

电子束熔炼

冶金工业部钢铁研究院

1962·北京

前 言

本专輯收集了近几年来各国有关电子束熔炼的主要文章，除“电子束炉电源控制”一文为本院秦元璇同志編写外，其余都为譯文。“資料”一节中編入有关数据、消息报导等。专輯最后附有索引。

編輯本专輯的目的，为使讀者对形成电子束的原理、电子束炉电源設備及其控制、电子束熔炼炉結構、熔炼工艺和效果有一概括的了解，并作为工作上的参考資料。

本专輯由于受紙张质量和篇幅所限，部分金相图和設備外貌照片省略未登，如需要請參看原文，特向讀者致歉。

由于我們的水平所限，本专輯不論在內容（为了保持原文結構，个别文章之間在內容上可能有一些重复）和翻譯质量上都有不少缺点，敬希讀者批評和指正。

目 录

言

第一部分 电子束熔炼和应用	(1)
一、电子束用作生产工具	(1)
二、电子束熔炼的各种方法	(4)
三、在真空中利用电子轰击法加热材料	(13)
四、双阴极和单阴极的区域精炼电子束设备	(22)
五、电子轰击熔炼	(26)
六、60瓦高真空多室电子束炉炼钢	(31)
七、高熔点金属的电子束熔炼	(41)
八、电子束在难熔金属上的应用	(45)
九、铌及铌基合金的电子轰击熔炼	(48)
十、钨的电子轰击悬浮区域熔炼提纯法	(51)
十一、钛和钛基合金的电子束熔炼	(55)
第二部分 电子束炉电源设备及其控制	(58)
十二、电子束炉电源控制	(58)
十三、可控低脉动恒流电源	(67)
第三部分 电子束的形成和聚焦	(74)
十四、强流电子束的聚焦	(74)
十五、高电密电子束的形成	(82)
十六、高电密电子束的电子枪及其聚焦	(90)
十七、区域熔炼轰击用电子枪的改进	(97)
第四部分 其他	(99)
十八、有关真空电弧炉和电子轰击炉熔炼的研究	(99)
十九、高温真空中不同合金的蒸发	(103)
廿、几种金属在高温真空下的蒸发速度	(106)
廿一、资料	(108)
廿二、索引	(112)

第一部分 电子束熔炼和应用

电子束用作生产工具

E.S. Candidus

电子束设备的类型很多，它可以用于任何需要可控热源的过程，设备的结构取决于用途。

(作为一种简单可控热源的电子束，近二年来已经发展成为“多面手”，它已经用于焊接，熔炼，浇铸，精炼，钻孔和磨削。)

电子束设备基本上是由一个真空室，一个电子枪及一个枪用电压源所组成。

电子枪

任何电子束加热设备的核心是电子发射系统。可用的型式很多，究竟使用那一种，多半取决于设备的用途。其型式可归纳成二种主要类型：一类产生柱形电子束，另一类产生环形电子流。产生柱形束的系统基本上包括一个发射阴极，一个聚焦装置和一个加速装置。聚焦装置也可以与其它二个元件合并起来。图1表示典型的枪，其中阴极是钨丝。阳极可以是加热的工作件，见图1(a)；或者是一个有孔的板，允许电子束穿过，如图1(b)所示。

纯金属的阴极，钨或钽适用于这种情况。遗憾的是其他材料，例如氧化钨或含钽的钨，虽然发射性能较好，但是很容易被蒸发的金属和杂质的堆积物所沾污，因此用它们做阴极材料不合适。

在钨和钽这二种纯金属中，如果阴极采用丝的形式，则选择钨，因为钨丝必须具有或多或少的自持能力。电子发射时需要高温(2500°C)，这时钨丝保留它的机械强度，不变形。另一方面，在任何温度下，钽的发射性

能都比钨好。如果阴极是实体形状间接加热的，就选择钽，因为它发射性能好，见图2。

图1所表示的枪用于功率较低的情况(小于10

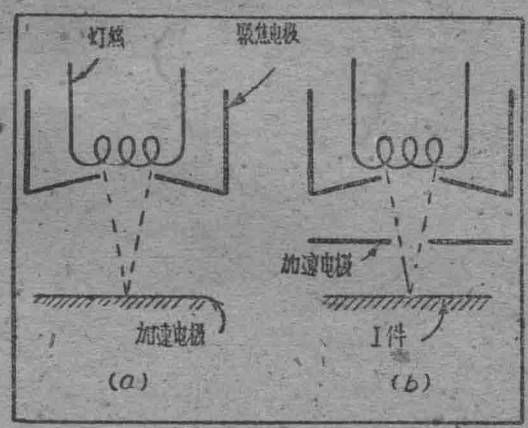


图1. 简单的电子枪的形状

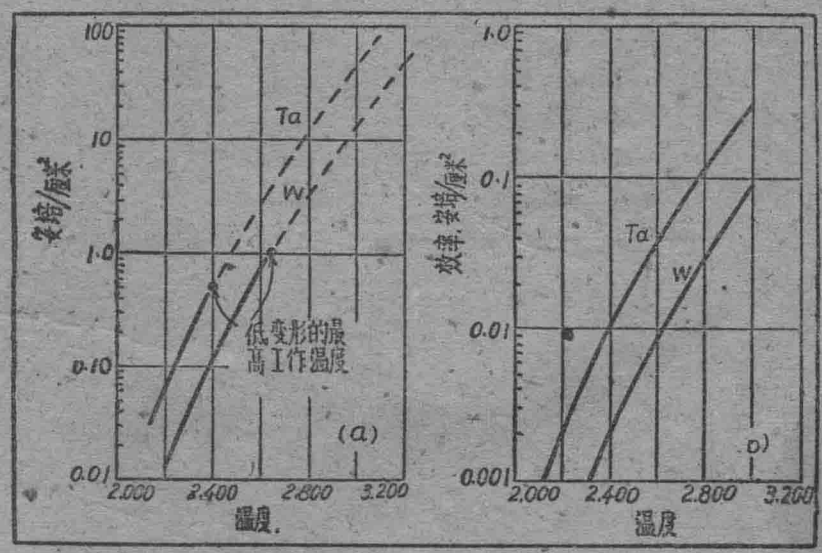


图2. a) 钨丝和钽丝的发射性能； b) 钨和钽的表面发射效率

延)。当加速电压提高时，它的电子光学性能有很大改进。由于采用灯丝而引起的场图的畸变，被加速电极造成的强电场消除掉。当操作电压低于20千伏时，如果需要更高的功率，并要求良好的电子光学性能，则应用如图3所示的更精密的结构。此时，阴极用钽片，把它加工成凹球形。同时聚焦极和加速极的成型都需非常精确。电场的几何形状相当规则，因而电子束具有良好的电子光学特性。用这个枪能够使用高电流，因而获得了高功率。

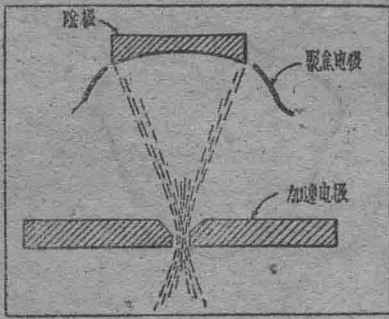


图3. 球面阴极的电子枪

如果要求辉点尺寸极小，或者要求穿透能力高，则采取类似电子显微镜中所用的发针型灯丝，就可以作出一个比较简单的枪。用这个方法已经作出了操作电压为40到140千伏的电子枪。当功率为1瓦时，它所产生的辉点尺寸小到0.25毫米。

如果枪距离工件相当远，并需要有很小的辉点，则当电子束通过孔后，必须提供进一步的聚焦。采用聚焦线圈就能够满意地实现这一点。线圈的轴向磁场和电子束平行，而它的径向磁场和电子束的中心线对称。图4表示几种磁透镜的形状。

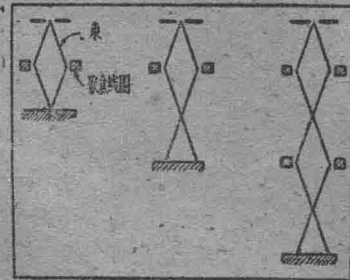


图4. 磁聚焦系统

为了提高阴极寿命，并阻止阴极附近的气体放电，就必须在枪中保持真空度在 10^{-4} 毫米水银柱以

下。因为极大多数的应用过程都涉及到气体的放出，如果枪太靠近工件，就会遇到困难。

采用一个产生恒速电子束的发射系统就能避免这些困难。此时带有强电场的电子枪能够移动到高压力崩溃源任何距离的地方。因为崩溃时，瞬时压力分布基本上是根据平方定律。当崩溃达到枪时，已过了一定时间，因此它已大大减弱。此外，在电子束的路径上可以放上一个或几个膜孔去进一步减少到达枪的气流。而且在枪的附近可以放一个小容量的辅助泵系统，以消除实际达到枪的少量气体。

对于某些用途，例如悬浮区域精炼和金属锭冶炼，已经使用了环形发射系统，如图5所示。这些系统与图1(b)所示的情况很相像。它们的优点是简单而且很容易按比例放大。主要缺点是阴极太靠近工件，以致放电不可避免，除非工件非常清洁。而且阴极被对它有害的蒸发金属所沾污。虽然如此，环形枪仍获得了很多应用并相当成功。

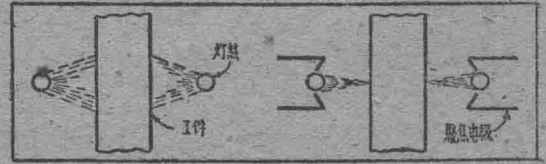


图5. 环形电子枪

结 构

电子枪的结构材料必须适应高真空和高温。不锈钢和镍等金属十分适宜于作电极和灯丝支柱，但应抛光，以使高压击穿减小到最小程度。

绝缘材料存在更多的问题，这是因为少量放气会引起击穿，继而损坏绝缘材料本身。从放气的观点看，高铝陶瓷适宜于作绝缘材料，然而它们应该上釉以避免吸气并使本身易于保持干净。

供 电

如果设备所应用的枪能够产生光学特性良好的圆柱电子束，则电源输出的交流波纹系数应该保持低于总电压的百分之几。在采用膜孔的场合下更是特别重要，因为电子束的焦距主要取决于电压。对于一个在高功率水平工作的系统来讲，应用三相全波整流系统具有极大的优点，因为输出的波纹系数，在不用任何

滤波器时，只有 4%。

4%的波紋系数取决于输入整流器的是正弦波，这就不允许把饱和电抗器用作电压控制，而且在整流线路中也不能采用硅二极管，因为它们应该带着极大的电感操作，以防止瞬时放电时的焚烧电流。因此，要得到聚焦很好的电子束和理想的高功率，电源是利用可調的自耦变压器控制，并采用真空管作整流器。

栅控整流器虽然便宜，但要它们的输出波形平滑，却要解决相当严重的滤波问题，因而一般都不采用它，除非在电子光学特性并非头等重要的场合下，例如在环形枪的情况下，用这种栅控整流器就有利，因它们价廉，而且还可以采用一个很好的快速作用的自动控制系統。

电子束的用途

1. 熔炼——已经用环形枪成功地大规模熔炼金属锭。需要熔炼的金属棒，穿过在10千伏操作的环形枪结构而逐渐下降。已熔金属从棒端滴落到熔融金属熔池中，熔池处于具有可动模底的锭模中。这个熔池被另外一个环形枪所保持，该枪稍高于熔池，而它的聚焦系统使电子向下运动。

大的扩散泵（81.28厘米）用来抵制放气，以保持压力低于 10^{-5} 毫米水银柱。由于压力崩溃引起放电的危险，这个电源必须设计得能够迅速反映负载变化，以防止设备及能源本身的损坏。

抵制放气的另一个方案如图6所示，不用环形枪，而用一个60瓦功率的产生柱形束的枪。该枪离开熔池表面约4米，而且它还用一个膜孔来隔开，以阻止气流达到电子枪。

在操作中，用电子束保持锭模中的熔池。粉末状的被熔金属用一个振动加料器加入熔池。

2. 焊接——电子束焊接的优点是不沾污焊件，因为没有电极的沾污和大气的沾污。此外，与电弧焊比较，电子束焊接可以在更大范围内控制束的直径和功率，可以得到更小的直径，深度与广度之比更大。

钨、钼、钽、钛、铅、铍、铀、铍、铝、镍、不锈钢和碳钢已经成功地运用了电子束焊接技术，可焊厚度达到6.35毫米或更大。镁和铬由于蒸气压力太高还没有成功。

最简单的焊机在瞄准盘后边用一根钨丝，工件接地，钨丝对工件的电压是负的5到10千伏，最大的电流

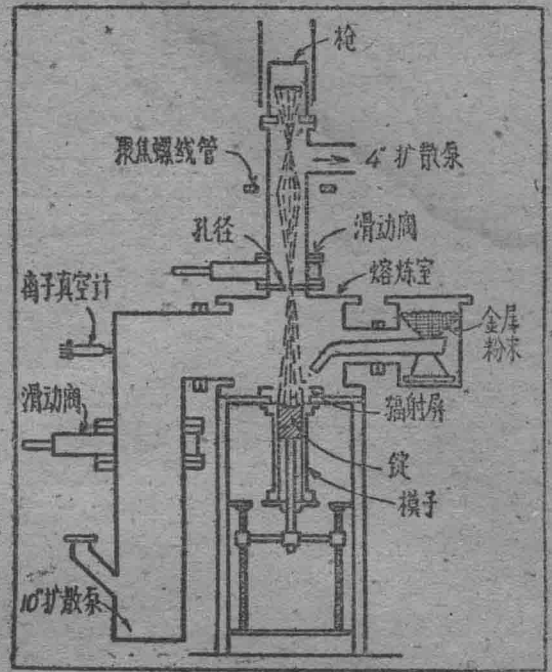


图6. 电子束熔炼炉

约为100毫安左右，允许最大功率约1瓦。辉点的直径0.79—3.18毫米。枪到工件的一般距离是12.7—25.4毫米。这种布置的基本缺点是工件的形状不规则会引起电子束的散焦。

一个修正的方案是在枪内有一个阳极，工件对阳极是呈电中性的，这就消除了由于工件不规则的影响。允许枪远离工件而操作。对于这种设备一般都需要采用磁聚焦。这种型式枪的典型电气数据是20千伏及3瓦。辉点尺寸0.25—2.54毫米。这种设计就允许在枪和焊接室中间插入一个隔离真空室。这个中间室有它自己的抽气系统，这样，就使得枪室的真空度基本上与工作室的真空度无关。因此，可以容许从工件发出大量气体，而不妨碍焊接的进行。

3. 烧结——高温烧结一般是在电阻加热炉或感应加热炉内进行。在这两种情况下，加热元件或磁化器都必需加热到比负载更高的温度。这就引起弯曲，蒸发和热损失等一系列严重问题。而电子束加热的烧结炉可以把负载加热到比系统内任何部件更高的温度。仅有的加热元件是电子源，但它可以保持在相当低的温度。比起电阻加热元件或感应磁化器来，电子源灯丝所需要的贵重难熔金属非常少。电子束烧结炉的功率比其他两种型式为低，因为电子束功率有效地直

接用于負載。

目前电子束燒結炉用来加热鉭时，在15分鐘內以电子流5安，电压2000伏，可以把1磅（0.4536公斤）鉭加热到2200°C，即每磅2½ 釐小时。

4. 区域精煉——近几年来感应加热的悬浮区域精煉方法已广泛应用，但是它的应用也受到了限制，这是由于很难得到极小的加热面积。这一点是非常重要的，因为在有些场合下难熔金属只是小部分区域需要高功率，对于大部分区域都是禁止高功率的。另外在许多应用区域精煉的过程中，需要精密地控制輸入功率，而用感应加热的方法經常不易做到这一点。

为了对悬浮式区域精煉中的最小区域加以控制，可以采用相当简单的环形电子束源。在典型的情况下，用Ø0.25~0.63毫米的鎢絲作成一個环，圍繞着一个圓棒，一般情况下該棒就是阳极。鎢絲和聚焦板是处于同一直流电位。这种布置的特点是简单，而且功率消耗相当低。經常碰到的困难是由于从熔体中分離出的材料使鎢絲熔化而污染熔体。

熔点达到3370°C的金属，用这种方法已經成功地进行了区域精煉。直径12.7毫米的鉭棒，6.35毫米的鎢棒，6.35毫米的鉭棒也都已成功。这种设备所需要的功率源一般是500毫安，10千伏。

用电子束方法进行区域精煉的其他优点是熔煉的成功与否并不取决于被精煉材料的电阻。当材料的电阻系数小于0.1欧姆-公分，則一般不能采用感应加热。而电子束区域精煉即使是最好的絕緣体，例如宝石，也可以进行。这种方法还能熔煉直径非常小的样品，例如直径为1.5毫米的絲已經煉成，而运用感应加热是非常困难的。

5. 单晶生长——在研究硅单晶体生长的技术方面，已經作了极大的努力。最常用的是Czochralski方法，能够經濟地生产很大的晶体，但它也受到限制，这是由于熔融的硅和坩堝（一般为石英）相接触。Gasson已經提出了一种电子束加热提煉硅的设备结构，它能克服前述方法中的許多缺点。四个远距离安置的电子枪，在一个多晶硅板上聚焦，該板位于用水冷的鉭支架上。熔化了了的硅的熔池在实体硅板内部形成，这样，就没有不淨的坩堝材料与金属接触。用同样的原材料，以二种方法进行比较結果，在电子束设备中，硅中氧的浓度低十倍。每一个枪的容量是1瓦，而总的容量就是4瓦，变压器为5千伏。阴极都能单独的移动以改变其焦点，因而保持熔煉的对称性。每一个电子束加热的面积约为3×1厘米。

另一种方法是垂直向上送进硅棒，以熔化棒的頂端，并从融熔部分中提煉单晶。

用一个功率400~500瓦的电子束，在直径为19.05毫米的圓棒頂端能够保持一个融熔状熔池。

6. 金属涂层——凡不能在坩堝內或不能用細絲加热的材料而要产生汽化薄膜，电子束技术非常有效。这个设备和熔煉所用的极相似，只是功率水平低了很多，以及用一个圓板代替鎢模。

被蒸发的材料放在圓形模的低洼处，用一个精密聚焦的电子束把它加热到蒸发溫度。用这个方法已經生产了0.0127毫米的鉭鍍层，而蒸发時間不到1分钟。

（秦元璇 譯自Engineering, Vol. 189, No 4905, Apr. 1960. 凌賢野校）

电子束熔煉的各种方法

Helmut Gruber

电子束熔煉金属有許多技术方案可以采用。电子束与其他加热方法（如感应加热和电弧加热）相配合的联合法也值得考虑。下面对最重要的几种方法及其优缺点較詳細地加以探討，其中对电子设备作詳細叙述。

利用自耗电极的鑄錠熔煉法（滴液熔煉法）——所有这些方法的共同点是：將熔煉物料以自耗电极的形式导入熔池，熔池保持在接近坩堝上緣的最稳定的水平上，并将凝固的鑄錠不断向下拉。这是一种直接将电弧熔煉技术轉变为电子束熔煉的方法。关于自耗电极

的給料及鑄錠下拉裝置的細節这里不作詳細說明，此两种工序也可以自动控制。今天尚沒有一个电子束熔煉設備有这种控制。鑄錠完全連續下拉是不合适的，因为这样，鑄錠(图 12c)有产生裂紋的危险。为了可靠地避免裂紋，下拉时須將坩堝及鑄錠相互間往返移动，正像所有連續鑄錠法、以及真空电弧熔煉法(采用可下拉的坩堝底)很久以来所做的那样。

采用一个环形发射阴极的方法 (图 1a)

一个將环形热阴极几乎完全围绕的带槽聚集环迫使电子束射向自耗电电极以及熔池。在最简单的情况下，聚集环位于阴极电位，自耗电电极及熔池位于地电位。当然，也可以給聚集环一种負偏压，以便控制电子流的强弱。向自耗电电极方向和向熔池方向所放射的电子的比例，除聚集环的几何形外，也与阴极——自耗电电极及阴极——熔池間的距离有关。如果要使全部



图 1a. 用一个环形发射阴极进行滴液熔炼

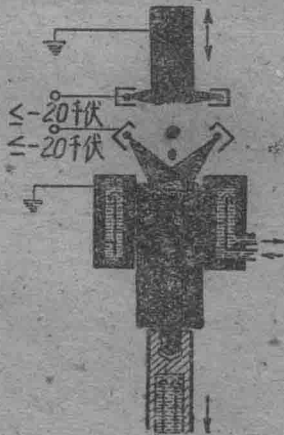


图 1b. 用两个环形发射阴极进行滴液熔炼

放射的电子都击中熔煉物料，也就是說要达到高电效率时，此距离必須与加速电压保持正确的比例而且要比較小。

图 1 a—d 为用滴液熔煉技术及环形发射系統进行鑄錠的各种方法。

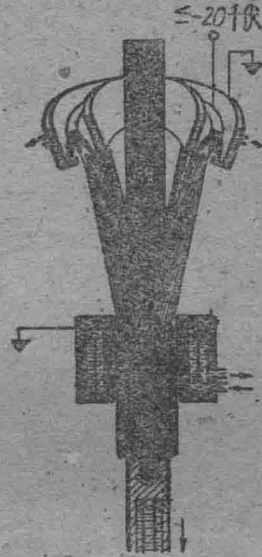


图 1c. 采用环形发射阴极和加速阳极加热自耗电电极及熔池的滴液熔煉 (锥形发射系統)

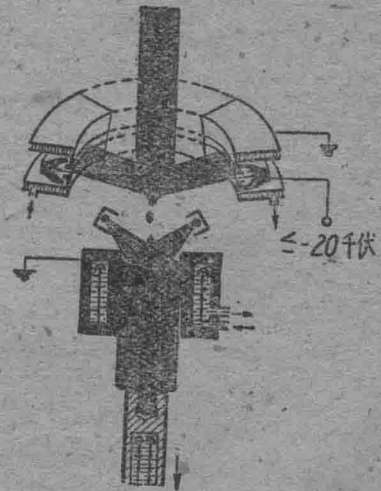


图 1d. 采用一个环形发射阴极和加速阳极加热自耗电电极 (环形发射系統) 及用一个简单的环形发射阴极加热熔池。(图 1a、c、b 方法的結合)

当距离大及电压较低时，如同二极管的场合，在热阴极的周围形成空间电荷；这样，就不能充分利用阴极的全部电子放射能力。根据兰格牟尔 (Langmuir) 的空间电荷法，则： $I = K \cdot u^{3/2}$ 。

〔式中： I —电子流， U —加速电压， K —电子管导电系数〕。当空间电荷存在时，电子流决定于加速电压。如果在二极管曲线（小距离、高电压）的饱和范围内工作时，则全部放射的电子向阳极方向（熔炼物料）加速。因而电子束的功率（熔炼功率）也可以通过热阴极的发射，也就是通过供给阴极的热功率，进行调整。此时，在一定的电子发射功率的情况下，阴极加热功率及阴极温度最小，而阴极的寿命将最大。

此种配置方法的优点是电子发生系统简单，便于更换阴极。只要自耗电电极轴向对称地导向环形阴极时，就能轴向对称且能量分配均等。

此种配置方法的缺点：

(1) 如已提及，为了全部充分利用放射，需使阴极靠近熔炼物料。因而金属蒸气及金属飞溅容易沉淀在阴极及聚集环上，特别是当熔炼难熔金属（热阴极的温度本身对它们来讲就是“冷”的），或者当聚集环在高熔炼能量（约超过 50 瓦）的场合尚需水冷时，结果，一方面会使阴极的电性能及聚集环的几何形发生变动（因此必须将加热热阴极用的电流强度连续提高），另一方面，阴极因为在合金形成时能够降低熔点，所以容易熔化掉（见图 6b）（这更不好）；阴极的寿命只有数小时。当熔炼颗粒状、海绵或粉状材料，亦即熔炼未预熔及未预烧结的材料时，阴极的喷射特别强。

如果想使熔炼操作基本上不受阻挠，有必要使熔化的环形阴极在熔炼过程中得以更换。为此，可用阴极筒（据 C. d'A, Hunt, 更换时间为 15 分钟）或用更好的阴极枪（更换时间少于 1 分钟）。但是它使熔炼设备复杂化；尽管如此，仍然能改变熔炼过程的不连续性。

(2) 自耗电电极在加热时可能翘曲，甚至触到控制栅极而造成短路。

(3) 带聚集环的形状发射系统在熔池及自耗电电极附近意味着熔炼室中泵的有效抽气速度的降低。

(4) 在图 1a 或 b 的环形发射阴极操作中，最大的问题是在热阴极及阳极（熔池及自耗电电极）之间的电场中所产生的辉光放电。只要阴极及阳极间的压力

为 $\leq 10^{-4}$ 托尔时，一般不产生辉光放电，因为电离的可能性太小，从熔炼物料中发生的气体，被电子电离的要小于 1%。但是，由于有自发的气体放出及熔炼时所产生的金属或金属化合物的蒸气，所以几乎不可能避免，在熔炼物料周围即在加速空间的压力常常超过 10^{-4} 托尔（特别在第一次熔炼的场合），并产生非自持辉光放电。真空泵足够大可减少此种危险，但是它在熔炼区中的有效应用由于电极配置的几何状态（见图 1a）而受到限制。聚集环及自耗电电极与坩埚边缘的距离很小时，则构成一种难免的流动阻力。因而，在 $\leq 10^{-4}$ 托尔压力时，排气量受到限制。

由于离子及二次电子在非自持辉光放电中的加速作用（借助于阴极及阳极间的电场），当压力继续增大时，阳极流增加非常强烈（如无限流器时）。结果会继续产生自发的气体放出。这样一来，产生的离子及二次电子越来越多，直到最后产生碰撞电离，从非自持辉光放电过渡到自持辉光放电。阳极电压因此会降低到远远低于规定的数值，并且，阳极电流虽然能够增高，但在标准规格的电流机组的场合，最多只增高三倍左右，这意味着电子发射功率减少，因而会引起熔炼过程中断。此外，离子流还能异乎寻常地加热阴极及聚集环，结果会继续放出气体，最后二者都熔化。在最坏的情况下，甚至当大功率时，自持辉光放电能过渡到电弧放电。

因此不得不限制阳极电流，或在出现辉光放电时减低或极短时间内切断阳极电流。在任何情况下都要减少或中断这时往自耗电电极及熔池供给的能量，直到辉光放电熄灭为止。因而熔炼的连续流程及熔炼铸锭的均匀性受到阻碍。甚至有时尽管减低熔炼速度，但仍能引起熔池凝固。熔炼过程中的这种阻碍现象，在纯金属的场合还勉强可以容许，但在熔炼合金时，多半是不允许的。

重要的是细粒组织，此组织出现在熔炼中断或短时间减低熔炼速度的地方（可能是因急冷而造成的析出）。熔池在继续熔炼前所进行的预热未能完全消除此种不均匀带。

所有电气措施，如阳极流限制器，短时间减低阳极电压，即切断、限制或减少电子发射，虽然能减少辉光放电的影响，但不能消除其产生的原因。

(5) 用带一个环形发射阴极的装配不可能与自耗电电极无关地往熔池供给固定的能量。因为如前所

述，輝光放电时，能量須减少或切断。当大多数气体含量很高的第一次熔炼时，这种现象的影响特别大；它能导致非常不匀的鑄錠，因此在很多情况下，为使鑄錠均匀化，須进行第二次熔炼，即使这对于提純并不是必要的。

用两个环形发射阴极的方法 (图1b)

已經彻底除气提純的熔池与阴极間的輝光放电趋向远远小于阴极与自耗电极之間的，因而采用图1b所示的两个在电气上分离的环形发射阴极能减少1.(5)节中提到的困难。如果在上部阴极与自耗电极間产生輝光放电时，甚至可将此系統切断，而不需要中断往熔池供給能量。因而鑄錠中的不均匀性将减少。当然，两个环形发射系統在輝光放电方面的互不关联性只是在非自持輝光放电，并且上部环形发射系統区域的压力增高尙未侵及到下部环形发射系統の場合才能得到保証。因此，两个系統不要放置相距过近，但是也不許将上面的系統距熔池太远，否則，从自耗电极上滴落的金屬落到熔池上时，喷射将过分强烈。

两个环形发射阴极虽然具有上述的优点，但其应用并不受到特别重視，原因是熔炼設備相当复杂。尽管如此，仍然不能避免在电场中进行熔炼的各个系統的基本缺点(輝光放电)。实际上此类系統不再应用。

采用环形发射阴极及加速阳极的方法 (图1c及d) (环形中间发射系統及锥形中间放射系統，在无場空間熔炼)

前述的环形发射系統具有很大缺点，这主要是由于阴极与自耗电极之間，以及阴极与熔池之間的距离小并且存在着电场。如果在离热阴极尽可能近的地方装上带有放出电子的环形槽的加速阳极时，就可以将阴极与熔炼物料間的距离大大扩大，并可在无場空間熔炼。

采用此种裝配获得如下优点：

- (1) 阴极的蒸发及噴濺减少，因为它距离熔炼物料較远，因而阴极的寿命大大提高。
- (2) 熔炼物料不再是阳极，即在无場空間熔

炼，所以不仅能熔炼传导性的物件(金屬)而且也能熔炼非传导性的物料(如金屬氧化物、陶瓷)。当然，要求此种材料的蒸气压力不太高，并在較高温度时能成为导电体是必要的条件。

(3) 产生輝光放电的危險以及因而出現的电流增大的困难将减少。通过环形加速阳极的槽孔而出来的快速电子在压力上升时仍然能制造出离子及二次电子(这种情况有时从熔池及自耗电极周圍的发光現象可以看到)，但是此种离子及二次电子不能再产生另外的离子，因为没有电场它們不能再被加速。它們不能成为任何射束电流，而是重新結合消失。

(4) 将电子发生室、即加速阳极的环形槽与熔炼室分別抽真空，就可能使电子发生室內的气体反应大大减弱，并且将电子发生室的压力始終保持在 10^{-4} 托尔以下，就不会再出現輝光放电。

但是遺憾的是，对于这种系統來說，电子发生室分別抽真空在技术上几乎不可能。

此外，此配备的缺点还在于更換阴极相当复杂。熔炼过程中更換阴极是根本不可能的，但是，因为阴极寿命足够长，所以也不需要再在熔炼期間更換。另外，此种系統必須分別与坩堝直径相配合，而不可能像图3f系統那样，通过电子光学方法达到此种配合，使一个系統适用于所有的坩堝直径。

图1c的裝配倘若不直接过渡到电子枪，可能将简单的环形发射系統(图1a)排挤掉。

另外，此种系統可构成“圓形中間发射系統”(图1d)或“錐形中間发射系統”(图1c)。在第一种情况下，只能加热阴极；在第二种情况下，能加热自耗电极和熔池。

此种系統的进一步应用見图3e。

4. 电子枪法，在无場空間熔炼 (图3a—f)

刚刚叙述过的裝配，即帶加速阳极的环形发射系統，可直接轉为采用任意数量电子枪的熔炼法。这种設備可以完全避免环形发射系統上的全部缺点。只是有一些另外的无关紧要的小缺点。根据我們对各种电子束熔炼方法的深入試驗結果，以电子枪法最为优越。

电子枪从許多年前就开始应用于各种不同目的。

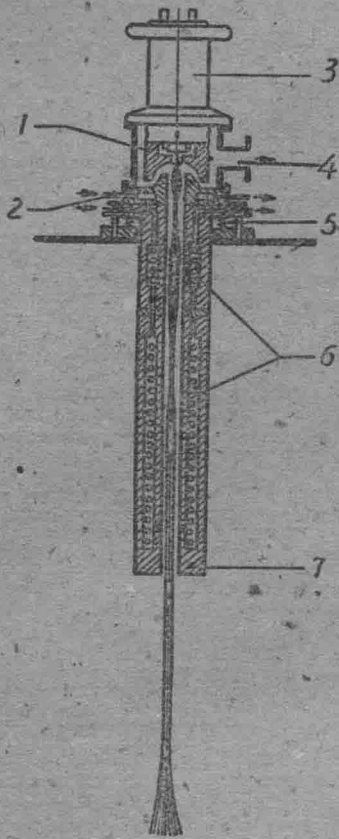


图 2a. 不同构造的电子枪:

图 2a. H. Stephan 式的电子枪。最大加速电压 20 千伏；最大发射功率 100 瓩；导电系数： $1.77 \times 10^{-6} \text{ A} \cdot \text{V}^{-3/2}$

1—中间带热阴极的 Pierce 电极；2—加速阳极（地电位）；3—绝缘器；4—电子枪单独排气用的真空连结；5—电子枪的调节装置（机械的）；6—磁透镜；7—电子束导管

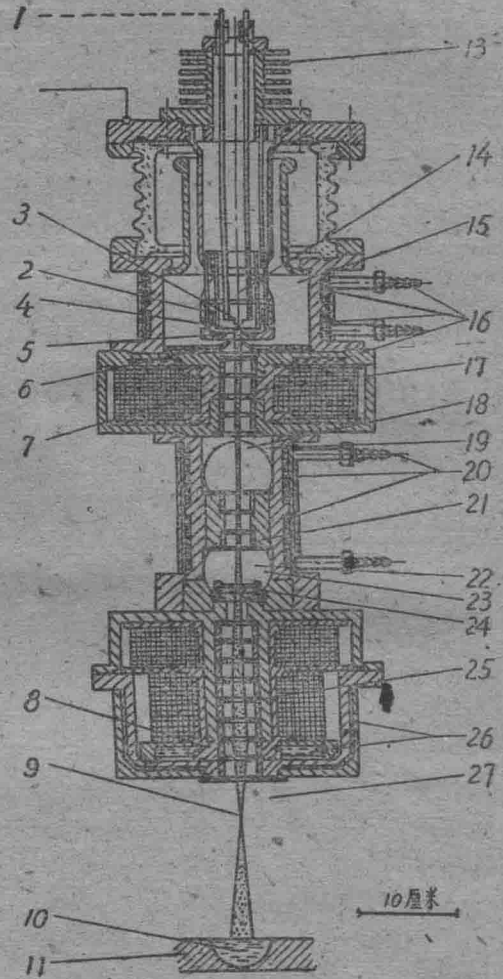


图 2b. 不同构造的电子枪:

图 2b. M. von Ardenne 及 S. Schiller 式的电子枪

通过电子撞击将钨阴极（直径 8 毫米，厚 4 毫米的薄片）加热至 2800°K ，发射密度为 4 安/厘米²。电子撞击采用 0.4 安及 1500 伏（约 600 瓦），500 瓦将从热阴极向四周射击。最大加速电压为 24 千伏，最大发射功率为 50 瓩。导电系数为 $6 \times 10^{-7} \text{ A} \cdot \text{V}^{-3/2}$ ，当击中熔炼物料时的发射直径为 4~100 毫米。

1—电气元件：撞击数据 $I_A \approx 0.4$ 安； $U_A \approx 1500$ 伏；2—高导电系数电子发射体；3—撞击阴极；4—发射阴极（钨圆盘，直径 8 毫米）；5—Pierce 电极；6—阳极（接地）；7—磁性辅助线；8—调整焦点直径用磁透镜；9—电子束（ $I_B = 1.9$ 安； $N_B = 45$ 瓩）；10—熔池；11—绝缘坩埚；12—真空技术元件；13—空冷器；14—扩散泵 I；15—电子发生室（I）；16—水冷却；17—光闸系统 I/II；18—扩散泵 II；19—中间室（I）；20. 水冷却；21—光闸系统 II/III；22—扩散泵 III；23—中间室（II）；24—光闸系统 III/IV；26. 水冷却；27. 炉室（IV）（主要容器）

这里要提到的只是电子显微镜、金属及绝缘材料的钻铣设备、金属蒸发、化合物的照射以及金属焊接等。这实际上只是解决整个系统提高发射功率的课题。幸而在熔炼时不需要着重良好的聚焦点，这个课题并不难解决。

当阳极电压为20千伏时发射功率在100瓦以下的电子枪已制成。功率更高的电子枪正在发展过程中。制造200瓦以下的电子枪可能不会有什么不可克服的困难。可以设想，当用更高的电压时，电子枪的功率会大大增大。

这种适于熔炼用的电子枪其主要组成部分是：热阴极、Pierce式电极、加速阳极（带有中心孔，以便借助于Pierce式电极而聚焦的电子束通过）以及与其连接的较长的电子束导管。当射线从电子束导管穿过时，通过一个或数个磁透镜而获得所希望的聚焦点，以便使射线能以准确的角度和扩度击中熔炼物料。热阴极（用钨或钼制）的加热可直接或间接（由加热线圈或电子轰击）进行。当用电子轰击加热时（如图2b），阴极的寿命最高，据M.vonArdenne所说达1000小时。E.B.Bas使用“螺栓阴极”（这对上述应用情况非常适合），也获得相似的寿命。

如果电子发生室与真空泵连接（图2a），由于电子束导管小，真空传导率小，所以能保持压力差。下例说明在一种压力下，此压力差能有多大。

图 3a-g 采用电子枪和自耗电电极技术制造圆柱形铸锭的各种方法

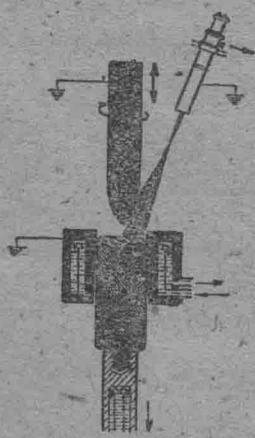


图3a. 采用一个电子枪使自耗电电极及熔池加热的滴液熔炼。电子枪斜射

图2a式电子枪的数据：

阳极孔的长度	15毫米
阳极孔的直径	10毫米
电子束导管长度	150毫米
电子束导管直径	20毫米
电子发生室的有效抽气速度 S_{eff}	

(在压力范围 $10^{-3} \sim 10^{-5}$ 毫米水银柱) 25.4 公升/秒

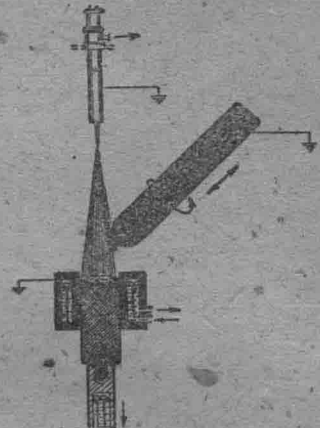


图 3b. 采用一个电子枪使自耗电电极及熔池加热的滴液熔炼。自耗电电极倾斜导入 (N.R.C. 法)

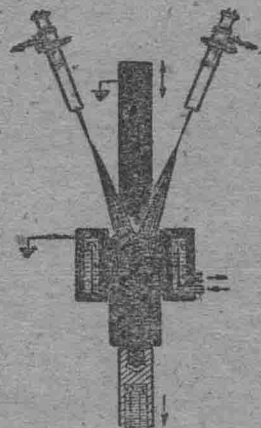


图 3c. 采用两个或更多的轴向对称的电子枪使电极及熔池加热的滴液熔炼

如实验（图4）所示，当熔炼室中的压力为 10^{-3} 或 $2 \cdot 10^{-4}$ 毫米水银柱时，则电子发生室为 1.2×10^{-4} 或 4.4×10^{-5} 毫米水银柱。

图4的曲线按以下公式计算：

$$P_E \cdot S_{eff} - L = S (P_S - P_E)$$

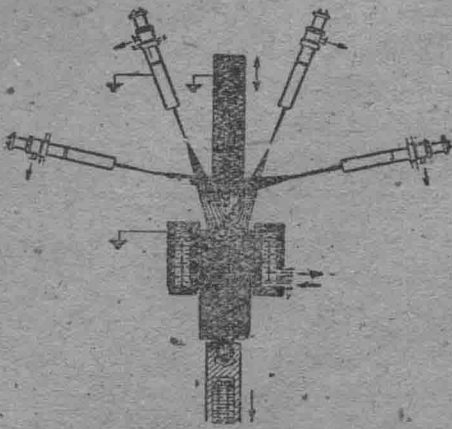


图 3d. 采用四个或更多的轴向对称的电子枪滴液法。自耗电极及熔池的加热, 使用不同的电子枪

- 式中: P_E ——电子发生室中的压力;
 P_S ——熔炼室中的压力;
 S_{eff} ——电子发生室中的有效抽气速度;
 S ——阳极孔及电子束导管的真空串联传导率;
 L ——漏气率。

上述结构的电子枪在熔炼时, 有下列优点:

(1) 在最坏的熔炼室压力条件下仍能保持电子发生室中的压力为 $\leq 10^{-4}$ 托尔, 并几乎可防止在电子发生室中产生任何一种辉光放电。最多也不过在熔

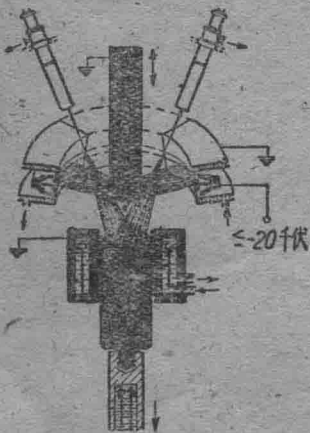


图 3e. 用电子枪加热熔池, 用圆心或锥形发射系统加热自耗电极的滴液熔炼

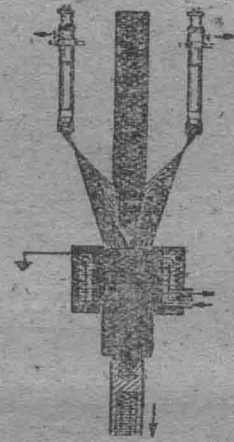


图 3f. 利用多数电子枪的滴液熔炼。电子束以电子光学方法偏转(可应用于采用电子枪的各种系统)

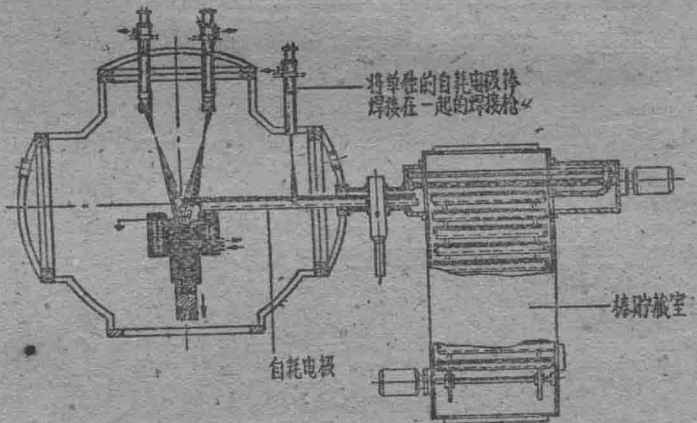


图 3g. 熔炼电极的水平加料装置

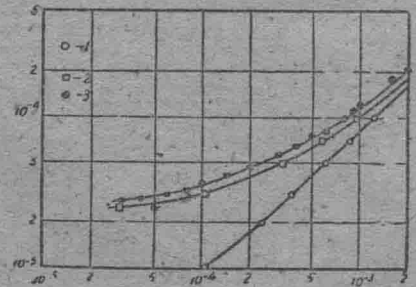


图 4. 用分别抽空的电子枪时电子发生室与熔炼室的压力关系

室中形成非自持辉光放电, 但是如 3. 节已提到, 它不能引起电流上升, 因为熔炼室是无场的。M. von Ardenne 和 S. Schiller 已将此种辉光放电摄成照片。

(2) 即使在不是单独抽气的电子枪的情况下，热阴极与熔炼物料间的大距离以及电子束导管的微小的抽真空速度也能避免电子发生室中发生气体的不良作用。因此用简单的设备也可以不放棄单独抽空电子枪。

(3) 长的水冷电子束导管除了具有减少真空传导率的优点外，尚具有其他优点，即能避免其中的金属飞溅和蒸气，因此金属向阴极的蒸发或飞溅很少。环形发射阴极的寿命只有数小时，但是在采用图2a电子枪的直接加热的阴极的场合下，能熔炼30—50小时。通过一定的措施（间接加热，采用块状阴极）可延长寿命达数百小时。

(4) 为保护热阴极完全不受蒸发及飞溅，并借此大大延长其寿命，可用电子光学方法使电子束弯曲（见图3f及3g的设备或N.F.Eaton设备）。这样可获得另外一个优点，即用电的方法能非常准确地调整射线。更换坩埚直径时不需要改变或在机械上调整电子发生系统。当然，射线也用电子光学方法任意转向熔炼物料。此外，肉眼能够很准确地观察到射线在鎢錠的赤热面上的击中点并且能调整射线。

(5) 采用数个电子枪的设备时，一个电子枪发生事故并没有什么关系，可使其余的电子枪多负荷一些，而不必中断熔炼操作。此外，正如在环形发射阴极的场合一样，可用閘式閥門更換阴极。M.von Ardenne及S.Schiller的电子枪中就实现了这点（图2b）。

(6) 前述电子束熔炼，滴液熔炼等各种操作方法，对于不同的坩埚直径不管熔炼材料如何，都可以經常采用同一种电子枪设备。而环形发射系统则必须分别情况与熔炼物料及熔炼方法相适应。

(7) 与环形射线系统相反，熔炼区中没有任何设备。熔炼区周围的抽气速度不降低，抽空气体及蒸气就较好。蒸发的杂质能离开熔区的近周，炉室的清理非常简单（这在改变熔炼金属时常常是非常重要的）。自耗电电极的装入及鎢錠的出炉不受阻碍。

(8) 因为自耗电电极的下端为锥形，所以自耗电电极以液体状态，为提纯而暴露于真空的表面积显著地大于环形射线系统（图1a或1b）。后一种情况下，端部是钝的，因此液体表面相当小。同时熔炼过程从锥体的基底边缘开始，然后流向尖端，并从尖端落入熔池，因而在液态停留的时间较长，提纯和去气的可能

性也较大。当然应该确切地讲，自耗电电极端部的温度比熔池表面的温度低得多（用钽时，约低200°C），这样就使氧化物的蒸发及化合物的离解的可能性较小。

带电子枪的系统的优点是明显的，简单概括如下：

1. 几乎完全解决了电子束熔炼与辉光放电有关的问题；
2. 阴极的寿命较长；
3. 由于采用了较多的阴极，有一个阴极发生故障，并不严重影响操作；
4. 同一的发射系统适用于各种操作方法；
5. 熔炼区无任何阻碍；
6. 去气及提纯的可能性较好。

同时也应该指出其缺点：

1. 电子枪与最简单的环形发射系统相比（图1a及1b）稍复杂一些，如果再将它们单独抽空，并为提高对称性而采用更多的电子枪，制造费昂贵。
2. 电子枪系统不能使熔池完全轴向对称的加热（在自耗电电极的场合，非对称性本身并不起作用，它还可以通过扭转自耗电电极而避免）。这一缺点是不太重要的。当采用三个电子枪时，就可使在鎢錠直径大于50毫米的情况下所获得的表面同环形发射阴极熔炼时所达到的没有差别（在熔炼物料、熔炼速度以及下拉技术相等的前提下）。例如，在钽锭时只須从表面旋削约0.5毫米就可以。

然而就是采用图3a或3b的一个电子枪（这种装配在较小设备时为了经济起见是常用的），也可使直径在50毫米以下的鎢錠表面足够好。应该提到，在此种直径条件下，电子束能聚集至其射线几乎充满熔池的全部表面，自耗电电极的阴影效应很小。

有必要就电子枪，即无场空间熔炼的一些争论作进一步深入的探讨。

电子枪的电效率 有时会碰到这样的意见，即图1a及1b的环形发射系统的电效率显著比单独的加速阴极系统优越，特别是电子枪。换句话说，当采用上述环形发射系统时，击中熔炼物料的“有效”电子在全部发射及加速的电子中所占的比例大于第二种情况。

测定结果表明，在采用本电子枪系统时（这还不是现在用电子光学设计的最好的电子枪），此比例就已达93%。因为磁透镜对控制射线集中到熔炼物料上

的可能性无疑地比聚焦环好，并且电子束在通过加速阳极及磁透镜后不再受到影响（与此相反，在最简单的环形发射系统的场合，坍塌的阳极电位能吸引电子），所以非常明显，所有环形发射系统也包括带加速阳极（如图1c），其有效电子的比例必然要比用电子枪的系统小。

N.R.C. 和本文作者的试验表明，为保持一定直径的钨熔池恰好为溶液状态，发射电子束的必要功率在采用电子枪时比采用环形发射系统为小。这同样证明电子枪的效率较好。

利用电子枪的自耗电极熔炼，由于电极底端是锥形的，与图1c的环形发射系统（由极底端是钝的）比较，电极上所产生的辐射损失较多。用直径50毫米的钨电极熔炼时，辐射损失约为10瓦。这个数字远不能抵消电子枪系统上述的较高的效率。同时，利用加速阳极的环形发射系统（图1c），其自耗电极也是倾斜熔化。

另外一种看法认为在熔炼物料附近的空腔，电荷对电子束有很大的影响，能使它部分地离开其目的物（熔炼物料），这也是没有根据的。通过在 $10^{-3} \sim 2 \cdot 10^{-5}$ 托尔时用 10~20 千伏电子压和几安培发射电流强度所作的试验可以得到证实。

电场的离子泵效应 有时听到这样的意见，即在有场空间进行熔炼时，例如用简单的环形发射阴极（图1a及b），在熔液上方所产生的正离子能向阴极或聚焦环方向加速。此种作用与离子泵作用原理相似，有利于辅助提纯。但是在无场空间熔炼，即利用电子枪以及采用与熔炼物料远离的加速阳极的所有其他系统进行熔炼时，则不必期望有这种作用。这种对于无场空间熔炼不正确的意见已经被 P. Müller 反驳了。我们只想重复他的结论并作些补充。

P. Müller 用钨的例子说明电离的气体分子或蒸气分子仅占从溶液中散发的分子总数的极小部分。实例：含 10ppm H_2 ，1000ppm O_2 ，100ppm N_2 的钨的熔炼。熔炼电流强度为 5 安，熔炼电压为 15 瓦，电子发生系统带环形发射阴极（按图 1 之普通规格，适于 50 毫米直径的熔槽），熔炼速度为 0.1 公斤/分。从单位时间内所产生的一定种类的气体分子的总数 N 中按 P. Müller 方法有如下数被电离（推算）：

$$\frac{N+H_2}{NH_2} = 10 \cdot 10^{-5}, \quad \frac{N+O_2}{NO_2} = 3.1 \cdot 10^{-4},$$

$$\frac{N+N_2}{NN_2} = 3.0 \cdot 10^{-4}$$

电此得出（总离子流从上面的数据算出为 1.7×10^{-3} 安）

$$\frac{\Sigma N^+}{\Sigma Ne^-} = \frac{\text{总离子流}}{\text{电子流}} = 0.34 \times 10^{-3} = 0.34\%$$

即使有更高的电子流及气体含量并假定气体分子多次通过电子束，离子在量上仍然少于未电离的分子的 1%。

在 O_2 场合（最初的含量高时），根据前述的例子，通过离子泵作用最多也不过多排除 0.31ppm O_2 ，而且也不能说这 0.31ppm O_2 不利用离子泵作用就不能被排除。

如计算所示，在蒸发的金属原子及金属化合物的情况下，电离分子部分的百分比稍大，其程度是微不足道的。

如果参照一下在电离真空计管或离子泵时的情况，对此结果就不会感到惊奇。在电离真空计管中，例如在 10^{-4} 托尔时，离子流约为电子流的 1%，即约为上例的三倍（0.34%）。但是应该认为，在电离真空计中，电离的可能性由于电子的加速电压较低而大大增大，并有意地使其增高（例如，使气体分子多次通过电子束）。但是即使将离子流提高到三倍（从电子流的 0.34 提高到 1%），根据上述实例（只指 O_2 ），电离的 O_2 分子也不过 1ppm。利用离子泵效应，也只能排除一小部分氧气。

目前的离子泵，电压为 500 伏时，可获得每 1 安电子流的抽气速度为 2 升/秒。目前也在设计电离作用以及泵效应大的离子泵。当电子流为 5 安时，抽气速度可能达 10 升/秒，这与 75 瓦（5 安，15 千伏）电子束熔炼设备的常用抽气速度 10,000 升/秒相比是微不足道的。

还能够用另外的例子来支持 P. Müller 的推算。作者认为，即使考虑全部电离因素，离子泵作用的提纯效率也要小于分析的准确性，因此不可能通过实践来证明离子泵的作用。事实上用环形发射系统（图 1a）及电子枪（图 3c）对钨进行的比较熔炼也未找到根据，证明在同样的熔炼条件下（真空度、熔炼速度、能量、熔炼物料），环形发射系统可以炼出较纯的金

属。

从事电子束熔炼工作者一致认为理想的熔炼操作，其特点在于没有辉光放电，因而也不产生明显的离子流，而阳极电流几乎全是电子流。如果这是正确的話，那末坚持电场对泵作用会有有效作用的意見似乎有矛盾。

这問題在将来不必考虑，因为必須考虑到为了提高阴极的寿命并且更好地解决辉光放电問題，将来的工业用电子束熔炼设备都将采用加速阳极，即在场外空间进行熔炼。

滴液溶炼可采用的电子枪配置

图3介绍了經过作者实验的几种可用的熔炼法。图3a及b的配置已經叙述过了。如果在熔炼时旋轉自耗电电极，則可获得对称的錐形端。

图3c是设备中最简单的并經过实践考驗的配置，它具有数个与自耗电电极軸向对称的电子枪。它的优点之一是熔炼室中沒有任何一个能减低泵的抽气速度的设备。由于自耗电电极熔化得相当倾斜，所以最好将其挂在細棒上，使电极在熔炼结束时剩下很少。此外，同环形发射阴极方法一样，亦可以使用直径小于或等于鑄锭直径的自耗电电极进行熔炼。当电极直径与坩埚直径相等时，熔炼时滴液容易降落到坩埚边缘上，但仍比环形发射法少得多。为避免这种現象，可以选择

直径稍小于鑄锭直径的电极。这样还可以节省能量并使射綫損失减少。

当采用图3d的方法时，同环形发射阴极的图1b的情况一样，自耗电电极与熔池分开加热。由于技术費用較大，所以大功率设备才可考虑采用这种配置。

采用图3e方法时，自耗电电极与熔池也是分开加热，然而用圆形中心发射系統（实用价值較小）。

图3f是图3c的改进方法，根据目前的技术水平，这是最好的配置：数个单独抽空的电子枪，电子束以电子光学方法偏轉。此种配置具有上述电子枪配置的全部优点，特别是能保护热阴极不受金属蒸发及飞溅。坩埚直径更换时，只需旋轉一个电位計按钮来調节电子枪。

最后的图3g表示另外一种方法，此种或相似的形式将来可能具有重要意义，自耗电电极水平（或几乎是水平的）加入装置。此种方法由于设备很小而且能用简单的方法将自耗电电极单个地加入，所以很有价值。此种加料方法在使用电子枪时最为简单，但是也可以考虑利用其他电子发射系統。

(Das Schmelzen von Metallen mit Elektronenstrahlen, Zeitschrift für Metallkunde, 1961年5月号, 第52卷, 第5期, 第291頁, 于淳摘譯, 刘光仁校)

在真空中利用电子轰击法加热材料

(美国专利2942098. USPO. 1960, 6, 21)

Hugh. R. Smith

該发明是关于在真空中加热金属和其他材料，特别是真空熔炼和鑄造、真空蒸发等。众所周知，金属和其他材料在高真空中經过熔炼和鑄造以后，同在較高压下熔炼的同种材料相比，具有更优异的性能。同时，某些在熔融状态下化学活性較高的材料，例如鈦，是不能用普通的冶金炉熔炼和鑄造的，而在适当設計的真空炉中却可以成功地冶炼。其他一些高真空过程如将材料进行真空蒸发和沉积以形成均匀性大、气孔度低的薄膜和涂层，以及在高溫和低压下的化学反应，都具有相当高的价值和重要性。在所有这些高

真空过程中，既要保証所需要的高真空，又要供給材料以充分高的热量，可以說，这是当前一件相当困难的事情。

該发明的目的是为了在真空中加热金属或其他材料提供一种改进办法。对于小型的、試驗室規模的操作来說，特别是对于高效率低成本不是特别重要的地方，利用直流高压的电子轰击法加热材料比較容易。这种加热方法具有很多优点：可以保証所需要的高真空（例如在真空中熔炼和鑄造的设备中使熔鑄材料完全脱气就需要保持高真空）。这是电弧熔炼法或自热

放电法以及其他常规的加热方法所不能胜任的。同时，它还能将所制备的材料加热到比它的水冷铜坩埚或模子更高的温度。然而对于大型的、工业规模的操作来说，利用电子轰击法得到足够的热量不容易。事实上，在该发明以前也是不可能的。困难就是因为电子放电形成负空间电荷，限制了电子电流，限制了在适当的电压下供给电子束的电功率的大小，也就限制了加热所需的热能。而该发明的另一目的是提供一个稳定的高压高阻抗的电子发射，使电子电流不受空间电荷的限制，于是就可以得到大型、工业规模的熔炼和铸造用的以及其他一些用途的高功率电子轰击加热设备。

根据该发明，在电子放电系统的阴极和阳极之间保持实际的压力梯度，而且使阳极附近的压力比阴极附近大得多（大几个数量级）。为此，最好将阴极做成环形，同时对准阳极，并与受电子轰击的阳极非常接近。从被轰击的阳极中放出来的气体和蒸气，或者由另外一些气体来源而放出的气体连续地进入阳极附近的空腔，同时这些气体从阴极附近连续地抽出，例如，借助于连续抽空的真空箱，使气体排出。于是气体就连续地从阳极附近通过环形阴极而逸出。因此，通过阳极和阴极之间的空腔造成一个压力梯度。在阳极附近，压力最大，而在阴极附近的压力比较低。

环形阴极结构同阳极很接近（一般说来此距离比阴极直径还小），以致使阴极处在实际的压力梯度情况下。借助于上述压力梯度得到了唯一的一种放电形式。在阳极附近所形成的离子，当电子从阴极流向阳极时，使这些阳离子从产生离子的区域流向阴极地区。于是电子束的负空间电荷就大大地被中和，甚至被正离子流的空间电荷过度中和，得到巨大的电流密度。如果空间电荷中和程度大，通过放电空间的压力梯度也可能使之避免电弧放电和其他形式的电故障，并且产生了比目前可能产生的另外一种操作形式，电流密度更高。

该发明的实践要求一些设备，例如真空泵和产生高真空的密封室、传送和支撑原料的工具，发射电子的阴极结构和供电设备。然而这些设备可能形式不同。这里图解和说明的只不过是应用的一个例子。

上述和其他概念，可以用下面详细的叙述和图解来说明。

图解：

图1. 是一个大型设备的纵断面图，该设备可用于本发明。

图2. 是该设备的局部纵断面图，它表示按本发明在操作过程中典型的气流分布和压力分布情况。

图3. 也是局部纵断面图，它表示在操作过程中电场和离子的标准分布。

图4. 是沿图3的4—4线截取的横断面图。

图5. 是图1设备上用的标准供电系统。

图6. 是改进后的局部纵断面图。

图7. 表示上述设备的另一种改进方案的局部纵断面图。

图8. 是一个局部垂直断面，它表示上述设备的另一种方案。

图9. 也是一个局部垂直断面，它表示又一种方案。

图1表示依据该发明由海绵块状原料制备真空熔锭或铸棒的设备。这个设备由以下几部份组成：真空箱或密封体1，它通过一个大直径的管子2同能力大的真空泵3相联，真空泵包括大型（例如直径为81.28厘米）油扩散泵和适当的预备泵以及一些控制设备。真空泵3的能力必须相当大，而且管子2也必须足够大，以便熔炼时，当炉料中放出大量气体和蒸气时还能保持容器内的压力很低，一般说来绝对压力为0.1微米水银柱或者更低。

在真空箱内部有一个水平板4支撑着熔炼坩埚5，供给熔铸用海绵块状料的原料漏斗6，和从漏斗中将上述原料输送到坩埚中的普通供料机构7。气闸8是为了向漏斗连续再装料时用的。导电的坩埚向下延伸，通过平板上的孔，而且使坩埚通过平板和真空箱的金属壁接地。环形丝状的热阴极9用钨丝卷成，并且环绕到坩埚的下部。阴极的每端通过两根导线10和11同电功率供给器12相联。导线穿过真空箱的墙壁，其绝缘子为13和14。功率供给器通过导线给炉丝以足够的电流，产生持久的电子热发射。功率供给器也使整个阴极处于相当高的负电压，例如对于坩埚来说，有15,000伏的负电压，所以从阴极发射出来的电子轰击坩埚，并使坩埚中的炉料熔化。具有向内开的槽形断面的环形聚焦板16，将阴极包围住，使电子向内打到坩埚上，而防止其他部件如板4和壁1受到轰击。最好将聚焦板用金属块或金属带17与阴极相连，这样可以使聚焦板和阴极处于同等电位，又有助于支