

薄规格高品质汽车板针眼状缺陷控制的研究

张涛*, 王新华, 李金波, 高福彬, 刘俊山

河钢集团邯钢公司, 邯郸, 056015

Study on pin-like defects control of thin size and high quality automobile sheet

Zhang Tao, Wang Xinhua, Li Jibo, Gao fubin, Liu Junshan

Hansteel Co., Ltd., HBIS Group, Handan 056015, China;

1. 前言

近年来随着车企出于汽车节能和降低制造成本的需要将很多部件用钢板厚度减薄后, 出现了汽车板在车企冲压加工开裂显著增加的情况。如国内一些车企将乘用车车门、B 柱、后备箱等部件用钢板减薄至 0.65mm 后, 其称之为“针眼”状的冲压开裂缺陷发生率显著增加, 而由连铸交接坯轧制的钢板在其中占有很大比率。统计了邯钢 2021 年共发生针眼缺陷 223 次, 其中炉次间交接坯(即第一块和第五块铸坯)的针眼状缺陷发生率最高, 共发生 141 次, 占比达 63.2%。若将这些交接坯进行降级处理, 可以显著减少针眼状缺陷的发生率。

日本制铁、JFE 等日本钢企生产汽车板钢, 对炉-炉连浇形成的交接坯采取降级策略。文献 1^[1]设计了炼钢全流程的工业试验, 通过评估钢液全氧、增氮、炉渣成分、铸坯检测和 DTR 产线等参数的变化, 研究转炉工艺、钢包开浇、中间包控流装置、中间包覆盖剂和浸入式水口快换等工艺操作对钢液最佳洁净度的影响。该文章指出炉次间交接坯容易造成产品的质量缺陷, 不能用于“洁净钢级别”的制品。文献 2^[2]介绍了日本近 100 年炼钢技术的进展, 主要讲述了对炼钢工艺作出重大贡献的科学技术和工程方面的突破性进展。文中强调了为了减少炉-炉间交接坯降级带来的损失, 在能够与转炉产能相匹配的情况下, 高拉速转炉转向采用单流铸机。以上文献说明, 国际先进钢铁企业对炉炉间交接坯都采取了降级的策略。

目前国内关于铸坯交接问题的研究主要集中在异钢种连浇的混浇坯, 常用的研究方法是结合物理模拟和数值模拟对异钢种在中间包内的混浇过程进行研究^[3-6]。安航航等人^[7]通过开展单流板坯连铸机中间包及结晶器内异钢种混浇过程的物理和数值模拟工作, 并结合工业现场的混浇试验, 研究了异钢种连浇过程中中间包内剩余钢液质量及拉速对混浇坯长度及成分变化的影响规律。

随着国内钢企生产的汽车板减薄后冲压开裂问题的增多, 国内相关钢企纷纷开始采取将连铸交接坯降级的控制策略, 即将炉-炉连浇过程上炉次浇铸的最后一块铸坯和接续炉次浇铸的第一块铸坯降级, 但仅此一项造成的降级率近 40%。由于汽车板减薄是今后发展趋势, 预计会有更多汽车部件用钢板减薄至 0.65mm (或更薄), 如不能减少连铸交接坯降级量, 将会大幅提升汽车板生产成本, 造成很大物料资源浪费。

本文为了解决薄规格汽车板冲压开裂增多问题, 对汽车板“针眼”状冲压开裂缺陷、造成冲压开裂缺陷的 Al_2O_3 类和钙铝酸盐类夹杂物的来源、炉-炉连浇过程接续炉次钢水进入中间包后的流动和混合特征等开展了试验与数值模拟的研究, 并据此研究结果采取了新的交接坯降级控制策略, 将薄规格汽车板钢连铸交接坯降级量减少一半以上, 而汽车板“针眼”状冲压开裂发生率没有增加, 仍保持在每万件 2.5 起以下的先进控制水平。

2. 实验研究

2.1. 检测分析

分析检验发现, 造成钢板冲压开裂的主要为两类夹杂物: 一类为 Al_2O_3 类夹杂物, 多为条状或块状夹

杂物（没有发现簇状 Al_2O_3 存在），尺寸较大的可达 1mm，较小的在 $80\mu\text{m}$ 左右；另一类为 $\text{CaO}\cdot 2\text{Al}_2\text{O}_3$ 、

$\text{CaO}\cdot 6\text{Al}_2\text{O}_3$ 等钙铝酸盐类夹杂物，呈条状或块状，尺寸大都不足 $50\mu\text{m}$ 。丸川雄净^[1]认为能够造成汽车板缺陷的夹杂物临界尺寸分别为 $100\mu\text{m}$ ，根据本研究分析检验结果，对厚度 0.65mm 左右汽车板，能够造成冲压开裂的夹杂物临界尺寸可以小于 $100\mu\text{m}$ 。

2.2. 夹杂物来源

研究发现，连铸交接坯 Al_2O_3 和钙铝酸盐类夹杂数量较正常坯增多，主要是因为炉-炉连浇时，上炉次钢包结束浇注移走后，接续炉次钢包长水口浸入至中间包内钢液面以下 150mm 左右后开浇，由于长水口浸入较浅（浸入深易造成钢水反灌），会发生长水口周边局部区域钢水裸露的情况，而裸露的钢水会被包内气氛中 O_2 氧化（换包时中包密封短时被破坏），造成 Al_2O_3 夹杂数量增加。而当接续炉次开浇正常后，长水口浸入至较深位置，中包钢液面会趋于平静，并被覆盖渣完全覆盖。

此外，在接续炉次长水口浸入中包内钢液时，会将钢液表面覆盖渣部分罩入长水口管口内，并在钢包开浇后被通过长水口进入中间包的钢水流击碎成微小渣滴，弥散于钢液中。此类夹杂物源自中包覆盖渣（主要组分为 CaO 和 Al_2O_3 ），尺寸小且为液相而难以上浮去除，以 $12\text{CaO}\cdot 7\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{CaO}\cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ 形式残留于钢中，或与钢液中 Al_2O_3 夹杂结合，演变为 $\text{CaO}\cdot 2\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{CaO}\cdot 6\text{Al}_2\text{O}_3$ 类铝酸盐夹杂物。

3. 数值分析

3.1. 模型建立及验证

采用组分混合模型计算了中间包内后一接续炉次与前一炉次的钢液流动和混合行为。模型相关尺寸如图 1 所示。

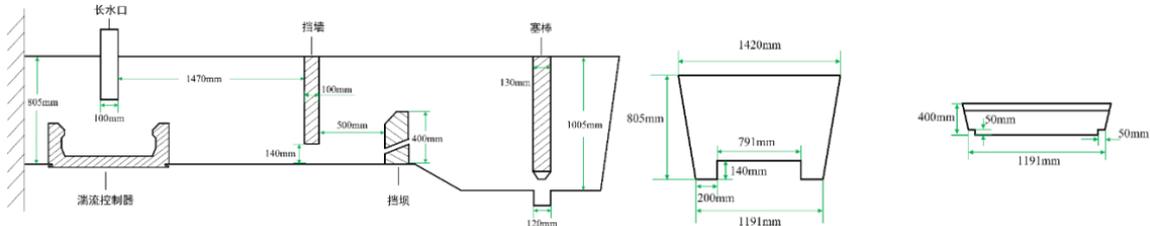


图 1 中间包内控流装置的具体尺寸

为了验证的模型的适应性，对同样工艺条件下的混浇炉次的铸坯进行取样分析。以开浇时铸坯上的位置为起点，然后每隔 0.6m 对铸坯取样，对所取试样中钢种成分差异较大的四个元素（Al、Mn、Cr、Ti）进行化学成分检测，得到的结果如图 2(a)所示。

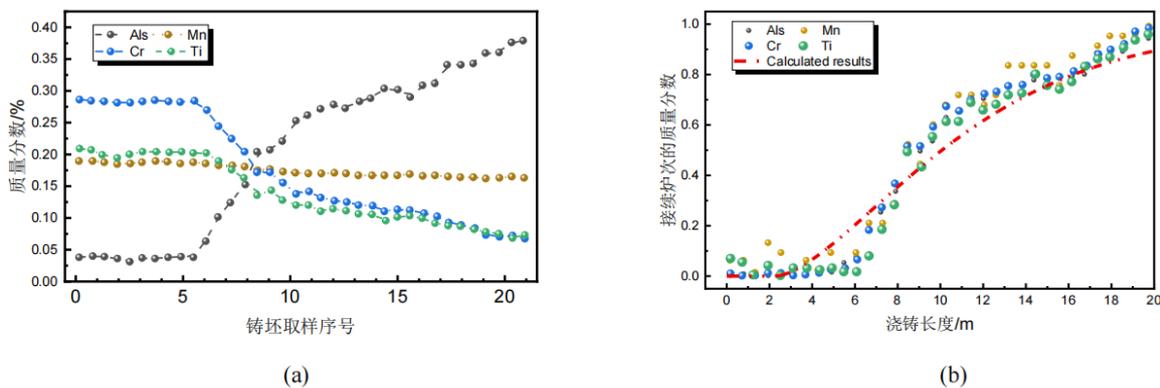


图 2 (a)铸坯取样序号与质量分数之间的关系;(b)浇铸长度与接续炉次质量分数的关系

采用建立的数学模型计算了不同钢种混浇时中间包出口处两炉钢水的混合率情况。以接续炉次开浇时刻为时刻零点，读取中间包出口处后一炉次的质量分数的数据。浇注长度可以根据式(1)进行计算：

$$L = v_{\text{casting}} \cdot t \quad (1)$$

假设两炉钢液在中间包内混合后通过中间包出口进入结晶器后，混合钢液的液相穴内完全混合且均匀凝固。因此混浇坯沿拉坯方向不同位置铸坯的各元素质量分数可根据式(2)进行计算。

$$C = C_1 M_1 + C_2 M_2 \quad (2)$$

同时 M_1 与 M_2 ，具有如下关系：

$$M_1 + M_2 = 1 \quad (3)$$

将式(3)代入式(2)中，可以得到后炉次钢液质量分数(M_2)与混浇坯中各元素质量分数(C)之间的关系：

$$M_2 = \frac{C - C_1}{C_2 - C_1} \quad (4)$$

再通过用铸坯取样的顺序号乘以 0.6 米得到后炉次开浇为起点的浇铸长度，就得到了试验样品中浇铸长度与后炉次钢液质量分数的关系，如图 2(b)中散点所示。从图中可以看出，模型的计算结果与铸坯内的实际成分变化基本一致，说明建立的数学模型适用于炉炉间连浇过程的模拟计算。

3.2. 结果分析

为了更加准确地把握炉-炉连浇过程对交接坯洁净度的影响，我们对炉-炉连浇过程接续炉次钢水进入中间包后的流动和混合特征进行数值模拟研究。图 3(a)为浇铸过程中间包中心截面钢液的流动速度的云图和矢量图，图 3(b)为后一接续炉次开浇 1s、25s、100s、250s 和 725s 时，后一炉次钢液在中间包内钢液比率的变化。

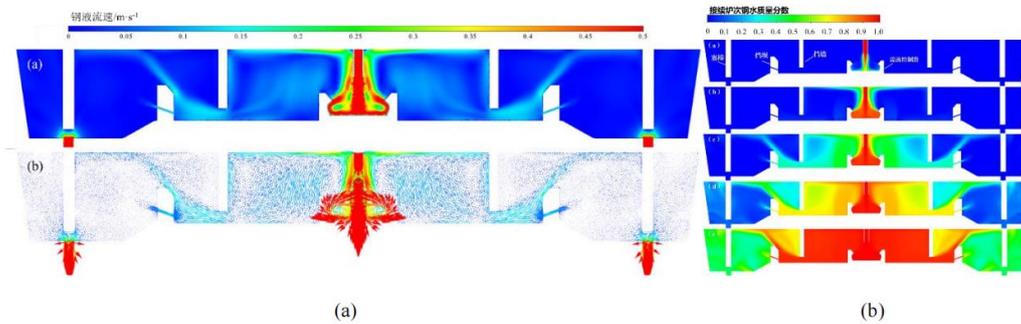


图 3(a)中心面钢液流速的云图和矢量图分布(b) 炉-炉连浇过程中间包钢液中接续炉次钢水质量分数的变化

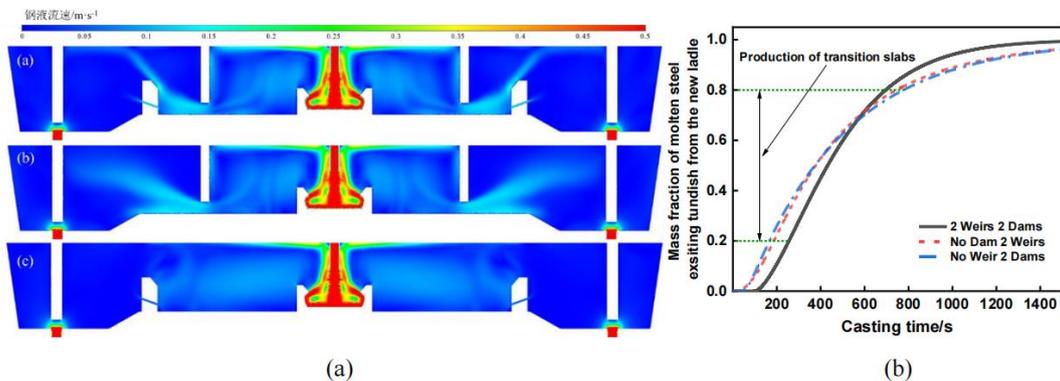


图 4(a)不同控流结构下钢液的速度分布云图(b)不同控流结构下出口处接续炉次比率随浇铸时间的变化

对交接坯轧制钢板冲压开裂的研究进一步发现，即便在接续炉次钢水到达中间包出口后一段时间里，所浇铸坯轧制钢板冲压开裂率也很低，只有当中包出口处接续炉次钢水比率达到 20% 后，所浇铸坯轧制钢板的冲压开裂率才会明显提升，但在中包出口接续炉次钢水比率超过 80% 后，所浇铸坯轧制钢板冲压开裂率又减少至与正常坯相同，即接续炉次开浇造成的 Al_2O_3 和钙铝酸盐夹杂数量增加对交接坯轧制钢板冲压开裂的影响主要发生于中包出口接续炉次钢水比率达到 20-80% 时间段所浇铸坯，而在该时段之前和之后浇铸的铸坯，即便属于交接坯，轧制钢板冲压开裂率也很低，没有必要加以降级。

研究了不同中间包控流结构（“双挡墙+双挡坝”、“双挡墙+无挡坝”和“无挡墙+双挡坝”），产生的交接坯长度变化。如图 4(a) 所示，在三种控流结构下，中间包内钢水的流动情况，从图中可以看出，在“双挡墙+双挡坝”的结构下，钢液流动在通过挡坝后，朝向液面的流动为主。因此，在该控流结构下，中间包出口处接续炉次钢水比率达到 20% 的时间较晚，而随着接续炉次浇铸量的增加，中间包出口处接续炉次比率达到 80% 时的时间相差不大，具体数据如表 1 所示。图 4(b) 描述的是不同控流结构下，中间包出口接续炉次钢水比率的变化情况。

表 1 不同控流结构下交接坯的产生时间

| 中间包结构 | 后炉次钢水到达出口 时间/min | 后炉次钢水质量比率 20%/min | 后炉次钢水质量比率 80%/min | 交接坯 产生时间/min |
|--------|---------------------|----------------------|----------------------|-----------------|
| 挡墙和挡坝 | 1.51 | 4.26 | 11.59 | 7.33 |
| 有挡墙无挡坝 | 0.59 | 3.10 | 12.41 | 9.31 |
| 有挡坝无挡墙 | 0.71 | 2.77 | 12.94 | 10.17 |

从表 1 可以看出，在采用“双挡墙+双挡坝”结构的中间包，并将挡墙长度控制在 700-900mm，挡坝高度控制在 400mm，挡墙下方钢液通过高度与挡坝高度之差控制在 200mm 左右，中间包出口接续炉次钢水 20-80% 的比率时间最短，约为 7.33 min，对应的交接坯长度约为 8-10 m。而采用“双挡墙+无挡坝”和“无挡墙+双挡坝”的中间包控流结构下，产生交接坯的时间分别为 9.31min 和 10.17 min，对应的交接坯长度分别约为 10-13m 和 11-14m。通过对比可以明显看出，采用“双挡墙+双挡坝”的中间包控流结构下，产生的交接坯最少，同时在铸坯定尺控制在 10.75m 以内的情况下，可以通过精确识别交接坯的起始点和终止点，将其控制在一块铸坯内。

4. 结论

(1) 随着车企出于汽车节能和降低制造成本的需要将很多部件用钢板厚度减薄后，出现了称之为“针眼”状的冲压开裂缺陷发生率显著增加，而由连铸交接坯轧制的钢板在其中占有很大比率。

(2) 造成薄规格汽车板冲压开裂的主要是 Al_2O_3 和 $\text{CaO}\cdot 2\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{CaO}\cdot 6\text{Al}_2\text{O}_3$ 类钙铝酸盐夹杂。交接坯轧制钢板 Al_2O_3 和钙铝酸盐类夹杂物较正常坯增多，主要是在炉-炉连浇过程接续炉次开浇时刻中间包内少量钢水裸露被氧化和少量中包覆盖渣被带入钢液所致。

(3) 混浇炉次铸坯的取样分析与数值模拟计算结果进行对比，验证了建立的数学模型适用于炉炉间连浇过程的计算分析。

(4) 连铸交接坯轧制钢板冲压开裂主要发生于炉-炉连浇过程中间包出口接续炉次钢水比率达到 0-80% 时间段所浇铸坯轧制的钢板。采用“双挡墙+双挡坝”控流结构的中间包产生交接坯时间最短，为 7.33min，长度约为 8-10 m。

参考文献

- [1] S. D. Melville, L. Brinkmeyer, paper presented at the Steelmaking conference proceedings, 1995.
- [2] T. Emi, Steelmaking Technology for the Last 100 Years: Toward Highly Efficient Mass Production Systems for High Quality Steels. *ISIJ International*, 2015, 55(1), 36-66.
- [3] 张剑君, 彭著刚, 王春锋. 钱龙. 薄板坯单流中间包混浇水力学模型试验研究[J]. *炼钢*, 2017, 33(4): 19-22.
- [4] 隋亚飞, 陈杰, 刘彭, 徐刚军. 周军军. 连铸混浇坯成分变化规律及模型的研究[J]. *连铸*, 2019, 44(4), 62-67.
- [5] 李涛, 常立忠, 从俊强, 周德福. 异钢种连浇工艺参数对交接坯长度的影响[J]. *连铸*, 2016, 41(2), 13-16.
- [6] 王新华. 高品质冷轧薄板钢中非金属夹杂物控制技术[J]. *钢铁*, 2013, 48(9), 1-7+15.
- [7] 安航航, 焦树强, 孙彦辉, 刘崇林, 宋思程. 板坯连铸异钢种连浇混浇坯长度及成分变化模型的开发及应用[J]. *工程科学学报*, 2021, 43(12), 1656-1665.