致翹皮夹杂缺陷增多；采取改进措施后，SPHC 基板缺陷率得到有效控制，稳定维持在 0.13% 左右，相比优化前下降约 60%。

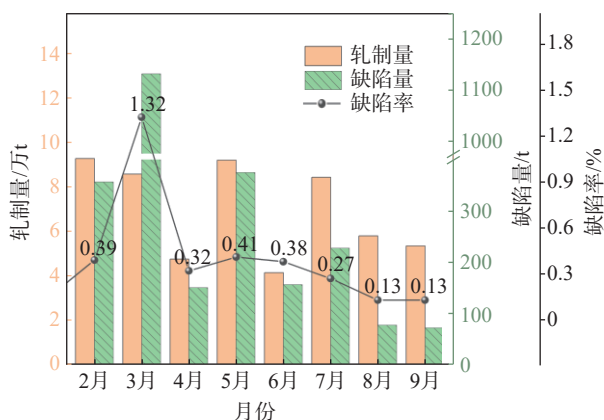


图 6 2024 年 SPHC 基板改进措施实施前后表面缺陷率对比

对上述实验数据进行分类统计，2—6 月 2 种水口类型对应的钢卷缺陷率对比如图 7 所示。采用普通水口生产的 SPHC 钢卷轧制量为 25.84 万 t，缺陷率为 0.57%；采用大孔径水口生产的轧制量为 14.92 万 t，缺陷率为 0.32%；普通水口的缺陷率为大孔径

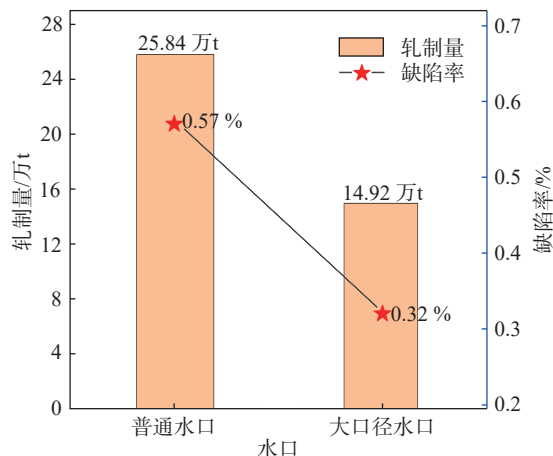


图 7 选用 2 种水口类型生产的 SPHC 基板缺陷率对比

水口的 1.78 倍。

增大水口内径可有效减缓出水口钢流速度，降低股流对壁面的冲击与卷渣风险^[18]。出口孔径的选择需根据生产实际情况确定：小断面结晶器 (600 mm×170 mm) 选用小孔径水口，更利于稳定液面波动，提高铸坯质量^[19]；对于大断面结晶器 (250 mm×1800 mm)，在侧孔倾角相同的条件下，侧孔面积减小反而不利于结晶器液面稳定^[20-21]。水口选型的目的是稳定结晶器流场与液面，减少卷渣现象。本文研究的结晶器断面为 220 mm×(1050~1810) mm，更适配大孔径水口，实践结果也验证了这一结论。

自 7 月起，SPHC 系列钢种生产全程采用大孔径水口进行浇铸；6 月起开始试用挡墙包，挡墙包与普通包的产品缺陷率对比如图 8 所示。分析 6—9 月的生产数据可知，普通包生产 SPHC 钢卷的轧制量为 21.754 万 t，缺陷率为 0.22%；挡墙包轧制量为 5.58 万 t，缺陷率为 0.06%，较普通包降低约 72.73%。

挡墙包的流场模拟分析

某厂板坯连铸机生产的 SPHC 系列冷轧卷的铸坯断面尺寸为 220 mm×(1050~1810) mm，拉坯速度根据断面尺寸设定为 1.10~1.75 m/min。该铸机中间包基本参数如下：长水口内径为上口 80 mm、下口 70 mm，浸入深度为 230 mm；中间包水口内径为 58 mm；铸坯尺寸为 1255 mm×220 mm；铸坯拉速为 1.55 m/min；工作液位钢容量为 27.8 t；入口速度

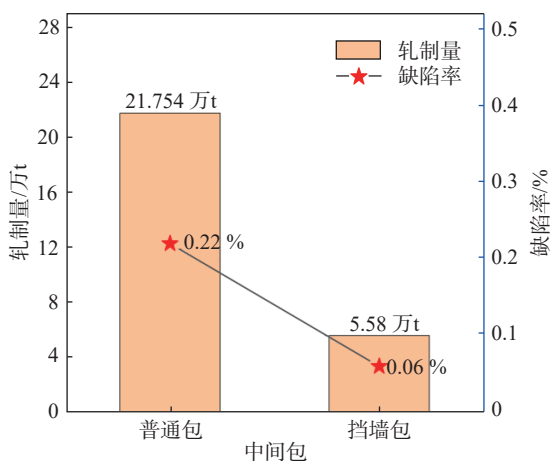


图8 选用2种类型中间包生产的SPHC基板缺陷率对比

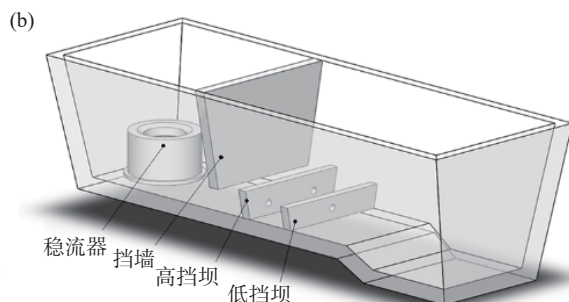
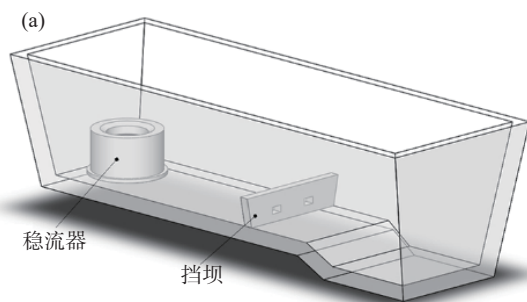


图9 (a) 普通包和 (b) 挡墙包的结构模型

控制方程如下：

(1) 连续性方程

钢液的流动满足质量守恒关系：

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial (\rho u_j)}{\partial x_j} = 0 \quad (1)$$

式中： ρ 为流体密度； t 为时间； u_j 为流体流向 j 方向的速度； x_j 为坐标轴上对应的 j 方向。

(2) 动量方程

$$\rho u_j \frac{\partial (\rho u_i)}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial \left[\mu_{\text{eff}} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right]}{\partial x_j} \quad (2)$$

式中： u_i 为流体流向 i 方向的速度； p 为流动静压； x_i 为坐标轴上对应的 i 方向； μ_{eff} 为有效黏度。

(3) 描述湍动能的 k 方程

$$\begin{cases} \frac{\partial (\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial (\rho u_i k)}{\partial x_i} = \frac{\partial \left(\frac{\mu_{\text{eff}}}{\sigma_k} \times \frac{\partial k}{\partial x_i} \right)}{\partial x_i} + G - \rho \varepsilon \\ G = \mu_t \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \end{cases} \quad (3)$$

为1.85 m/s。中间包结构模型如图9所示。

本文采用 FLUENT 6.3 商业软件进行模拟计算，设定边界条件如下：

- (1) 上表面的自由液面处理为自由滑移壁面；
- (2) 出口处流体充分发展，采用质量边界条件，保证出口与入口质量守恒；
- (3) 固体壁面边界采用壁面函数法计算壁面附近的流体流动；
- (4) 中间包内钢液流动状态稳定；
- (5) 忽略表面渣层对钢液流动的影响；
- (6) 钢液为不可压缩黏性流体。

式中： k 为湍动能； σ_k 为常数1； G 为湍流能源项； ε 为湍动能耗散率； μ_t 湍流涡黏性。

(4) 描述湍动能的 ε 方程

$$\frac{\partial (\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial (\rho u_i \varepsilon)}{\partial x_i} = \frac{\partial \left(\frac{\mu_{\text{eff}}}{\sigma_\varepsilon} \times \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right)}{\partial x_i} + \frac{C_1 G \varepsilon - C_2 \rho \varepsilon^2}{k} \quad (4)$$

式中： C_1 、 C_2 、 σ_ε 为常数，分别取1.43、1.93、1.00^[16,19]。

中间包内的流场模拟结果如图10所示。由图10(a)、10(b)可知，在湍流区，钢包长水口射出的钢液触底后向四周扩散，碰壁后转为向上流动，在长水口处形成卷吸循环区；该循环区增强了钢液流动，有利于钢液成分与温度均匀化，且普通包和挡墙包在该区域的流场特征差异较小。该区域远离钢液面，降低了钢液卷渣、吸气的概率，有效减少钢液的二次氧化，同时有利于夹杂物碰撞长大。由图10(c)可知，无挡墙的普通包内湍流区范围较

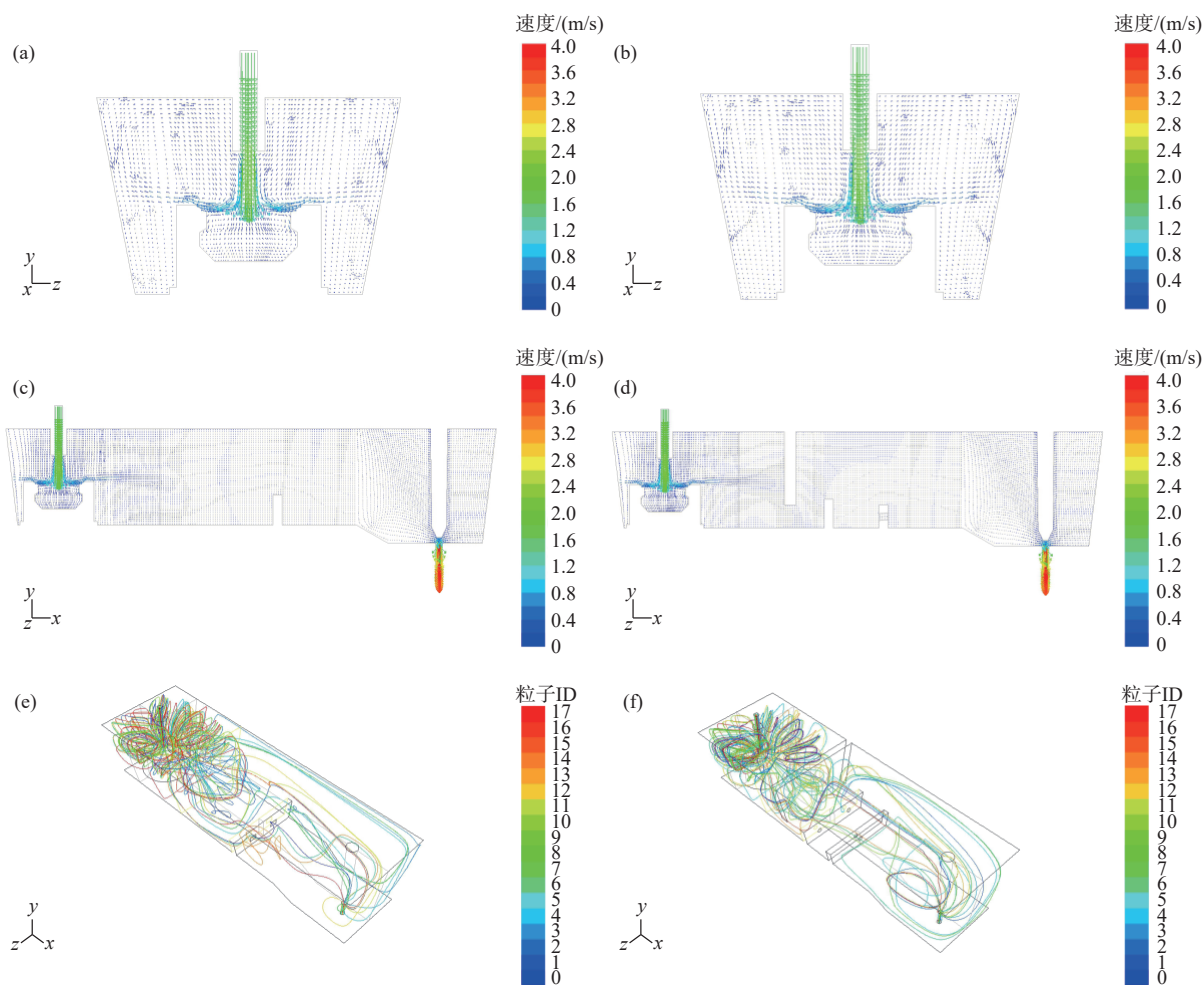


图 10 中间包流场分析: (a) 普通包横向截面; (b) 挡墙包中横向截面; (c) 普通包纵向截面; (d) 挡墙包水纵向截面; (e) 普通包粒子运动轨迹; (f) 挡墙包粒子运动轨迹

大, 钢流到达挡坝后形成向上的层流; 但由于受到上层湍流冲击, 层流流速波动较大, 稳定性较差。挡墙包通过挡渣墙将大范围湍流控制在注流区, 既增强了钢液混合作用, 有利于成分与温度均匀化, 又使层流区保持平稳, 有利于夹杂物上浮去除。图 10(e)、10(f) 以粒子运动轨迹形式展示了钢液流动路径, 可见加装挡墙后, 钢液粒子经过挡坝后的运动轨迹明显更平滑, 形成比较规律的层流运动; 相较于普通包, 挡墙包内规律层流的稳定性更好, 可有效减少卷渣现象。

中间包温度分布如图 11 所示。对比 2 种中间包的温度分布可知, 高温区与湍流区重合度较高, 且挡墙包湍流区温度高于普通包。在水口和塞棒区域, 挡墙包内钢液温度更均匀, 在 1823~1825 K 仅

存在 2 个温度梯度, 而普通包在 1822~1825 K 存在 3 个温度梯度。从冲击区到浸入式水口的温降幅度来看, 普通包大于挡墙包。

挡墙包与普通包的停留时间分布 (RTD) 分析结果见表 4, 可见 2 者差异较小。响应时间反映钢液进入中间包后第一批到达浸入式水口的快慢, 挡墙包响应时间为 90 s, 普通包为 79 s, 这是由于挡墙包内钢液流动路径更长, 响应时间延长; 两者在平均停留时间上差异也较小。但普通包内的湍流降低了钢液过挡坝后层流的流速, 且湍流冲击可能阻碍夹杂物上浮。由表 4 可知, 挡墙包的死区体积分数为 0.17%, 相比普通包的 0.18% 更小。两者死区体积分数差异较小, 主要原因是中间包容积较小。

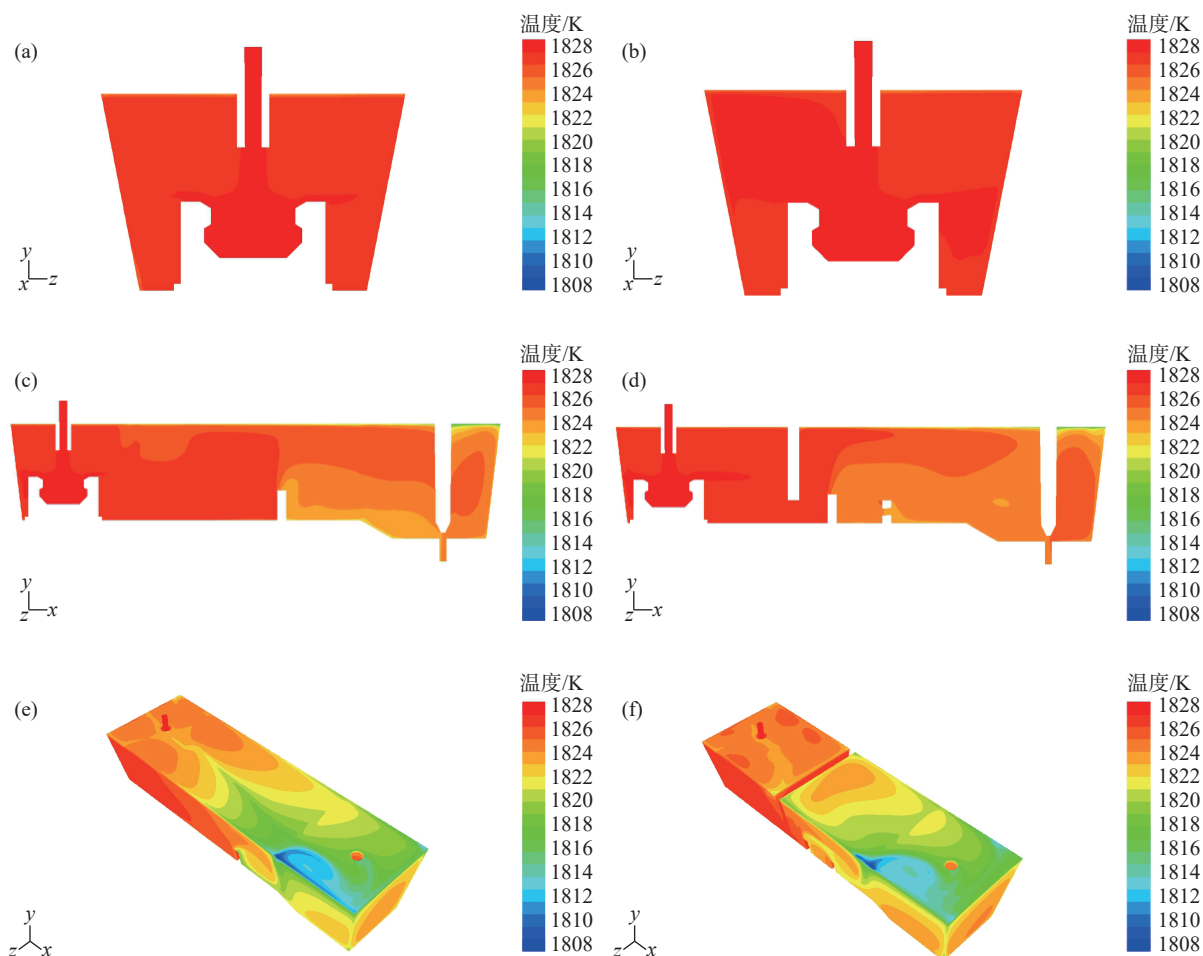


图 11 中间包温度场: (a) 普通包横向温度场; (b) 挡墙包横向截面温度场; (c) 普通包纵向截面温度场; (d) 挡墙包纵向截面温度场; (e) 普通包整体温度分布; (f) 挡墙包整体温度分布

表 4 RTD 数据分析

中间包	响应时间/s	停留时间/s		体积分数/%		
		峰值	平均值	死区	活塞区	混合区
挡墙包	90	306	530	0.17	0.36	0.47
普通包	79	309	542	0.18	0.34	0.48

结束语

(1) SPHC 基板翘皮部位的夹杂物主要成分为 Al_2O_3 、 SiO_2 、 MnO 、 CaO 、 Na_2O 等。当夹杂物不含保护渣成分时, 其尺寸基本在 $10\ \mu\text{m}$ 以下; 当夹杂物含有保护渣成分时, 尺寸相对较大, 最大可达 $300\ \mu\text{m}$ 以上。这些夹杂物主要来源于钢水一次脱氧产物及液面波动造成的保护渣卷渣, 表明铸坯夹杂与卷渣为 SPHC 基板翘皮的主要诱因。

(2) 在大断面生产条件下, 通过选用大孔径水口、采用挡墙包进行连铸浇铸作业, 并配合保证铸

机精度、细化冷却制度及优化排渣操作制度等措施, 可将冷轧 SPHC 基板的翘皮夹杂缺陷率降低 60% 左右。

(3) FLUENT 模拟结果表明, 挡墙包可有效分割湍流区和层流区。相比普通包, 挡墙包的湍流区温度更高, 层流区流场稳定性更优; 同时, 挡墙包内钢液从长水口至浸入式水口的温降更小。

参考文献

- [1] 张维维, 李晓伟, 吕春风. IF 钢冷轧板表面条状缺陷. 钢铁研究学报, 2009, 21(7): 59

- [2] 彭其春, 田俊, 张学辉, 等. 冷轧板夹杂类表面缺陷研究的进展. 炼钢, 2009, 25(1): 73
- [3] 杨小波, 张通, 许可, 等. 唐钢管线钢舌状翘皮缺陷成因与控制方法. 金属世界, 2023(4): 58
- [4] 陈琳, 李爱彬, 朱洪祥, 等. SPA-H 耐候钢表面缺陷原因分析及控制. 金属世界, 2024(3): 68
- [5] 海超, 左海霞. 夹杂物引起冷轧板表面缺陷的成因与控制. 本钢技术, 2012(5): 25
- [6] 李成良, 周成宏, 刘东升. SPHC 冷轧基板常见表面缺陷及其原因. 上海金属, 2013, 35(1): 40
- [7] 王声齐, 姜丽梅, 韩闯闯, 等. 低碳冷轧带钢表面翘皮缺陷原因分析与控制. 河北冶金, 2022(1): 59
- [8] 薛正良, 胡智超, 李平, 等. SPHC 板坯表面和皮下夹渣的研究. 炼钢, 2018, 34(1): 36
- [9] Souza G M, Mendonça A F G, Tavares R P. Physical and mathematical modeling of inclusion behavior in a tundish with gas curtain. *REM-Int Eng J*, 2020, 73(4): 531
- [10] Lei H, Yang B, Bi Q, et al. Numerical simulation of collision-coalescence and removal of inclusion in tundish with channel type induction heating. *ISIJ Int*, 2019, 59(10): 1811
- [11] 荣文杰, 蒲迪涛, 霍慧芳, 等. 浸入式水口结构影响板坯连铸结晶器钢液流动行为的研究进展. 材料与冶金学报, 2024, 23(6): 513
- [12] 徐利平, 汪洪峰. 非稳态浇注时铸坯裂纹和夹渣的控制措施. 连铸, 2019, 44(2): 27
- [13] 雷琳琳, 常运合, 罗衍昭, 等. 浸入式水口及其对板坯连铸结晶器流动行为的影响. 连铸, 2023(6): 1
- [14] 黄京宇, 金焱, 甘菲芳, 等. 无挡墙中间包内流动状况数值模拟研究. 特种铸造及有色合金, 2024, 44(3): 328
- [15] 李顶涵, 段豪剑, 孙亮, 等. 中间包结构优化对钢液流动状态的影响. 中国冶金, 2024, 34(8): 38
- [16] 刘东旭, 龚伟, 朱江江, 等. 控流装置对板坯中间包流场的数值模拟优化. 连铸, 2023(2): 10
- [17] Sinha A K, Sahai Y. Mathematical modeling of inclusion transport and removal in continuous casting tundishes. *ISIJ Int*, 1993, 33(5): 556
- [18] 彭笑萱, 孙宇, 段豪剑, 等. 浸入式水口对板坯结晶器卷入渣滴影响的物理模拟. 中国冶金, 2023, 33(6): 43
- [19] 张慧书, 吴国玺, 陈韧, 等. 板坯连铸结晶器浸入式水口结构研究. 上海金属, 2017, 39(4): 54
- [20] 邱春根, 时朋召, 徐李军, 等. 250 mm×1800 mm 板坯连铸结晶器浸入式水口优化的物理模拟. 特殊钢, 2017, 38(2): 11
- [21] Merder T, Warzecha M. Optimization of a six-strand continuous casting tundish: Industrial measurements and numerical investigation of the tundish modifications. *Metall Mater Trans B*, 2012, 43(4): 856
- 作者简介:** 韦耀环 (1981—), 男, 广西壮族自治区柳州人, 研究生。2008 年毕业于北京科技大学钢铁冶金专业, 主要研究方向: 连铸坯质量控制。通信地址: 广西柳州市柳州钢铁股份有限公司; E-mail: weiyaohuan975@163.com。
- 李文思 (1982—), 男, 广西壮族自治区柳州人, 本科。2006 年毕业于武汉科技大学无机非金属材料工程专业, 主要研究方向: 钢铁冶金用耐火材料。通信地址: 广西柳州市柳州钢铁股份有限公司转炉厂; E-mail: frey.sunnie@163.com。**
- 通信作者:** 王伟胜 (1996—), 男, 安徽省合肥人, 博士。2023 年毕业于武汉科技大学冶金工程专业, 主要研究方向: 洁净钢冶炼。通信地址: 广西柳州市柳钢股份有限公司转炉厂; E-mail: s_wangweisheng@sina.com。