

# 空心阴极等离子烧结功率输出特性研究

王从曾<sup>\*</sup> 苏学宽 马 捷

(北京工业大学材料科学与工程学院, 北京 100022)

**摘要:** 提出一种空心阴极放电等离子烧结方法, 并对该种工艺过程中的加热功率特性进行了试验研究。结果表明, 放电加热功率的大小与空腔尺寸、放电电压和工作气压有关。在满足空心阴极效应的条件下, 空腔尺寸越小, 放电电压和工作气压越高, 加热功率越大。

**关键词:** 烧结; 空心阴极; 功率

## 1 前言

粉末冶金制品的烧结工艺, 是决定粉末冶金制品质量的关键环节之一。目前, 常采用的加热方式有火焰加热、电阻发热体加热、感应加热等。这些传统的加热方式基本上能满足一般粉末冶金制品烧结工艺的要求, 但由于其存在加热的最高使用温度偏低、热效率不高等问题, 往往难以适应正在飞速发展的新材料研究及应用的需求, 因此, 发展新型高温高效的加热方法, 已成为粉末冶金技术领域的一项重要任务。

作者等在新材料研究工作中发现, 当真空条件下产生辉光放电时, 如果形成空心阴极效应<sup>[1]</sup>, 则阴极表面会产生很高密度的大能量离子轰击, 离子轰击的热效应可使阴极材料被迅速加热到很高的温度。如果将这一效应用于粉末冶金制品的烧结, 不仅可以大幅度提高烧结温度, 解决高熔点材料的烧结困难, 而且由于这种加热方法不需要专门的加热元件, 是利用高能粒子对粉末制品的轰击而直接加热, 具有加热速度快, 设备体积

小, 能源消耗少等特点, 有很高实用价值。为证实这一设想, 作者利用这种加热方法进行了纯钨、纯钼及其它粉末制品的烧结试验<sup>[2,3]</sup>, 结果表明, 最高烧结温度可达 3000℃, 纯钨的烧结密度达到垂熔烧结的水平, 初步证实了这种烧结加热方法的可行性。

但是, 由于空心阴极等离子烧结方法的加热方式与发热体加热或感应加热不同。因而决定其烧结加热温度及加热功率的控制因素也与其它加热方法有不同之处。空心阴极放电加热时, 其功率输出的大小, 不仅与放电电压有关, 而且还与阴极(粉末制品)间距离、工作气压等条件有关, 是个较为复杂的问题。如果不了解这些因素与加热功率输出之间的关系与规律, 这种方法便不能得到合理应用。本文的目的就是通过对空心阴极等离子加热功率输出特性的研究, 探讨其中的规律, 以便为该方法的实际应用提供基本依据。

## 2 试验条件与方法

试验装置如图 1 所示, 基本组成为真空

<sup>\*</sup> 王从曾, 教授, 主要从事等离子体材料表面改性研究及教学工作。

收稿日期: 1999-10-25

室,抽真空及测量系统,供电及控制系统,供气系统。在真空室中设置阳极和由平行平板构成的空心阴极。阴极板的材料为低碳钢板,尺寸为  $100\text{mm}\times 100\text{mm}\times 4\text{mm}$ 。工作气体为工业纯氩气。

试验时通过调整阴极板间的距离(或称为空腔尺寸) $d$ ,工作气压  $p$  和放电电压  $V_f$ ,进行不同条件下的空心阴极放电,测出各种条件下的空心阴极点燃电压  $V_d$  和放电功率  $P$ 。试验参数范围为,气压  $10\sim 150\text{Pa}$ ,电压  $0\sim 1000\text{V}$ ,空腔尺寸  $5\sim 150\text{mm}$ 。

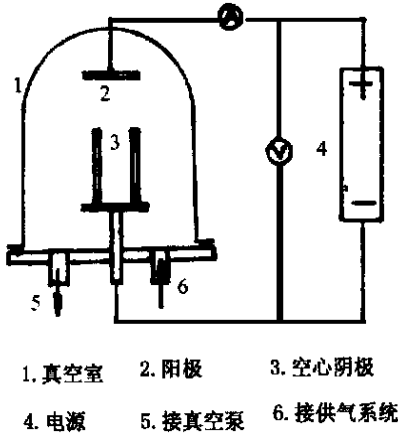


图 1 试验装置示意图

3 试验结果及分析

3.1 空心阴极的点燃条件

空心阴极效应发生的条件亦称空心阴极的点燃条件。空心阴极点燃时,除必须满足巴邢定律外,还必须满足空腔尺寸和气压、电压等条件。通过提供不同的工作气压和电压并调整空腔尺寸,所作的试验表明,对于不同的  $d$  和  $p$  值的组合,点燃电压  $V_d$  并不是一个常数,而是一个与  $d$  及  $p$  值有关的变量,其变化规律如图 2 和图 3 所示。

结果表明,对同一  $p$  值,  $V_d$  随  $d$  值增大而升高;而在同一  $d$  值时,  $V_d$  则随  $p$  值的升高而增大。但当  $d$  太小或  $p$  太低时(见图 2 和图 3),由于两阴极板的相互屏蔽,无论电

压高低均不能使空心阴极点燃。

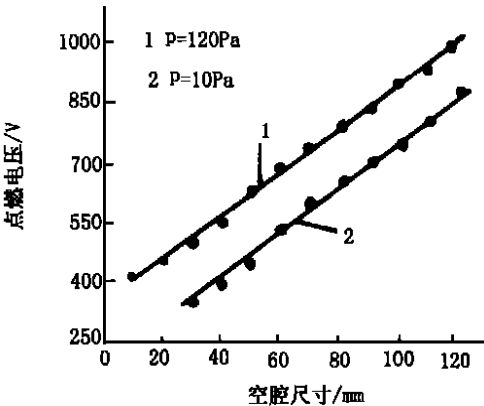


图 2 点燃电压与空腔尺寸的关系

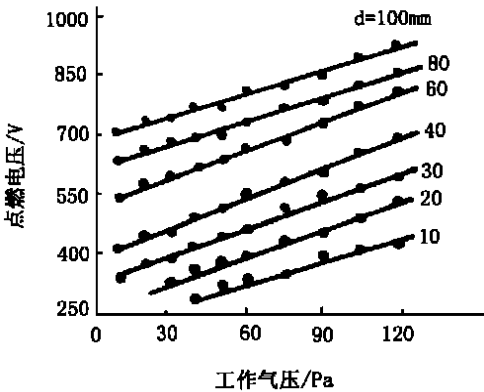


图 3 点燃电压与工作气压的关系

空心阴极点燃的关键首先是可在阴极表面建立起稳定的等离子壳层(阴极位降区),否则便不能形成自持放电。但是仅有阴极位降区,只能满足一般的辉光放电,不一定能形成空心阴极效应,形成空心阴极放电的另一个条件是两阴极间必须有负辉区的交迭,以形成电子的振荡而提高气体的离子化率。因此,当空腔尺寸太小时,运动电子在两极板之间很少有机会与气体原子发生碰撞而产生稳定的阴极位降区,也不能产生辉光放电。而当空腔尺寸太大时,由于负辉区不相交迭,电子逸向阳极,不在阴极之间产生振荡,也不会形成电流放大作用,因而不能形成空心阴极

放电。气压的升高可使阴极位降区和负辉区压缩分离,不利于空心阴极的点燃。电压的升高可使阴极位降区和负辉区扩展,有利于空心阴极的点燃。因此空腔尺寸较大或气压较高时,点燃电压就要增高。

### 3.2 功率输出特性

利用空心阴极放电对粉末冶金坯料加热,依赖于正离子对坯料表面的轰击,因而加热功率的大小便取决于离子的密度和能量,亦即放电功率。空心阴极放电时其放电功率的大小首先取决于空腔尺寸  $d$ , 试验结果如图 4 所示。

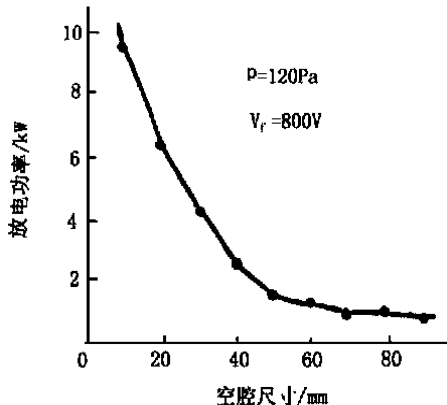


图4 放电功率与空腔尺寸的关系

由图中可以看出,在能够形成空心阴极效应的条件下,给定  $p$  和  $V_f$  后,放电功率随  $d$  值的增大而大幅度下降。在本文的试验条件下,当  $d$  为 10mm,  $p$  为 120Pa,  $V_f$  为 1000V 时放电功率可达 15kW,而当  $d$  值增大为 60mm 以上时,放电功率便降低到 1.2kW,接近于相同条件下的异常辉光放电功率。其结果是由于随  $d$  值的增大,负辉区的交迭减弱,电子振荡次数减少,气体离化率降低所造成的。

在空心阴极放电功率输出特性的影响因素中,除空腔尺寸  $d$  之外,放电电压  $V_f$  和气压  $p$  的作用也十分显著。它们的影响规律如图 5、图 6 所示。图 5 表明,随着  $V_f$  的升高,放电功率呈线性增加,而且在相同气压条件

下空腔尺寸愈小增加幅度愈大。这是由于随着放电电压的升高阴极位降区的电场强度增大,运动电子的加速度增大,与气体原子碰撞电离的几率增大,导致电流密度和离子能量的增大的结果。图 6 表明,放电功率受气压的影响较为复杂,在  $V_f$  和  $d$  保持不变的条件下,放电功率首先随  $p$  值的升高而增大,达极大值后又随  $p$  的增大而逐渐减小,直到空心阴极效应消失,成为一般的异常辉光放电。这是因为,起初由于气压的升高、正离子和二次电子数量增多,电流密度增大。当电流达极大值后,随着气压的升高负辉区和阴极位降区收缩,负辉区的交迭程度减弱,电子在两阴极间的振荡次数减少,气体离化率下降,电流密度也随之降低。随着气压的进一步升高,阴极板之间的负辉区完全分离,空心阴极效应消失后,放电功率达最低值,达到相同条件下异常辉光放电时的水平。

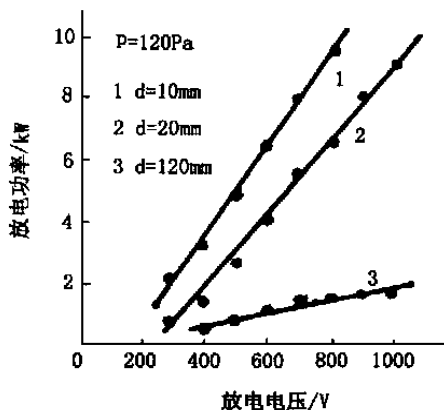


图5 放电功率与电压的关系

## 4 应用实例

试验材料为  $12\text{mm} \times 12\text{mm} \times 100\text{mm}$  的由纯钨粉压制的棒料。烧结温度  $3000^\circ\text{C}$ , 保温时间 40min。根据上述的试验结果及试验设备在  $3000^\circ\text{C}$  时的散热功率, 确定烧结工艺参数为: 电压 900V; 棒料间距离 8mm; 最大电流 20A; 气压 120Pa; 工作气体为氩气。升温时按上述参数工作, 当温度达到  $3000^\circ\text{C}$  时, 可

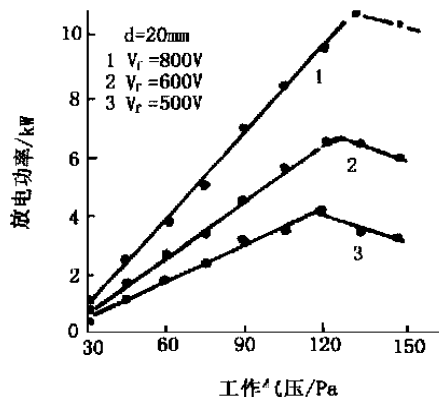


图6 放电功率与气压的关系

适当降低气压,减小电流,使温度保持在 $3000^{\circ}\text{C}$ 。试验结果表明,试样的密度达 $17.1 \sim 17.5\text{g}/\text{cm}^3$ ,与普通垂熔的结果相似。

## 5 结论

1)随着空腔尺寸增加或工作气压增大,空

心阴极点燃电压增高。但是当气压太低或空腔尺寸太小,小于辉光放电时要求的电子自由程和阴极位降区尺寸时,无论电压高低均不能产生空心阴极效应。在本文条件下,空腔尺寸小于 $20\text{mm}$ ,气压低于 $20\text{Pa}$ 时,即不能产生空心阴极效应。

2)在可点燃条件下,空腔尺寸减小或电压增高,放电功率增大。当空腔尺寸较大时,随着气压的升高,放电功率增大,达极大值后,放电功率随气压升高而减小,直到空心阴极效应消失。

## 参考文献

- 1 陈宗柱,高树香. 气体导电(下),南京工业学院出版社,1988;27.
- 2 王从曾,苏永安,唐宾等. 新技术新工艺,1993,5;12~13.
- 3 苏永安,王从曾,唐宾. 粉末冶金技术,1994,12(2);114~117.

# POWER CHARACTERISTIC OF PLASMA SINTERING BY HOLLOW CATHOD DISCHARGE

Wang Congzeng Su Xuekuan Ma Jie

(Beijing Polytechnic University, Beijing 100022)

**Abstract:** A method of plasma sintering by Hollow Cathod Discharge (HCD) was given in this paper and the heating power characteristic was investigated. The results show that power of discharge is related to the dimension of cavity, the voltage of discharge and the pressure of work gas. Under the condition of meeting HCD effect, the smaller the dimension of cavity and the pressure of work gas, the higher the discharge voltage.

**Key words:** Sintering; Hollow cathod discharge; Power

## 本刊已加入《中国学术期刊(光盘版)》和“中国期刊网”的声明

为适应我国信息化建设需要,扩大作者学术交流渠道,本刊已加入《中国学术期刊(光盘版)》和“中国期刊网”。作者著作权使用费与本刊稿酬一次性给付。如作者不同意将文章编入该数据库,请在来稿时声明,本刊将做适当处理。

《粉末冶金技术》编辑部