

内容提要 埋入式电极盐浴炉是一种进行工具淬火的新型炉子。炉膛体积利用率高，耗电量低，炉底平整，炉温均匀。

本书叙述埋入式电极盐浴炉的结构，电极的设计与制造，并说明了埋入式坩埚的材料与制造等。

本书供从事热处理的工人、技术人员参考。

埋入式电极盐浴炉

上海工具厂编

*

机械工业出版社出版（北京阜成门外百万庄南街一号）

（北京市书刊出版业营业许可证出字第117号）

机械工业出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

*

开本 $787 \times 1092 \frac{1}{32}$ ·印张 1·字数 17 千字

1974年12月北京第一版·1974年12月北京第一次印刷

印数 00,001—10,000·定价 0.10 元

*

统一书号：15033·4268

出 版 说 明

在批林批孔运动的推动下，机械工业技术革新和技术改造的群众运动蓬勃开展，先进经验层出不穷。为及时总结推广这些先进经验，我们组织编写了“机械工业技术革新技术改造选编”。

“机械工业技术革新技术改造选编”将陆续出版，内容包括：铸、锻、焊、热处理、机械加工、改善劳动条件、三废处理等方面，每本讲一个专题，内容少而精，便于机械工业的广大职工阅读参考。

在组织编写过程中，得到有关领导部门和编写单位的大力支持，对此我们表示感谢。欢迎广大读者对这些书多提宝贵意见。

前 言

我厂热处理车间的广大革命群众遵照毛主席“**打破洋框框，走自己工业发展道路**”的教导，在无产阶级文化大革命和批林批孔运动的推动下，批判了“洋奴哲学”、“爬行主义”，发扬自力更生的精神，组成以工人、领导干部和技术人员三结合的技术革新小组，经过反复实践，将插入式电极盐浴炉改为埋入式。用这种新型炉子进行工具淬火，提高了产量，节约了电力，而且质量比较稳定。

目前，埋入式电极盐浴炉在全国逐渐推广使用，又有新的改造和好经验。我厂在改造埋入式电极盐浴炉工作中虽取得一定的成绩，但也还存在某些不足之处，有待进一步改进。

由于我们水平有限，书中难免有错误之处，希读者提出批评指正。

上海工具厂

一九七四年九月

目 录

前言

一 插入式电极盐浴炉的主要缺点	1
二 埋入式电极盐浴炉的结构	2
三 电极的设计与制造	4
1. 电极材料	4
2. 电极的形状、尺寸和布置	5
3. 电极设计制造及放置中的几个主要问题	10
四 埋入式坩埚的材料与制造	11
五 筑炉	14
六 埋入式电极盐浴炉的起动	16
1. 起动电阻的形状及尺寸	16
2. 起动方法	17
七 埋入式电极盐浴炉的试验	18
1. 埋入式坩埚的寿命	18
2. 炉温的均匀性	19
3. 实际使用中的电参数	19
八 使用中的体会	20
附录	22
I. 熔盐电导率	22
II. 盐浴炉变压器次级绕组接线方法	23
III. 室温盐水溶液模拟试验法	24

一 插入式电极盐浴炉的主要缺点

插入式电极盐浴炉的主要缺点是使用效率低，耗电大，即使是最简单的单相电极盐浴炉，它的有效使用面积，也只有盐浴面的 $\frac{2}{3}$ ，其余的 $\frac{1}{3}$ 被电极所占据，不能用于生产，热量白白损失，浪费大量电力（见图 1）。

其次是电极损耗大。由于电极直接插入盐浴，在盐与空气交界处极易产生氧化，造成“缩颈”现象（见图 2）。交界处的电流密度过大，发热急增，更加速了电极的损坏。这种情况在高温电极盐浴炉中，尤为突出。例如，我厂原高温插入式电极，使用 5~6 天后就需停炉调换，化费很多劳力和钢材，占去大量生产时间。

插入式盐浴炉的电极一般布置在炉膛一侧，因此，在电极附近的盐浴温度较高，远离电极的底部温度最低，造成盐浴温度不太均匀，在远离电极的温度死角处，易使炉渣沉积，不易扒去，使炉底严重倾斜（见图 3），炉子深度大为减小，甚至不能进行正常生产。此种情况，在中温炉最为常见。

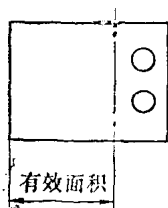


图 1 单相插入式盐浴炉的电极布置及有效使用面积

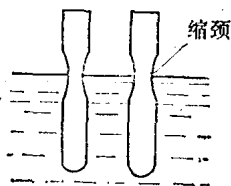


图 2 插入式电极的“缩颈”现象

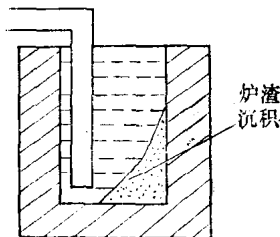


图 3 插入式盐浴炉的炉底倾斜情况

二 埋入式电极盐浴炉的结构

埋入式电极盐浴炉的结构如图 4 所示。

所谓“埋入式”，顾名思义，就是电极不是直接插入盐浴，而是有部分“埋入”在耐火材料之中。因此，它首先克服了电极的“缩颈”现象。这种炉子的主要优点是：（1）盐浴表面无电极插入，电极不占用炉膛体积，因此大大提高了炉子的利用率，几乎 100% 的盐浴面积可用于生产；（2）埋入式盐浴炉的电极是布置在炉子底部的，电极的三个面嵌在炉壁里，只有一个面露出在盐浴中，因此电极损耗下降；

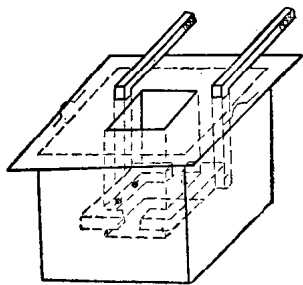


图 4 埋入式电极盐浴炉的
坩埚和电极结构示意图

（3）发热源在炉子的底部，这有利于盐浴的自然对流，加上电磁搅拌作用，整个盐浴的温度就比较均匀，而且结渣很易扒除，不会形成炉底严重倾斜。

电极盐浴炉一般分为单相和三相两大类。对大功率的盐浴炉考虑到三相输电平衡，常采用三相盐浴炉；对于 50 千瓦以下的较小功率的盐浴炉则常用单相。埋入式电极盐浴炉也有单相和三相之分。由于埋入式电极的位置是固定的，无法调节，因此电极的尺寸和相对位置对炉子的功率有很大影响。图 5 是一般埋入式盐浴炉电极的形状和布置。

三相埋入式电极一般采用块状电极（深井式盐浴炉除外），如图 5 a 和 b 所示。虽然制造带直角的电极比较麻烦，但适当调整三电极的距离，可达到三相平衡，炉温均匀。不带

直角的块状电极很难达到三相平衡，容易造成炉温不均匀。

条状电极上下平行布置（图 5 c）的目的是为了缩短电极间距，减少电极间熔盐电阻，使之在较低电压下亦能发出较大功率。条状电极比较细长，几乎围绕整个坩埚的侧壁，上面电极末端容易翘出，筑炉也比较困难。条状电极马蹄形布置（图 5 d）的优点是，即使电极间距较大，也可以发出较大功率。它的缺点是电流密度很不均匀，相当大的电流集中在马蹄两端，使炉温均匀性降低，末端的损耗亦较大。

直条状布置的电极（图 5 e）简单易造，筑炉方便，电流能较均匀地通过整个电极间的熔盐，因此，炉温就比较均匀。但由于电极间距比较大，盐浴电阻显著增加，不易发出足够功率，因此必须增加电极高度。

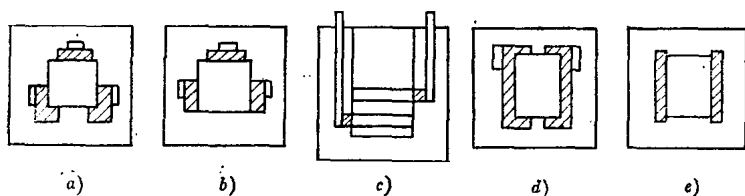


图 5 埋入式盐浴炉电极的形状和布置

a 和 b — 三相块状电极布置；c — 上、下平行布置；

d — 马蹄形布置；e — 直条状布置

埋入式电极引入炉子的方式一般有两种：一种是穿过炉体下部的侧面，直接通入。为了防止漏盐，除加厚电极引入一侧的炉壁厚度外，尚需加一个冷却水套，如图 6 所示，在盐浴炉工作时不断地通入冷却水。这种炉子损坏后，必须停炉重筑，所占时间较长。为了不致影响生产，就得考虑备用炉子。这种电极引入方式的最大优点是电极简单易造。其他

的优缺点如上所述。

另一种方式是从炉子上部耐火材料中引入，这样无漏盐的危险，而且不需冷却水套，因而节约用水。

我们选择了后一种电极引入法。并且采用炉体与坩埚可装拆的型式，如图 7 所示。炉体用角铁与铁板焊接而成，炉壳与隔热砖之间放 10 毫米厚的石棉板，里层砌强度较高的

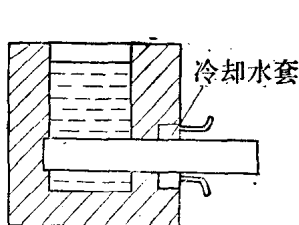


图 6 电极直接从炉侧引入

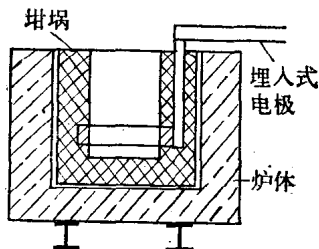


图 7 坩埚和炉体可装拆的埋入式电极盐浴炉

普通粘土砖，中间有一炉膛，炉膛内放一个埋入式坩埚，坩埚侧面与炉膛壁之间有 60 毫米左右的间隙，这样坩埚在损坏后便可吊出调换，而炉体的使用寿命是很长的。这样的结构基本上能保证不因炉子长期检修而影响生产。

从上所述可知，我们所说的埋入式电极盐浴炉，实质上也可以说是埋入式坩埚。

三 电极的设计与制造

1. 电极材料

电极材料必须具有较高的电导率，耐高温，耐腐蚀，不与熔盐起化学作用，使用寿命长，并且要取材容易，经济性

好。从实用效果看，采用高铬高镍的耐热钢或不锈钢固然很好，但取材不易，价格昂贵，使用受到限制。石墨化电极在冶金工业中得到大量应用，在盐浴炉中作为埋入式电极是可考虑的电极材料。它的优点是损耗小，石墨碳在熔盐中有良好的防脱碳作用，电极有希望作成连续推进（或旋进）的形式。从而，从根本上能解决炉体寿命长、电极寿命短的矛盾。它的缺点是耐急冷急热性差、强度比钢低。我们所试验的石墨化电极（ $\phi 100$ ）直接从炉侧引入（见图6），使用一段时间后，在冷却水套附近断裂了。目前我们用的电极材料是低碳钢，它的使用寿命不及耐热钢或不锈钢，但只要适当增加电极的截面积，这种材料还是可取的。

2. 电极的形状、尺寸和布置

电极尺寸的一般计算法 要计算电极尺寸，一般先要计算出熔盐电阻。大家知道，电极本身的电阻是极小的，为了简化计算，可将盐浴炉发热仅看作熔盐电阻起作用，而忽略电极本身的电阻发热。

盐浴炉的功率可用下式计算：

$$P = \frac{U^2}{R} \times 10^{-8} \text{ (千瓦)} \quad (1)$$

式中 P ——盐浴炉发出的功率（千瓦）；

U ——电极间的电压（伏）。如忽略铜排、电极引入棒及变压器内阻所引起的电压降，则可近似地看作变压器的次级电压；

R ——近似地看作电极间的熔盐电阻（欧姆）。

功率 P 是根据需要事先决定了的，因此，可以根据功率按公式（1）算出所需的熔盐电阻 R （忽略了铜排等的外加电阻）。由于电极间熔盐电阻，不仅与熔盐本身的电导率有

关，而且与电极间的尺寸和相对位置有很大关系，因此，可以利用这种关系来计算电极的尺寸（如相对位置已固定）。

例如，两平行电极的熔盐电阻就可按下式计算：

$$R = \frac{S}{\gamma A}$$

$$= \frac{S}{\gamma H L} \quad (\text{欧姆}) \quad (2)$$

式中 γ —— 熔盐的电导率（欧姆⁻¹·厘米⁻¹），它与熔盐成分和使用温度有关。可以从有关手册中查得（见附录 I）；

S —— 平行电极间熔盐导电的距离（厘米）；

A —— 平行电极间熔盐导电的面积（厘米²）；

H —— 露在盐浴中的电极高度（厘米）；

L —— 露在盐浴中的电极长度（厘米），它决定于炉膛尺寸。

如果采用平行布置的电极，在各种参数大部分肯定的情况下可用上述算法。我厂所用盐浴炉其电极高度 H 需要 240~250 毫米，才能达到所需的熔盐电阻，发出额定的功率。另外，刀具的有效加热深度大多数在 280 毫米以内，而我们又不希望刀具处于两电极之间的导电区，因为在这一区域会使刀具变形。为了减低电极高度并避免上述现象，我们采用了马蹄形电极。

马蹄形电极尺寸的计算 首先对马蹄形电极的熔盐电阻作近似计算。

马蹄形电极在盐浴内的布置如图 8 所示。这样布置的总熔盐电阻 R 相当于两个熔盐电阻 $R_{\text{弯}}$ 与一个平行电极的熔盐电阻 $R_{\text{平}}$ 的并联连接（见图 9）。这样，总的熔盐电阻 R 可以用下式计算：

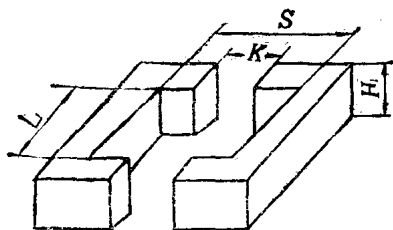


图8 马蹄形电极在
盐浴内的布置

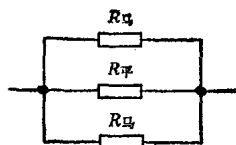


图9 马蹄形电极的
熔盐电阻

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_{\text{马}}} + \frac{1}{R_{\text{平}}} + \frac{1}{R_{\text{马}}}$$

整理后得

$$R = \frac{R_{\text{马}} R_{\text{平}}}{2R_{\text{平}} + R_{\text{马}}}$$

$R_{\text{平}}$ 的计算：马蹄形电极中二平行部分间的熔盐电阻，仍可按下式计算：

$$R_{\text{平}} = \frac{S}{\gamma A} = \frac{S}{\gamma HL}$$

上述计算式中仅仅假定了电极间的熔盐电导，忽略了电极区临近熔盐的电导，故求得的盐阻一般偏大。

$R_{\text{马}}$ 的计算： $R_{\text{马}}$ 在马蹄端的整个“延伸脚”（ $b \rightarrow a$ ）上的分布是不均匀的，随着距离的增加而增加。其熔盐电阻（ $R_{\text{马}}$ ）可以看作（ $b \rightarrow a$ ）面上无数个小面积在与其相对应的导电距离上熔盐电阻的叠加。

为了计算方便，我们在马蹄形中间取一小段 Δx （见图10），设在马蹄面上某一处有相互对应的小面积 $\Delta x H$ （ H 为电极高度），它们之间的对应距离为 $2x$ 。如将这小面积的熔盐电阻看作二平行小电极的熔盐电阻，则

$$\Delta R_{\text{馬}} = \frac{2x}{\gamma H \Delta x}$$

取倒数

$$\frac{1}{\Delta R_{\text{馬}}} = \frac{\gamma H \Delta x}{2x}$$

将上式取微分，并进行积分，显然，边界条件为

$$x \text{ 最小为 } \frac{K}{2}, \quad x \text{ 最大为 } \frac{S}{2}。$$

由于计算时所取的微面积是看作相互平行的小电极，故导电距离也可看作是相互垂直的直线。在实践上，它们的导电路程是一个弧形，显然，比假定的来得长。所以由上式计算的熔盐电阻 $R_{\text{馬}}$ ，比实际的来得小。

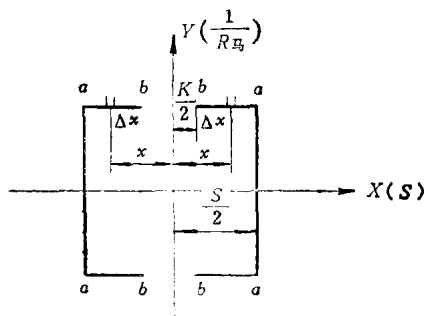


图10 马蹄形电极的计算

马蹄形电极的总熔盐电阻，

$$R = \frac{R_{\text{馬}} R_{\text{平}}}{2R_{\text{平}} + R_{\text{馬}}} \\ = \frac{S}{\gamma H \left[S \left(\ln \frac{S}{2} - \ln \frac{K}{2} \right) + L \right]}$$

从上式可知，当我们确定了炉膛的宽度 S 、长度 L 及合理选取 K 值后，就可按所需的熔盐电阻来求得盐浴电极的高度 H 。

例如，我厂的高温加热炉，其熔盐配方为 100% BaCl_2 ，经常使用温度为 1200~1300°C，采用单相 80 千瓦磁性调压器，次级电压为 9~31 伏，要求的炉膛尺寸为 300×350 毫米，深 450 毫米，采用马蹄形电极对称布置，其马蹄端的开

档尺寸选定为 80 毫米，厚度选定为 60 毫米（选定原则另有说明），现计算电极的高度 H ，需多少才合适？

〔解〕已知： $P = 80$ 千瓦 $U = 30$ 伏，

$S = 300$ 毫米（30 厘米）

$L = 350$ 毫米（35 厘米）

$\gamma \approx 3$ 欧姆⁻¹·厘米⁻¹ $K = 8$ 厘米

由公式（1）求所需的熔盐电阻 R 为

$$R = \frac{U^2}{P} \times 10^{-3} = \frac{30^2}{80} \times 10^{-3} \approx 0.01125 \text{ (欧姆)}$$

由公式（2）求所需电极的高度 H 为

$$\begin{aligned} H &= \frac{S}{\gamma R \left[S \left(\ln \frac{S}{2} - \ln \frac{K}{2} \right) + L \right]} \\ &= \frac{30}{3 \times 0.01125 \left[30 \times \left(\ln \frac{30}{2} - \ln \frac{8}{2} \right) + 35 \right]} \\ &\approx 12.2 \text{ (厘米)} \end{aligned}$$

根据上述计算，我们初步确定电极高度为 120 毫米。通过实际使用，尚能达到要求。对于中温盐浴炉（炉膛尺寸与高温炉一致）可用同样方法计算，它的电极高度约需 110 毫米左右，为了便于统一制造，也定为 120 毫米，经实际使用，也能达到要求。然而，对于中温盐浴炉所采用的普通 50 千瓦变压器在接线上是需要进行改变的。

模拟试验法确定电极尺寸 目前还用一种“室温盐水溶液模拟试验法”来确定电极尺寸（具体方法见附录Ⅲ）。这方法的要点是用模拟的方法来验证初步确定的电极在工作条件下的熔盐电阻，验证是否能发出所需的功率。如果电极的几何尺寸及相对位置不符合要求，可以根据模拟试验的结果进行修正。

3. 电极设计制造及放置中的几个主要问题

(1) 马蹄形电极比较复杂，为了减少厚钢板的焊接工作量，我们试用了浇铸成型的低碳钢电极。从使用中发现，浇铸电极的寿命短一些，这可能是由于浇铸钢内组织比较疏松的缘故。对于厚钢板焊接的电极，在焊接过程中应使整个断面焊牢。

(2) 马蹄形电极 $\left[\begin{smallmatrix} a \\ b \end{smallmatrix} \right]$ ， a b 两处的开档尺寸，取 70~80 毫米为宜，开档过小，会导至 a b 处的电流密度过大，温度过高，电极的烧损也会加剧；开档过大，则使温升速度减慢。

(3) 电极的厚度直接关系到电极的使用寿命，它应该与坩埚的寿命相匹配，坩埚耐火层厚度增加能提高坩埚的使用寿命，此时，电极厚度可以适当增加。我们认为电极厚度以 60~70 毫米为宜。对于高温炉，可取高限。必要时也可按电极横截面上的允许电流密度（通常取 0.6~0.8 安/毫米²）进行校验，通常总是远远低于这一数值。

(4) 马蹄形电极 $\left[\begin{smallmatrix} a \\ b \end{smallmatrix} \right]$ ， a b 处烧损较快，使用一段时间后，发出功率下降，此时可以提高次级变压器的电压，或者可以在坩埚底部加低碳钢辅助导电板，以减少电极间熔盐电阻，增加发出功率。辅助导电板不能和电极接通。这种方法作为临时救急措施还是可行的，但最后还是要修正电极导电面积或相对位置。

(5) 电极柄与铜排的接触连接处应刨光后镀铜，或焊上一块铜板，使之接触良好。这样，接触处不易发热，无需通水冷却。

(6) 埋入式电极盐浴炉的熔盐电阻，与插入式相比有成倍提高，在相同的功率下，埋入式的次级电压高，次级电

流就降低。因此，对于埋入式电极的引出柄，其截面积和铜排截面积，可以比插入式有所减小。如参照插入式的截面积，则更安全可靠。

(7) 电极与坩埚底部的距离，一般以 50 毫米左右为宜。如果电极直接与坩埚底部接触，则由于炉渣沉积而使电极短路，影响电极间的导电，降低发出的功率。其次，由于坩埚底部短路而发热骤增，坩埚底部易烧坏。我厂曾试用电极直接与坩埚底部相接触的炉子，使用不久，就使坩埚底部铁板烧穿而漏盐了。

(8) 由于埋入式比插入式的熔盐电阻大，为了发出足够的功率，需要提高变压器的次级电压。我国原有盐浴炉变压器老产品的次级电压一般为 5.5~17.5 伏，将原来次级线圈的并联输出(三相单线圈为 Δ 输出)改接为串联输出(三相单线圈为 Y 输出)，可以使次级电压提高一倍(三相可提高 $\sqrt{3}$ 倍)，即提高到 11~35 伏(三相为 9.5~30 伏。具体接线方法见附录 I)。

四 埋入式坩埚的材料与制造

图 11 是我厂设计制造的埋入式坩埚。

坩埚外壳用 6~8 毫米厚的铁板焊接制成，焊缝必须牢固，无渗漏现象。对于高温炉，可以采用较厚的铁板。电极用低碳钢焊接制成。

坩埚内衬材料，采用磷酸盐耐火混凝土，用捣打法成型。这对于制造具有复杂电极的坩埚是很有利的。因为用标准的耐火砖砌造，容易漏盐。磷酸盐耐火混凝土的配方如下：

颗粒 ≤ 15 毫米

低铝石

40%

颗粒 ≤ 6 毫米	低铝石	30%
2号低铝细粉		30%
外加稀磷酸 (比重 1.38)		8~9%

将上述配料均匀拌和, 放置 24 小时后, 方可压制使用, 放置的目的是为了排除混合物中含铁质氧化物与酸起反应而生成的气体, 以保证坩埚的致密性。

配料中的稀磷酸, 采用工业磷酸 (一般浓度为 85 %), 加水稀释至所需浓度, 可按下表配制:

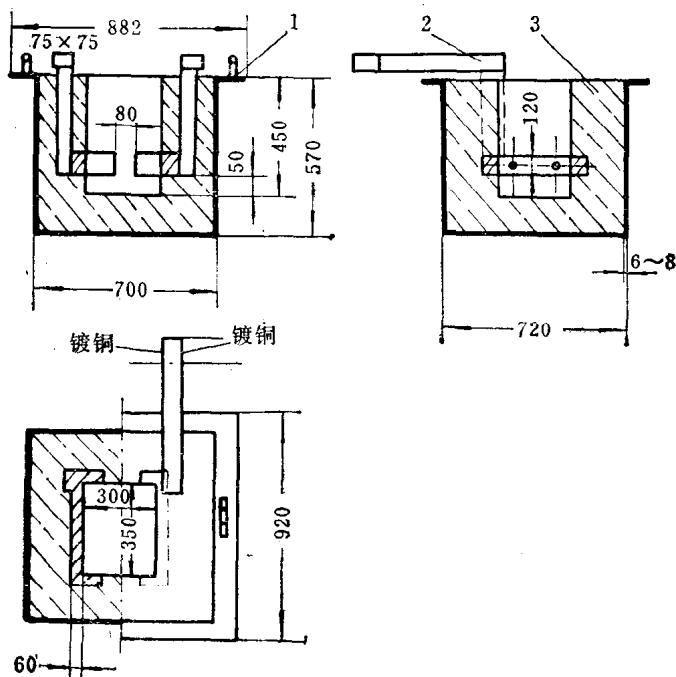


图11 我厂设计制造的埋入式坩埚

1—坩埚外壳; 2—电极; 3—坩埚内衬材料

表 1

浓度 %	85	80	75	70	65	60	55	50	45	40
比重 克/ 厘米 ³	1.689	1.633	1.579	1.526	1.475	1.426	1.379	1.335	1.293	1.254
每10公 斤浓酸 加水重 (公斤)	0	0.62	1.33	2.14	3.08	4.10	5.45	7.00	9.00	11.25

配料中的低铝石（又名焦宝石）含 Al_2O_3 40~50%，其余是氧化钙、氧化镁和氧化铁，作为混凝土的骨料。2号低铝细粉作为填充剂。所加稀磷酸在 200~600℃ 下经作用后生成的磷酸盐作为胶结剂，它具有较高的高温粘结强度。磷酸盐耐火混凝土是一种“火硬性”材料，其硬化取决于胶结剂磷酸本身的物理化学反应。烘炉中混凝土受热后，在不同温度下，磷酸组分经过多次脱水，发生变化，最后由于粒状 AlPO_4 的无机聚合作用，形成链状空间网状无机高分子结构，因而使它具有良好的高温性能。这种磷酸盐耐火混凝土最高使用温度可达 1400℃ 左右，其制成品不易开裂。经我厂使用，除坩埚内壁有少量剥落外（与捣打是否结实有关），觉得它的强度较高，并具有高的耐火度和良好的热稳定性等优点，作为坩埚内衬是适宜的。

我厂开始曾试用过矾土水泥耐火混凝土，用振动浇筑法成型。矾土水泥要用水养护，因为它是一种“水硬性”材料。矾土水泥耐火混凝土水份太多，在烘炉过程中极易产生裂纹。矾土水泥在高温下其粘结强度下降。因此耐火强度比较差，后来就被磷酸盐耐火混凝土所代替。