

DOI:10.13228/j.boyuan.issn1005-4006.20210125

钢包渣洗脱硫剂的试验研究与应用

肖年根¹, 王学林¹, 钟 华¹, 邓爱军^{2, 3}, 操瑞宏³, 王海川²

(1. 新余钢铁集团炼钢厂, 江西 新余 338001; 2. 安徽工业大学冶金工程学院, 安徽 马鞍山 243032;
3. 新余钢铁集团技术中心, 江西 新余 338001)

摘 要: 为了研究微合金化钢因硫含量超标而导致成品钢材出现裂纹等质量问题,以船板钢 C36-1 为研究对象,通过采用多因素多水平正交回归的试验方法进行了钢包渣洗脱硫剂的组分设计研究,根据实验室基础试验数据建立了脱硫剂的组分设计模型。结果表明,当脱硫剂中 $w(\text{CaO})=42\% \sim 55\%$ 时对脱硫率的影响较为明显。 $w(\text{Al}_2\text{O}_3)<35\%$ 以下、 $w(\text{CaC}_2)=12\%$ 较为合适。经工业生产试验验证,脱硫剂的组分最终确定为 $w(\text{CaO})=42\% \sim 55\%$ 、 $w(\text{Al}_2\text{O}_3)=30\% \sim 35\%$ 、 $w(\text{CaC}_2)=8\% \sim 12\%$ 、 $w(\text{CaF}_2)=8\% \sim 10\%$ 。该脱硫剂的工业平均脱硫率达到了 80.93%。新型脱硫剂的使用稳定控制了船板钢钢液中硫质量分数至 0.010% 以下,铸坯裂纹判废率降低了 85% 左右,满足了企业对该类钢种控硫的工艺需求,增加了企业的经济效益。

关键词: 组分设计; 渣洗; 脱硫剂; 船板钢; 脱硫率

文献标志码: A **文章编号:** 1005-4006(2022)03-0032-07

Experimental study and application of desulfurizer
by slag infiltration

XIAO Nian-gen¹, WANG Xue-lin¹, ZHONG Hua¹, DENG Ai-jun^{2, 3},
CAO Rui-hong³, WANG Hai-chuan²

(1. Steel Works, Xinyu Iron and Steel Group Co., Ltd., Xinyu 338001, Jiangxi, China;
2. School of Metallurgical Engineering, Anhui University of Technology, Ma'anshan 243032, Anhui, China;
3. Technology Center, Xinyu Iron and Steel Group Co., Ltd., Xinyu 338001, Jiangxi, China)

Abstract: It wanted to study and solve the quality problem of cracks in microalloyed steel due to excessive sulfur content, the composition design of desulfurizer for slag infiltration of ship plate C36-1 was studied by using multi-factor and multi-level orthogonal regression test method, and the composition design model of desulfurizer was established according to the basic laboratory experimental data. The results showed that when the $w(\text{CaO})=42\% \sim 55\%$ in desulfurizer, the effect on desulfurization rate was more obvious. $w(\text{Al}_2\text{O}_3)<35\%$, $w(\text{CaC}_2)=12\%$ is appropriate. After industrial production test, the final determination of the components of desulfurizer was $w(\text{CaO})=42\% \sim 55\%$, $w(\text{Al}_2\text{O}_3)=30\% \sim 35\%$, $w(\text{CaC}_2)=8\% \sim 12\%$, $w(\text{CaF}_2)=8\% \sim 10\%$. The industrial average desulfurization rate of the desulfurizer reached 80.93%. The new desulfurizer can stably control the sulfur content of ship plate steel to less than 0.010%. The failure rate of slab crack was reduced by 85%. It met the process demand of sulfur control for this kind of steel and increased the economic benefit of the enterprise.

Key words: component design; slag infiltration; desulfurizer; ship plate; desulfurization rate

对于绝大多数钢种而言,硫元素都是有害的,硫的存在会显著降低钢材的力学性能和使用性能^[1-3]。为了提高钢液洁净度,保证后续成品轧材质量和性能,通常需要对钢液进行脱硫处理,以降低钢中硫含量,从而减少含硫夹杂物的数量,或者通过其他技术手段来改变含硫夹杂物的类型、形状、

尺寸和分布状态^[4-5]。在钢铁生产全流程过程中,脱硫工作主要在以下 4 个阶段进行,即高炉炼铁过程的铁水脱硫、出铁后的铁水预脱硫处理、炼钢过程的脱硫以及钢液的炉外精炼脱硫^[6]。受空间和动力学条件的限制影响,单一生产工序很难将铁水或钢液中的硫含量降到更低水平。为了追求超低硫含

量的目标,在生产低硫钢或者超低硫钢的时候通常采用铁水预脱硫和钢液炉外脱硫的组合方式来加强脱硫过程,以满足该类钢种的低硫质量要求^[7-8]。

转炉炉后出钢前在钢包底部铺加适量脱硫剂,利用出钢时钢液的冲击动能与脱硫剂进行充分接触与混匀,从而起到脱除钢液中硫的作用,该过程在生产工艺上称之为钢包的“渣洗”脱硫^[9-11]。该脱硫操作方法简单可行、成本较低,但动力学条件充足,脱硫效率高,比较适用于无铁水预脱硫过程或因铁水中硫含量过高而影响转炉平稳冶炼的生产过程。生产实践表明^[12-14],采用转炉钢包“渣洗”脱硫工艺能够有效地实现钢液的平均脱硫率达到 30%~50%。对于一些没有炉外精炼设备的中小钢铁企业而言,“渣洗”脱硫工艺能够在没有精炼工序的条件下生产低硫钢种,这样既可缩短钢液的冶炼周期,又可减少精炼装备投入,降低精炼生产成本,可谓一举多得。

新余钢铁集团炼钢厂 1 区转炉车间现有 100 t 转炉 3 座,平均冶炼周期为 32 min,炉后出钢时间约为 4 min,转炉炉后配有合金微调站,生产钢种主要有 C36 系列船板钢、高建板钢和桥梁钢等。受高炉铁水硫含量波动大影响,转炉冶炼生产时常造成成品钢液硫含量不稳定,进而因硫高形成铸坯裂纹或造成整炉改判致废的严重后果,这给钢厂带来了较大的经济损失。为解决上述问题,依据钢厂现有

生产条件和工况,在尽可能不改变现行生产节奏(保证转炉生产效率不降低)和不增加生产成本的前提下,通过实验室模拟研究转炉出钢时的渣洗过程,对钢包渣洗脱硫剂进行技术开发,以满足本厂从出钢开始到合金微调站较短时间内实现钢液脱硫的迫切需求,降低钢液硫含量,提高产品质量,增加企业经济效益。

1 试验条件与方法

1.1 试验设备与原料

(1)试验设备。本研究所采用试验设备主要有 50 kg 中频感应炉、电热干燥箱、高纯氧化镁坩埚、电子天平等。试验所用中频感应炉主要由电源及电气控制装置、感应炉本体、倾翻传动装置和炉体水冷系统等构成。

(2)试验原料。本试验以成品 C36-1 船板钢钢带作为试验用钢,其具体化学成分见表 1,试验前将其截取成长度为 30 cm 的钢带片备用。本试验研究以 CaO-Al₂O₃-SiO₂ 为基础渣系,通过向工业用预熔渣料和渣洗料中加入化学纯试剂 CaO、Al₂O₃ 和 CaC₂ 形成新的脱硫剂试验产品,其中预熔渣的主要成分见表 2,渣洗料主要成分见表 3 所示。试验前,应先对工业预熔渣料和渣洗料进行破碎、筛分,配加适量化学纯试剂后经混匀、预熔处理后再用于脱硫试验。

表 1 C36-1 高强船板钢主要化学成分(质量分数)

Table 1 Main chemical components of C36-1 high strength ship plate steel						%
C	Si	Mn	P	S	V	Nb
0.15~0.18	0.35~0.50	1.45~1.60	≤0.016	≤0.010	≤0.010	0.025~0.035

表 2 预熔渣主要成分(质量分数)

Table 2 Main components of premelting slag			%
CaO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	
40~50	20~25	<4	

表 3 渣洗料主要成分(质量分数)

Table 3 Main components of washing slag			%
Al ₂ O ₃	Ca	Al	
23~26	22~25	6~8	

本试验所采用船板钢 C36-1 中的 $w[S] \leq 0.010\%$,故试验时需先进行增硫操作以满足后续试验的脱硫效果。试验中通过配加一定量的化学纯 FeS($w(FeS) \geq 85\%$)来增加试验钢液中的硫含量。通过计算,每组试验中加入纯硫化亚铁约

4.675 g 可使平均硫质量分数为 0.010%的成品钢增硫至 0.020%。

1.2 试验方案与操作

1.2.1 试验方案

在考虑脱硫剂内各组分含量多少时需研究多个因素对脱硫效率的影响情况,因此为得到可靠的试验结果,本试验应采用多因素多水平正交回归的方法进行组分设计。本正交试验设计的影响因子为 CaO、Al₂O₃ 和 CaC₂,为尽量减少试验频次,计划采用“组合设计”的试验设计方法。根据二次回归方程的计算分析,将三因子含量变化对脱硫剂脱硫性能的影响区域确定为(1)试验温度为 1 550 ℃;(2)控制炉渣中 CaO 的质量分数,为 42%~56%;(3)控制炉渣中 Al₂O₃ 质量分数,为 25%~35%;

(4)控制炉渣中 CaC_2 质量分数,为 6%~14%。由因素水平变化计算公式^[15],取因素极差值 $r=1.215^{[16-17]}$,计算得到的本次试验 3 因子 3 水平 1 次零水平试验时的因素编码见表 4。

表 4 因素水平编码表
Table 4 Coding table of factor level

因素水平	渣指数 MI	X_1	X_2	X_3
$r=+1.215$	0.113	54.6	34.55	14
上水平(+1)	0.136	53.4	32.82	12
零水平(0)	0.164	50.2	30.55	10
下水平(-1)	0.215	48.6	28.26	8
$r=-1.215$	0.290	45.9	26.37	6

注:渣中 SiO_2 质量分数按 3.5%计算。渣指数 MI 为渣中 CaO 、 Al_2O_3 和 CaC_2 的质量分数比值,反应了一定碱度条件下,炉渣的流动性。表中 X_1 、 X_2 、 X_3 分别表示按照因素水平变化公式计算得到的 CaO 、 Al_2O_3 和 CaC_2 三因素的编码值。

运用二次正交法可计算出试验脱硫剂成分配比比例,通过坩埚熔炼容积可算出每次试验浇注钢液约为 6.5 kg,由于实验室动力学条件不如生产现场好,故按钢水量 5%的比例添加脱硫剂,即每组试验约需加 325 g 脱硫剂,由此计算出各种配加料的配加量见表 5。

表 5 新脱硫剂中组分的配加量
Table 5 Addition amount of the components in the new desulfurizer

试验方案	预熔渣	渣洗料	CaO	Al_2O_3	CaC_2
1	193.50	60	32.50	13.00	26.00
2	180.50	60	32.50	13.00	39.00
3	190.25	60	32.50	16.25	26.00
4	177.25	60	32.50	16.25	39.00
5	184.55	60	42.75	11.70	26.00
6	171.55	60	42.75	11.70	39.00
7	180.00	60	42.75	16.25	26.00
8	167.00	60	42.75	16.25	39.00
9	192.50	60	26.00	14.00	32.50
10	173.00	60	45.50	14.00	32.50
11	185.40	60	40.60	6.50	32.50
12	170.45	60	40.60	21.45	32.50
13	194.15	60	40.60	14.00	16.25
14	161.65	60	40.60	14.00	48.75
15	177.90	60	40.60	14.00	32.50

1.2.2 试验操作

(1)为减少钢样熔化频次,炉内每次试验钢量按 3~5 组试验用钢量考虑。按规定长度截取好的钢样垂直插入炉内,钢样顶部铺撒一层防氧的碳化稻壳。首先打开感应炉循环水冷开关,通水循环,再打开炉体电源逐渐升温熔化钢样。

(2)钢样熔化至 1 550 ℃后,将一定量的纯硫化亚铁加入到熔炉中,充分混合后将钢液中硫质量分数增至 0.030%左右。恒温 1 min 左右,待硫化亚铁与钢液充分混匀后,取增硫样,记为 S_0 。

(3)增硫样取样结束后,将按表 5 第 1 组配方配好的脱硫剂渣料均匀铺放在经过预加热的氧化镁坩埚底部。准备工作完成后,即可进行出钢操作。出钢过程中加入适量的铝线进行脱氧操作,结束后使用石英管玻璃棒进一步搅拌钢液,使钢液与底部脱硫剂充分反应均匀。上述操作完全结束后再进行一次取样,记为 S_1 。

(4)重复上述步骤,依次按表中顺序对脱硫剂进行脱硫试验,取样分别记为 $S_2\sim S_{15}$,并对相应的钢样贴上顺序标签进行分装以备检测使用。

(5)试验结束后降低感应炉输出功率,关闭总电源,维持水冷系统继续工作 2 h 左右,进一步降低感应炉温度至 200 ℃以下后即可关闭水冷系统,结束试验。

2 结果与讨论

2.1 试验结果

试验过程由于受到感应炉容量和钢熔化速度的限制,每炉按 3~5 组试验用钢水量熔化钢样,各炉次分组情况及脱硫试验结果见表 6。

由表 6 中的 15 组脱硫试验数据可知,在利用“渣洗”工艺方法进行的实验室基础脱硫试验中,脱硫率最高为 74.20%,最低为 53.12%,整体平均脱硫率为 61.96%,其脱硫水平接近国内大中型炼钢厂的现场生产操作水平。如果能达到生产现场钢渣混冲的动力学条件,则脱硫率会得到进一步提高,可将钢中硫含量降至更低水平。从表 6 可以看出,第 6 组、第 8 组和第 10 组试验的脱硫率较高,均达到了 70%以上,这表明这 3 组配方具有更为高效、稳定的脱硫效果。因此,这 3 组脱硫剂的原料配比可初步确定为实验室基础研究的最优配方。

2.2 脱硫剂设计模型的建立

由试验结果数据分析可知,15 组脱硫试验脱硫率均在 50%以上,最高达到了 74.20%,这说明试验

表 6 脱硫试验分组及试验结果

Table 6 Desulphurization test group and test results

试验组号	初始硫质量分数	渣洗反应后的钢液主要成分					脱硫率 η	平均脱硫率 η'
		C	Si	Mn	P	S		
1	0.032	0.182	0.35	1.45	0.012	0.015	53.12	56.24
2		0.166	0.38	1.43	0.018	0.014	56.25	
3		0.173	0.42	1.56	0.015	0.014	56.25	
4		0.159	0.40	1.53	0.013	0.013	59.37	
5	0.030	0.160	0.47	1.46	0.016	0.014	53.33	62.22
6		0.160	0.49	1.55	0.014	0.008	73.33	
7		0.170	0.36	1.48	0.012	0.012	60.00	
8	0.031	0.150	0.32	1.51	0.014	0.008	74.20	65.82
9		0.170	0.34	1.58	0.015	0.012	61.31	
10		0.160	0.31	1.48	0.011	0.009	71.00	
11		0.180	0.43	1.51	0.012	0.011	64.52	
12	0.032	0.160	0.36	1.47	0.012	0.013	58.06	63.54
13		0.150	0.50	1.51	0.016	0.013	59.37	
14		0.160	0.45	1.45	0.017	0.012	62.50	
15		0.180	0.43	1.48	0.016	0.010	68.75	

注: $\eta=\frac{|\omega([\text{S}])_0-\omega([\text{S}])_1|}{\omega([\text{S}])_0}\times\%$,其中 $\omega([\text{S}])_0$ 为钢液初始硫含量, $\omega([\text{S}])_1$ 为钢液渣洗后的硫含量。

设计所得脱硫剂各主要成分配比基本合理可行,能够满足转炉出钢脱硫的任务要求。下面通过试验数据建立脱硫剂设计模型,并分析影响脱硫剂脱硫效率的各因素之间的显著性关系。

本次实验室基础试验设计的脱硫剂影响因子为 CaO 、 Al_2O_3 和 CaC_2 ,若按 3 水平全因子考虑正交试验的话,则需要进行 27 次试验,试验工作量较大。为减少试验次数,可在编码空间中,选择几类具有不同特点的试验点并将其适当组合起来形成适合本研究方案的二次组合设计试验^[18-19]。考虑三因素影响的三元二次基本回归模型为^[20]

$$\eta=a_0+\sum_{i=1}^3a_ix_i+\sum_{i<j}a_{ij}x_ix_j+\sum_{i=1}^3a_{ij}x_i^2\quad(1)$$

式中: η 为脱硫率; a_0 、 a_i 、 a_{ij} 为回归系数, x_i 、 x_j 为影响因素,其中 i 、 j 取 1、2、3……, $i<j$ 。

根据表 4 中的因素水平编码参数和表 6 中的试验数据对式(1)进行求解,即可得到三元二次回归模型,见式(2)。

$$\begin{aligned}\eta= & 42.352+12.356X_1-2.2X_2+3.856X_3+ \\ & 14.25X_1X_2+4.36X_1X_3+2.88X_2X_3- \\ & 0.753X_1^2-3.126X_2^2+2.463X_3^2\end{aligned}\quad(2)$$

对回归模型进行方差分析和显著性水平检验结果表明,回归模型在显著性水平系数 $\alpha=0.01$ 水

平上显著,这说明由本试验方案研究所得数据是真实合理的,并且通过这些数据经过回归计算得到的三元二次模型也是可靠的。为便于直观分析,需将式(2)中的规范变量 X_1 、 X_2 、 X_3 变换为自然变量 Z_1 、 Z_2 、 Z_3 ,其中 Z_1 、 Z_2 、 Z_3 分别代表脱硫剂中 CaO 、 Al_2O_3 和 CaC_2 的质量分数。因此,可得到本文所研究的脱硫剂组分设计模型,即

$$\eta=7.254\,6+0.482\,8Z_1+0.405\,2Z_2-0.313\,9Z_3-0.000\,52Z_1^2-0.007\,5Z_2^2+0.001\,6Z_3^2\quad(3)$$

式中: Z_1 、 Z_2 、 Z_3 分别为脱硫剂中 CaO 、 Al_2O_3 和 CaC_2 的质量分数。

2.3 脱硫剂模型的分析与讨论

2.3.1 单因素分析

为便于直观地找出单一因素变化对脱硫剂脱硫率的影响情况,将脱硫剂模型中的其他两个影响因子固定在某一恒定水平。对于特定的脱硫剂配方,将 Al_2O_3 质量分数和 CaC_2 质量分数固定在零水平,即取 $Z_2=0$ 、 $Z_3=0$,研究 CaO 质量分数变化对脱硫率的影响情况,则由模型可得 CaO 质量分数与脱硫率 η 之间的函数关系为

$$\eta=-0.753Z_1^2+12.356Z_1+42.352\quad(4)$$

同理,固定 CaO 质量分数和 CaC_2 质量分数在零水平,即取 $Z_1=0$ 、 $Z_3=0$,可得到 Al_2O_3 质量分数

变化对脱硫率的影响情况,其质量分数与脱硫率 η 之间的函数关系为

$$\eta = -3.126Z_2^2 - 2.2Z_2 + 42.352 \quad (5)$$

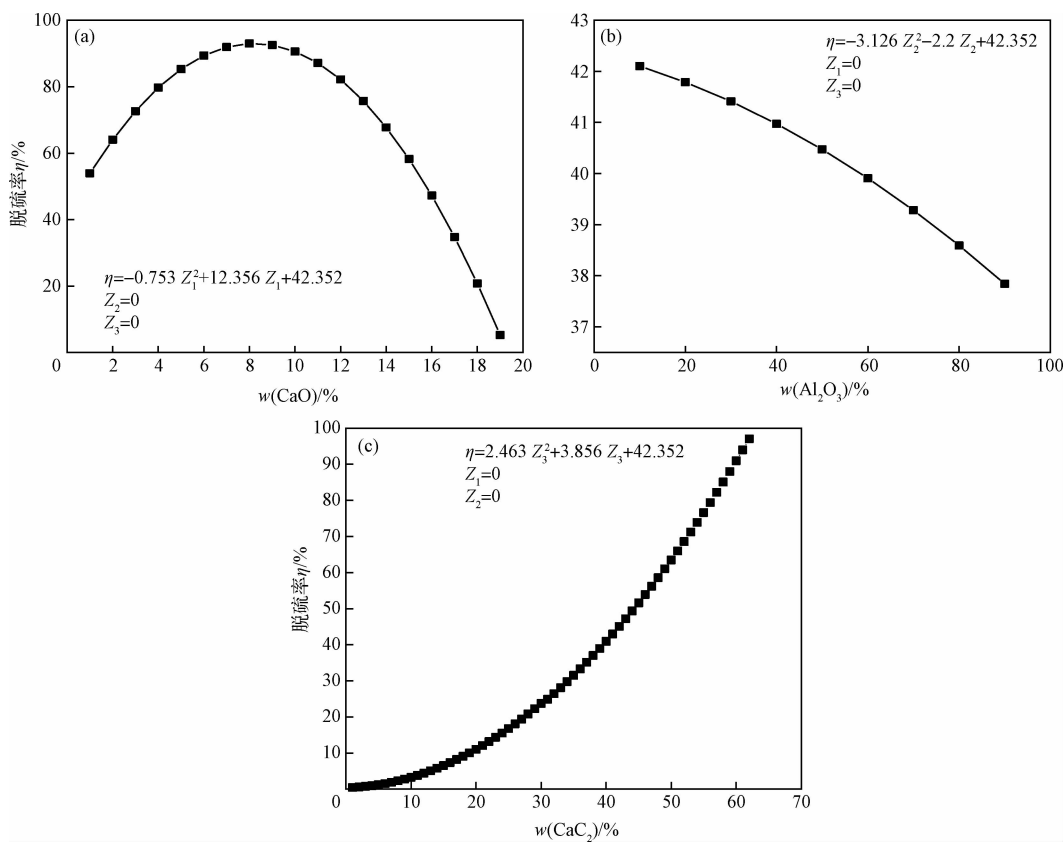
再固定 CaO 质量分数和 Al_2O_3 质量分数为零水平,即取 $Z_1=0$ 、 $Z_2=0$,可得到 CaC_2 质量分数变化对脱硫率的影响情况,其质量分数与脱硫率 η 之间的函数关系为

$$\eta = 2.463Z_3^2 + 3.856Z_3 + 42.352 \quad (6)$$

上述 3 个单因素质量分数变化对模型脱硫率的影响情况如图 1 所示。由表 4 可知,式(4)是脱硫剂中 $w(\text{Al}_2\text{O}_3) = 30.55\%$ 、 $w(\text{CaC}_2) = 10\%$ 时, $w(\text{CaO})$ 对脱硫剂脱硫率的影响情况,结果如图 1(a)所示,可以看出脱硫率随 $w(\text{CaO})$ 的增加先升高后下降,当脱硫剂中 $w(\text{CaO}) = 9\%$ 时,脱硫率达到

了最大值;式(5)表示 $w(\text{CaO}) = 50.2\%$ 、 $w(\text{CaC}_2) = 10\%$ 的脱硫剂中, $w(\text{Al}_2\text{O}_3)$ 对该脱硫剂脱硫率的影响情况,结果如图 1(b)所示。从图 1(b)可以看出,脱硫率随 $w(\text{Al}_2\text{O}_3)$ 的增大逐渐降低;式(6)表示脱硫剂中 $w(\text{CaO}) = 50.2\%$ 、 $w(\text{Al}_2\text{O}_3) = 30.55\%$ 时, $w(\text{CaC}_2)$ 对该脱硫剂脱硫率的影响情况,结果如图 1(c)所示,可以看出脱硫剂脱硫率随 $w(\text{CaC}_2)$ 增加呈上升趋势。

在模型的实际应用过程中,单因素分析仅能定性描述某一因素变化对结果的影响变化趋势,不能进行定量准确的表征分析。主要是因为各因素之间并不是完全独立的,它们也是相互影响,相互制约的。因此,还需对该模型进行双因素或多因素的综合分析,才能得出最终的定量结论。



(a)CaO 质量分数变化; (b)Al₂O₃ 质量分数变化; (c)CaC₂ 质量分数变化。

图 1 单因素变化对脱硫剂脱硫率的影响

Fig. 1 Influence of single factor change on desulfurization rate of desulfurizer

2.3.2 双因素分析

在上述单因素分析基础之上,考虑任意两因素对试验结果的综合影响而进行的分析方法称为双因素分析法,该方法能定量、真实地反映各因子对试验结果的影响情况。

当分析脱硫剂中 CaO、 Al_2O_3 质量分数变化对

脱硫剂脱硫率的双重影响时,恒定 CaC_2 质量分数 10% 不变,即取 $Z_3=0$,则可得到脱硫率 η 与 CaO 和 Al_2O_3 两因素的影响关系,即

$$\eta = -0.052Z_1^2 - 0.75Z_2^2 + 48.28Z_1 + 40.52Z_2 + 415.63 \quad (7)$$

同理,当分析 CaO、 CaC_2 质量分数对脱硫剂脱

硫率的综合影响时,恒定 Al_2O_3 质量分数 30.55% 不变,取 $Z_2=0$,则可得到脱硫率 η 与 CaO 和 CaC_2 两因素的影响关系,即

$$\eta = -0.052Z_1^2 + 0.16Z_3^2 + 48.28Z_1 - 31.39Z_3 + 1\,096.633 \tag{8}$$

再者分析 Al_2O_3 、 CaC_2 质量分数对脱硫剂脱硫率的综合影响时,应恒定 CaO 质量分数 50.2% 不变,取 $Z_1=0$,即有脱硫率 η 与 Al_2O_3 和 CaC_2 两因素的变化关系,如式(9)所示。

$$\eta = -0.75Z_2^2 + 0.16Z_3^2 + 40.52Z_2 - 31.39Z_3 + 3\,018.076 \tag{9}$$

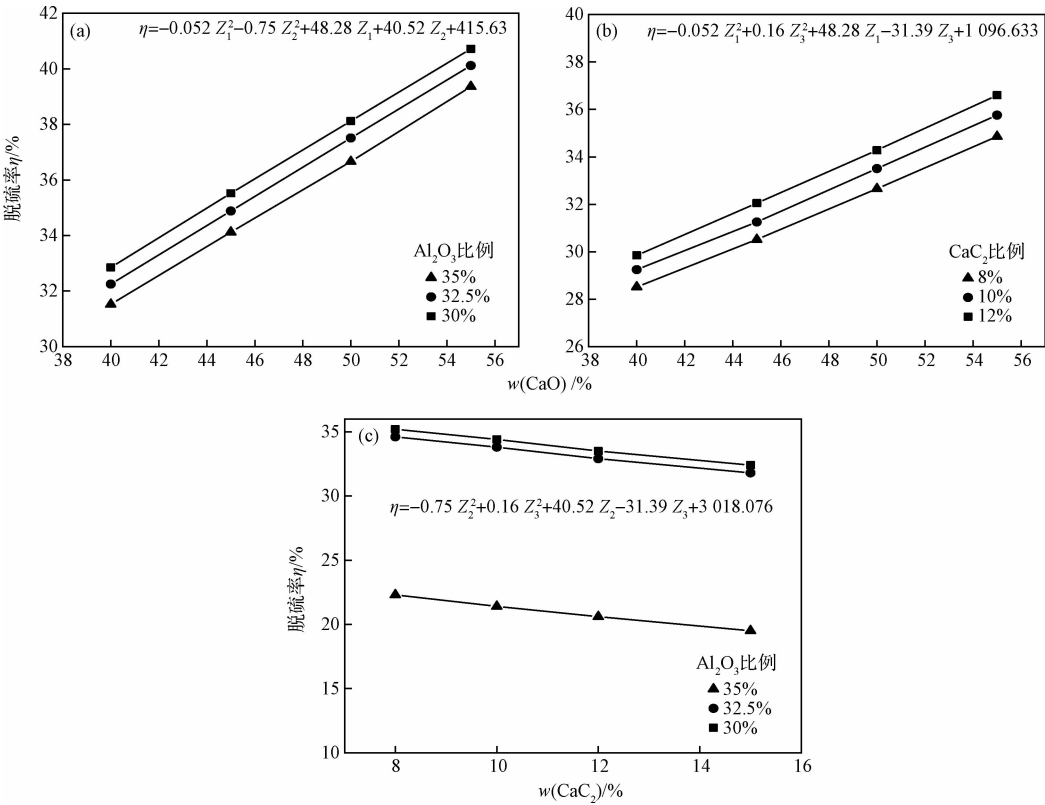
上述两因素对脱硫剂脱硫率的综合影响情况如图 2 所示。

当 $w(\text{CaO}) = 40\% \sim 55\%$ 时,脱硫率与 $w(\text{CaO})$ 呈现线性增大变化趋势,这说明脱硫剂中 CaO 起到了绝对主导作用,其质量分数对脱硫剂的脱硫率影响尤为显著,如图 2(a) 所示。但当

$w(\text{Al}_2\text{O}_3)$ 从 30% 增加至 35% 时,脱硫剂的脱硫率反而有所下降,这主要是由于高温条件下 Al_2O_3 易与渣中 CaO 、 SiO_2 形成高温熔点难熔物质,当脱硫剂中 $w(\text{Al}_2\text{O}_3)$ 不断增加时,熔渣熔化温度也在逐渐升高,此时熔渣流动性变差,脱硫剂利用率降低,反而影响了脱硫效率。为此,将 $w(\text{Al}_2\text{O}_3) < 35\%$ 较为合适。

图 2(b) 所示为 $w(\text{CaO})$ 和 $w(\text{CaC}_2)$ 共同作用对脱硫率的影响情况,可以看出 $w(\text{CaO})$ 为 40%~55% 时,脱硫剂的脱硫率也是在逐渐增大的,而当 $w(\text{CaC}_2)$ 由 12% 降到 8% 时,脱硫率也随之下降,故 $w(\text{CaC}_2) = 12\%$ 较为合适。

图 2(c) 所示为 $w(\text{Al}_2\text{O}_3)$ 和 $w(\text{CaC}_2)$ 对脱硫率的影响趋势情况。由图 2(c) 可知,在有 CaC_2 存在的情况下, $w(\text{Al}_2\text{O}_3)$ 为 30%~35% 时对脱硫剂的脱硫率影响较大,这与图 2(a) 所表现出来的趋势是一致的。



(a) CaO 、 Al_2O_3 质量分数变化; (b) CaO 、 CaC_2 质量分数变化; (c) CaC_2 、 Al_2O_3 质量分数变化。

图 2 双因素变化对脱硫剂脱硫率的影响

Fig. 2 Influence of two factor change on desulfurization rate of desulfurizer

通过上述单双因素的综合分析可知,由实验室基础试验得出的脱硫剂具有良好的脱硫效果,其成分配比范围为 $w(\text{CaO}) = 42\% \sim 55\%$ 、 $w(\text{Al}_2\text{O}_3) = 30\% \sim 35\%$ 、 $w(\text{CaC}_2) = 8\% \sim 12\%$ 。

3 工业应用效果

由于转炉实际生产时对生产节奏要求比较严格,炉后出钢合金化微调处理时间有限,底吹氩搅

拌时间较短。因此,根据上述实验室研究结果,脱硫剂在保证碱度的基础上,应充分考虑脱氧和化渣速度,故在最佳脱硫剂成分基础之上添加一定量的 CaF_2 作为快速化渣熔剂。最终,工业应用脱硫剂成分分配比为 $w(\text{CaO})=42\%\sim 55\%$ 、 $w(\text{Al}_2\text{O}_3)=30\%\sim 35\%$ 、 $w(\text{CaC}_2)=8\%\sim 12\%$ 、 $w(\text{CaF}_2)=8\%\sim 10\%$ 。本次工业应用试验共计进行25炉钢,统计生产数据并进行分析,其结果如图3所示。

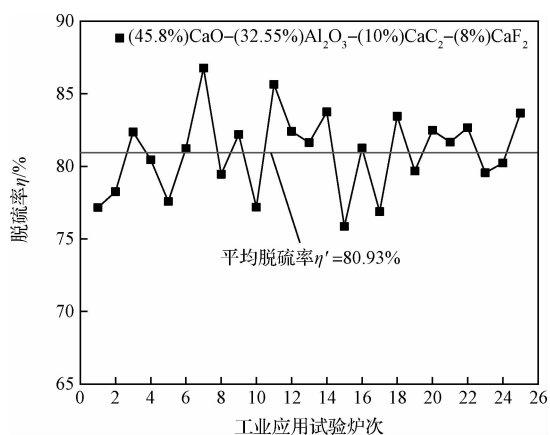


图3 新脱硫剂的工业应用试验数据

Fig. 3 Comparing experimental data of desulfurization rate between new and conventional desulfurizer

从图3可以看出,新型脱硫剂的工业应用试验取得了较好的脱硫效果。25炉的平均脱硫率达到了80.93%,其中不低于平均线以上炉数为16炉,占比为64%,远高于该脱硫剂在实验室状态下的脱硫率。这主要是由于在实际生产过程中,钢渣混冲的“渣洗”效果明显优于实验室条件,脱硫反应动力学条件充足,充分发挥了新型脱硫剂的脱硫效率。

新型脱硫剂的使用使得成品钢液中硫的质量分数能够稳定控制在0.010%以下,尤其可以有效降低硫高炉次($w(\text{S})\geq 0.035\%$)中硫质量分数,至内控范围,而避免形成铸坯裂纹和判废。按照渣洗脱硫工艺对硫高炉次每炉多加入新型脱硫剂0.9 t,脱硫剂含税价约为3 300元/t计算,则使用脱硫剂的吨钢成本增加24.75元(出钢量为120 t);若按裂纹判废计算,每炉钢损失近10万元(成品和废品差价按照800元考虑),因而在硫高炉次每炉多投入0.9 t脱硫剂成本,则可避免该炉次损失10万元左右;使用新型脱硫剂以后,铸坯裂纹判废率降低了85%左右。此外,由于新型脱硫剂的使用,钢中活度氧平均下降0.001 5%,每炉脱氧剂的使用量减少24 kg,吨钢降低脱氧成本1.28元。

4 结论

(1)以 $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3\text{-CaC}_2$ 为新型“渣洗”脱硫剂的基础渣系,在实验室条件下,成分分配比为 $w(\text{CaO})=42\%\sim 55\%$ 、 $w(\text{Al}_2\text{O}_3)=30\%\sim 35\%$ 、 $w(\text{CaC}_2)=8\%\sim 12\%$ 范围的脱硫剂具有较好的脱硫效果,平均脱硫率达到了61.96%;

(2)根据实验室基础试验数据建立了新型脱硫剂的设计模型,经单双因素综合分析表明,脱硫剂中 $w(\text{CaO})=42\%\sim 55\%$ 时对脱硫率的影响较为明显,起到了主导作用; $w(\text{Al}_2\text{O}_3)$ 应控制在35%以下,否则反而降低了脱硫剂的效率;脱硫剂的脱硫率随着 $w(\text{CaC}_2)$ 的增加而升高, $w(\text{CaC}_2)=12\%$ 较为合适;

(3)工业应用试验验证了以 $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3\text{-CaC}_2\text{-CaF}_2$ 渣系取代常规 $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3$ 渣系,其成分分配比 $w(\text{CaO})=42\%\sim 55\%$ 、 $w(\text{Al}_2\text{O}_3)=30\%\sim 35\%$ 、 $w(\text{CaC}_2)=8\%\sim 12\%$ 、 $w(\text{CaF}_2)=8\%\sim 10\%$ 。通过验证,新型脱硫剂的平均脱硫率达到了80.93%。新型脱硫剂的使用能够稳定控制成品钢液中硫质量分数至0.010%以下,铸坯裂纹判废率降低了85%左右,最大化地降低了企业质量成本,增加了企业经济效益。

参考文献:

- [1] 袁武华,王峰. 国内外易切削钢的研究现状和前景[J]. 钢铁研究,2008,36(5):56.
- [2] 邓爱军,蒲雪峰,左小坦,等. H型钢V形开裂的缺陷研究与优化[J]. 钢铁,2019,54(8):161.
- [3] 仇兵利,随晖,车德会,等. 易切削不锈钢中氧含量和锻造比对硫化物形态及切削性能的影响[J]. 钢铁研究,2021,33(5):418.
- [4] 刘宗辉,秦凤婷,任建忠,等. LF两步造渣工艺对C82DA钢中硫和铝的影响[J]. 钢铁,2020,55(7):78.
- [5] 李树军,杜雪岩. LF精炼渣的热态循环利用研究[J]. 钢铁钨钛,2020,41(6):112.
- [6] 郝鑫,王新华,黄福祥,等. LF-VD高效脱硫工艺[J]. 钢铁,2014,49(7):72.
- [7] 魏国立. 精炼快速脱硫工艺探讨[J]. 山西冶金,2015(4):85.
- [8] 冉孟伦. 普碳钢低成本脱硫工艺研究[J]. 炼钢,2015,31(1):22.
- [9] 马杰,侯伟,赵磊磊. 转炉出钢渣洗脱硫的理论研究与工业试验[J]. 钢铁研究,2009,37(2):23.
- [10] WANG Ruo-si, WANG Shuo-ming, HAN Peng-long. Study of deoxidization and desulphurization in slag washing process of Al-killed steel[J]. Advanced Materials Research, 2013, 788: 27.