

钢铁译文集

Gang Tie Yi Wen Ji

耐火材料专辑

1

1998

首钢技术中心科技信息研究所

目 录

直流电弧炉炉底用导电耐火材料性能	TSUKASA 等 (1)
单电极直流电弧炉在FLORJDA钢铁公司的应用	D. Meredith (7)
导电捣打料研究	Kenji Ichikawa 等 (11)
喷加白云石提高电弧炉耐火材料寿命	Klans Walden (17)
用于直流电弧炉的导电耐火材料	Walter Msiegl (21)
特殊钢厂直流电弧炉用耐火材料结构和性能综述	Claus Braunhuber 等 (24)
Oharter钢厂直流电弧炉炉底导电耐材的操作经验	Steve C. Beason (29)
直流电弧炉炉底电极套砖	KAZUHIKO KAWASAKI等 (32)
炼钢用单电极直流电弧炉	Dr. S. K. DUTTA等 (38)
直流电弧炉用耐火材料	西尾英昭等 (44)
电弧炉炉底干式振动料的比较	Wayne E. Gerberick (53)
直流电弧炉用特种耐火材料	Ravin Jhunwal (58)
低C高抗剥落性MgO-C砖	山村 隆 等 (64)
Al-Mg浇注料在高温钢包上的应用	MASANOSI TAWARA 等 (70)
Mg砂粒度分布对MgO-C砖物理性质的影响	Masato Tanaka 等 (74)

直流电弧炉炉底用导电耐火材料性能

TSUKASA KANNO 等

一、序 言

最近,电炉炼钢已从交流电弧炉向直流电弧炉转化(以下简称AC-EAF和DC-EAF)。根据炉底电极的形式,直流电弧炉可分为接触钢棒式、触针式、导电砖式。日本有采用接触钢棒式和触针式的,唯独没有报导过采用导电砖式的。

三菱室兰公司DC-EAF炉开始运行。炉底内衬采用导电砖,使用预热的生铁和废钢。到1994年12月止DC-EAF炉操作已达到2250炉。本文介绍了在该运行阶段了解到的有关情况。

二、DC-EAF炉和耐火内衬的技术条件

表1示出了DC-EAF炉的技术条件,装

容量为120t。操作时底部有20t剩余钢水,然后加入40~60%的预热生铁。图1显示了运行过程简图及DC-EAF炉的有关参数。

DC-EAF炉技术条件 表1

炉子容量(t)	100(120)
炉壳直径(m)	6.1
变压器容量(MVA)	38.8×2
电 压(V)	700(最大)
电 流(KA)	98(最大)
电极直径	28英寸
炉 料	废钢、生铁
水 冷	边墙 88% 炉顶 80%

炉子内衬的砌筑情况见图2。导电镁炭砖用在工作层和永久层,鳞片状石墨填充在镁炭砖的各层水平接缝处,以保证导电性

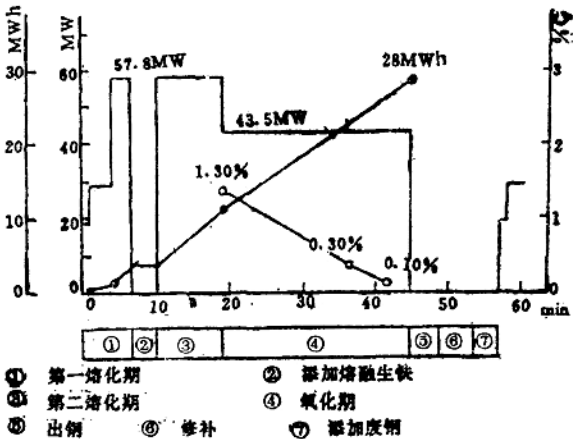


图1 DC-EAF炉的特性和操作步骤

能。冷态捣打料和热态修补料用于修补内衬中的侵蚀部位。

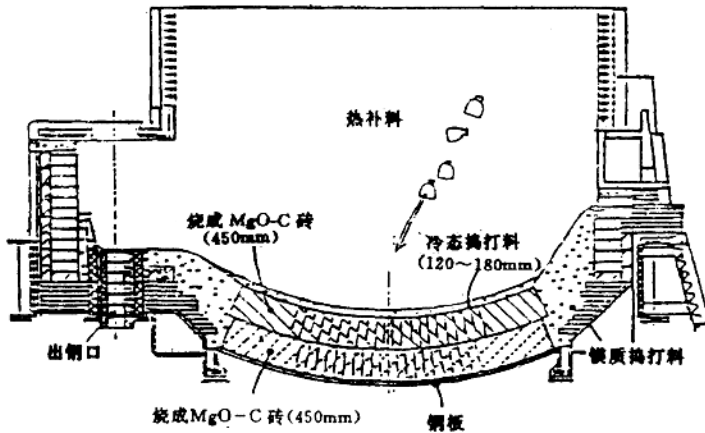


图 2 DC-EAF 炉底砌筑示意

三、炉底耐火材料

1. 镁炭砖的性能

表 2 所示为用于炉底工作衬和永久衬的镁炭砖的性能。对这种砖来说，重要的性能是导电性、导热性(关系到对铜盘的保护)、耐侵蚀性。

DC 电弧炉底工作层、永久层砖和
补炉料性能 表 2

用途	工作层	永久层	修 补 料	
类 型	烧 成 砖		捣打料	修补料
化学组成(%)				
MgO	76	86	74	40
CaO	—	—	—	20
固定C	20	10	16	19
电阻率($\Omega \cdot \text{cm}$)				
制 品	0.005	0.020	—	—
200℃×5h	—	—	0.460	—
1400℃×22h埋碳	0.004	0.017	0.018	0.085
高温导热性 (1000℃) ($\text{MJ}/\text{m} \cdot \text{h} \cdot \text{℃}$)	16.5	9.5	5.2	—

在室温下，把石墨端子接在 $15 \times 15 \times 60\text{mm}$ 的试样两边。如图 3a 所示，镁炭砖(含 25% 的固定碳)的导热性(电阻率)在预热过程中发生变化。当热处理温度增加到约 800°C 时，电阻率下降，温度 $>800^\circ\text{C}$ 时电阻率基本保持不变，冷却后也基本稳定不变。第二次预热后再次冷却，电阻率变化很小，见图 3b。这种情况可能取决于结合剂酚醛树脂的碳化程度。图 4 显示了经过 200°C 和 1400°C 加热后，含 $\text{C} 10 \sim 25\text{Wt}\%$ 的不同组成试样的电阻率。两种不同热处理温度的试样，其电阻率都是随着 C 含量的增加而下降。

炉底工作衬选择了石墨含量为 20%，抗热震性强的镁炭砖，以防由于熔融钢水的渗透引起的剥落。这种镁炭砖的电阻率低，并有很好的导热性。炉底永久衬使用的是含 10% 石墨、导热性较低的镁炭砖。因为在操作过程中永久衬温度较低，并不指望电阻率能够降低，故选用了经烧成的镁炭砖作为永久衬。为了减少在运行过程中冷启动后导电性发生变化，也可采用烧成镁炭砖作工作

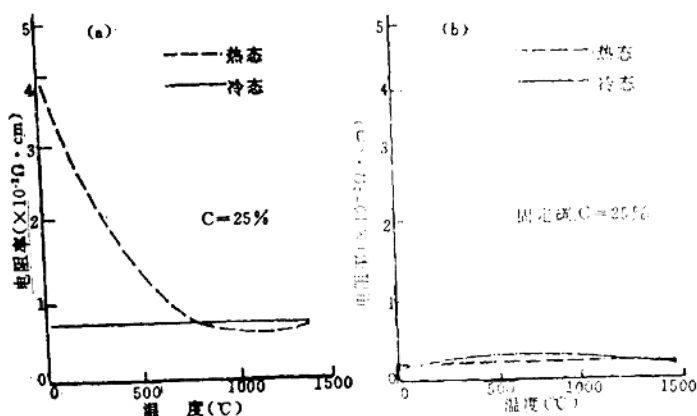


图3 MgO-C砖(含25%固定碳)的电阻率
(a) 常用的加热/冷却方式 (b) 二次加热/冷却

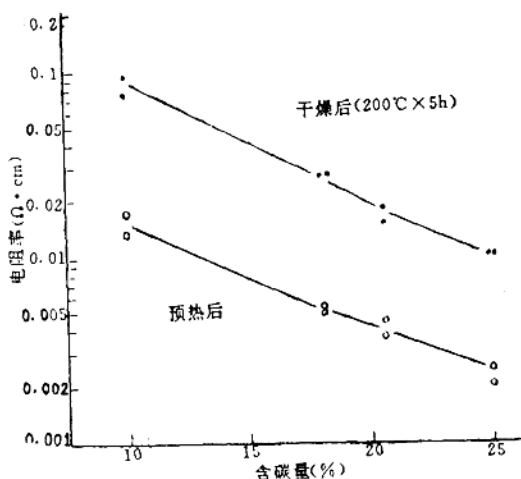


图4 不同C含量的镁炭砖在干燥和焙烧后的电阻率的变化

衬。

2. 水平砖缝之间的电阻率

弧型铜盘和衬砖之间、工作衬和永久层之间的砖缝对炉底导电性有影响。假设缝宽为2mm, 测量了各种石墨接缝材料的电阻率。将石墨材料夹在两个钢盘之间 ($37 \times 52 \times 5\text{mm}$), 上面加上 $95\text{g}/\text{cm}^2$ 的载荷, 这相当于衬砖的载荷。表3列出了经检测的石

墨接缝材料的电阻率比两个钢盘直接连接中间没有填充材料的电阻率要高。人工制造的细颗粒石墨的电阻率比片状石墨的高。同时, 大颗粒片状石墨的电阻率比细颗粒的小。已认识到, 这些接缝材料的电阻率既受到石墨本身电阻率的影响, 更受到石墨颗粒之间较大的接触电阻的影响。在本阶段, 只选用了大颗粒鳞片状石墨作为水平接缝材

料。

填充与不填充的石墨电阻率 表 3

	尺寸 (A·V·mm)	结合厚度 (mm)	电阻(Ω)
不含结合剂	—	0	0.044
合成石墨	0.03	2	0.346
片状石墨	0.07	2	0.215
片状石墨	0.15	2	0.160
片状石墨	0.30	2	0.120

3. 热修补材料的性能

使用的热修补材料性能如表 2 所示。冷态捣打料通常用于一周一次的检修，出钢后使用热修补料。这两种材料的组成中都有片状石墨，导电性能都很好。作为 C 的来源，鳞片状石墨、人工石墨和无定形 C 中鳞片状石墨的电阻率最低。这就是选用鳞片状石墨作为修补料组成的原因。

表 4 示出了实验室检测出的采用各种不同类型 C 的捣打料的电阻率。捣打料是用 MgO 烧结块，8Wt% 的各种 C 原料以及树脂结合剂混合制备的。试样做成直径 50mm，高 50mm 的圆柱体，经过 10MPa 压力压制而成。经过干燥和热处理后，在室温下检测了电阻率。鳞片状石墨的试样电阻率最低。就冷态捣打料而言，电阻率低对于确保冷启动时的炉底导电性是很重要的。对于 C 来源不同的三种检测试样来说，由于 C 颗粒之间的接触不同，电阻率不同。经过干燥后，试样之间的电阻率差异比经过加热后的更为明显。经过干燥的试样的电阻率来源于通过非导电层的 C 颗粒之间的接触，而经过加热的试样的电阻率来源于通过树脂结合剂中残 C

几种形式碳的电阻率比较 表 4

	尺寸 (A·V·mm)	200℃×5h	1400℃×2h (埋C)
片状石墨	0.30	4.88	0.037
合成石墨	0.30	>7×10 ⁵	0.184
不定形碳	0.30	>7×10 ⁵	0.218

注：经 200℃ 和 1400℃ 处理后

与石墨颗粒之间的接触。

图 5 示出了捣打料的电阻率、抗侵蚀指数与 C 含量之间的关系。随着 C 含量的增加，导电性增强（电阻率降低）。当 C 含量为 8Wt% 时，侵蚀指数最大。修补料中碳引入由最初的沥青改为鳞片状石墨。

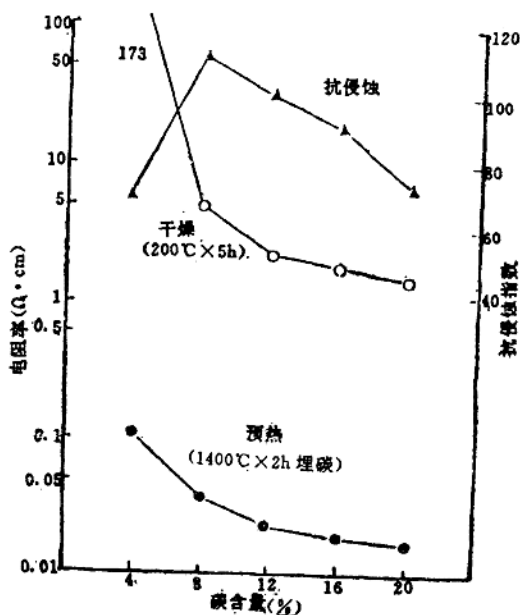


图 5 不同 C 含量镁炭砖经 200℃ 烘干和 1400℃ 烧成后侵蚀情况和电阻率的变化

四、在 DC-EAF 炉上的应用

1. 运行情况

自 1994 年 1 月以来钢产量逐渐增加，主要是由于出钢速率为每炉一个小时，通常留一些钢水以减少炉料的冲击。另外，每天炉子完全出钢一次，然后用氧气吹扫炉底除去残留的钢渣（它会降低炉底导电性），接着用热修补材料补炉。

每周一次的检修日是去除残渣，然后进行冷态捣打料的施工。

2. 炉底的电阻率

加料时, 废钢和炉底之间接触不充分, 且低温状态下冷态捣打料电阻率较高, 造成在一周开始之际炉子冷启动时炉底电压偏高。加热前应对冷态捣打料的初始电阻率有个估计。熔池形成后捣打料温度上升, 炉底电压降至5V, 保持这一水平, 直到下一次装料。如表5所示, 炉底电压为5V时的电阻率和实验室检测的结果非常接近。另外, 实验室数据还显示在操作过程中, 炉底电阻率受接缝材料的影响很大。

试验室炉底电阻与实际应用数据比较 表5

实际数据 (精炼期)	
炉底电压 (V)	5
总电流 (KA)	98
炉底电阻 (Ω)	5.1×10^{-5}
每单位面积炉底的电阻($\Omega \cdot \text{cm}^2$) (A)	4.85
实验数据 (1400℃埋C后)	
砖材 (工作层和永久层) ($\Omega \cdot \text{cm}^2$)	0.72
捣打料 (保持50mm厚) ($\Omega \cdot \text{cm}^2$)	0.09
结合层 (2×2层) ($\Omega \cdot \text{cm}^2$)	4.80
炉底平均电阻 ($\Omega \cdot \text{cm}^2$) (B)	5.41
比较结果	A≈B

3. 炉底温度

炉底温度用靠近炉底中心 (离铜盘225mm) 的埋在永久衬内的热电偶测量。图6示出了炉底温度随着修补料改变而变化。在某些情况下, 冷态捣打料的高消耗 (出钢后估算) 和热修补材料的低消耗导致炉底温度约为500℃, 衬砖完全暴露。在其它情况下, 冷修补材料的低消耗和热修补材料的高消耗导致炉底温度最高为400℃, 且出钢后衬砖不暴露。修补料的残余情况可通过炉底温度间接估算, 此外, 在连续运行过程中对修补料的监控也是很重要的。

4. 炉底砖的侵蚀

2250炉后, 更换了炉底砖 (工作层)。出钢口一侧的炉底砖最薄 (80mm), 中心部位是150mm, 边缘部位为380mm (最大)。

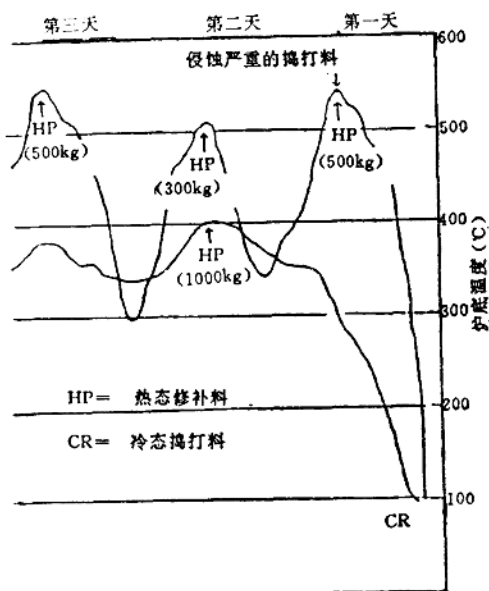


图6 通过热电偶测量永久层镁炭砖

温度对炉底捣打料和修补料的影响

镁炭砖的侵蚀是由于渣中的FeO对石墨的氧化造成的。为提高内衬寿命, 采取对策防止FeO的氧化非常重要。如出钢后, 出钢口的附近有残渣滞留, 所以常用氧气吹扫以清除残渣, 这样就加剧了氧化。采取措施后发现: (1) 接缝处有很少的金属渗透; (2) 无论是工作衬还是永久衬基本上没有砖的气相氧化, 永久层的砖可重复使用。水平接缝处的鳞片状石墨的光泽没有变化 (很少被氧化)。

表6示出了与70tAC-EAF炉相比, 100tDC-EAF炉的单位消耗。这只是一个总体上的比较, 因为还有更多的不同之处, 例如AC-EAF炉用废钢, 而DC-EAF炉则使用熔融生铁。

表6数据表明DC-EAF炉电极和氧气的消耗较少, 而热修补料的消耗在某种程度上要比AC-EAF炉多。热修补料的消耗受氧气吹扫以及缩短炉子操作周期的影响很大, 这

可能会得出易使人误解的结论。上述观察结

直、交流电弧炉各指标单位消耗比较

表 6

炉 料	DC 炉	AC 炉
	废钢、生铁	废钢
能耗(kWh/t)	234	396
电极消耗(kg/t)	1.16	2.80
氧 气(Nm ³ /t)	20	32
CaO(Kg/t)	24	20
修补料(Kg/t)		
冷态捣打料	0.19	0.37
热态修补料	0.20	—

果将会在今后连续运行的过程中得到证实。

五、结 语

采用导电耐火材料炉底的DC-EAF炉在第一阶段运行成功。观察结果是：

(1) 有必要采用导电耐火材料，如含 C 材料作为炉底用料和修补料。

(2) 经过>800℃的热处理后，以树脂结合的含C耐火材料电阻率降低。

(3) 采用鳞片状石墨作为C来源可有效地降低电阻率。

(4) 在炉子运行过程中，炉底电阻率很大程度上受水平接缝的影响。

(5) 通过埋在永久层砖衬中的热电偶测示温度，可以推算出热修补的的残厚。

(6) FeO的作用是衬砖和修补料侵蚀的主要原因。

(7) 第二阶段DC-EAF炉的运行正在进行中。今后将在此基础上对耐火材料的变化进行研究。

程 强 译自《TAIKABUTSU

OVERSEAS》，Vol16, No2.

陶绍平 校

单电极直流电弧炉 在FLORIDA钢铁公司的应用

D. Meredith

摘要 直流电弧炉的开发始于1971年的ASEA, 最初开发直流电弧炉目的是熔化废钢和还原铁矿石。后来, 这种直流炉又应用于铁合金生产。FLORIDA钢铁公司使用的是35t、18KVA的电弧炉。1986年3月TAMPA炼钢分厂也开始使用了直流电弧炉, 炉底采用镁炭砖砌筑, 到目前为止已运行了半年以上, 钢产量超过50000t。采用直流电弧炉后, 石墨电极消耗由11磅/t降至5.0磅/t。

一、前言

单电极直流电弧炉的开发始于1971年的ASEA。当时, 人们偶然发现石墨阴极的直流电弧等离子体能给阳极提供非常有效的电弧热能, 这一点体现在炉内的废钢上。采用该技术, 石墨电极消耗较交流电弧炉至少降低了50%。

最初, 开发直流电弧炉目的是: (1) 替代传统的熔化废钢的三相交流电弧炉; (2) 作为ELRED过程中熔化预还原矿石的炉子。今天, 直流电弧炉在炼钢和铁合金工业同时应用。FLORIDA钢铁公司最初的炉子是一台35t、18KVA的废钢熔化炉。TAMPA炼钢分厂改造的直流电弧炉1986年3月19日投入运行, 并已正式使用。

二、FLORIDA钢铁公司 的直流电弧炉

1. 设备安装

电炉中2号电极延伸到炉壳中心, 炉壳

是一新的炉壳, 它像一个大的圆形铜盘, 分为四个部分, 并被固定在炉底用作接触板, 使电流自上流向炉底。炉壳的每一部分都有一个向外突出的管子延伸到炉底与一个冷水管相连。

炉壳的上下部靠一法兰盘连接。它是一个由绝缘材料制成的分离层, 目的是与炉底电极绝缘。铜盘上方是导电炉底, 由镁炭砖砌成, 与常规的炉底耐火材料相比, 这种炉底材料具有较高的导电性。炉底上还安装一带有轴向鼓风机的空气输送管和一将冷风吹向炉底的罩子。

2. 操作经验

(1) 操作 目前这座直流电弧炉与另一座炉容稍大些的交流电弧炉交替冶炼, 为铸机输送铁水。两座电弧炉每周工作5天或120h。直流电弧炉每周冶炼50~55炉, 约1800t钢水。以下总结了两座电弧炉的基本操作参数。电弧炉出钢温度约1700℃, 两次出钢间隔时间通常为2h左右。

(2) 导电炉底 电弧炉炉底全部用镁炭砖砌筑。炉底衬厚度为40英寸, 由4层砖砌成。导电砖内含C10~20%, 这些C以鳞片

年产量: 200000t

作业计划: 120h/周

品 种: 60级、40级、钢筋5~11

生 产 率: 33t/h

	3号炉(D.C.)	4号炉(A.C.)
炉壳直径:	12英尺6英寸	13英尺6英寸
熔化功率:	11MW	14MW
精炼功率:	9MW	11MW
氧 枪:	2支	2支
装料次数/每炉:	3次	2次
炉 容:	33t	33.5t
水冷炉顶:	√	√
水冷炉壁:	√	√
电极直径:	16~18英寸	16英寸
电极升降:	液压	曲柄传动
作业班组数:	2个	2个

石墨形式填充在镁质混合料中。

为了确保炉底与废钢之间良好的导电性,每次出钢后,炉内要留有5t钢水。周末停炉后,要将炉内的钢水全部出净。重新开炉时须重新向炉内兑入一些钢水。在最初的几周里,为确保炉底镁炭质耐火材料具有良好的导电性,用一小钢包将交流电弧炉内的钢水送到直流电弧炉中。此后,就放弃了冷开炉操作,即在渣门处用氧枪先熔化5000磅废钢覆盖在炉底上,然后将剩余的废钢装入电弧炉内开始起弧冶炼。

为了保持整个炉底良好的导电性,须取缩常规的热修补料,如死烧白云石质或Mg质修补料,这样必然导致炉底损耗增加,经济上不合算。

炉底顶层耐火材料消耗后,需在周末停炉期间进行更换。一般是在冶炼5周或700h后进行。随着冶炼操作工艺和炉底耐火材料设计的进一步改进,炉底顶层两次修补的间隔将显著延长。

近来,镁炭质捣打料的研究很有成效,可在不损坏炉墙的情况下成功地修补炉底。这种冷态捣打料在充分热处理前,未石墨化或不导电。为了使之导电,需在炉底每15~20英寸的面积上设置导电针,将切割的金属

碎块铺在导电针上,用渣门处的氧枪熔化金属碎块,然后才能开始起弧。

(3) 电极消耗 在交流电弧炉冶炼中,虽电极静止不动,但其消耗为10.6磅/t钢。图1绘出了到11月15日为止,每周的电极消耗情况,它包括了电极头损耗和折断损耗。这段时间内石墨电极平均消耗为11磅/MWh,相当于5.6磅/t钢。这意味着电极消耗较交流电弧炉降低了5.6磅/t钢(或降低了53%)。

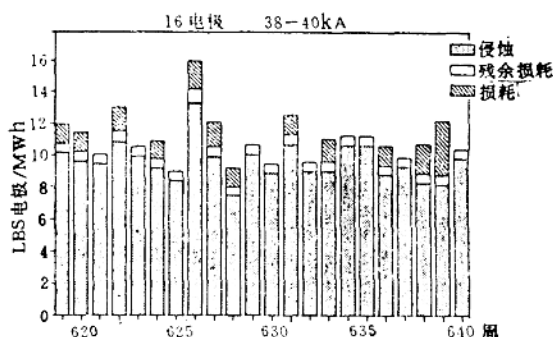


图1 电极消耗情况

投产初期,电极的电流密度为200A·S/英寸²。电流密度很高,由于功率不足,导致电极大量开裂和残头损耗,延长了精炼时间。因此,该公司11月15日将电极换成了18英寸的电极,这样,电极电流密度就降到了160A·S/英寸²。

显然,这样的改换是合理的。现在,电极平均消耗为4磅/t钢。或者说,比交流电弧炉电极消耗节省了62%。大电极的两个优点是增加了精炼功率,缩短了冶炼周期。

图1还进一步阐明了石墨电极平均消耗分为两种不同的消耗途径,表明了电极头消耗与边部氧化的关系。可以推断,这个关系与交流电弧炉基本一致。

(4) 能源消耗 理论上直流电弧炉的能耗与交流电弧炉一样,实际上这是一种误

解, 由于交流电弧炉的关系, 直流电弧炉功率不足, 因此冶炼周期时间较长。其原因是: (1) 多次停炉 (这与某些因素有关, 如学习正规地操作设备), 如几次在炉壳结合部发生灭弧现象、残留于炉内的钢渣造成的短路等。目前, 通过改善内部的管理已基本上解决了这个问题; (2) 当不实行留钢操作时, 灭弧可能是由于炉底接触不良所致; (3) 直流电弧炉靠三个功率低的负荷系统工作, 因此在其它条件与交流电弧炉一样的情况下, 直流电弧炉冶炼可节省能源消耗, 但这只是间接的证明。

3. 长弧操作

交流电弧炉改造为直流电弧炉时, 由于没有适宜的变压器, 因此电流和电压间的关系发生了变化。根据整流器原理, 在直流电弧炉操作中, 起弧电流增加了1.22倍, 起弧电压增加了2.34倍, 起弧阻抗增加了1.91倍 (或2倍), 故直流电弧炉冶炼离不开长弧熔化技术。

目前, 许多现代化的电炉车间都采用了用泡沫渣屏蔽电弧, 以改善对物料传热的长弧操作技术。直流电弧炉也采用了这一技术并使其进一步完善。由于直流电弧炉中央设置了单电极, 且电弧垂直于炉缸, 因此直流电弧炉可采用更长的电弧, 使直流电弧炉内传热较交流电弧炉更均匀。在交流电弧炉中, 三个电弧炉由于电磁力的作用, 相互排斥, 造成每个电极的电弧热面集中, 如图2所示。

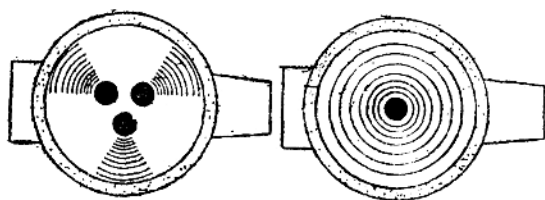


图2 交流和直流炉的热分布图

据此, 人们才有兴趣考察耐火材料指数。这个指数是评价交流电弧炉炉墙热应力的数值, 耐火材料指数 (RI) 由下式计算:

$$RI_{ac} = \frac{Parc \cdot (U_{arc} - 35)}{a^2}$$

式中 $Parc$ ——一根电极的有效功率 (kW);

U_{arc} ——冶炼期间的起弧电压, 允许阴阳极电压降为35V;

a ——电极外表面到炉渣线处的距离 (cm)。

要记住, 这个指数用来表示交流电弧炉的如何构造。这里, 靠近电极的耐火材料侵蚀增大, 因为它离三个电极的电弧最近。另外, 由于电磁力的作用, 电弧偏移, 从而进一步加剧了耐火材料的侵蚀。因此, 不能用同样的公式讨论直流电弧炉。

通常, 在交流电弧炉中, 每条电弧炉向其周围的1/3区域内释放热量, 而单电极直流电弧炉的电弧则将其热量全部传给炉内各个区域。因而, 建议使用下式来计算直流电弧炉耐火材料指数。

$$RI_{dc} = \frac{1}{3} \frac{Parc \cdot (U_{arc} - 35)}{a^2}$$

下面介绍如何使用这个耐火材料指数公式来研究FLORIDA钢铁公司直流电弧炉和交流电弧炉。

AC: $Parc = 4000$ (KW);

$U_{arc} = 140$ (V);

$a = 76$ (cm);

$RI_{ac} = 73$ 。

DC: $Parc = 12000$ (KW);

$U_{arc} = 325$ (V);

$a = 125$ (cm);

$RI_{dc} = 74$ 。

在这个例子中, 改造前后交流电弧炉和直流电弧炉耐火材料指数实际上是一样的, 几个月的实际操作经验也证实了这一点, 炉墙侵蚀没有明显的差异。

FLORIDA钢铁公司直流电弧炉的实际操作经验表明：减少了炉墙耐火材料的维修，因而，计算RI时的校正系数可能小于1/3。但是，这必须通过进一步的实践来证实。

4. 直流电弧炉的其它优点

电流从熔池传到底部电极，产生了使电弧炉下部熔化了金属运动的电磁力，此电磁力使熔化了金属沿着炉底向外侧流动，接着沿着炉子的表面流回熔池中心。电弧炉熔池中的静压力进一步加强了熔池的运动，且导致了熔化金属的温度均匀分布和化学同性。

在冶炼开始4~5min后，直流电弧炉的噪音比交流电弧炉的要低得多。

由于炉内烟气在电极孔散发，所以直流电弧炉中烟气的疏散要比交流电弧炉中烟气疏散更容易。

5. 直流电弧炉的经济效益

通过交流电弧炉的电极特性，认识到单位电极消耗的不稳定性，所以从交流电弧炉转为直流电弧炉须认清炉子的基本原理，以确定其经济价值。FLORIDA钢铁公司TAMPA厂把每吨节约5美元定为预定目标。目前，由于炉底耐火材料性能没有达到设计水平，所以FLORIDA钢铁公司每吨节约费用低于5美元。

6. 直流电弧炉经验概括

从1971年起，ASEA就开始研究在冶金过程中开发直流电弧炉技术。1984年，ASEA与西德的KRUPPINDUSTRIETECHNIK共同合作，进一步开发和推广了熔化废钢的直流电弧炉。

几年来，对直流电弧炉技术进行的测试和研究如下：

测试结果 表 1

工 厂	产 品	容量 (t)	等级	产量(t)
Mefos 72-75	铁	7	4.5	1000
Kanthal 75-76	合金	30	9	8000
domnarvet 77-79	碳素钢铁	30	11	3500
Gullspang since 81	FeW	4	1.2	1800
Avesta 83-84	不 锈 钢	55	18	17500
MS&A since 84	HCFcCr	70	16	25000
Gullsoang since 85	Recovery of Mo8Co硅铁	6	2.0	1300
Florida Steel since 86	碳 素 钢	35	18	50000

三、前 景

如前所述，直流电弧炉主要优点是降低了石墨电极的消耗，节约了资金。但要达到很低的支出，只有单电极炉子才能实现。

今天，商用电极的最大直径为28英寸，允许通过电流为100kA。利用这类电极，直流电炉的功率被限制在75kVA。鉴于直流电弧炉中没有炉壳效应或者电流集中于表面的现象，所以在将来有可能考虑使用更大直径的电极，因此也就有更高的功率。然而，这发展还需有一段时间。

目前，直流电弧炉主要应用在75MVA范围内。在此范围内，直流电弧炉为钢铁工业找到了一条降低成本的路子。

张王斌 译自《电炉会议录》

曹 勇 校

导电捣打料研究

Kenji Ichikawa等

一、序 言

为了改善环境、降低电极和耐火材料消耗、实现自动化操作，直流电弧炉风靡世界。目前有多种不同类型的直流电弧炉在运行中，都有底电极，且底电极都直接接触钢水和渣。因此，底电极须具有良好的抗侵蚀性并配备有效的修补料以延长炉子寿命。为了开发导电耐火材料，本文报导了碳、结合剂和热处理对镁碳质捣打料导电率的影响。

二、导电性

典型材料的电阻率示于图1。金属或碳化物具有很小的电阻率，如：铁的电阻率为

$9.7 \times 10^{-6} \Omega \cdot \text{cm}$ ，铝的电阻率为 $2.7 \times 10^{-6} \Omega \cdot \text{cm}$ 均归于高导电性材料。用于耐火材料骨料的金属氧化物有较高的电阻率，被归为绝缘材料。氧化铝的电阻率为 $1.0 \times 10^{16} \Omega \cdot \text{cm}$ ，虽然 MgO 的电阻率随温度升高有所下降（850℃时为 $2.0 \times 10^{18} \Omega \cdot \text{cm}$ ），但相对来说还是很高。电极通常由碳素材料制成，但用于各种场合的碳电极的电阻率在室温下仍很高，为 $10^{-4} \sim 10^{-2} \Omega \cdot \text{cm}$ 。炉底电极上使用的耐火材料，电阻率应在 $10^{-2} \Omega \cdot \text{cm}$ 或更低。添加金属可有效地提高导电性，但可能会降低耐侵蚀性。本研究选择了镁碳质材料，因为镁砂具有很好的抗渣侵蚀性，而C又是一种导电的材料，对钢水具有不浸润性。

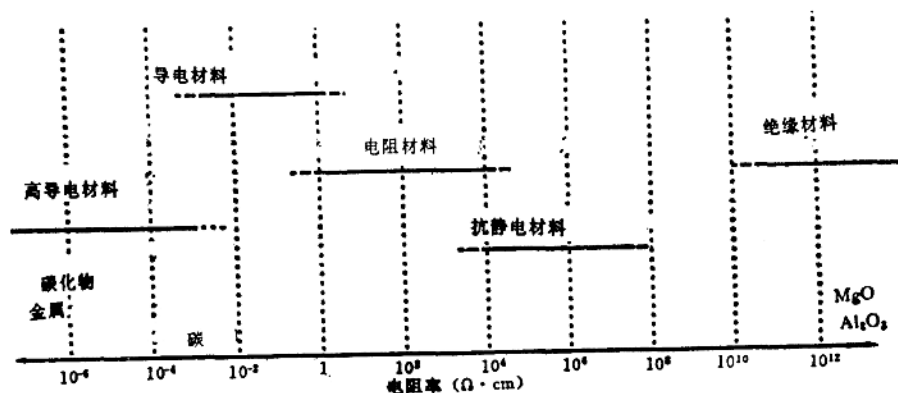


图1 典型材料的电阻率

三、试验方法

表1列出了用于试验的原材料。为了捣打的需要,对镁砂颗粒级配进行调整并准备了四种中国产的不同粒度的鳞片状石墨,对于试样中的镁砂和石墨用液体酚醛树脂进行混合搅拌,用手工捣打成型,试样尺寸为 $40 \times 40 \times 160\text{mm}$,成型样品的两端涂以In-Ga合金(In=70, Ga=30),按图2所示测量每组试样的电阻。为了比较每组试样的导电性,用下列方程式计算试样的电阻率(ρ):

$$R = \rho l / a$$

式中 R ——电阻(Ω);

ρ ——电阻率($\Omega \cdot \text{cm}$);

l ——试样长度(cm);

a ——试样截面积(cm^2)。

试验用原材料 表1

骨 料	海水镁砂, $\text{MgO}=98\%$
碳	中国产天然鳞片石墨 $\text{C}=98\%$
结 合 剂	液体酚醛树脂

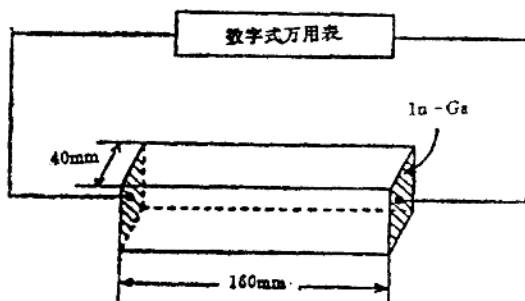


图2 电阻率的测量方法

四、石墨的影响

由于捣打成型试样的电阻率通常受石墨含量的影响,故研究了石墨粒度和加入量对电阻率的影响。

1. 石墨粒度的影响

准备了四种粒度(0.15, 0.22, 0.26和0.49mm)的石墨,分别与镁砂和酚醛树脂混合,制成两组试样:一组试样的石墨含量为9%;另一组为18%。试样经捣打成型,在室温下养护24h,然后在常温下按图2所示的方法测量试样的电阻,并计算电阻率,其结果示于图3。

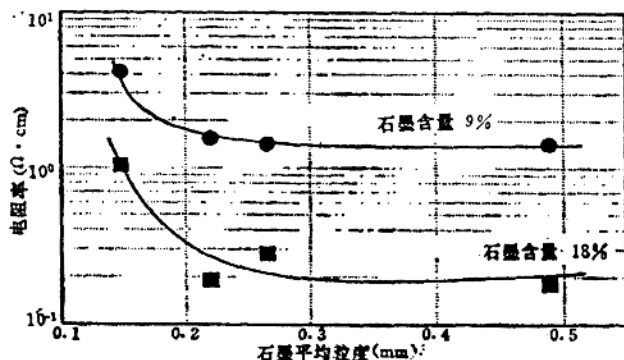


图3 石墨粒度与电阻率的关系

可以看出,含有18%石墨的试样其电阻率明显低,18%与9%石墨量的差别约为1

个数量级。小粒度石墨对电阻率的影响较大,含有0.15mm粒度石墨的试样具有较高

的电阻率。含有较大粒度石墨 ($>0.2\text{mm}$) 的试样在 9% 和 18% 含量下都具有较低的电阻率。

2. 石墨含量的影响

准备了不同石墨含量的试样用于试验。试样在室温和 $150^\circ\text{C} \times 24\text{h}$ 处理后, 测量了电

阻率。结果示于图 4。可以看出, 石墨含量在 0~18% 时, 随石墨含量的增加, 电阻率急剧下降, 而当石墨含量 $>18\%$ 时, 电阻率基本保持稳定。在养护期间未发现试样有明显差异。

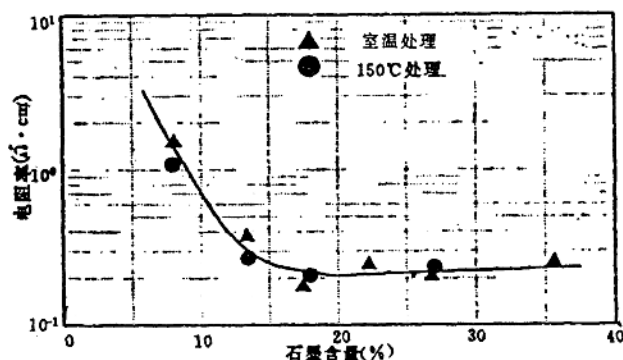


图 4 石墨含量与电阻率的关系

试样经 150°C 处理后检测试样的显气孔率, 并绘制于图 5。显然, 该曲线与图 4 正好相

反。石墨含量在 13~15% 的范围内电阻率较低, 而过量的石墨则会导致较高的气孔率。

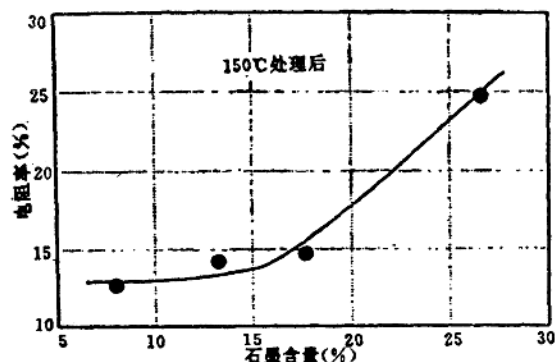


图 5 石墨含量与显气孔率的关系

3. 电路的形成

如前所述, 石墨量与电阻率是非线性的关系。由于石墨间接触点的数量取决于石墨含量, 电路中石墨含量 $<18\%$, 电阻率下降。石墨量 $>18\%$ 时, 石墨间的接触点虽增多了, 但正如图 5 所示, 由于成型试样结构

松散, 可能会阻碍石墨颗粒的接触或使接触面积变小。故认为, 当试样中石墨含量太多时, 不能被降低电阻率。图 6 是一个电路示意图, 图中阴影线部位是 In-Ga 合金电极, 黑色的方形体代表石墨颗粒, 在两电极之间, 至少在 (A) 状态下, 石墨颗粒须连续

接触,以便在成型体中获得导电性。随着石墨含量的增加,石墨接触点和接触面积也增加(B状态),逐渐形成并联电路,电阻率下降。图4中石墨含量在8~18%范围的状态与图6中的(A)(B)状态相似。该条件下,石墨颗粒影响接触面积,不管怎样,如前面试验所述,当石墨含量相当低时(即<8%),电阻率下降是非线性的,(D)状态

表明了能导电的最低石墨含量,但这种状态很特殊,不能用于实际。(C)状态具有与(D)状态相同数量的方形面积,(C)是一种常见的情况,这种状态并不能形成电路,没有导电性。在石墨含量少时,电阻率非常高。当石墨含量增加到一定值时,才可能形成(A)状态,从而获得导电性。

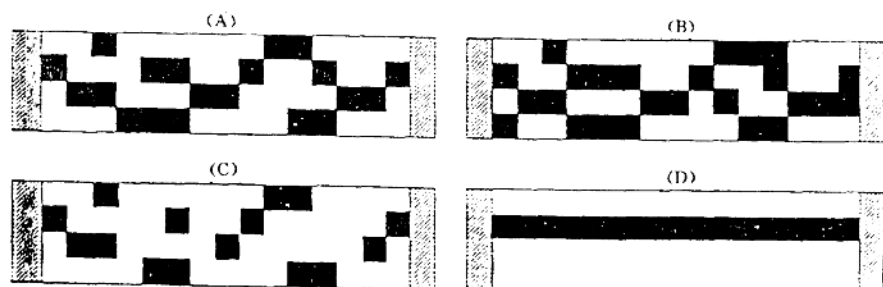


图6 电路示意图

五、结合剂含量的影响

如前所述,液体酚醛树脂被用作试验的结合剂,捣打成型时,液体酚醛树脂的用量一定的范围,在每组试样中加入18%的石墨,测量了150℃×24h和1000℃×3h处理后的电阻率,结果示于图7。酚醛树脂是一种

绝缘材料,试验时每个颗粒均被这种结合剂的薄膜所覆盖和绝缘。图7示出了经150℃养护后试样电阻率的微小变化,这种变化是由于结合剂用量不同所致,即颗粒周围有一层很薄的结合剂膜,由于大多数石墨颗粒在捣打中被强迫与其它的颗粒直接接触,所以电阻率的变化很小,可以说具有绝缘性的结合剂添加量对电阻率的影响很小。

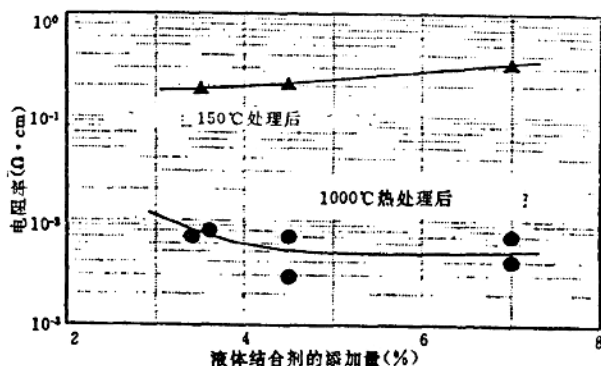


图7 液体结合剂加入量对电阻率的影响

经1000℃处理后的试样的电阻率比150℃处理后的试样的电阻率小，这是由于酚醛树脂的碳化作用使石墨沾结的缘故。假设电阻率的微小变化是由于致密度和结合剂残余C含量不同造成的，那么，当结合剂用量太少时，成型体又无法充分致密化，且不能通过加热处理加以修正。虽养护后的试样电阻率随结合剂的微量增加而略有提高，但结合剂在高温下被碳化。又促进了电路的形成。从致密度和残余碳含量的平衡看，较合理的结合剂用量约为4.5%。

六、热处理温度对电阻率的影响

试样经室温、150℃加热到250、400、600、1000和1500℃后，分别测量了试样的

电阻率和显气孔率。电阻率与热处理温度的关系示于图8。加热后树脂结合剂的特性是影响电阻率的主要因素，在250~600℃电阻率的变化是由于熔剂的蒸发和树脂的分解所致，但变化不大。在600~1000℃由于酚醛树脂发生了碳化反应电阻率显著降低。可见，不同石墨含量试样的电阻率随温度变化的趋势十分相似。

显气孔率的变化示于图9。在600℃前，试样显气孔率明显增大，在此温度下树脂中的熔剂或易挥发物随结合剂的分解而蒸发。温度超过600℃后，试样显气孔率的变化比较小。石墨含量为27%的试样的显气孔率稳定在较高的水平上，这是由于试样未达到充分致密化，且大多数气孔属于开口气孔所致。因此说结合剂蒸发给电阻率带来的影响小。

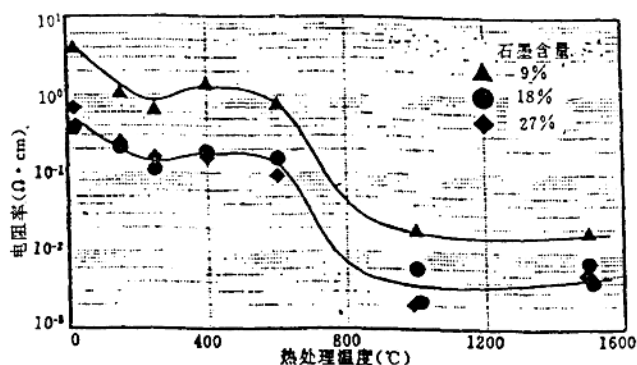


图8 热处理温度对电阻率的影响

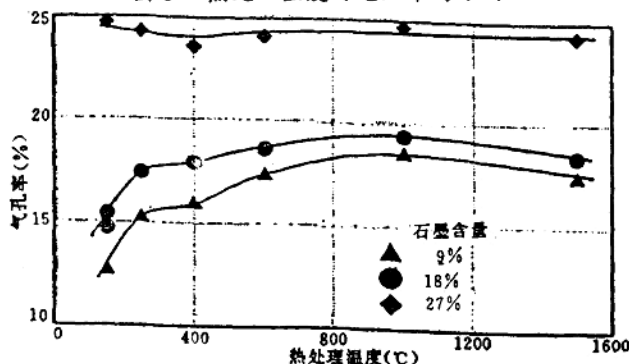


图9 热处理温度对显气孔率的影响