

化学成分对 DL05 电缆钢导电率的影响

黄红兵¹ 彭其春¹ 徐静波² 习天辉² 李 伟² 朱国栋¹

(1 武汉科技大学钢铁冶金及资源利用省部共建教育部重点实验室, 武汉 430081; 2 武汉钢铁(集团)公司, 武汉 430083)

摘 要 DL05 钢的冶金流程为铁水-PB 脱硫处理-BOF-吹氩-RH-200 mm×200 mm 方坯连铸-轧制成 Φ6.5 mm 线材。分析了生产的 256 炉次的 DL05 钢化学成分对导电率的影响, 得出钢中元素总含量或钢中 Mn 含量增加, 钢的导电率降低, 但当钢中元素总含量(不含 Mn)增加, 钢的导电率增加不显著, 因此 Mn 含量对钢导电率的影响最大。提高钢的洁净度, 亦有利于改善钢的导电率。通过将原先 DL05 钢的化学成分控制范围(/%: ≤0.10C, ≤0.10Si, ≤0.35Mn, ≤0.030P, ≤0.030S)优化为(/%)≤0.02C, ≤0.03Si, ≤0.12Mn, ≤0.025P, ≤0.015S, 和 RH 精炼过程有效控制钢的洁净度后, 256 炉次检验结果表明, 该钢导电率 ≥16% 的炉次比率从原 63.25% 提高到 93.75%。

关键词 DL05 电缆钢 BOF-RH 导电率 Mn 化学成分

Effect of Chemical Composition on Electric Conductivity Ratio of Steel DL05 for Cable

Huang Hongbing¹, Peng Qichun¹, Xu Jingbo², Xi Tianhui², Li Wei² and Zhu Guodong¹

(1 Key Laboratory for Ferrous Metallurgy and Resources Utilization of Ministry of Education, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430081; 2 Wuhan Iron and Steel (Group) Co, Wuhan 430083)

Abstract The metallurgical flowsheet for steel DL05 is hot metal- PB desulphurization treatment- BOF- argon blowing- RH- 200 mm×200 mm blooms casting-rolled to Φ6.5 mm rod products. The effect of produced 256 heats steel DL05 chemical composition on electric conductivity ratio is analyzed, it is obtained that with increasing total content of elements in steel or increasing Mn content in steel the electric conductivity ratio decreases, but with increasing the total content elements (except Mn) the electric conductivity ratio of steel increases not obviously, therefore the effect of Mn content in steel on electric conductivity ratio is greatest. And improving the cleanliness of steel is available to improve the electric conductivity ratio of steel. With optimizing the chemical composition original control range of steel DL05- /%: ≤0.10C, ≤0.10Si, ≤0.35Mn, ≤0.030P and ≤0.030S to the control range- /%: ≤0.02C, ≤0.03Si, ≤0.12Mn, ≤0.025P and ≤0.015S, and effectively controlling the cleanliness of steel during RH refining, the 256 heats examination results show that the percentage of heats of electric conductivity ratio ≥16% increases from original 63.25% to 93.75%.

Material Index Steel DL05 for Cable, BOF-RH, Electric Conductivity Ratio, Mn, Chemical Composition

铜包钢兼具钢和铜的优良特性, 具有良好的可焊接、可塑、耐腐蚀及磁性能, 相比于传统铜导线, 具有省铜材、比重轻、节成本等优点, 在国民经济的持续增长、资源的日益匮乏和社会对钢材性能要求的愈益严苛今天, 具有广阔的市场前景^[1-4]。DL05 钢就是典型的铜包钢, 作为该钢重要性能指标之一的导电率(% IACS)需要在 20℃时达到不小于 16% 的提高是钢厂亟待解决的难题之一。

导电率的计算公式为: 导电率/(IACS) = $0.2195 L / (d^2 R_{20}) \times 100\%$ 。式中: IACS- 国际退火铜标准; L- 金属线材标距长度/m; d- 金属线材径/m; R_{20} - 20℃时金属线材直流电阻/Ω。

影响金属导体导电率的因素很多, 作为钢材构成的化学成分对其导电率的影响是最基本的^[5], 分析研究该钢各主要成分对导电率的影响特点, 总结规律, 探究并制定洁净度控制方案对提高 DL05 电缆钢的导电率很有必要。

1 生产工艺和现场数据分析

武钢生产 DL05 钢的工艺流程为: 高炉铁水→脱硫处理(PB)→转炉冶炼(BOF)→在线吹氩调温(BAr)→RH 处理(tRH)→200 mm×200 mm 方坯连铸(CC)→方坯精整修磨线→高速线材轧制→斯太尔摩控冷→集卷。

DL05 钢作为洁净钢的代表, 其化学成分组成特

通讯作者: 彭其春, 教授, 武汉科技大学钢铁冶金及资源利用省部共建教育部重点实验室, 武汉 430081

E-mail: pengqichun1964@163.com

点既要满足用户对 DL05 钢导电率、拉拔性能和抗拉强度的要求,又要符合工业化冶炼的生产实际。DL05 钢中,除 Fe 作为基本元素外,其他元素(C, Si, P, S, N, Ni, Cr, Mo, Cu, Mn, Als)含量很少,其中锰元素含量最高,且钢中的锰元素对导电率影响很大,因此,为了研究元素与 DL05 钢导电率之间的关系,现将[Mn]为一类, $\Sigma[M]_{\text{总(不含Mn)}}$ 为一类,因此,须分别探讨 $\Sigma[M]_{\text{总}}$ 、 $\Sigma[M]_{\text{总(不含Mn)}}$ 、[Mn]与导电率之间的关系。

为分析 DL05 钢中化学元素对导电率的影响,结合生产实际,现统计整理分析钢厂 2014 年 1 月~11 月的 256 批次的 DL05 钢 $\Sigma[M]_{\text{总}}$ 、 $\Sigma[M]_{\text{总(不含Mn)}}$ 、[Mn]与导电率之间的关系。

由图 1(a)可知,DL05 钢 $\Sigma[M]_{\text{总}}$ 主要集中在 0.093%~0.135%, $\Sigma[M]_{\text{总}}$ 和导电率呈负相关关系, $\Sigma[M]_{\text{总}}$ 越大,DL05 钢导电率越低。提高该钢洁净度,降低钢中元素总含量,有利于导电率的提高。

由图 1(b)可知,DL05 钢中元素总质量分数(不含 Mn)主要集中在 0.046%~0.073% < 0.10%,它和导电率之间的相关性不显著。

由图 1(c)可知,DL05 钢中[Mn]主要集中在 0.035%~0.058%,平均为 0.047%,锰含量升高,电缆钢导电率降低,因此,钢中的锰与其导电率呈显著负相关性。

Mn 的电阻率明显大于 Fe 的电阻率^[6],即锰的导电性差于铁,而钢中除铁元素外,锰元素的含量最高,对比图 1(a, b),DL05 钢中元素总含量(不含 Mn)时,导电率和元素含量(不含 Mn)关系不大,加入 Mn 元素后,导电率和元素总含量关系明显。因此,Mn 含量对控制 DL05 钢导电率有着至关重要的作用,且锰元素对 DL05 盘条的导电率影响最大。

DL05 钢主要成分控制见表 1。

2 洁净度优化工艺及应用效果

2.1 洁净度优化工艺

对 DL05 钢采取有针对性的洁净度优化工艺,现对成品钢材进行化学成分、显微组织检测,夹杂物定量分析和导电率、力学性能检测,验证优化工艺的效果。采取的主要优化工艺如下:

(1)在 RH 处理时增加钢液循环和氩气流量,尽量将钢中碳含量降到最低,稳定操作,防止原辅料增碳来控制钢中碳含量。

(2)适当提高炉渣中的 CaO 含量,增加炉渣碱度,降低温度,加大 FeO 含量,增大炉渣量来改善钢液脱磷的热力学、动力学条件,并在出钢过程中根据渣厚推算活性灰 CaO 加入量进行添加,减少“回磷”来控制钢中磷含量。

(3)优化脱硫剂成分,采用低硫合成渣造渣,结合 KR 搅拌深脱硫技术;适当提高渣中 Fe_2O_3 含量,并在操作过程中向炉内加一定量的氧化铁皮保证渣的氧化性以控制生产中的“回锰”;在满足必要的控氧前提下,根据文献[7]选择合适的 $[\text{Mn}]/[\text{S}] \geq 10$ 。

(4)根据钢液终点氧含量加铝工艺,确定合适的加铝量,提高酸溶铝命中率。加强出钢挡渣操作,补铝采用铝线代替铝块,提高铝的利用率;RH 脱碳后适当降低钢液温度,减少脱氧加铝量,增加钢液中氧的活度,可以降低 RH 终点钢液中酸溶铝的含量。

2.2 应用效果

2.2.1 化学成分

DL05 优化前的化学成分和优化后,武钢 2014 年 1 月~11 月的 256 批次的 DL05 钢化学成分如表 2 所示。

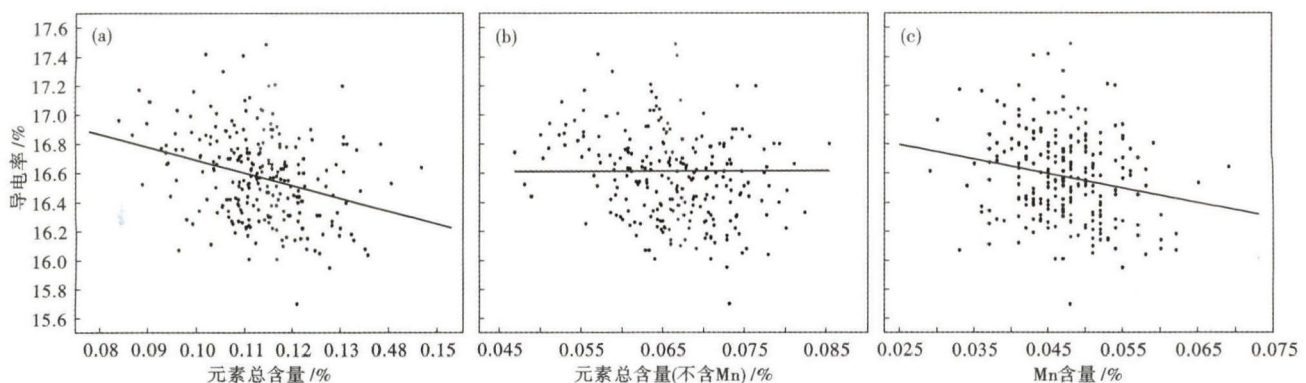


图 1 元素总含量(a),元素总含量(不含 Mn)(b)和 Mn 含量(c)对 DL05 钢导电率的影响

Fig. 1 Effect of total content of elements (a), total content of elements except Mn (b) and Mn content (c) in steel on electric conductivity ratio of steel DL05

表 1 DL05 钢主要成分的控制 / %

Table 1 Control range of main chemical composition of steel DL05 / %

C	Mn	P	S	Al	残余
≤0.005	≤0.10	≤0.015	≤0.01	≤0.01	≤0.10

表 2 工艺优化前、后 DL05 钢的化学成分 / %

Table 2 Chemical composition of steel DL05 before and after process optimization / %

工艺	C	Si	Mn	P	S
优化前	≤0.10	≤0.10	≤0.35	≤0.030	≤0.030
优化后	≤0.02	≤0.03	≤0.12	≤0.025	≤0.015

表 3 DL05 钢 Φ6.5 mm 线材夹杂物定量分析结果

Table 3 Results of quantitative analysis of inclusions in Φ6.5 mm rod coil of steel DL05

试样编号	平均直径/ μm	单颗视场 面积/μm ²	单位面积颗粒 数/(个·mm ⁻²)	面积百分比/ %
W2014083	4.80	8.55	25	0.023

表 4 DL05 钢 Φ6.5 mm 线材夹杂物尺寸分析结果

Table 4 Analysis results of size of inclusions in Φ6.5 mm rod coil of steel DL05

试样号	计数/ 颗	项目	最大卡尺 直径/μm	面积/ μm ²	等效圆 直径/μm
W2014083	35	平均值	4.80	8.85	3.15
		最大值	11.43	29.65	6.13
		最小值	2.11	2.31	1.72
		标准偏差	2.45	6.43	1.23
		总和	171.4	305.6	115.6

由表 2 可知,该成品钢化学成分均达到优化工艺的预期效果。

如图 2 所示,实际 DL05 钢中锰硫含量比 $[Mn]/[S]$ 主要集中在 $11 \sim 19 > 10$,深脱硫效果达到 $[S] \leq 0.002\%$,完全能够满足 DL05 电缆钢的锰、硫要求,减小了脱硫剂用量,降低了铁损,进而降低了成本。

2.2.2 夹杂物定量分析

图象仪夹杂物的定量分析结果见表 3 和表 4,由表中可看出,夹杂物的平均直径都比较小,单位面积颗粒数也比较少,满足了钢中夹杂物总量少、尺寸小的洁净钢一般要求,说明该钢的纯净度较高。

电子探针对夹杂物组成和形貌分析结果见图 3,图 3 是该试样非金属夹杂物直径分布直方图,从图 3 看出钢的夹杂物直径大部分分布在 $2 \sim 6 \mu m$,最大直径为 $10.5 \mu m$ 只有 1 个。

对批号分别为 W20140825-016 (B146400)、W20140825-083 (B146400),直径均为 Φ6.5 mm 试样作夹杂物分析。

沿纵截面切割取样、镶嵌、磨至抛光面,采用电

子探针观察分析,2 个试样中的夹杂物成分都是以元素 Al、Cr、Mn、O 为主,尺寸大小不一,DL05 钢的批号为 W2014016 (B146400) Φ6.5 mm 线材典型夹杂物尺寸和成分见图 4。从图 4 中可以看出夹杂物尺寸都很小。

2.2.3 导电率

对比优化工艺前后钢材导电率。优化工艺前炼制的 DL05 钢,共取 63 个炉号,68 个批次的该钢进行导电率检测,其导电率如图 5(a) 所示。

图 5(b) 为优化工艺后 256 炉次的导电率分布。由图 5(a, b) 对比可知,优化工艺前炼制的 DL05 钢(63 炉次)元素总含量平均值为 0.14%,优化工艺后的该钢(256 炉次)的元素总含量平均值为 0.114%,元素总含量降低,该钢导电率 $\geq 16\%$ 的批次百分比也从 63.25% 提高到 93.75%,如表 5 所示。同时,图 5(b) 点比较集中于元素总含量平均值

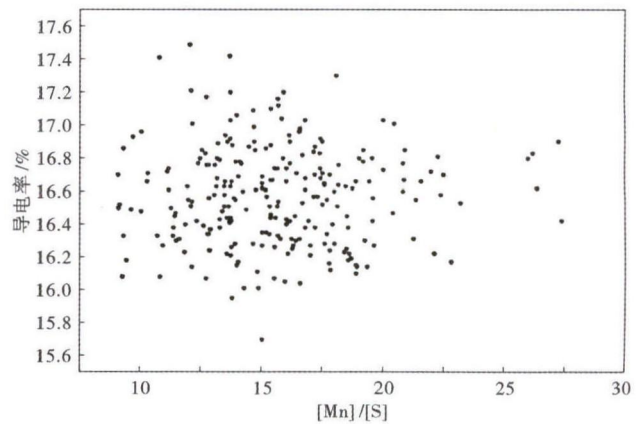


图 2 成分优化后 DL05 钢的锰硫比 $[Mn]/[S]$ 和导电率
Fig. 2 Ratio of manganese and sulfur- $[Mn]/[S]$ and electric conductivity ratio of steel DL05 after optimization of chemical composition

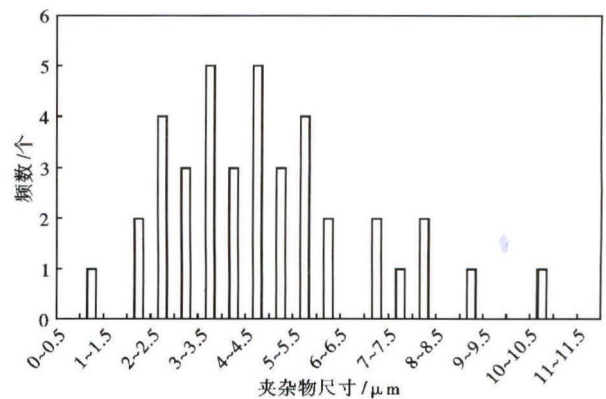


图 3 DL05 钢 Φ6.5 mm 线材非金属夹杂物尺寸分布
Fig. 3 Distribution of nonmetallic inclusions size in Φ6.5 mm rod coil of steel DL05

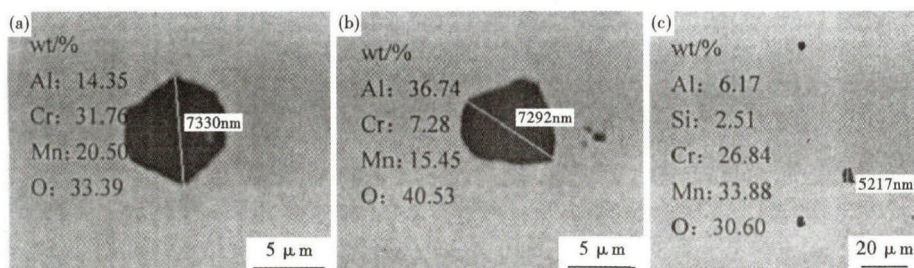


图4 DL05 钢 Φ6.5 mm 线材夹杂物的形貌、尺寸和成分

Fig. 4 Morphology, size and composition of inclusions in Φ6.5 mm rod coil of steel DL05

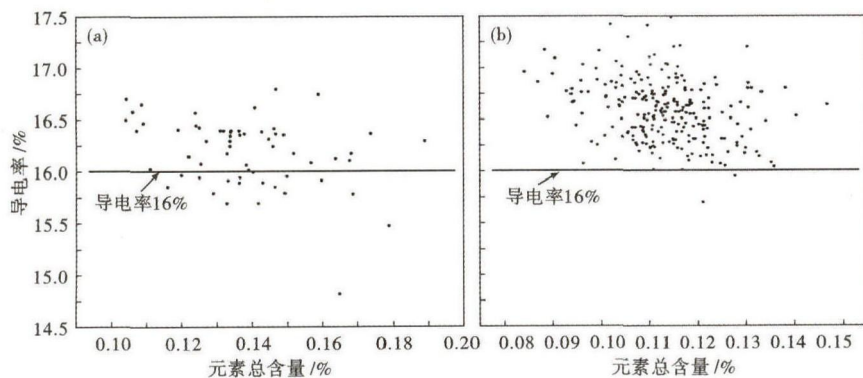


图5 优化工艺前 63 炉次(a)和优化工艺后 256 炉次(b) DL05 钢元素总含量和导电率分布

Fig. 5 Distribution of total elements content and electric conductivity ratio of steel DL05 before process optimization, 63 heats (a) and after process optimization, 256 heats (b)

表5 工艺优化前后的 DL05 钢导电率和导电率≥16%的钢材百分比

Table 5 Electric conductivity ratio (ECR) and percentage of products ≥ 16% ECR of steel DL05 before and after process optimization

工艺	导电率/%		导电率≥16% 批次比例/%
	最小	最大	
优化前	14.8	17.08	63.25
优化后 2014 年 1 月 ~ 11 月	15.7	17.19	93.75

0.114%处,而图5(a)点则比较分散,可见操作稳定性对于该钢导电率的保证和提高的重要性。

3 结论

(1) DL05 钢化学组分中, $\Sigma[M]_{\text{总}}$ 、 $[Mn]$ 越大,导电率越低,而 $\Sigma[M]_{\text{总(不含Mn)}}$ 与导电率的相关性不显著;作为钢中含量仅次于铁的锰元素对 DL05 钢的导电率影响最大,优化工艺降低钢中元素总含量

是提高该钢导电率的重要途径。

(2) 通过采取在 RH 处理时增加钢液循环和氩气流量,采用低碳原辅料;适当提高炉渣碱度,出钢过程中加活性炭;优化脱硫剂成分,适当提高渣中 Fe_2O_3 含量,操作过程中并加一定量氧化铁皮;合理配矿;根据钢液终点氧含量加铝工艺,调整 RH 脱碳后钢液温度等措施可有效控制 DL05 钢洁净度。

(3) 优化工艺后,化学成分、夹杂物达到 DL05 钢洁净度要求,导电率≥16%的炉次从 63.25% 提高到 93.75%,且导电率稳定性也得到很大程度的提高。因此,DL05 钢组分的化学成分直接影响了其导电率。

参考文献

- [1] 彭大暑,刘浪飞,朱旭霞,等. 金属层状复合材料的研究状况与展望[J]. 材料导报,2000,14(4):23-24.
- [2] 肖秋雷,刘素霞,甘霞,等. 电镀法生产铜包钢线的制造工艺及常见的质量问题的探讨[J]. 电线电缆,2008(3):14-16.
- [3] 贺飞,刘利梅,钟云,等. 铜包钢线材及其生产工艺[J]. 表面技术,2007,36(5):78-80,90.
- [4] 刘辉杰. 导电用钢材的试验与开发[C]. //2010年中南·泛珠三角炼钢连铸学术交流会议论文集. 武汉:湖北省金属学会,2010:342-344.
- [5] 王雅贞,李承祚. 转炉炼钢问题[M]. 北京:冶金工业出版社,2004:4-5.
- [6] 孙金煜,田晓慧,元以中. 材料物理[M]. 上海:华东理工大学出版社,2013:65.
- [7] 贾万军,李具中,帅习元,等. 电缆钢 DL05 的试制开发[J]. 炼钢,2013,29(6):19-22.

黄红兵(1992-),男,在读硕士,2015年武汉科技大学(本科)毕业,特殊钢研究。E-mail:936200284@qq.com

收稿日期:2016-07-08