

高品质欧标轨炼钢生产工艺实践

郭朝军*, 李德辉, 连波

河钢集团邯钢公司, 邯郸 056015

Steelmaking Production practice of high quality European standard rail

Guo Chaojun *, Li Dehui, Lian Bo

HBIS Group Han Steel Company, Handan, Hebei 056015, China

1. 前言

随着中国经济的快速发展和“一带一路”战略的实施, 中国铁路运输的正向着高速化和重型化两个方向发展, 即客运应体现高速、舒适, 货运应加大载货量, 因此铁路发展对钢轨质量提出了越来越高的要求。目前国内共有五家钢轨生产企业, 钢轨产品质量虽然可以满足国内铁路发展的需要, 但与国际最先进的欧标钢轨相比尚有一定的差距^[1], 主要表现在: (1) 夹杂物含量要求更加严格。国内钢轨夹杂物检验按照 GB/T 10561-2015 标准的评级法进行, 只对夹杂物含量定性分析, 而欧标钢轨氧化物洁净度按照 K 值法进行, 不仅对夹杂物进行定性, 还要定量分析。针对欧标钢轨在夹杂物含量的严格要求, 本文重点从欧标轨炼钢冶炼生产全流程工艺控制难点进行系统分析和攻关, 不断优化生产工艺, 形成了欧标钢轨冶炼和轧制关键核心集成生产技术, 钢轨各项性能指标满足欧标标准要求, 且产品质量稳定。

2. 欧标轨生产过程中存在的问题

在高品质欧标轨生产中, 由于现场设备、能源介质、工艺等因素影响, 主要存在转炉自动化炼钢率低、少渣炼钢泄爆率高、炼钢过程数据采集及反馈缺失、浇次首炉 NDT 探伤合格率低等问题。

2.1 转炉自动化炼钢率低

邯钢炼钢转炉系统已安装国际先进的二级计算模型和副枪在线测量的一键式自动化炼钢系统, 但由于总管氧压的波动, 使得炼钢模型中的热氧平衡与实际偏差较大, 炼钢自动化率不足 50%, 终点命中率仅为 73%, 转炉终点氧含量在 600-800ppm, 严重影响钢轨内部质量。

2.2 少渣炼钢干法除尘泄爆率高

转炉冶炼过程另一个瓶颈问题是, 少渣炼钢过程中的干法除尘泄爆问题。造成干法除尘设备泄爆的问题主要包括转炉留渣量大, 点不着火后引起的干法除尘的泄爆, 以及倒完前期渣后的泄爆。转炉干法除尘设备的泄爆几率高达 53%, 严重影响生产连续性和终点成分与温度的命中。

2.3 炼钢过程数据采集及反馈缺失

欧标轨冶炼 LF 和 RH 精炼过程数据及反馈缺失, 导致炼钢过程不能及时根据包况及工况的变化而及时调整过程控制, 炼钢整体控制能力较差, 严重影响欧标轨炼钢生产过程的连续性及其成品铸坯成分和影响等最终目标的命中。

2.4 浇次首炉 NDT 探伤合格率低

欧标钢轨冶炼过程, 尤其是浇次第一炉, 由于炉衬、过热度高、浇铸过程卷渣等影响, 导致铸坯内部质量差, 轧制成钢轨后, 在 NDT 探伤工序出现报伤。探伤合格率最低达 73%, 严重影响钢轨质量与产量。通过对报伤部位进行取样分析, 发现造成钢轨探伤出现报伤的原因主要来自于炼钢过程。

3. 欧标轨生产问题分析及解决措施

3.1 转炉自动化炼钢率低问题分析及解决

转炉氧枪供氧管道受场地空间限制，孔板流量计布置不能满足计量准确性的要求，总管氧压的波动造成流量计量发生大的偏差而且很不稳定，供氧压力受公司氧气管网压力波动影响，总管氧压波动较大，波动范围在 1.3-2.5Mpa，每天均不同程度大范围波动，给转炉自动化炼钢的顺利进行造成极大影响。由于自动化炼钢模型是氧气流量、累计氧气消耗量、初始输入物料参数和终点目标参数等按照模型自动计算，按计算结果对整个吹炼过程中加料量、吹氧量、加料时机、氧枪枪位变化时机、副枪动作时机和吹炼终点确定等过程进行自动控制，从而实现自动化炼钢的目标，因此氧流量的计量稳定性及准确性是所有工作的基础。

经过对技术难题进行分析，制定了解决方案如下：在现有设备条件下，通过建立转炉炼钢工作氧压与供氧流量关系的数学模型，根据实际工作氧压计算供氧流量，并用该计算流量替代仪表测量流量值参与自动化炼钢模型控制，实现自动化炼钢过程的准确控制和稳定操作。改善自动化炼钢效果，提高自动化炼钢率。在供氧不稳情况下转炉自动化炼钢率可实现 100%，终点命中率可通过软件原有的自学习功能不断提高。基于在供氧管路固定、氧枪参数已确定的情况下，氧枪的流量与喷头参数及出口氧压相关的原理，按照流体力学及气体方程可推导出通过氧枪喷孔的气体流量公式如下：

$$F_0 = \frac{1.782C_dNA_{喉}^2 P_{工作}}{\sqrt{273+T_{环}}} = \frac{1.782 \times 0.97 \times 5 \times \pi \times 0.0203^2 \times P_{工作}}{\sqrt{273+T_{环}}}$$

其中，F₀：氧气流量，m³/min；P_{工作}：工作氧压，Mpa；T_环：氧气环境温度，℃；

C_d：氧枪喷孔流量系数，通常取 0.96-0.99；N：氧枪喷孔个数；A_喉：氧枪喷孔喉口面积，mm²

通过上述公式计算结果，确定计算供氧流量与工作氧压的关系；通过物料平衡计算，与上述计算供氧流量的模拟计算值相比，验证后基本符合实际，因此，用此计算供氧流量替代流量计测量值，参与自动化冶炼过程控制，能够准确反应实际氧气消耗与入炉料条件及终点目标之间的关系。

3.2 少渣炼钢干法除尘泄爆问题分析及解决

在少渣炼钢过程中，倒完前期渣后二次下枪时，由于熔池温度已升高，到了 C、O 开始剧烈反应期，CO 含量上升快，而 O₂ 含量没有很快下降，两项指标达到爆炸临界值时就会引起干法除尘泄爆^[2]。针对此问题，制定了如下改进方案：

(1) 终点倒渣角度控制，避免留渣量过大引起点火滞后；针对因为留渣量大而导致的开吹点不着火而导致泄爆的现象，通过大量实践摸索，对留渣角度进行了规范化控制，将倒渣角度控制在 88—92 度，避免留渣量过大引起的点火滞后，进而导致的干法除尘的泄爆。倒完前期渣后，再吹按防泄爆模式进行操作，主要控制开吹氧气调节阀开度、吹氧量爬坡时间，保证枪位合适。原则上控制好前期倒渣量约等于终渣留渣量。

(2) 针对倒完前期渣后的泄爆，发明了再吹防泄爆操作模式，主要原理：通过控制开吹氧气调节阀开度、吹氧量爬坡时间，枪位合适，原则上控制好前期倒渣量约等于终渣留渣量。通过对图 1 的修改，建立了图 2 的模式，按照图 1 的吹炼模式，开吹氧流量最初始开度设定为 30%，开吹模式氧压初始开度设定为 22%，最终流量设定为 370Nm³/min，此模式仅在常规吹炼时用于防泄爆，当采用少渣冶炼时，由于留渣、倒前期渣的因素，此模式下的吹炼，极易发生干法除尘的泄爆。通过对泄爆时的氧压、氧流量开度、氧压开度、最终流量、一氧化碳含量、风机转速等数据的积累和观察，发现在风机转速达到最大时，如果不改变氧流量、氧压的开度设定，发生干法除尘泄爆的概率非常大，原因是炼钢厂的管路条件所限，基于空间不够的原因，调节能力非常有限。在短短的一分钟之内，阀门还未完成调整时就已经发生了泄爆。基于以上的原因，通过数据摸索，发现将开吹氧流量最初始开度设定为 15%，开吹模式氧压初始开度设定为 15%，最终流量设定为 300Nm³/min，即建立了图 2 的模式，通过此模式的建立，倒完前期渣后再下枪吹炼泄爆的几率明显降低。



图1 常规冶炼吹炼模式参数设定

Fig. 1 The conventional blowing model parameter setting

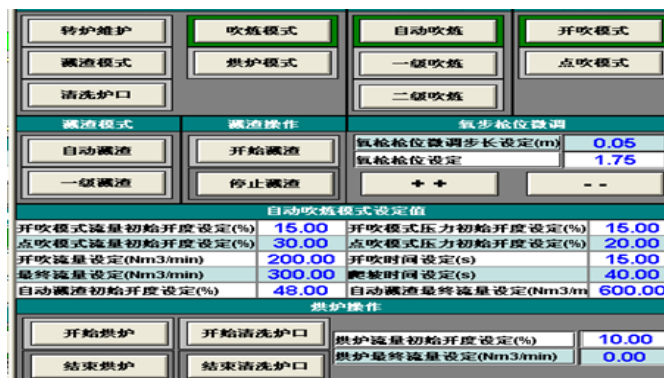


图2 少渣冶炼吹炼模式参数设定

Fig. 2 The SGRS process model parameter setting

3.3 炼钢过程数据采集及反馈缺失问题分析及解决

通常欧标轨冶炼时，转炉精炼连铸等工序过程数据可以共享并便于下道工序及时跟踪钢水信息进行工艺参数的调整，但实际生产中由于相关数据接口和系统确实，造成 LF 和 RH 精炼工序数据无法实现共享，严重影响整体工艺控制的连续性和稳定性。针对炼钢过程精炼过程数据缺失严重影响炼钢过程高效、稳定控制的问题，结合炼钢厂已有设备，编写了精炼过程跟踪反馈软件，不仅有效提高 LF 精炼的终点温度命中率 and 钢水的品质；开发了一种 RH 真空精炼炉数据收集数据与下发数据系统，实现现场自动化一级系统下发相关生产计划并自动采集现场各种关键数据，有效降低钢水的真空度，加快了 RH 精炼炉的生产节奏，为 RH 精炼炉稳定运行创造了条件，对提高产品产量、缩短产品交货周期等都起到了积极作用。

3.4 浇次首炉 NDT 探伤合格率低问题分析及解决

炼钢完成后，钢轨在轧制成成品后，重轨钢碳、锰含量较高，两相区较大，碳元素易在晶界析出，钢中的分层、缩孔、孔洞、夹杂、白点、气泡、非金属夹杂物、内裂、疏松、偏析及严重粗晶等内部缺陷都可能导致钢轨探伤不合格。浇次第一炉中间包内含有大量的空气、部分脱落下来的耐火材料、烘烤时包盖掉下的氧化铁皮，这些在开浇后不久大部分能够上浮，少部分因为前期中包没能充满，没有足够的时间上浮，而随钢水进入铸坯中；中间包开浇时，中间包液位处于不断变化的过程，使得钢水二次氧化加剧，同时液位波动大也可能形成卷渣^[3-4]；开浇第一炉钢水过热度高，中间包温度较低，钢水流进中间包后，中间包处于不断吸热的过程，使得钢水温度变化较快，拉速调节频繁，从而引起结晶器液位波动较大，形成卷渣可能性增大，进而造成重轨探伤不合，严重影响产品质量。针对此问题，制定了如下工艺改进措施：

第一炉钢水 RH 真空处理后的软吹时间较连浇炉次延长 5~10 分钟，进一步降低钢水中夹杂物含量，提高钢水纯净度；开浇前中间包预吹氩 3~5 分钟以排掉中间包内空气，防止第一炉钢水开浇出现二次氧

化；控制中间包钢水过热度较连浇炉次高 5~10℃，确保开浇操作顺利进行以及补偿浇注后期钢水温降，保证中间包温度合适；当中间包钢水液面达到开浇高度，控制钢水间断流入结晶器，当钢水液面达到结晶器液面检测范围内时，拉矫机和振动自动启动，加入开浇渣；当钢液面达到设定高度后，保持钢液面稳定，改为自动控制模式；起步拉速设为 0.60~0.65m/min，起步后待中包钢水温度降低至规定的范围内后，按照 0.01m/min 的速度提高拉速，拉速提至工作拉速后定拉速浇钢，直至浇次结束。

4. 欧标轨工艺优化改进效果

该技术的开发应用使得邯钢钢轨冶炼、连铸技术经济指标显著提升，铸坯合格率提高到 96%以上，浇次连浇炉数由 10 炉提高到 25 炉以上；铸坯质量明显提升，钢轨 A 类夹杂物≤2.0 级，[O]≤8ppm，[N]≤40ppm，钢轨硬度波动±7HB，浇次第一炉钢轨探伤合格率提高到 95%以上，连铸实现高效稳定浇铸。2017 年，利用该技术生产的 R260 和 R350LHT 送欧盟权威机构德国莱茵实验室进行产品检测，结果显示，钢轨产品在夹杂物、硬度、疲劳等各项指标，完全满足欧标 EN13674.1-2017 标准要求，产品控制水平已达国际先进水平。夹杂物检测结果 K 值为 5.24，具有较大富余量。图 3 为德国莱茵实验室对邯钢 R350LHT 检测结果。邯钢欧标钢轨产品于 2017 年获欧盟委员会颁发的 TSI 和 EN13674.1-2017 符合性证书，成为国内唯一一家获此认证的钢轨生产企业。翌年正式通过中铁检验认证中心(CRCC)认证，有力推动了我国高品质钢轨钢生产技术的发展，行业引领作用明显。

Table 15: Results of non-metallic inclusion content, profile 60E1, steel grade R350LHT

Sample no.	Area [mm ²]	Type of inclusion ¹⁾ factor	Number of inclusions for each size class 3 to 8								Multiplication and 1. Subtotal	
			3	4	5	6	7	8	S ²⁾	O ³⁾		
198	100	SS	-	-	-	-	-	-	-	-	0.0	-
		OA	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		OS	1	-	-	-	-	-	-	-	-	0.5
198	100	SS	-	-	-	-	-	-	-	-	0.0	-
		OA	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		OS	2	-	-	-	-	-	-	-	-	1.0
251	100	SS	-	-	-	-	-	-	-	-	0.0	-
		OA	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		OS	1	-	-	-	-	-	-	-	-	0.5
251	100	SS	-	-	-	-	-	-	-	-	0.0	-
		OA	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		OS	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.0
311	100	SS	-	-	-	-	-	-	-	-	0.0	-
		OA	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		OS	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.0
311	100	SS	1	-	-	-	-	-	-	-	0.5	-
		OA	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		OS	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.0
371	100	SS	-	-	-	-	-	-	-	-	0.0	-
		OA	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		OS	1	-	-	-	-	-	-	-	-	0.5
371	100	SS	-	-	-	-	-	-	-	-	0.0	-
		OA	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		OS	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.0
431	100	SS	-	-	-	-	-	-	-	-	0.0	-
		OA	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		OS	1	-	-	-	-	-	-	-	-	0.5
431	100	SS	-	-	-	-	-	-	-	-	0.0	-
		OA	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		OS	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.0
Sum of area	1000											
2. Subtotal										S: 2.0	O: 2.5	
Value K3 (for 1000 mm²)										S: 2.0	O: 2.5	
Total value K3 (for 1000 mm²)										4.5		

¹⁾ SS = sulfidic string form // OA = oxidic dissolved
²⁾ OS = oxidic string form // OG = oxidic globular
³⁾ O = oxides

图 3 欧标钢轨检测报告

Fig. 3 The test report of European standard rail

5. 结论

(1) 在欧标轨生产过程中，由于总管氧压波动、少渣冶炼模式、工艺过程数据采集及反馈缺失和第一炉非稳态浇铸等因素，造成炼钢整体控制能力较差，严重影响产品质量。

(2) 借助氧压波动修订数学模型实现自动化稳定控制，建立少渣操作模式实现防泄爆，搭建数据采集系统提高过程控制能力，制定浇次首炉特定操作工艺实现铸坯质量提升。整体技术的运用，确保欧标钢轨在国外权威实验室获得高度评价，并顺利成为首家通过欧标认证钢轨生产企业。

参考文献

[1] 周清跃. 国内外钢轨钢研究及进展[J]. 中国铁道科学, 2002 (6) :120-125.
 [2] 马瑞楠. 转炉炼钢干法除尘系统泄爆率影响因素研究[J]. 河北冶金, 2014 (7) :61-64.
 [3] 李钧正. 钢轨超声波探伤检验不合格原因分析及工艺改进[J].河南冶金, 2020 (6) :19-21.
 [4] 王建锋. 重轨探伤不合格的原因分析及改进研究[J].连铸, 2017 (2) :17-21.