

矿热熔炼炉

KUANG RE RONG LIAN LU

冶金工业出版社

矿 热 熔 炼 炉

Б.М.斯特隆斯基 著

《矿热熔炼炉》翻译组 译校

冶金工业出版社

内 容 提 要

本书系统地分析了矿热炉熔池的特点,介绍了炉体、电极装置、炉盖、短网等部分的设备情况,并提出了电炉设计的计算方法。

本书可供从事铁合金、电石和其他矿热电炉熔炼方面的科研、设计、生产的工程技术人员参考。

Руднотермические плавильные печи

Б. М. Струнский

ИЗДАТЕЛЬСТВО «МЕТАЛЛУРГИЯ»

МОСКВА 1972

*

矿 热 熔 炼 炉

Б. М. 斯特隆斯基 著

《矿热熔炼炉》翻译组 译校

*

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 12 3/4 字数 336 千字

1980年5月第一版 1980年5月第一次印刷

印数 00,001~3,000 册

统一书号: 15062·3502 定价 1.70元

译 者 的 话

本书是根据苏联1972年出版的Б.М.斯特隆斯基著的“Рудно-термические плавильные печи”一书翻译的。

书中对铁合金生产的主要专用设备——矿热电炉作了比较系统和全面的介绍。较为详细地阐述了矿热炉熔池的特点；在研究多渣熔池模型的电气性能和现有电炉参数的基础上，提出了一些与炉子容量无关，而仅随工艺改变的参数，并由此而推导出电炉的计算方法；列举了不少实测和计算数据。这些内容对从事铁合金、电石和其他矿热电炉熔炼方面的科研、设计、生产的工程技术人员有一定的参考价值。但是原书中没有介绍新型的电炉结构。关于矿热电炉的自动控制，特别是电子计算机的应用也没有介绍。

在翻译过程中，对原书的错误尽量做了改正或注释。

本书的翻译工作由北京钢铁设计研究总院铁合金科组织。参加本书翻译和校对工作的有北京钢铁设计研究总院彭石之、马仲范、郭鸿发、吴建材、吴天呈等同志以及吉林铁合金厂于忠、王文昌同志。铁合金科的许多同志都为本书的翻译校对做了工作。

目 录

第一章 矿热炉熔池	1
第一节 绪 言.....	1
第二节 矿热过程分类.....	3
第三节 有渣熔池结构.....	4
第四节 埋弧有渣熔池.....	9
第五节 无渣熔池.....	13
第六节 电极位置.....	18
第七节 熔池电磁场.....	21
第八节 熔池温度场.....	30
第九节 熔池的电气特性.....	36
第十节 熔池电阻和功率分布.....	53
第二章 多渣熔池的电气特性	62
第一节 多渣熔池模型.....	62
第二节 电流从电极到熔池的通过情况.....	63
第三节 电极端面通过电流时的熔池电阻.....	66
第四节 电极侧表面通过电流时的熔池电阻.....	68
第五节 电极全部表面通过电流时的熔池电阻.....	70
第六节 单相双电极熔池.....	77
第七节 三相三电极熔池.....	86
第八节 六电极熔池.....	90
第九节 矩形电极熔池.....	97
第十节 电流痕迹.....	99
第三章 熔池的特性和参数	108
第一节 计算方法和计算指标.....	108
第二节 电炉功率.....	110
第三节 反应区尺寸.....	111

第四节	电炉的操作指标·····	115
第五节	熔池的有效电阻系数·····	119
第六节	电流密度和功率密度·····	124
第七节	无渣熔池的主要参数·····	129
第八节	矿石还原有渣熔池的参数·····	133
第九节	多渣熔池的参数·····	134
第四章	熔池结构·····	140
第一节	关于炉衬的意见·····	140
第二节	炭质炉底的熔池·····	141
第三节	陶质炉底的熔池·····	149
第四节	矿热炉熔池内衬的特点·····	152
第五节	出铁口·····	158
第六节	炉壳结构·····	159
第七节	热损失·····	163
第五章	电极·····	171
第一节	电极及其性能·····	171
第二节	电极糊及其成分与性能·····	174
第三节	自焙电极的结构·····	177
第四节	自焙电极的焙烧·····	181
第五节	作为导体的自焙电极的工作·····	188
第六节	石墨电极和炭素电极的使用·····	194
第七节	自焙电极的使用情况·····	196
第八节	新出现的电极结构·····	198
第六章	电极装置·····	202
第一节	电极装置的类型·····	202
第二节	电极夹头·····	203
第三节	铜瓦·····	215
第四节	护板·····	225
第五节	电极升降压放装置·····	228
第七章	炉盖、给料机构和旋转机构·····	247

第一节	烟气·····	247
第二节	烟罩·····	251
第三节	吸气罩·····	252
第四节	炉盖·····	253
第五节	给料装置·····	267
第六节	熔池旋转装置·····	269
第七节	水冷却系统·····	272
第八章	三相电炉的电路·····	274
第一节	电炉系统图·····	274
第二节	三相电炉参数的一般算式·····	277
第三节	对称三相电炉的参数·····	281
第四节	对中间相对称的三相电路·····	283
第五节	非对称的三相电路·····	288
第六节	能量转移·····	291
第七节	减少负荷不平衡的方法·····	297
第八节	三相系统的不同类型·····	299
第九节	变压器和电炉回路中的电抗线圈·····	305
第十节	炉子的电气特性·····	308
第九章	电炉短网·····	315
第一节	单相电炉短网·····	315
第二节	圆形熔池三相电炉短网·····	320
第三节	矩形熔池三相电炉的短网·····	326
第四节	六电极电炉的短网·····	332
第五节	导体有效电阻·····	336
第六节	导体电抗·····	348
第七节	短网合理配置的原则·····	364
第八节	允许负荷·····	367
第十章	电炉的电抗·····	377
第一节	熔池的电抗·····	377
第二节	炉子电抗·····	385

第三节 炉子电路中的电容.....	388
第四节 熔池的电气品质因数.....	394
参考文献.....	396

第一章 矿热炉熔池

第一节 绪 言

一般的矿热炉，都是直接加热的电炉。由于有效电阻的作用，在熔池中电能直接转变为热能。电流通过炭质电极或石墨电极进入熔池。在电极上也消耗功率，但与熔池的功率相比是微小的，在冶炼的能量平衡中可以忽略不计。

电炉熔池的结构很复杂，它包括处于各种物理化学状态的炉料（从硬块到糊状）、熔渣和金属。在熔池中进行的工艺过程是各种各样的，有的是连续进行，有的则是非连续进行。熔池的电阻是炉子的最重要参数。影响这个参数的因素很多，如熔池中物料的电阻系数、熔池的几何尺寸、电极的数量和尺寸、以及电极在熔池中的配置等。大电流通过熔池，使熔池处于磁场强度很高的电磁场中，磁场强度则影响功率在熔池中的分布。这些因素与工艺要求的相互结合，就决定了炉子工作的电气制度。

炉子的电气参数和几何参数，取决于所进行的冶炼过程。但这种现象在小功率炉子上并不明显。有时采用相近似的电气制度可以使同一个熔池适用于各种不同的冶炼过程，生产出性能毫无共同之处的产品。随着炉子功率的增加，炉子结构的复杂，以及对产品质量要求的提高，根据工艺过程的全部特点，有区别地选择熔池的结构和参数是很有必要的。

矿热炉的出现，大约已有几十年。起初，这种炉子是一种不大的，炭素炉底的单相熔池，炉底呈圆形或方形，一般砌筑在固定的钢壳里或架在小车上的钢壳里。炉底作为导电的一极，挂在手动卷扬机上的碳质电极为另一极。1932年以前，兹拉托乌斯特附近的“波洛基”工厂，就用功率250千瓦的这种炉子生产45%硅铁。现在苏联的一些工厂仍然保留了功率约1000千瓦的单电极

电炉，生产电石和其他产品，主要用于试验。随着炉子功率的增加，熔池尺寸加大了，设备也作了改进。米格（Миге）和米格—彼罗（Миге-Перрон）设计的单电极电炉，无论在功率方面，还是在结构完善方面，都有了极大的发展。这些炉子功率达到15000千伏安，电极直径达到3.85米，电流强度达到300000安。直到现在，法国和意大利仍然利用米格炉生产电石。单电极电炉之所以得到采用，是因为在能量上有它的优点，如：热量集中，电极和炉底之间放热均匀，而且炉子维护方便。单电极电炉的缺点是导电炉底热损失大、寿命短。采用单相双电极熔池，就避免了这个缺点。目前苏联利用这样的炉子生产金属硅，其功率达到5500千瓦。但就其能量利用率和冶金质量来说，这种炉子不如单电极电炉，因此推广受到限制。要想增加炉子的功率，就必须增加熔池中电极的数目、改用三相电流电源。

肖德别尔格（Седерберг）自焙电极的出现，大大推动了矿热炉的发展，它可使质量不高的任何尺寸的电极连续地接长。三相熔池砌筑的形状有矩形的，圆形的和三角形的。除了圆形电极以外，也出现过矩形截面的电极。1964年，三相电炉的功率曾经达到53000千瓦。为了改善熔池功率的分布和减少电极料的消耗，开始采用六根电极的，圆形和矩形熔池的电炉。比较普遍的是圆形熔池，其电效率高，砌炉用的金属和耐火材料较少，还可以使之旋转（炉子旋转是防止炉料烧结的一种非常有效的方法）。

封闭式电炉的应用，是矿热炉发展中的一大成就。譬如说：在敞口炉中冶炼黄磷是不可想像的，一开始就是封闭式电炉。在另外一些场合下，由于炉子功率不大而使用敞口电炉。鉴于综合利用电炉煤气和改善劳动条件，随着炉子尺寸和功率的增大，需要将炉口封闭。二十世纪五十年代，开始用封闭式电炉冶炼锰铁和电石。1964年，苏联投产了容量为16500千伏安的封闭式电炉，用以生产45%硅铁。同时，对炉子上部设备的结构作了进一步改进。使用肖德别尔格连续自焙电极以后，又出现了威斯道姆（Висдом）型压放机构。这种压放机构已顺利地使用了大约30年。由

于采用大型电极、封闭炉盖，又加上遥控和自动控制的要求，使电极液压压放、升降装置得到了广泛应用。在功率不大的老式炉子上，仍在使用电动卷扬机。

不能脱离工艺过程而抽象地研究现代炉子的结构。乍看起来，矿热炉冶炼并不复杂，甚至有时操作也很简单。多数情况下，炉子在固定的料线和料批组成的条件下连续工作。但这只是表面现象。实际上，炉料在熔池中发生各种物理化学变化，经历着固态、液态和气态全过程，进行大量而复杂的反应。关于这些问题，将在专门章节中予以论述。

第二节 矿热过程分类

到目前为止，曾多次试图把矿热过程和矿热炉进行分类。M.C.马克西门柯(Максименко)的分类法^[1]是最早的分类方法之一。这种分类法是以电流放出的热量在熔池（水平面）各部位的分布为基础的。按照马克西门柯的分类方法，有效能量主要在两个部位放出，即电极端部与炉料的接触处（ p ）和炉渣或熔体内部（ q ）。这就可以假定有 $p > q$ 和 $p < q$ 的两种加热过程。这种完全以放出能量的多少为基础的分类法，未能得到也不可能得到进一步的发展，因为在许多熔炼过程中，很难确定 p 值和 q 值以及它们的比例。只能把纯电弧加热过程和纯电阻加热过程区分开来。矿热炉中的热量既来源于电弧，也来源于炉料和炉渣的电阻。熔池中的功率在二者之间是怎样分布的？除个别情况外，在多数情况下是无法确定的。

工厂里是按冶金特点分类的：把所有的生产分为有渣法和无渣法。这种分类法在一定程度上是有先决条件的。

在铁合金生产中，渣量（按金属量的%计）差别很大，从冶炼硅、硅合金的3%到冶炼锰铁、铬铁及其他合金的400%不等。从硅合金到其他铁合金，渣比大幅度上升。熔池里炉渣多，对炉子工作有一定的影响，这种现象在多渣熔池冶炼中尤为明显。在多渣熔池里，冶炼过程要按不同于无渣的方式进行，不但要改变

冶炼的工艺和方法，而且还要改变电气制度；作为导电体和消耗电能的熔池，它的状况也有所变化。根据这一情况，将矿热炉生产分为无渣法，少渣法和多渣法，这不仅是从现象上区分的，而且也是从实质上区分的。

按冶炼过程的特点分类，能在一定程度上反映出所采用的炉子的结构，但仍不全面。无论是什么冶炼过程或什么炉子，都需要兼顾它的能量特性。考虑到能量特性，可以把所有的矿热过程归纳为以下几类：

1) 要求能量集中在反应区的埋弧和冷料面的操作；2) 要求能量在渣层放出的埋弧和热炉口操作；3) 要求能量在熔池表面放出的明弧和热炉口操作。

第一类包括全部的连续无渣法，如各种牌号的硅铁、金属硅、硅钙、硅铝、电石的冶炼；这一类还包括连续的有渣法，如生铁、碳素锰铁、硅锰合金、碳素铬铁、再制铬铁和磷的冶炼。

第二类包括有渣法，如低碳锰铁、钨铁、粗锡、铜镍冰铜、电炉氧化铝、低磷锰渣和钛渣的冶炼。

第三类包括间断的有渣法，如金属锰、精炼铬铁的冶炼。

第一、二类冶炼过程的特点是 $p < q$ 、电弧放出的能量小于炉料、炉渣、熔体电阻热的能量。第三类过程的炉渣电阻也产生很大的能量，只有在有盖电炉中才是 $p > q$ 。

第三节 有渣熔池结构

有渣熔池是各种各样的，其结构有的是连续发生变化，有的则是周期发生变化。这些变化由液态产品的聚积和出炉、料面下沉和加入新炉料引起。明弧作业的熔池，存在着能量密度和导电率各有差别的三个层，即合金层、炉渣层和部分浸到炉渣里的炉料层。连续作业和电极插入物料中的熔池，其结构比较复杂。在这样的熔池里，炉渣上面是半熔体层；这种半熔体层有时很深，它既不同于金属，又不同于炉渣，而是一种由软化了的半熔融状态的和熔化了的矿石、炉渣以及浸入渣内的焦末组成的集合体。在

这一层中进行氧化物的主要的分解反应，并形成液态的冶炼产品。该层温度与炉渣温度相差很小。计算了燃烧损失、沿烟道逸出和反应不完全等所造成的损失后，配加还原剂还要稍许过量；过剩的炭随着料层的下沉和炉渣的聚积，在炉渣与半熔体之间逐渐形成一焦末层，即所谓的“残炭层”，这种残炭层起着过滤液态冶炼产品的作用。在半熔体之上分布着一层干燥而赤热的炉料，炉料上面又覆盖一层薄薄的新炉料。这种状况不能代表一切，也不是绝对准确。例如，无还原剂的冶炼熔池中或以金属脱氧剂代替碎焦时就没有残炭层。

研究熔池结构，应详细计算能量指标，以便准确地了解熔池的功率分布。

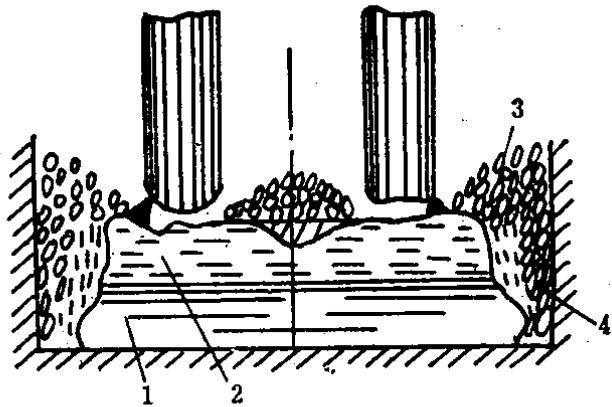


图 1 冶炼微碳铬铁和低碳铬铁的熔池
1—金属；2—炉渣；3—炉料；4—渣皮

图 1 是第三类过程的最简单的明弧作业熔池图。冶炼过程一般是周期地进行，加有熔剂的炉料，是一炉一炉地熔化。电极提到熔池镜面之上，电极下面形成一个功率很大的电弧。下面以功率3500千伏安电炉冶炼 Cr000微碳铬铁为例，说明这种熔池的能量平衡情况。工作电压为 309 伏^[2]，炉料成分如下：100份（按重量）含50.9%Cr₂O₃的铬矿，88.5份含90%CaO的石灰，30份50%的硅铬合金。每吨铬铁（含铬60%）的能量平衡如下：

冶炼过程一般是周期地进行，加有熔剂的炉料，是一炉一炉地熔化。电极提到熔池镜面之上，电极下面形成一个功率很大的电弧。下面以功率3500千伏安电炉冶炼 Cr000微碳铬铁为例，说明这种熔池的能量平衡情况。工作电压为 309 伏^[2]，炉料成分如下：100份（按重量）含50.9%Cr₂O₃的铬矿，88.5份含90%CaO的石灰，30份50%的硅铬合金。每吨铬铁（含铬60%）的能量平衡如下：

供 热，%	
炉料热含	0.45
硅氧化热	47.4
炉渣生成热	7.0
电能	45.2
总计	100.0

耗 热, %

1760°C合金热含	8.0
1800°C炉渣热含	32.2
Cr ₂ O ₃ 分解热	26.5
FeO分解热	3.9
硅化物分解热	3.7
水分蒸发和挥发物排除的耗热量	3.8
电损失	3.6
各种热损失	18.3
总计	100.0

冶炼的能量总效率等于0.781。分解反应消耗的热量为总热量的34.1%（按热平衡）。还原剂带入熔池的热量为总热量的47.4%，它完全可以抵偿吸热反应需要的热量（34.1%），排除挥发物需要的热量以及加热合金需要的热量。可以认为，电流通过时，在熔池表面产生的热量用于抵销电损失和热损失，约占它的功率的48%，其余的功率（~52%）是消耗在炉渣电阻上。

电能在电弧和炉渣之间的分配取决于渣层厚度。令 P_B 表示电弧熔池内一根电极下面产生的功率； r_{π} 和 r_{III} 分别表示电弧和炉渣的电阻。金属的电阻很小，可以忽略不计。

$$P_B = I^2(r_{\pi} + r_{\text{III}}) = P_{\pi} + P_{\text{III}}$$

电流强度不变时，渣层越厚，渣中的功率 P_{III} 越大。从上述的平衡中得出，炉渣的功率比电弧的功率更主要。

还应该注意的是电弧辐射和无盖的敞口熔池造成大量的热损失。实践证明，在冶炼微碳铬铁过程中，工作电流强度为电极在渣中短路时电流强度的0.7~0.8倍情况下，热损失最小。由此得出：

$$r_{\pi} = (0.43 \sim 0.25)r_{\text{III}} \quad P_{\pi} = (0.43 \sim 0.25)P_{\text{III}}$$

炉渣的电阻和炉渣中产生的功率，比电弧的电阻和电弧的功率更主要。根据这个因素，确定渣层厚度和选择相应的电极位置。这种冶炼一般是在高电压（280~350伏）、低电流强度下进行的。

熔化期（需要消耗大量热量）用高电压，还原剂加入熔池后，用降低电压的方法降低电功率。矿热炉冶炼时有明弧出现，电气制度就不稳定，但比炼钢时稳定，这是因为炉渣量大，而且炉渣电阻削弱了电弧的影响。 $P_{\text{电}}/P_B$ 值取决于液态熔池的特点。冶炼各种牌号的铬铁可采用以下的制度^[3]：

铬铁	Cr0000	Cr000~Cr00	CrO	Cr01	Cr1
$P_{\text{电}}/P_B$	0.55~0.65	0.7~0.8	0.9	0.9	0.9

图 2 所示为冶炼钨铁和粗锡的熔池。钨精矿和锡精矿因比重大而沉入渣层。电极插入渣层不深。在电极和炉渣之间电流形成短电弧，电弧的电阻消耗了过剩的电压。造渣时，在渣面上覆盖一薄层焦末，焦末浸入炉渣，使炉渣起泡，从而促使炉渣电阻上升。电弧的电压降比炉渣的小，炉渣电阻产生的功率大大超过电弧产生的功率。在炉渣成分和渣量不变的情况下，改变电压使功率再分配，将影响电极的位置及弧柱高度。

冶炼低碳锰铁时，在冶炼末期出炉之前，炉子熔池也是这样。进行这种产品冶炼时，利用在炉渣里的硅锰合金代替焦末，电极也插入炉渣里。在炉料完全熔化之前，各电极之间的炉渣表面被矿石块和石灰块覆盖。在上述过程中，炉渣表面不均匀，也不平静。用金属还原剂时，形成新的化合物和煤气，用煤时则主要是生成一氧化碳，并大量放热，于是炉渣沸腾、上涨，促进加入的炉料熔化。

图 3 所绘的熔池同图 1 和图 2 的熔池相比，在结构上已有所改进，炉渣量增加了，电极插入炉渣的深度也增大了。铜镍冰铜和钛渣就是用这样的熔池冶炼的。在这些产品冶炼过程中，产生的炉渣量，几乎超过金属体积的五倍。冶炼冰铜时，电极插入炉渣的深度为电极直径的 0.6 倍，为渣层厚度的 0.4 倍。冶炼铜镍冰铜的热量平衡如下：

	供 热，%	
电能		100%

耗 热, %	
蒸发水分的耗热量	3.9
吸热反应的耗热量	2.7
冰铜热含	9.8
炉渣热含	59.3
炉气带走热量	9.9
热量损失	6.5
电损失	4.4
平衡误差	3.5
总计	100

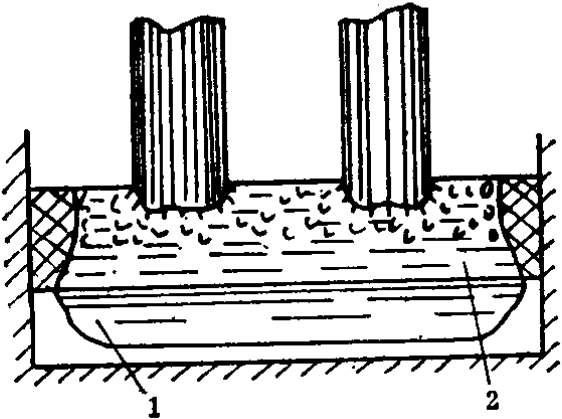


图 2 熔炼钨铁和粗锡的熔池
1—金属；2—炉渣

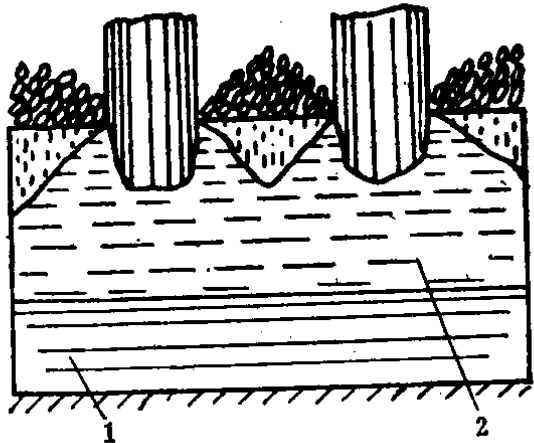


图 3 熔炼铜镍冰铜的熔池
1—金属；2—炉渣

这种冶炼不是矿石还原过程。它的吸热反应总共消耗 2.7% 的热量，几乎全部输入炉中的功率都消耗在加热炉渣上。为了强化炉料熔化，特意将炉渣过热。超过炉渣物理热的多余能量用于抵销热平衡中的其他消耗。冰铜里的能量，是以下几部分热量的综合：金属硫化物在炉渣里熔化时所得到的热量；从能量高的渣层传入的能量；以及本身的电损失。

冶炼冰铜时，电极插入熔池连续工作，这与矿石还原过程的工作制度相似，但它们的熔池物料结构有很大差别。炼冰铜的熔池里，没有一层硬壳状的典型结构料层。炉渣是加热区，几乎全部输入功率都消耗在这里。炉渣从各个方面冲刷插入的电极。热

量在炉渣里分布不均匀。电极附近能量密度最大；离电极愈远，则密度显著下降。这种能量分布的不均匀性再加上大渣量，就形成了炉渣强烈对流，加速了沉入炉渣里的炉料的熔化。因为没有分解反应，如果不加生矿，液态熔池相当平稳。兑入转炉渣时，把电极抬起至渣面附近起弧。随着电极下放和弧隙电阻的降低，电弧的功率下降，于是每束电弧分成许多小电弧。电极插入有渣熔池的深度继续增加，就会引起渣层增大对电极附近气隙的静压力，并加剧热的对流。这两个因素的作用，再加上随着电极插入深度的增加，接触表面积增大，使得电流的电阻逐渐地减小，以至熄弧。在电压不变时，电流强度和功率相应地升高。

在正常生产的情况下，冶炼铜镍冰铜的熔池是一个简单的受电体，它比其他受电体实际上受电均匀，可以清楚地描绘出几何形状，也能根据需要控制和给出受电体的尺寸。熔池的物理性能可以预知，或者很容易确定。

第四节 埋弧有渣熔池

图 4 是10500千伏安硅锰合金的熔池。炉子用实体的混凝土炉盖封闭，电极深深插入炉料中。炉盖上面有若干个锥形料斗，接受下料管漏下的新炉料。新炉料使上部赤热的料柱表面温度下降。在大约 0.6 米深处，赤热而疏松的料层变为半熔体。半熔体层厚约 0.7 米。半熔体下面是浸满炉渣的残炭层，冶炼的液态产品通过残炭层沉到炉底。在残炭层下面的液态熔池里，是经过离析而形成的合金层和渣层。炉渣体积大约为合金体积的 2.3 倍。

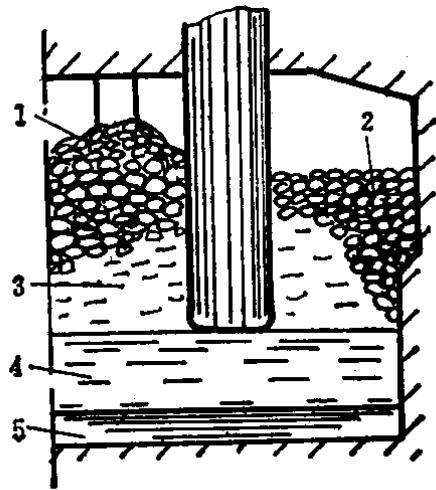


图 4 采用混凝土炉盖封闭的硅锰合金电炉的熔池

1—冷炉料； 2—炽热的炉料；
3—半熔体； 4—炉渣； 5—金属