

铜镍矿电炉熔炼

北京有色冶金设计研究总院
金川有色金属公司 编译

本书主要包括铜镍精矿和富矿电炉熔炼的理论概要、设备构造、生产操作、技术经济指标和安全技术。还包括贫化电炉从转炉渣中回收钴的理论和实际经验。它取材于苏联 Я.Л.Серебрянный著的《Электроплавка медноникельных руд и концентратов》一书(1965年和1974年版),并根据我国的需要加入一些国内资料编译而成。本书的特点是扼要介绍了几个工厂的实际经验,写得比较具体。可供有色冶金工厂从事矿热电炉工作的工人、技术人员和管理人员阅读,也可供设计人员、科研人员、大专院校师生参考。

参加本书编译工作的人员有:北京有色冶金设计研究总院黄其兴、那富智、陈维东、余楚蓉、张振民、李织云,金川有色金属公司黄剑师、王德雅、白达之。

铜镍矿电炉熔炼

北京有色冶金设计研究总院 编译
金川有色金属公司

*

冶金工业出版社出版

(北京灯市口74号)

新华书店北京发行所发行

冶金工业出版社印刷厂印刷

*

850×1168 1/32 印张 6 5/8 字数 175 千字

1981年5月第一版 1981年5月第一次印刷

印数 00,001~2,800 册

统一书号: 15062·3473 定价 0.89 元

目 录

第一章 矿热电炉在有色冶金中的应用	1
第二章 电炉熔炼的理论概要	3
第三章 矿热电炉熔炼前物料的准备	15
一、精矿和粉矿的烧结	15
二、精矿制粒后焙烧	16
三、硫化精矿的沸腾焙烧	25
四、铜镍精矿的回转窑焙烧	25
第四章 电炉熔炼的物理化学反应及熔炼产物	27
一、熔炼反应	27
二、熔炼产物	30
第五章 矿热电炉及其附属设备	47
一、矿热电炉的特性	47
二、基础和炉底	47
三、炉墙	54
四、炉顶	56
五、炉子的骨架	58
六、电炉加料装置	61
七、熔炼产物放出口	62
八、烟道	65
九、炉子通风	66
十、炉子热工制度的控制	67
十一、电极	67
十二、电极夹持器	72
十三、电炉主要参数的确定	82
第六章 矿热电炉的电气设备	86
一、电炉的供电系统	86
二、电炉变压器	87

三、短网	95
四、电极的自动化控制	100
第七章 电炉熔炼的操作	102
一、电炉的电气制度	102
二、低冰镍和渣池深度	111
三、电炉装料	116
四、液体转炉渣返回电炉	127
五、熔炼产品的放出	129
六、低冰镍放出口和放渣口的小修	139
七、电极的操作	143
八、降低废渣中金属损失的途径	152
九、提高电炉单位面积功率的措施	161
十、新电炉的开炉	163
十一、电炉修理	167
十二、电炉熔炼的热平衡	178
第八章 电炉熔炼的技术经济指标	181
一、电炉的生产能力	181
二、电能单消	182
三、金属进入低冰镍的回收率	184
四、辅助材料的消耗	187
五、电炉功率利用系数	188
第九章 电炉安全技术	189
一、电炉的位置和构造	189
二、电炉电气设备的维护	189
三、触电事故的紧急措施	191
四、放低冰镍和放渣的安全技术	192
五、加料安全技术	193
第十章 液体转炉渣的电炉贫化熔炼	194
一、贫化熔炼的理论基础	194
二、贫化熔炼的实践	196

第一章 矿热电炉在 有色冶金中的应用

在有色冶金生产过程中，矿热电炉日益广泛采用。作为一种熔炼设备，它比其它冶金炉具有一系列的优点：第一，它的热源是从电能转化来的，可以得到高温，使熔炼产物过热。这一点对于处理难熔矿石和精矿特别有利。例如，某些含氧化镁高的硫化铜镍矿，熔点高，在经济条件有利时采用电炉熔炼是合适的。第二，由于它不用燃料，没有燃料燃烧的气体产生，因此电炉烟量比其它冶金炉少。第三，电炉熔炼时随炉渣和烟气带走的有价金属较少，有可能获得较高的金属回收率。限制电炉采用的根本原因在于电炉熔炼耗电大，对于电价比较高的火力发电地区，它的生产成本往往比其它冶金炉高。对于具有廉价电力的水力发电地区，电炉在经济上则是有利的。因此，矿热电炉的采用，应根据不同情况通过技术经济比较来确定。

按照国内外重有色冶金的生产实践，矿热电炉经常应用于以下工艺流程中：

1. 含Cu10~20%的硫化铜精矿经过备料以后，可以进行电炉熔炼，产出的冰铜送转炉吹炼成粗铜。

2. 含Ni5%左右的硫化铜镍混合精矿或镍精矿经过备料以后，可以在电炉熔炼时产出Cu+Ni约20%的低冰镍。低冰镍送转炉吹炼成高冰镍（Cu+Ni 75%左右），高冰镍进一步处理以分离铜镍，然后电解精炼。

3. 闪速熔炼铜精矿或镍精矿时，产出的熔炼炉渣一般含铜镍比较高。这种液体炉渣可以流到一个电炉里，加入含硫物料以进一步回收炉渣中的有价金属，使炉渣贫化到废弃的程度。

4. 炼镍的转炉渣以及有些炼铜的转炉渣含钴比较高。为了

回收钴，转炉渣用电炉处理，加入焦粉和含硫物料（低冰镍或黄铁矿），以使转炉渣中的氧化钴和部分氧化铁还原成金属进入低冰镍从而得到富钴低冰镍。

5. 铅精矿经过烧结机死烧成烧结块，可以在电炉里加入焦粉还原，产出粗铅。

6. 锌精矿经焙烧或烧结后，可以用电炉加焦粉还原蒸馏。当电炉密封得好时，几乎可以获得含Zn蒸气50%、CO 50%的气体。气体经飞溅冷凝器冷凝，产出粗锌。

7. 某些含锌高的炉渣，可以加焦粉用电炉还原蒸馏锌。和电炉炼锌一样，冷凝得出粗锌。

8. 锡精矿可以用电炉还原熔炼得出粗锡。

9. 电炉可以作为鼓风炉的前床，用电热保温使熔池不冻，保证熔炼产品和炉渣得到良好的分离。

矿热电炉在重有色金属冶炼过程中的应用，不限于上述各点。其应用范围是广泛的，在此不一一叙述。

第二章 电炉熔炼的理论概要

如果向固体或液体通以电流，则由于电阻的作用，电能转变为热能。例如，镍铬发热体、熔融的炉渣、已发生电离的热气体层等都具有电阻。

电能转变为热能时所产生的热量，用焦耳-楞茨公式来确定：

$$Q = I^2 R t$$

式中 Q ——热量（焦耳）；

I ——通过电阻的电流（安培）；

R ——电阻（欧姆）；

t ——时间（秒）。

因为 1 焦耳 = 0.239 卡，或者 $\frac{0.239}{1000}$ 千卡，并按欧姆定律

$IR = V$ ，则上式可以写成

$$Q = \frac{0.239}{1000} IV t, \text{ 千卡}$$

如果电能以千瓦计，在 T 小时内将消耗

$$Q_1 = \frac{IV}{1000} T, \text{ 千瓦小时}$$

因为 1 千瓦小时 = $0.239 \times 3600 = 860$ 千卡，则 T 小时产生的热量 Q_1 为

$$Q_1 = 860 \frac{IV}{1000} \cdot T \text{ (千卡)}$$

电加热广泛应用在各种技术领域中，对冶金工业尤其重要。在冶金工业中，电炉是冶金炉的一个主要类型。

按电能转变为热能的方式，电炉可分为四种类型（见图1）。

1. 电阻炉 在电阻炉中，电能通过与电路相连接的固体或液体物料时转变为热能。

2. 电弧炉 在电弧炉中, 电能 在气体介质中通过电弧转变为热能。

3. 感应炉 在感应炉中, 当电能通过处在快速变换的磁场或电场中的固体或液体物料时转变为热能。

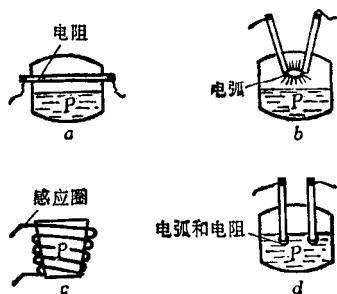


图 1 电炉类型

a—电阻炉; b—电弧炉; c—感应炉; d—电弧电阻混合式电炉 (矿热电炉); P—熔体 (炉渣、冰铜或金属)

4. 矿热电炉 在这种电炉中, 电能部分地在气体介质中通过电弧转变为热能, 部分地在固体或液体物料中通过电阻而转变为热能。这种电炉叫做电弧电阻炉或者叫做矿热电炉。熔炼硫化矿石和精矿的电炉, 就属于这种类型。

配有一台额定容量为 P 千伏安的三相变压器的电炉, 当电炉负荷达到 $P_{\text{额定}}$ 时, 其熔池中产生的热量按下式计算:

$$Q = \frac{860 P_{\text{额定}} \cos \phi T}{1000} = \frac{860 \sqrt{3} V_{\text{线}} I_{\text{线}} \cos \phi T}{1000} \\ = 1.49 V_{\text{线}} I_{\text{线}} \cos \phi T \text{ 千卡}$$

配备有三台额定容量为 P 千伏安的单相变压器的电炉, 当电炉负荷达到 $P_{\text{额定}}$ 时, 其熔池中产生的热量按下式计算:

$$Q = \frac{3 \times 860 P_{\text{额定}} \cos \phi T}{1000} = 2.58 I_{\text{相}} V_{\text{相}} \cos \phi T, \text{ 千卡}$$

式中 Q ——热量 (千卡);

$P_{\text{额定}}$ ——变压器的额定容量 (千伏安);

$V_{\text{线}}$ ——线电压 (伏);

$I_{\text{线}}$ ——线电流 (安培);

$V_{\text{相}}$ ——相电压 (伏);

$I_{\text{相}}$ ——相电流 (安培);

$\cos\phi$ ——功率因数;

T ——时间 (小时)。

熔炼硫化矿石和精矿的电炉,可以概略地看作是一个高温熔池,里面有两层熔体(见图2)。上面的炉渣层厚1700~1900毫米,下面的冰铜层厚600~800毫米。

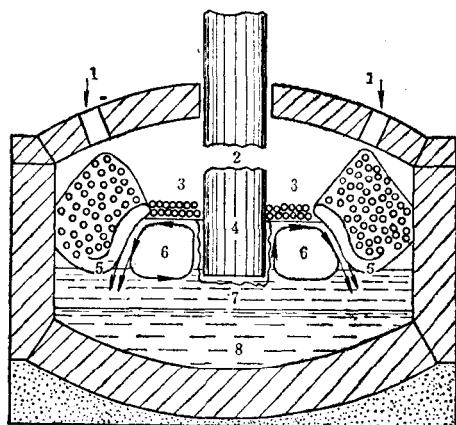


图2 电炉熔炼示意图

1—炉料; 2—烟气流动; 3—炉渣被焦炭还原; 4—能量输入、分配和转变; 5—炉料熔化; 6—炉渣运动和热交换; 7—炉渣; 8—冰铜

装到熔池中的固体物料以料堆的形式沉入渣层,这就是料坡。

物料靠以电能为主要来源的热量进行熔化。电能电压高达680伏电流达30000安培的情况下,通过三根或六根电极送入炉内。电极插入渣层的深度为300~500毫米。电能转变为热能就是在渣层中发生的。有40~80%的热量产生于电极-炉渣的接触面上,其余部分则产生于处在电回路中的渣层里。

大部分热量之所以产生于电极-炉渣的接触面上,是由于在

电极工作端的周围存在着一个气体层，这就是所谓的气袋，电流以大量的质点放电形式，即以微弧的形式通过这个气袋。

气袋是这样形成的：由于电子流的机械压力，熔渣脱离电极。所形成的空隙，便被由于电极燃烧所产生的气体和由炉渣中逸出的气体所充满。这个气体层具有很高的电阻，因此，电流通过气体层时产生很大的电压降，放出相应的热量。

在电极-炉渣接触表面上产生的热量大小，取决于电极插入渣层的深度。例如，当电极插入深度小时，在电极-炉渣接触表面上转变的热能，达电炉容量的80%，当电极插入深度大时，为40~50%；其余的电能在渣层中由于电阻作用转变为热能。

电炉熔池中的电能分布情况，可以用电场来说明它的特征。在电极插入较深的三根电极的矩形电炉，其电场如图3所示。细线表示电压降相同的等电位面，它的数值以相电压的百分数表示，已标注在各线条上。粗线表示电流通过渣层的路线。距电极100毫米的等电位面上的电压降已加有特别标注，因它决定着电极-炉渣接触面上的电压降。

在电炉的电场中，总是有着密密麻麻的等电位面围绕在电极周围。从图3可以看出，从电炉中心线起在两个电极直径范围内的靠近电极的区域，是熔池的导电部分（然而电流路线的90%是在从电极中心线起一个电极直径范围内通过的）。正是在这个区间内，电能转变为热能。远离电极中心线超过两个电极直径的熔池部分，不在电的回路之中，也不会产生热量。

以上所述，已为工业电炉的实测数据所证实（见图4）。

电流通过的路线有两种。

1. 由电极通过炉渣流向冰铜，即星形负荷。
2. 由一根电极通过炉渣流向另一根电极，即三角形负荷。

当电极之间的距离不变时，星形负荷和三角形负荷的大小取决于电极插入渣层的深度、渣层的厚度和炉内的料坡。当电极插入深度不大时，三角形负荷可达总负荷的70%；随着电极插入深度的增加，三角形负荷逐渐降低，电极插入很深时，为30~40%。

当电极向下插时，星形电流和三角形电流的和与电极插入深度成正比地增加，但是星形电流的增长速度大于三角形。当电极和冰铜的距离不变时，增大熔池深度导致三角形负荷增加，而星形负荷则无变化。因为在渣层容积内电能转变为热能是不均等的，所以熔池每个部分的温度也是不同的。

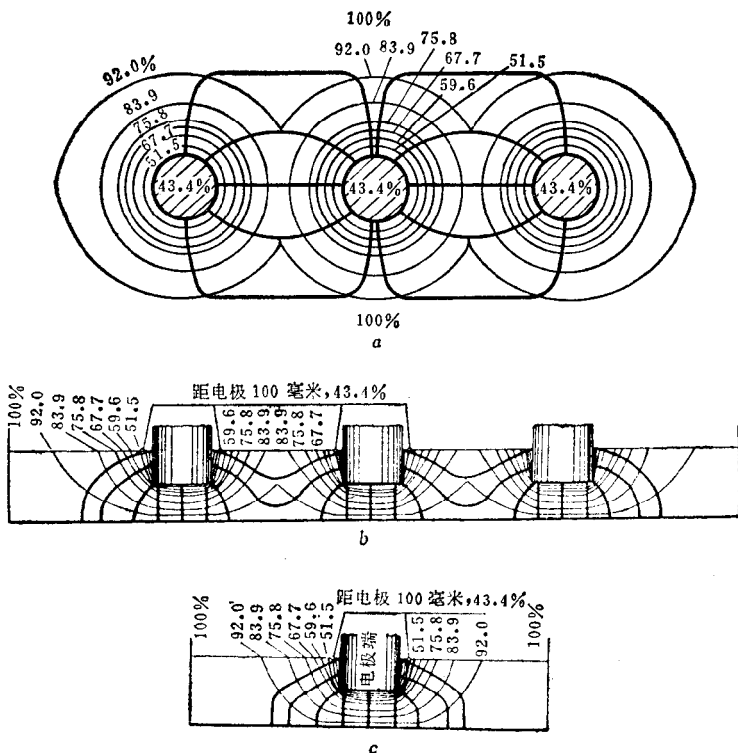


图 3 三电极电炉水质模型的电场
a—平面；b—纵剖面；c—端电极处的横剖面

在熔池内存在料坡时，电流主要以“星形”系统通过电炉；只有部分呈“三角形”系统。

有效放热区占整个熔池容积的30~40%。

必须指出，当炉内不存在导电性差的料坡时，熔池中的能量分布与此类似。如果插入熔池的电极周围堆满导电性差的炉料，料堆“切断”电力线，使炉内总电流减少，结果炉子的电场发生变化。

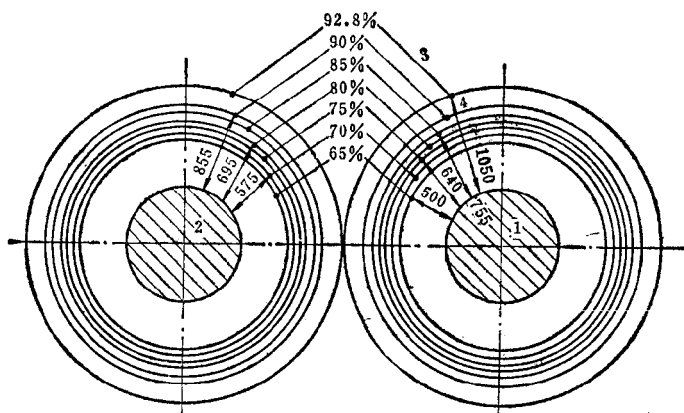


图 4 工业电炉的电场

1、2—直径1100毫米的电极；3—输出功率（%）；4—距电极的距离（毫米）

熔池内不导电的炉料明显地影响电能分布。熔体中有大量沉入的炉料时，有效放热区在距离0.5~0.75个电极直径的熔池面上，占全部熔池容积的14~20%。

为了更精确地了解熔池功率分布情况，有人绘制了电炉电场的体积功率曲线图(见图5)。这些曲线表明，大部分能量是在离电极顶端头360~450毫米处和靠近电极的空间放出的。

从图5的a、b、c可以看出，在不改变电极插入深度($h_{\text{电极}} = 0.232d_{\text{电极}}$)的情况下，增高熔池面和增加炉料沉入深度，可使放出能量的主要地区集中在靠近电极表面，进一步防止了底层熔体过热。

炉内那些不产生热量的部位，由于熔池内部的热交换作用，也具有热量。热交换作用主要是炉渣的对流运动将热能从热处带

至冷处而发生的。

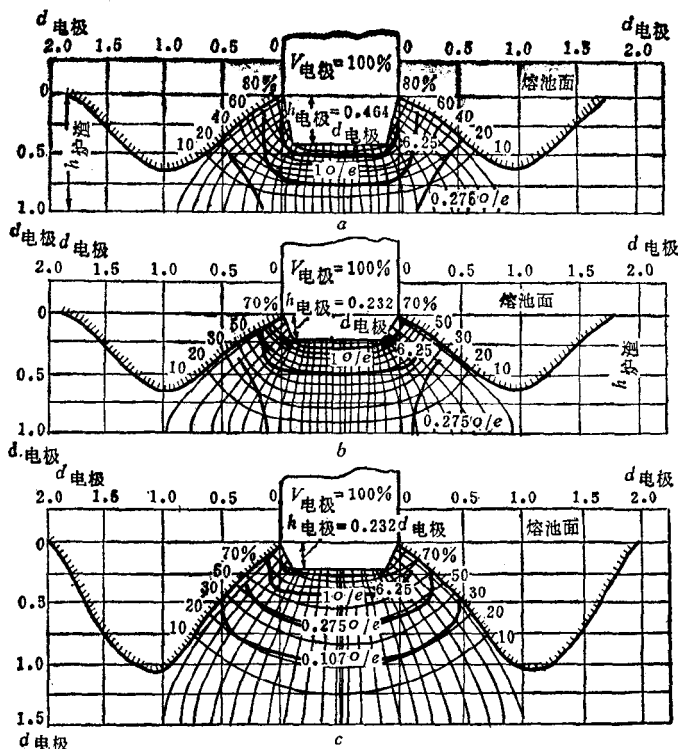


图 5 熔池垂直横断面上电压(%)，电流和体积功率(o/e)的分布

a— $h_{\text{电极}} = 0.464 d_{\text{电极}}$, $h_{\text{渣}} = 1 d_{\text{电极}}$

b— $h_{\text{电极}} = 0.232 d_{\text{电极}}$, $h_{\text{渣}} = 1 d_{\text{电极}}$

c— $h_{\text{电极}} = 0.232 d_{\text{电极}}$, $h_{\text{渣}} = 1.5 d_{\text{电极}}$

炉渣的对流是由于渣池各部位的热量不同造成的。已经指出，最大的热量产生于电极-炉渣的接触区。在此区域内，靠近电极表面的渣层已大为过热，它的比重大大减小，因为溶解在熔渣中的大量气泡胀大了它的体积。因此，靠近电极表面的炉渣和远离电极的炉渣的比重便产生了差别。比重小的过热炉渣在靠近

电极处不断上升而至熔池表面，并在熔池表面向四周扩散（见图6）。过热炉渣在其运动过程中与飘浮着的料坡相遇，将自己的多余热量传给料坡，并使沉入熔池的料面熔化。运动着的炉渣与温度较低的熔化炉料混合后，在渣池中向下沉降，到达电极下端附近。一部分炉渣流向电极、在电极-炉渣接触区内被过热，重新上升至熔池表面；另一部分炉渣则继续下降至对流运动非常薄弱的渣池下层，在这里冰铜和炉渣进行分离。

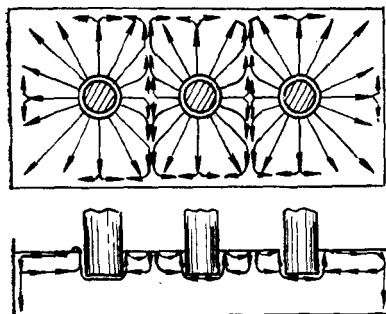


图 6 电炉中炉渣对流运动示意图

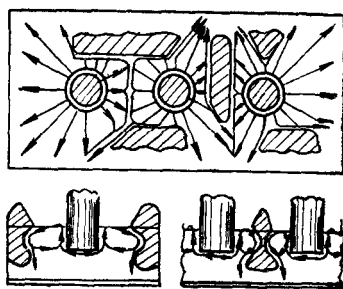


图 7 电炉中物料对炉渣对流运动的影响

这样，在相当于电极插入深度的渣池上部，炉渣不断地进行着闭路循环运动（见图7）。炉渣运动的线速度为1~2米/秒。下层，即电极下面的渣层，可以认为是不流动的，因为它几乎不参与对流运动，尤其在熔池非常深的时候。

热渣在向远离电极方向的流动过程中，将自己的多余热量传与熔池的较冷部分，从而维持了这一部分熔池的热平衡。而那些热渣很少流到的部位，或者说很冷的部位，则热量不足（炉子的四角、远处的墙内表面处），在这里就产生炉结。

从上述可知，炉渣的对流运动乃是电炉中一个最重要的工作过程：对流运动确保电炉熔池中的热交换和物料熔化的进行，因为物料的熔化过程是在物料溶解于运动着的炉渣中发生的。物料的大量熔化发生在电极插入的熔池区域内，也就是发生在强烈的

对流循环区域内。从电炉的平面看，这个区域是在从电炉中心线起1.5~2个电极直径的范围内。

熔池中料坡的屏蔽作用，对于对流热交换的深度有很大影响。诺里尔斯克公司的矿热电炉，大量炉料沉入熔池中，渣层对流的强烈循环不局限于电极插入深度的范围内，而是扩大到相当于三个电极插入深度的范围内。

由于在渣池内，电能转换成热能是不均匀的，因而熔池每个部位的温度也不一致。靠近熔体上层的温度最高，底层最低。渣层在纵向和横向上温度是均匀的，只是在垂直方向有变化，主要是在电极以下温度有变化，在电极插入深度范围以内实际上是等温的，这可用其中存在激烈的对流热交换来解释。

对诺里尔斯克公司工业炉进行的研究指出，料坡沉入很深时，上部等温区的大小约等于电极插入深度的三倍。等温区的温度接近炉渣的熔化温度，即1350~1450°C。渣池下部垂直方向上，有非常明显的温度降（每一厘米高约2.7~4°C）。在靠近低冰镍的界面上，渣池温度降低到1350~1300°C。

炉子的热场图和电场一样，决定于电极插入深度。随着电极插入深度的增加，最有效的放热区转向熔池深部。

在一定的炉子容量下（28000千瓦），由于供给电极的电压由270伏下降到235伏，电极插入深度由290毫米增加到450毫米（图8）。这时渣池上部等温层的下限由900毫米（指距离熔池表面）下降到1200毫米处，而距熔池面1600毫米处的炉渣温度由1230°C提高到1300°C。

由于放热中心趋近低冰镍层，使得低冰镍的温度提高110°C。在渣层上部和底部的水平断面上，实际上不存在温度差（据测量温度差在20~40°C，即在测量误差范围内）。

在电炉正常工作条件下，低冰镍总是稍许过热，温度在1100~1300°C之间。低冰镍温度的进一步升高，是在炉渣过分的过热和低冰镍层减薄的情况下发生的。相反，当炉渣和低冰镍层的厚度增加时，低冰镍底层的温度便下降，直到在炉底上产生炉

结。

由于熔池各部分受热情况不同，显然，炉料的熔化速度随着同电极距离的增大而急剧下降。炉料的熔化速度可按料坡的下沉速度来判断。从图9可以看出，电炉功率为28000千瓦，靠近电极处的炉料下沉速度比靠侧墙处大六倍（分别为0.7和0.1米/小时）。因此，大部分炉料（80~90%）在距离电极中心线1.5倍电极直径的范围内加入。炉料的强烈熔化不仅限于在沉入熔池而面向电极的料坡表面上进行，而且在整个沉入熔池的料坡表面上进行。

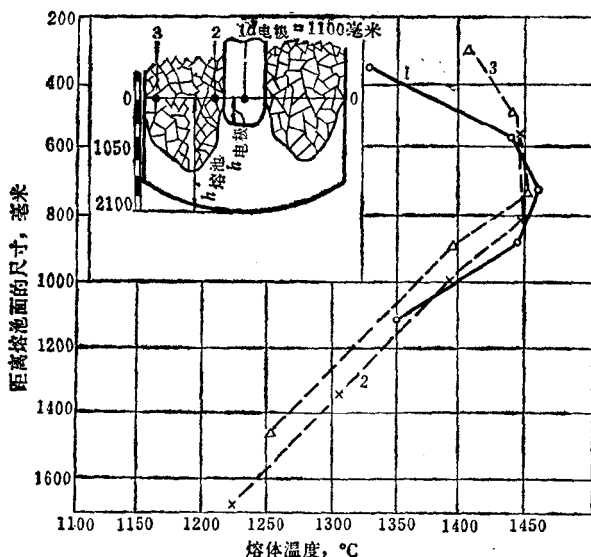


图8 功率28000千瓦电炉的熔池内在不同深度上的温度变化

点1—位于电极之间；点2，3—位于电极中心线上

电极至炉底电压260~270伏，电极插入深度280~290毫米

炉料在料坡里面是不具备热准备过程的。从表1可以看出，用热电偶插入料坡里面深1800毫米（贝辰加公司）和1450毫米（北镍公司）处测得炉料的温度不超过100°C。仅仅在离料坡和

渣的界面200~300毫米处才急剧地升高到1000~1200°C。

由于料坡与熔池的界面上有整块的结壳，同时炉料的透气性较差，这就妨碍了熔体放出的热气流加热炉料。在这种条件下，热量从料坡受热面向里面传送的速度很慢，因而造成料坡里面的低温。

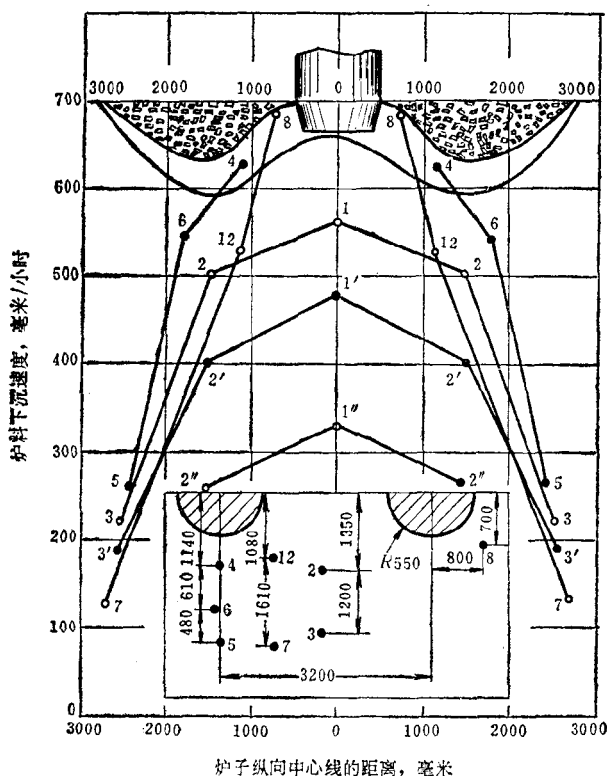


图 9 距离电极不同的位置上炉料下沉速度的变化

电炉功率28000千瓦(点1, 2, 3), 24000千瓦(点1', 2', 3'),

20000千瓦(点1'', 2''); 熔池深度1900~2100毫米;

图的上部表示料坡在熔池中的位置(沿电极的纵剖面),

下部表示测点的位置

应当指出，在料坡大量下沉的区域，炉料和熔体的界面上不会结壳。热气流能在这个部位透过炉料，但由于下沉速度很快，