

铸钢车轮踏面夹渣缺陷分析与防止

张思瑾, 杨召利, 马德清, 郑跃鹏

(信阳同合车轮有限公司, 河南信阳 464100)

摘要: 对铸钢车轮踏面夹渣样品的特征及成分、钢的熔炼过程进行了分析, 确认夹渣是钢液中的氧化渣与脱氧产物化合而成, 其主要成分为低熔点锰铝硅酸盐。采用氧化渣出钢的单渣法炼钢, 钢液过氧化程度高, 硅脱氧产物与氧化渣反应, 钢液中形成大量锰铝硅酸盐复合低熔点渣, 上浮不充分, 浇注过程随钢液进入车轮型腔至踏面位置, 因石墨的急冷作用迅速结壳, 凝固后形成踏面夹渣缺陷。通过控制氧化期吹氧强度并改进熔炼操作方式, 踏面夹渣缺陷产生几率明显降低。

关键词: 铸钢车轮; 踏面夹渣; 锰铝硅酸盐; 形成机理; 改进措施

我公司生产的铁路铸钢车轮的综合废品率一直控制在较低水平 ($\leq 4.0\%$)。但是, 2018年上半年及2019年3-4月, 车轮踏面位置出现较严重夹渣缺陷, 废品率也随之出现较大波动, 最高曾达7%, 造成了较大废品损失。通过对夹渣取样分析, 初步明确了其产生机理, 并提出了改进措施, 目前车轮踏面出现夹渣缺陷的几率明显降低。

1 铸钢车轮生产工艺

1.1 车轮钢化学成分

车轮钢材质为高碳碳素钢, 化学成分见表1。

1.2 车轮铸造工艺

我公司铸钢车轮生产工艺采用电弧炉炼钢、石墨挂砂衬铸型、雨淋式浇口浇注、中央冒口集中补缩的铸造工艺生产, 铸造工艺示意图见图1。炼钢采用氧化渣出钢的单渣法, 该方法曾广泛流行于欧美、日本等国家铸钢行业。与传统的“老三期”炼钢方法相比, 单渣法工艺取消了还原期, 有利于减轻钢液吸气。具体炼钢操作为: 熔化期吹氧助熔、氧化期吹氧脱碳提温, 氧化末期终点碳达到要求后, 不扒除氧化渣; 炉内添加高碳锰铁预脱氧, Mn含量目标值0.55%, 10 min后出钢, 平均出钢量约25.5 t; 增碳剂、硅铁、硅锰合金随钢流加入25 t茶壶包内, 进行合金化及二次脱氧; 镇静时间约6 min, 再倒入6 t底注包, 底注包内添加铝锭、电解锰、增碳剂, 进行合金化及终脱氧后浇注车轮。浇注温度 $\leq 1605\text{ }^{\circ}\text{C}$, 车轮示意图见图2。

2 踏面夹渣分析

2.1 夹渣特征

车轮踏面夹渣的冷态特征为: 透明、玻璃状、渣子呈淡绿色或墨绿色, 亦有微黄光泽; 且浇注温度高 ($\geq 1595\text{ }^{\circ}\text{C}$) 时踏面夹渣出现几率高。车轮踏面夹渣宏观热态形貌见图3a (图中箭头所示), 冷态形貌见图3b。

2.2 能谱分析

针对图3所示片状夹渣, 在渣子表面选取2个点, 做了EDS能谱分析, 分析显

作者简介:

张思瑾 (1971-), 男, 工程师, 主要从事铁路车轮的制造工艺设计工作。E-mail: zhangsj@tonghewheels.com

通讯作者:

马德清, 男, 工程师。电话: 13673089605, E-mail: madq@tonghewheels.com

中图分类号: TG245

文献标识码: B

文章编号: 1001-4977(2020)04-0418-06

收稿日期:

2019-09-03 收到初稿,
2019-11-28 收到修订稿。

示夹渣主要化学成分为 Al_2O_3 、 SiO_2 、 MnO ，和少量 FeO ，夹渣能谱分析结果见表2和表3。

两个检测点主要化学成分含量的平均值为： Al_2O_3 ，15%； SiO_2 ，47%； MnO ，33%，在 Al_2O_3 - SiO_2 - MnO 三元相图^[1]上画出该产物成分范围，见图4。

三元相图上三条线交叉的 ΔABC 即为该产物的成分范围，可见该产物主要成分处在锰铝榴石相区，从相图上看其熔点在 $<1200\text{ }^\circ\text{C}$ ，属低熔点夹杂物。

3 夹渣来源分析

3.1 人工造渣试验

以往认为此类夹渣来源于浇注及造型过程，属外来夹杂物。为分析车轮踏面夹渣的可能来源，参考以往类似研究^[2-4]，设计了人工造渣缺陷试验方案，具体试验方法为：分别取塞棒头附着物（图5a）、底注包钢渣（图5b）以及终喷涂料（图5c）等少许试验样品，破碎成粉状，撒入模样型腔底部（图6），然后从砂芯孔向试样型腔内浇入钢液，凝固后取出缺陷试样经打磨后切取缺陷部位做能谱分析，然后与夹渣成分作对比。检测设备：德国蔡司Sigma300型扫描电子显微镜和牛津仪器Inca X-act能谱仪。塞棒头附着物、底注包渣和终喷涂料样品能谱分析结果见表4-6。

从能谱图和结果分析看到，塞棒头附着物及终喷涂料人造缺陷的主要构成为 Al_2O_3 ，并含有少量 SiO_2 以及很少量或者不含 MnO 。分析结果与人工造缺陷用原材料成分很接近，与踏面夹渣成分差别较大，因此可以证实踏面夹渣不是来源于此。而底注包渣分析结果与踏面夹渣成分较接近，推测踏面夹渣可能来源于底注包渣。

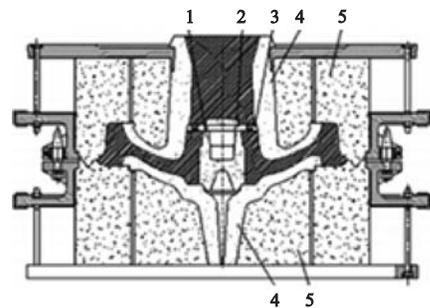
3.2 熔炼操作分析

结合车轮踏面夹渣物的能谱分析结果，以及有关铸件表面宏观夹杂物的研究^[5]，并考虑公司的炼钢方法，认为产生夹渣缺陷是钢液氧化严重、脱氧不充分

所致。熔炼炉号为1-282-17的一整炉钢液，浇注的车轮均出现较严重踏面夹渣缺陷，选取该炉熔炼过程各元素变化情况来分析炼钢过程，熔炼过程化学成分变化见表7。本炉钢氧化末期在炉内加65锰铁50 kg，出钢过程茶壶包添加75硅铁200 kg，添加65硅锰合金50 kg，底注包添加增碳剂3.6 kg（含碳量98%）、硅铁5 kg、铝锭2.1 kg。

表1 车轮钢化学成分表

Table 1 Chemical composition of cast steel wheels $w_B/\%$						
项目	C	Si	Mn	P	S	Al
标准范围	0.67 ~ 0.77	≥ 0.15	≤ 1.20	≤ 0.030	≤ 0.040	≤ 0.060
ZL-C 目标值	0.71	0.50	0.75	≤ 0.030	≤ 0.040	0.035



1.中芯 2.浮芯 3.雨淋芯 4.砂衬 5.石墨
图1 铸造工艺示意图

Fig. 1 Schematic diagram of casting process

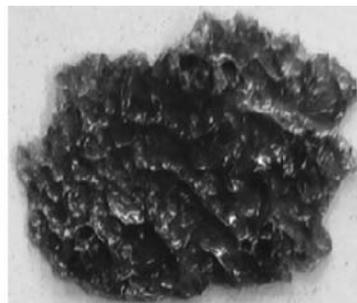


图2 车轮示意图

Fig. 2 Schematic diagram of wheel



(a) 热态形貌



(b) 冷态形貌

图3 踏面夹渣宏观形貌

Fig. 3 Macroscopic feature of tread slag

从熔炼过程看到:

(1) 本炉钢熔化期就一直在吹氧助熔、提温,但由于钢液温度低,将废钢中的Si和Mn元素大量氧化,形成低熔点锰硅酸盐渣;氧化期脱碳量大,吹氧操作将钢液中的含碳量从1.49%降到0.69%,脱碳量高达0.80%,这意味着钢液氧化很严重且渣的氧化性很强。

(2) Mn元素含量从钢液熔清的0.26%,提高到氧化末期的0.40%,加入50 kg 锰铁后, Mn的回收率按100%计, Mn含量也只能提高到0.53%,但实际达到0.60%,原因是氧化末期钢液温度高达1 690 ℃,炉渣中的部分MnO被还原或分解,使得钢液回锰。

(3) 电炉以钢渣混出的方式将钢液出到茶壶包,茶壶包中硅铁除对钢液合金化外,还起脱氧作用,将氧化渣中的部分MnO还原,避免了茶壶包内加入的硅锰合金被氧化。茶壶包中Si加入量应为0.63%,而实际含量只有0.34%,收得率低,仅有54%,从侧面说明了本炉钢液氧化程度高。

(4) 底注包中Al的理论含量应为0.035%,实际Al含量为0.028%~0.030%,收得率高达80%~86%,说明倒入底注包的钢液氧化程度较轻。

4 踏面夹渣形成机理

(1) 在炼钢的熔化期和氧化期,由于配碳量高,脱碳量大,吹氧强度大,钢液氧化严重,使得Si和Mn元素大量被氧化成SiO₂和MnO,形成锰硅酸盐低熔点渣相。

(2) 电炉钢渣混出,茶壶包内硅铁的脱氧产物SiO₂和炉渣中的MnO、Al₂O₃、FeO等进一步化合形成大量低熔点渣液滴,悬浮在钢液中。由于茶壶包镇静时间偏短,渣液无法全部从钢液中浮出。

(3) 钢液从茶壶包倒入底注包,底注包无镇静时间,造成低熔点渣不易浮出钢液,在浇注时随钢液进入型腔,形成夹渣。

表2 踏面点1夹渣能谱分析结果

Table 2 Energy spectrum analysis results of NO.1 slag in Fig. 3

元素	质量分数/%	原子分数/%	化合物百分比/%	化学式
Al K	4.25	3.98	8.02	Al ₂ O ₃
Si K	19.16	17.24	40.99	SiO ₂
P K	1.71	1.39	3.91	P ₂ O ₅
Mn K	31.11	14.31	40.17	MnO
Fe K	5.37	2.43	6.91	FeO
O	38.41	60.66		
总量	100.00			

表3 踏面点2夹渣能谱分析结果

Table 3 Energy spectrum analysis results of NO.2 slag in Fig. 3

元素	质量分数/%	原子分数/%	化合物百分比/%	化学式
Al K	9.55	8.48	18.03	Al ₂ O ₃
Si K	21.07	17.97	45.07	SiO ₂
Mn K	25.31	11.04	32.68	MnO
Fe K	3.28	1.41	4.22	FeO
O	40.80	61.11		
总量	100.00			

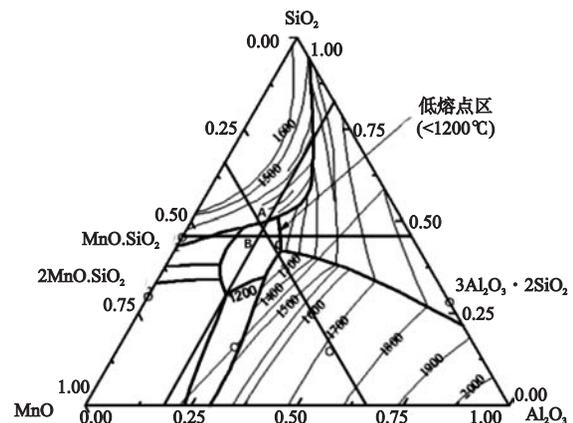


图4 MnO-SiO₂-Al₂O₃三元相图

(AB-Al₂O₃:15%; BC-SiO₂:47%; CA-MnO:33%)

Fig. 4 Ternary phase diagram of MnO-SiO₂-Al₂O₃



(a) 塞棒头附着物

(b) 底注包渣

(c) 终喷涂料

图5 人造缺陷试验样品

Fig. 5 Test sample of artificial defect

(4) 茶壶包内形成的低熔点渣, 随钢液被倒入底注包后, 一部分上浮到钢液顶面, 浇注时随钢液下降, 挂到包壁形成底注包挂渣。当有一定厚度时, 底注包接钢液时再次熔化这层挂渣, 部分挂渣也可能卷入钢液, 被浇入型腔。

(5) 低熔点渣随钢液进入型腔后, 钢液因石墨的急冷作用迅速结壳, 而低熔点渣则因钢液结壳滞留在车轮石墨型踏面位置, 凝固后形成踏面夹渣缺陷。

统计发现, 浇注温度 $\geq 1595\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的包次出现踏面夹渣的比例较大, 约占踏面夹渣缺陷总包次的66%。氧化渣出钢的单渣法炼钢工艺, 钢液脱氧主要依靠硅铁在茶壶包中进行, 可用茶壶包中Si元素的回收率高低, 来判断是否因温度高、钢液氧化性强导致车轮踏面夹渣缺陷产生几率增大。对比发现, 当在茶壶包中加入硅铁量相当时, 浇注温度 $\geq 1595\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时茶壶包Si含量平均值为0.41%, 浇注温度 $< 1595\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时茶壶包Si含量平均值为0.46%, 说明温度高时钢液氧化程度偏高, 加剧了Si元素的氧化。此外, 高温浇注也会加剧底注包挂渣的熔化, 使得底注包渣更容易被冲入型腔, 增大了踏面夹渣缺陷的产生几率。

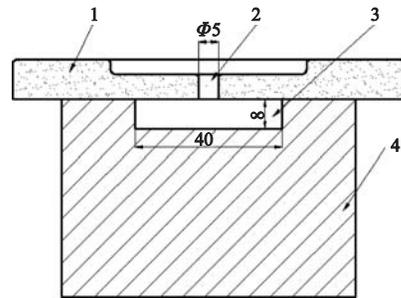
5 控制措施

公司为流水线生产模式, 每炉钢在茶壶包(浇注站)镇静6 min左右即开始倒钢。为最大限度减少此类脱氧产物化合形成低熔点渣, 最可行的是控制总氧输入量, 减少脱氧产物总量。具体措施为:

(1) 合理配碳。根据炉料结构, 合理配碳, 熔清碳目标范围: 0.95%~1.05%; 出钢碳目标范围: 0.70%~0.75%; 氧化脱碳过程采用大电压长电弧操作, 通过造泡沫渣埋弧熔炼, 以快速提温减少吹氧量, 降低钢液氧化程度。公司也实地考察了美国Griffin车轮公司所属几个工厂的熔炼工序, 发现这些工厂除了脱碳量普遍较低外(一般 $\leq 0.10\%$), 还有一个共同特点就是变压器功率大, 按其出钢量换算, 均超过600 kVA/t钢, 这样有利于快速提温, 减少吹氧量、降低钢液氧化程度, 也为我公司后期熔炼工序改造提供了方向。

(2) 明确规定熔清取样温度。之前未明确规定熔清取样温度, 炉前熔清取样温度偏低, 普遍在1480 $^{\circ}\text{C}$ 左右, 配碳的增碳剂在炉内分布不均匀, 熔清碳含量波动较大, 影响对用氧量的合理判断。为防止出现此现象, 规定熔清取样温度须达到1530~1550 $^{\circ}\text{C}$, 熔清碳含量波动性显著下降。采用Minitab软件统计分析了改进前后各283炉的熔炼数据, 电炉熔清碳及氧化期脱碳量见图12和图13。

从图12看到, 改进后熔清碳平均值约1.05%, 而改进前约为1.23%, 虽然改进后熔清碳仍处于控制目标



1. 砂芯 2. 砂芯孔 3. 试样型腔 4. 模样

图6 模样示意图

Fig. 6 Schematic diagram of sample mold

表4 塞棒头附着物能谱分析结果

Table 4 Energy spectrum analysis results of stopper adhesion materials

元素	质量分数/%	原子分数/%	化合物百分比/%	化学式
Al K	46.65	36.57	88.14	Al ₂ O ₃
Si K	1.38	1.04	2.96	SiO ₂
K K	2.11	1.14	2.54	K ₂ O
Fe K	4.95	1.87	6.36	FeO
O	44.91	59.38		
总量	100.00			

表5 底注包渣能谱分析结果

Table 5 Energy spectrum analysis results of BPL slag

元素	质量分数/%	原子分数/%	化合物百分比/%	化学式
Mg K	2.23	2.06	3.70	MgO
Al K	18.27	15.17	34.53	Al ₂ O ₃
Si K	16.40	13.08	35.08	SiO ₂
Ca K	6.01	3.36	8.41	CaO
Ti K	1.40	0.65	2.34	TiO ₂
Mn K	8.73	3.56	11.27	MnO
Fe K	3.63	1.46	4.67	FeO
O	43.32	60.66		
总量	100.00			

表6 终喷涂料能谱分析结果

Table 6 Energy spectrum analysis results of final-jet coating

元素	质量分数/%	原子分数/%	化合物百分比/%	化学式
Mg K	0.47	0.41	0.77	MgO
Al K	37.92	30.29	71.65	Al ₂ O ₃
Si K	5.34	4.10	11.43	SiO ₂
K K	0.40	0.22	0.48	K ₂ O
Ti K	4.15	1.87	6.92	TiO ₂
Mn K	3.34	1.31	4.31	MnO
Fe K	2.93	1.13	3.77	FeO
Zn L	0.54	0.18	0.67	ZnO
O	44.92	60.50		
总量	100.00			

上限,但也比改进前有较大下降,同时分布更集中。虽然工艺规定脱碳量 $\geq 0.20\%$ 即可,但从图13看到,熔炼操作改进前,氧化期平均脱碳量实际高达0.60%,而改进后氧化期平均脱碳量降低为0.36%,较改进前有显著下降。熔炼操作改进后氧化期平均脱碳量相对国外同类工厂仍较高,主要因为公司变压器功率偏低(360 kVA/t钢),为降低电耗,无法完全按照国外工厂的脱碳量组织生产,还有进一步改进空间。

此外,熔炼操作改进后茶壶包Si含量平均值达到0.48%,比熔炼操作改进前有进一步提升。综上所述,通过合理配碳及改进熔炼操作,控制氧化期吹氧强度,降低了钢液的氧化程度,车轮踏面夹渣缺陷的出现几率也由之前的11.34%下降到3.34%。

表7 1-282-17炉熔炼过程化学成分变化
Table 7 Variety of chemical composition of heat
No.1-282-17 steel $w_B/\%$

试样名称	C	Si	Mn	Al	温度/℃
熔清试样P1	1.49	0.04	0.26		1 490
氧化期试样P2	0.83	0.03	0.39		1 600
氧化期试样P3	0.75	0.03	0.40		1 690
氧化结束试样P4	0.69	0.03	0.60		1 708
茶壶包试样T1	0.68	0.34	0.78		
底注包试样L1	0.73	0.45	0.70	0.030	1 605
底注包试样L2	0.73	0.46	0.71	0.028	1 602
底注包试样L3	0.73	0.39	0.71	0.029	1 597
底注包试样L4	0.72	0.38	0.70	0.030	1 579

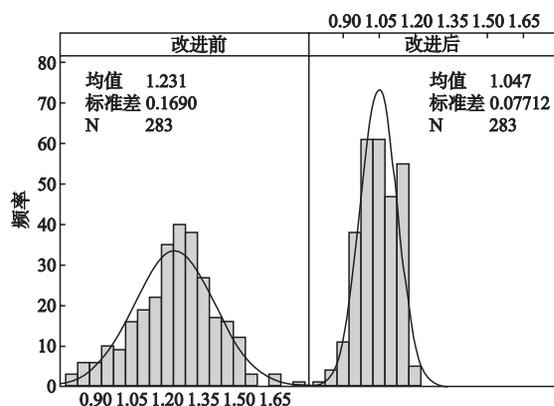


图12 熔炼操作改进前后电炉熔清碳含量

Fig. 12 Melting-down carbon content before and after melting operation improvement

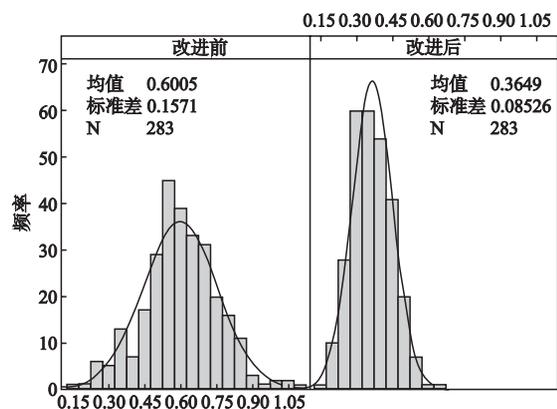


图13 熔炼操作改进前后电炉脱碳量

Fig. 13 Decarburization amounts before and after melting operation improvement

6 结束语

(1) 在电弧炉熔炼过程中,吹氧强度过大导致钢液氧化严重,使得Si和Mn元素大量被氧化成 SiO_2 和 MnO ,形成锰铝硅酸盐类氧化渣;当钢液与渣混出到茶壶包内,硅铁的脱氧产物 SiO_2 和氧化渣中的 MnO 、 Al_2O_3 、 FeO 等进一步化合成锰铝硅酸盐低熔点复合渣;茶壶包和底注包内钢液镇静时间偏短,渣液无法全部从钢液中浮出,在浇注时随钢液进入型腔,形成车轮踏面夹渣。

(2) 在现行生产模式下,通过合理配碳及改进熔炼操作,控制氧化期吹氧强度,降低钢液氧化程度,有助于降低踏面夹渣缺陷的产生几率。

参考文献:

- [1] CHEN Jing, ZHU Qing, HUANG Di, et al. Control of low melting point MnO-SiO₂-Al₂O₃ inclusions in low carbon thin-strip continuous casting steel [J]. Materials Science and Engineering, 2017: 1-9.
- [2] 黄晋, 张友寿, 夏露, 等. ZG30MnSi槽帮件表面夹杂物形成机理及防止 [J]. 铸造, 2009, 59 (9): 929-932.
- [3] 朱丽娟, 董秀琦, 郭海冰, 等. 用底注包连续浇注铸钢车轮产生夹杂缺陷的分析 [J]. 铸造, 2002, 51 (5): 289-292.
- [4] 于雪峰, 宋国祥, 孙延东, 等. 铁路货车用铸钢车轮夹杂物的热力学分析与实验研究 [J]. 铸造, 2010, 59 (1): 81-83.
- [5] 李传斌. 谈铸钢熔炼方面的问题 [J]. 铸造, 2010, 59 (3): 266-271.

Formation Causes Analysis and Prevention of Tread Slag in Cast Steel Wheels

ZHANG Si-jin, YANG Zhao-li, MA De-qing, ZHENG Yue-peng
(Xin Yang Amsted Tonghe Wheels Co., Ltd., Xinyang 464100, Henan, China)

Abstract:

The feature and chemical composition of tread slag in cast-steel wheels and the steel-making process were analyzed. It was confirmed that tread slag came from the deoxidation process and main component is manganese aluminum silicate with low melting point. Liquid steel had a high oxygen level under the condition of oxidation slag mode of single slag method and formed a large amount of manganese aluminum silicate because of the reaction between SiO₂ and the oxidizing slag, but the low melting point slags did not fully floated up and filled the mold together with steel. During the pouring process, the molten steel entered into the mould cavity and reached the tread position. Due to the rapid cooling effect of graphite, the crust quickly formed, and the slag inclusion on the tread was formed after solidification. By controlling oxygen blowing intensity in oxidizing period and improving melting operations, the probability of tread slag formation was significantly decreased.

Key words:

cast steel wheels; tread slag; manganese aluminum silicate; formation mechanism; improvement methods
