

# 等离子球磨机的研制及其振动平台试验

鲁忠臣<sup>a</sup>, 林城<sup>a</sup>, 高志强<sup>a</sup>, 涂佳亮<sup>b</sup>, 王为<sup>b</sup>, 宋凯强<sup>b</sup>, 曾美琴<sup>b</sup>

(华南理工大学 a.机械与汽车工程学院, b.材料科学与工程学院, 广州 510641)

**摘要:** **目的** 实现球磨室在常压下的大面积介质阻挡放电等离子体, 开发出商用等离子球磨机。**方法** 通过在不同弹簧和平台质量条件下, 利用振动传感器测试平台的振幅(峰峰值)和加速度(有效值)数值, 对比确定最优配置和机械振动参数。**结果** 当振动平台振幅接近球磨室内径时, 获得高振幅和高加速度的磨球, 显著缩短了气体放电间距, 实现了球磨室在常压下的大面积介质阻挡放电等离子体。所设计的单筒等离子振动球磨机, 其振动平台可选用 $\phi 7$  mm、 $\phi 8$  mm两组弹簧, 根据平台质量的不同, 选择不同类型的激振块组合, 可以在30 Hz转速以上实现平台振幅峰峰值达到或者接近球磨罐内径值, 同时拥有10g以上的加速度有效值。**结论** 本试验综合机械振动学、高压绝缘放电和材料加工技术, 所研制的等离子体球磨机实现了机械能和等离子体能在球磨过程中的协同作用, 显著提高了粉末活性, 降低了化合物合成反应激活能, 从而显著提高了所制备材料的性能。

**关键词:** 等离子球磨机; 机械振动性能; 反应激活能; 创新创业

**DOI:** 10.7643/issn.1672-9242.2018.11.0017

**中图分类号:** V216.2+1 **文献标识码:** A

**文章编号:** 1672-9242(2018)11-0090-08

## Development of Plasma Assisted Milling and Its Vibration Platform Testing

LU Zhong-chen<sup>a</sup>, LIN Cheng<sup>a</sup>, GAO Zhi-qiang<sup>a</sup>, TU Jia-liang<sup>b</sup>, WANG Wei<sup>b</sup>, SONG Kai-qiang<sup>b</sup>, ZENG Mei-qin<sup>b</sup>  
(a. School of Mechanical and Automotive Engineering, b. School of Materials Science and Engineering, South China University of Technology Guangzhou 510641, China)

**ABSTRACT: Objective** To achieve a large area dielectric barrier discharge plasma in ball mill chamber under atmospheric pressure, and develop commercial plasma ball mill. **Methods** The vibration sensors were used to test the amplitude (peak peak value) and acceleration (effective value) of the platform under the conditions of different springs and weights of platform to determine the optimal configuration and the mechanical vibration parameters. **Results** When the amplitude of the vibration platform was close to the inner diameter of the ball milling chamber, a combination of the high amplitude and high speed ball could significantly reduce the gas discharge distance, which obtained a large area dielectric barrier discharge plasma in ball mill chamber under atmospheric pressure. The vibration platform of the designed plasma assisted vibration ball mill with single cylinder structure could choose two groups of springs, i.e.  $\phi 7$  mm and  $\phi 8$  mm. Different exciting blocks could be selected according to the different weights of the vibration platform. Under this condition, the peak amplitude of the platform could reach or approach the inner diameter of the ball mill tank at a speed of more than 30 Hz, and the platform had an acceleration effective value of more than 10g. **Conclusion** This test combines mechanical vibration science, high voltage insulation discharge and material processing technology. The synergistic effect of mechanical energy and plasma energy is produced by the developed

收稿日期: 2018-08-13; 修订日期: 2018-09-13

基金项目: 华南理工大学校级教改项目(青年专项 No: Y1171090); 中央高校基本科研业务费(No. 2017MS010)

作者简介: 鲁忠臣(1986—), 男, 河南信阳人, 博士, 主要研究方向为等离子球磨设备开发。

通讯作者: 曾美琴(1964—), 女, 广东梅州人, 副教授, 主要研究方向为金属纳米功能材料研究。

plasma ball mill, which can effectively promote the powder activation, decrease the activation energy of compound synthesis reaction, and thus significantly improve the properties of the prepared materials.

**KEY WORDS:** plasma ball mill; mechanical vibration performance; activation energy; innovation entrepreneurship

机械球磨通常是指利用机械能的作用,实现固态粉末的变形、细化、原子扩散、固态反应或相变等,是制备超细材料的一种有效方法<sup>[1]</sup>,广泛应用于各种纳米晶、非晶、固溶体和复合材料的制备<sup>[2]</sup>。普通球磨存在效率较低、球磨时间长且容易污染、部分化合物难以合成等问题<sup>[3]</sup>。因此,在传统球磨的机械能场中引入其他物理能场,实现多场协同作用来改善球磨能效成为机械球磨技术发展的重要方向<sup>[4]</sup>。例如将超声波、磁场、温度场或电场等外加物理能场引入到机械球磨罐中,发展出了多种外场辅助机械球磨技术,使球磨机械能与其他物理能有机结合起来。它具有明显降低反应活化能、细化晶粒、加速提高粉末活性和促进机械合金化进程的优点,提高球磨效能<sup>[3-4]</sup>。

其中,研究人员通过可控高压,实现多种放电模式,包括火花放电、电弧放电和辉光放电等,并将其引入到球磨过程中或球磨粉体的后续处理过程中,能加快机械合金化进程,获得意想不到的效果<sup>[5-9]</sup>。研究发现,在氩气保护下普通球磨 200 h 后,15 min 的放电辅助球磨便可制备出普通球磨 500 h 均无法合成的 FeB 相。在氮气条件下,分别对 Ti 和 Si 粉进行辉光放电辅助球磨,超短时间内便检测出了 TiN 和 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 衍射峰,这均是普通球磨不能够实现的。2005 年,ZHU 等人<sup>[10]</sup>首次提出将冷场等离子体引入到机械球磨过程中,发展了一种等离子体辅助球磨技术。实现了机械能和等离子体能在球磨过程中的协同作用,不仅显著提高了球磨机能效,也加速了其原位固相反应和气固反应,而且能获得独特的组织结构,从而显著提高所制备材料的性能。该方法已在纯金属、金属氧化物、硬质合金、储能材料等的制备中显示出良好的应用前景。

为了进一步完善该技术的性能指标,最大程度实现等离子体能量和球磨机械能量的有机复合,本试验结合机械振动、高压绝缘放电和粉末材料制备三方面学科跨度,提出设计具有最佳性能的机械振动平台,优化球磨室内的大面积介质阻挡放电强度,进一步实现等离子球磨机产品的标准化生产。文中将简要介绍其中一个重要试验环节,通过优化机械振动平台参数,实现常压条件下的等离子体放电辅助球磨技术。

## 1 试验

### 1.1 球磨室内等离子体放电强度研究

等离子体是通过高压使气体放电电离化,产生大量的正负带电粒子、电子和中性粒子以及自由基,并表

现出集体行为的一种准中性气体<sup>[11-12]</sup>。其中,介质阻挡放电(Dielectric barrier discharge: DBD)是冷场等离子体的一种常见方式,是在两金属电极之间的气体间隙引入绝缘介质,以阻挡贯穿气体的放电通道,当向两电极间施加足够高的交流电压时,电极间的气体会被电离而产生放电现象。同时,只要放电间隙足够小,介质阻挡放电,还能摆脱所需真空系统的束缚,实现相对高压下的等离子体放电。因此,将介质阻挡放电结构引入具有气体控制的球磨罐,可以实现等离子体能和机械能的有机结合。等离子体辅助球磨原理如图 1 所示<sup>[13]</sup>,将包覆有介质阻挡层的铁芯圆柱状电极棒置于球磨罐中央,然后在电极棒和金属球磨罐两端电极施加高频高压交流电,根据放电负载调节等离子体电源的放电参数,促使球磨罐内激发不同气体均可产生低温放电等离子体。尤其重要的是,随着球磨机振幅和重力加速度的变化,磨球可以充满球磨腔体,并改变电极棒和磨球之间的相对位置,从而显著缩小气体的放电间隙,使得气体在较常压条件下也能实现电离放电现象,进行电晕放电或辉光放电的等离子体辅助球磨。另外,虽然介质阻挡放电产生的冷场等离子体中的电子温度极高,但其整体宏观温度却不高(略高于室温),其介质阻挡层又能抑制微放电的无限增加,避免了火花放电或电弧放电等热等离子体对球磨体系的烧损。

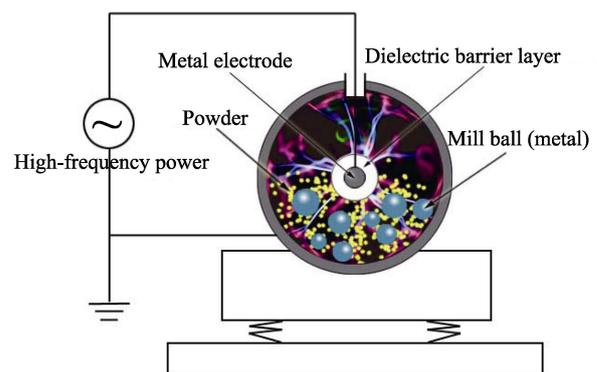


图 1 等离子体辅助球磨室内放电球磨

在等离子体球磨过程中,高密度高能量的等离子体轰击在粉体表面,在粉体表面产生很大冲击力和热效应的同时,等离子体的高活性粒子(离子、电子、激发态的原子和分子、自由基等)很容易与球磨粉末发生吸附作用,并引起材料表面的活性提高,同时球磨引入的新鲜表面、大量缺陷进一步增强球磨粉体的活性,使得扩散、相变和化学反应等更容易进行。通常,对于介质阻挡放电方式,当电极间隙较小时,介

质阻挡放电具有良好的横向分布均匀性,但是随着电极间隙的增加,放电均匀性开始下降,放电中出现明显的放电电流细丝,导致放电不均匀和强度降低<sup>[14]</sup>。因此,在常压条件下,对于实验室使用的200 mL~1.5 L左右容积的球磨罐,由于球磨罐内壁和电极棒的放电间距(30~65 mm)较大,很难直接实现大量的气体电离,而产生明亮的辉光放电,这必然降低等离子体对球磨粉体的处理能力,只有当球磨室内的气压降低,其辉光亮度才逐步增加,如图2所示。然而,当球磨室内气压极低时(如图2d所示),虽然

放电的辉光亮度较高,但由于气压稀薄,导致单位体积内的电子浓度并不高,这也必然弱化所离化气体的等离子体对粉体的作用效果。因此,在介质阻挡放电辅助球磨过程中,通常通过磨球振幅的高度来缩短气体放电间距,即当磨球振动振幅的峰峰值达到球磨罐直径时,球磨室内的平均放电间距最小,可以在较高气压条件下较容易实现整个球磨腔内的均匀等离子体放电。常压下产生的等离子体具有均匀稳定、电流密度适中、高活性粒子浓度等特性,对材料表面处理具有重要作用。

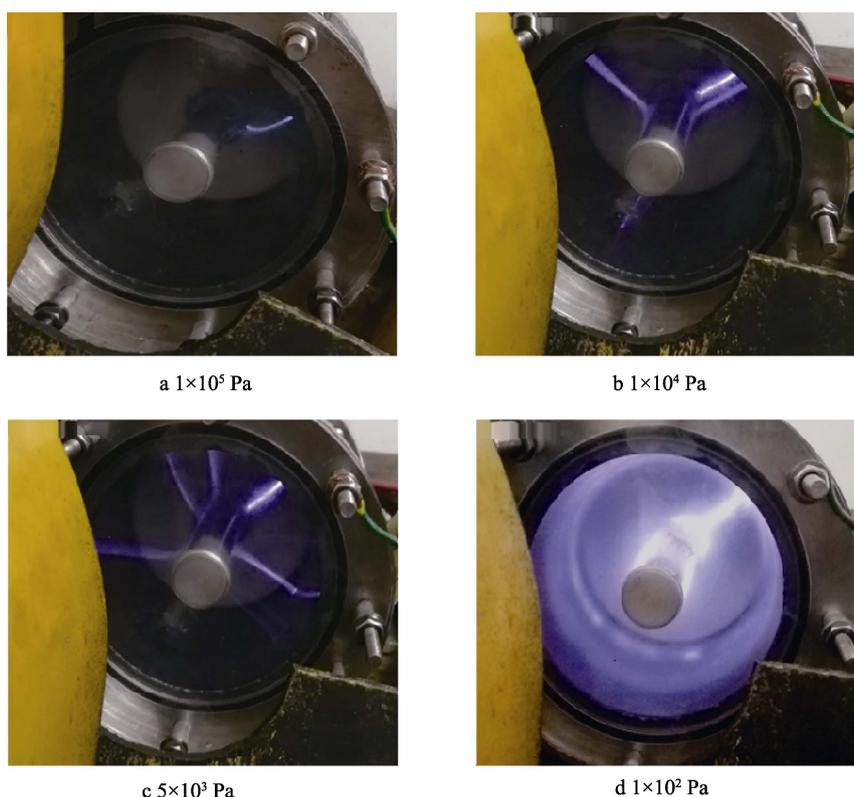


图2 等离子体辅助球磨室内不同气压下放电效果

## 1.2 机械振动平台设计

对于振动球磨而言,不同参数组合(如振幅、频率和弹簧刚度等)将对球磨粉末产生不同的合成效果,因此,该问题一直是振动球磨重要的研究内容<sup>[15]</sup>。Toraman等<sup>[16]</sup>采用实验证明了振动频率对振动球磨粉末效率有明显的正面效应。Gonzalez等<sup>[17]</sup>利用理论推导与实验相结合的方法证明了振动强度、振动频率与粉末粒度之间存在一定关系,在同等研磨时间下,振动强度越大,产品粒度越细。Gock等<sup>[18]</sup>提出具有不平衡振源的偏心振动磨配以大振幅,促使冲击力的集中,可有效提高振动强度,降低能耗。徐波等<sup>[19]</sup>通过建立介质层的运动方程和仿真试验指出,在适当的振动强度下可以提高介质的能量传递率。

振动平台属于振动球磨机的重要机械部分,其振

动平台质量、电机转速(频率)、弹簧和激振块等四组可变参数的组合将影响振动平台的振动频率、加速度(有效值)和振幅(峰峰值)等性能。为了实现机械力效应和等离子体放电效应的有效配合,该研究选择了45#钢,并设计了如图3所示的振动平台。平台最上端,呈现一个倒三角形的固定球磨罐的装置。振动平台主体两侧是安放不同配重块的位置,通过配重块来调节振动平台的整体质量,从而改变振动平台上下振动的加速度和振幅。在平台主体下方,可以安装四根弹簧,弹簧另一端则连接在球磨机底座。为调整振动平台质量及其与电机主轴相对位置,随机提供了四件10 kg的配重块,可根据实际需要按图4所示的三种方式进行配装,以达到不同的振动强度。

与上述振动平台连接的转动轴,配置有两组激振块,每组激振块由内、外两件偏心片(内摆和外摆)

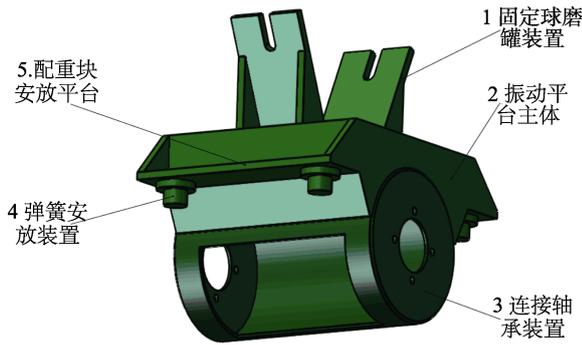


图 3 机械振动平台模型

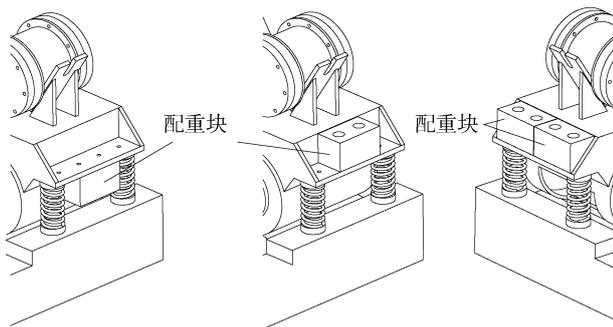


图 4 配重块三种安装结构

组成，两片偏心片重合度越大，提供的振动就越大，如图 5 所示。因此，可根据要求调整内外两偏心片重合度，并结合电机的快慢速以提供给振动平台不同的振动强度。

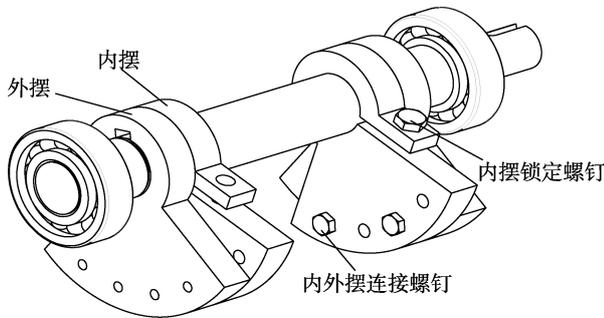


图 5 激振块安装结构

## 2 结果及分析

### 2.1 机械振动平台的振动性能测试

振动实验测试条件：通过增减配重块调整振动平台总质量的范围为 75~105 kg。选用的锰钢弹簧有：高为 110 mm，弹簧直径分别为 6 mm（弹性系数为 1618.17 g/m）、7mm（弹性系数为 2997.87 g/m）、8 mm（弹性系数为 5181.23 g/m）的弹簧。对组装好的等离子体单筒振动球磨机的振动平台进行机械振动性能测试，分别改变弹簧型号、振动平台质量和激振块质量（每对激振块均固定成 90°）三组参数，振动传

感器测点位于振动平台中心位置，比较球磨机振动平台的加速度和振幅等性能随电机频率（转速）的变化趋势。其中，激振块分为 A（小）、B（中）、C（大）三种型号。

对于振动平台而言，其振动动能是依靠转动轴上激振块的离心力提供的。因此，对于低质量振动平台通常采以 A+B 组合为主的激振块，而对于高质量振动平台通常采以 B+C 组合为主的激振块。如图 6 所示，当振动平台质量达到 105 kg 时，分别采用  $\phi 6$  mm、 $\phi 7$  mm、 $\phi 8$  mm 三组弹簧与不同大小的激振块进行组合测量其振幅峰峰值和加速度有效值。结果发现，分别采用这三组弹簧与相同的激振块进行配合时，弹簧型号的选择对平台振动性能的影响较小，所测得的振幅峰峰值和加速度有效值随电机频率的变化曲线基本重合。但是，激振块的大小组合对平台振动性能的影响却至关重要，对于仅采用一组 B 型激振块装置，其振幅峰峰值始终低于 60 mm，这意味着球磨室内的磨球在电机转速最大时，其平均振动高度始终无法达到球磨室内径的 1/2，很难在常压下实现整个球磨室内的均匀放电。而且该条件下平台的加速度有效

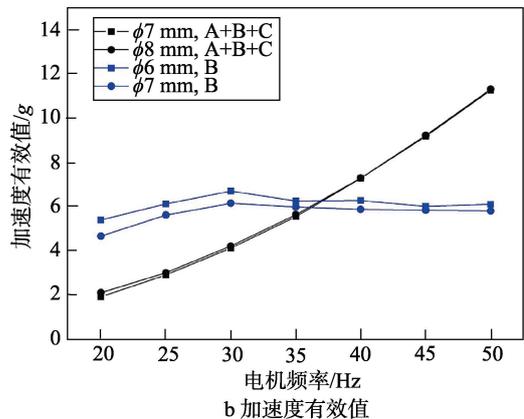
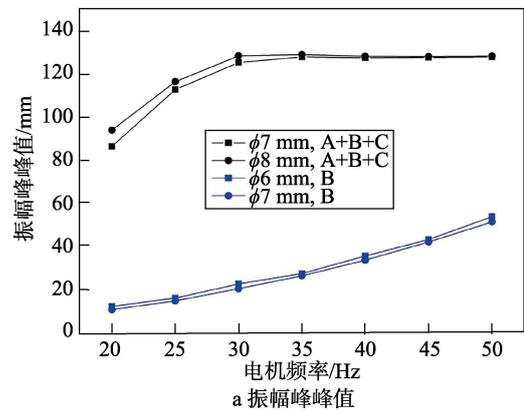


图 6 平台质量为 105 kg 条件下其振幅峰峰值和加速度有效值随电机频率的变化曲线

值随着电机频率的提高，很快达到了一个饱和值，不利于磨球机械冲击力的提高。若将 A、B、C 三组激振块全部安装到转动轴，振动平台的振幅峰峰值在

较低的电机频率(30 Hz)条件下,便可以达到130 mm高度,而且其加速度有效值随着电机频率的增加始终保持近线性增加趋势。这表明,球磨室内的大部分磨球可以在较低转速时便可振动到球磨室的上壁,保证整个球磨室内充满磨球,有效降低球磨室在各个方向的放电间距。

当将振动平台的质量降低到95 kg,分别采用 $\phi 7$  mm、 $\phi 8$  mm两组弹簧并同时加载A、B、C三组激振块条件下,测试结果如图7所示。在电机频率大于等于30 Hz时,采用两组不同弹簧的振动平台的振幅峰峰值由130 mm进一步提高到143 mm左右,并能够始终保持稳定。将激振块减少到B、C两组,在电机频率大于等于30 Hz时,采用两组不同弹簧的振动平台的振幅峰峰值也能够始终稳定在115 mm左右。在此两组组合条件下,平台的加速度也均随着电机频率的增加呈近线性增加趋势,而且最大值可以分别达到12.5g和10.5g左右。完全可以满足等离子球磨的实验要求。

进一步降低平台质量到85 kg,分别采用 $\phi 7$  mm、 $\phi 8$  mm两组弹簧并同时加载B、C两组激振块的条

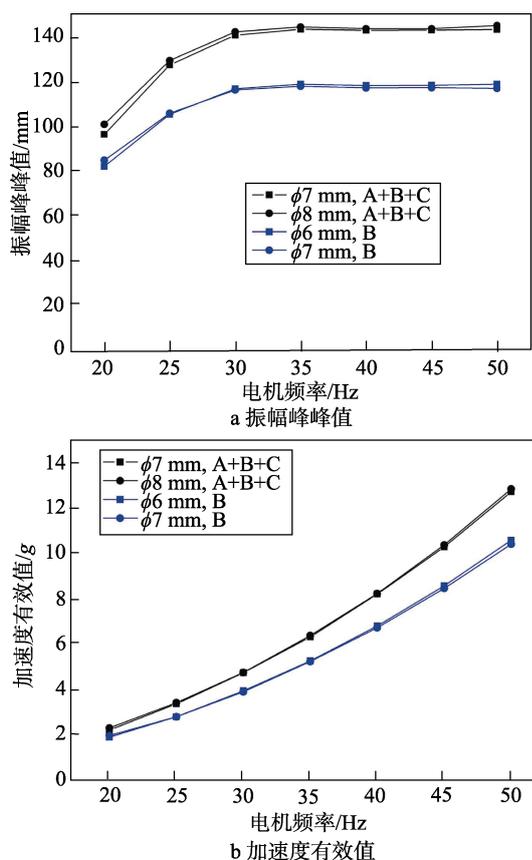


图7 平台质量为95 kg条件下其振幅峰峰值和加速度有效值随电机频率的变化曲线

件下,测试结果如图8所示。在电机频率大于等于30 Hz时,两组不同弹簧振动平台的振幅峰峰值由

115 mm分别进一步提高到130 mm和135 mm左右,并能够始终保持稳定。这表明激振块不变的条件下,振动平台质量的降低有利于提高其振幅。同时,在减少平台质量条件下,采用 $\phi 8$  mm弹簧装置的振幅值略大于 $\phi 7$  mm弹簧装置。若在此基础上,进一步减小激振块的型号为A、B两组组合方式,采用两组不同弹簧振动平台的振幅峰峰值的差异又显著降低,均能够稳定在103 mm左右。在此两组组合条件下,平台的加速度也均随着电机频率的增加呈近线性增加趋势,而且最大值可以分别达到11.6g和9g左右。完全可以满足等离子球磨的实验要求。

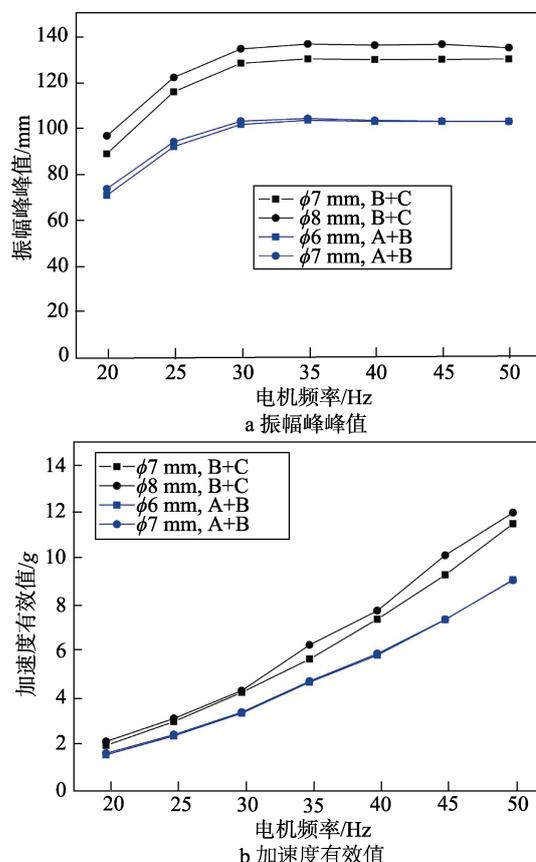


图8 平台质量85 kg条件下其振幅峰峰值和加速度有效值随电机频率的变化曲线

进一步降低平台质量到75 kg,分别采用 $\phi 7$  mm、 $\phi 8$  mm两组弹簧并同时加载A、B两组激振块条件下,测试结果如图9所示。在电机频率大于等于30 Hz时,两组不同弹簧振动平台的振幅峰峰值均由103 mm进一步提高到117 mm左右,并始终保持稳定。而该振动平台的加速度也均随着电机频率的增加呈近线性增加趋势,而且最大值可以达到10.2g左右。基本可以满足等离子球磨的实验要求。

根据机械振动平台性能测试分析,可以得到表1的结果。所设计的单筒等离子振动球磨机,其振动平台可选用 $\phi 7$  mm、 $\phi 8$  mm两组弹簧,根据平台质量

的不同选择不同类型的激振块组合，可以实现平台振幅峰值达到或者接近球磨罐内径值（130 mm），同时拥有 10g 以上的加速度有效值。

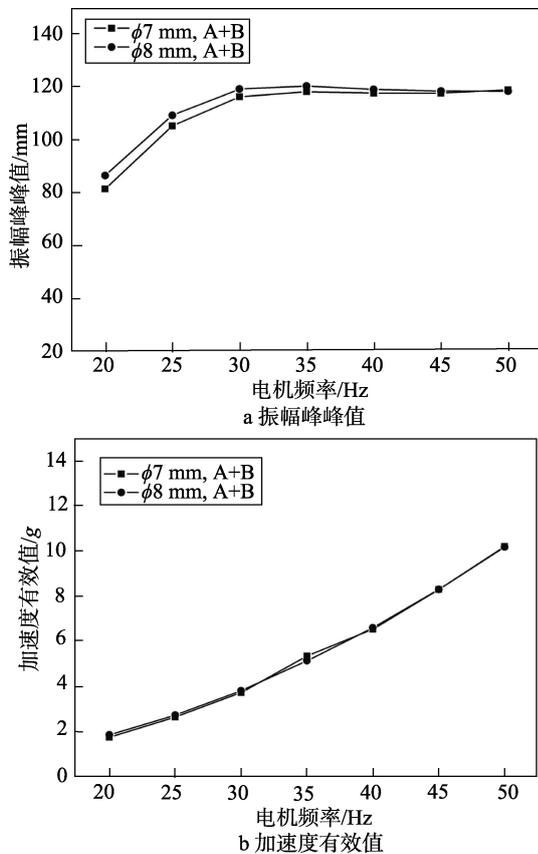


图 9 平台质量 75 kg 条件下其振幅峰值和加速度有效值随电机频率的变化曲线

表 1 振动平台在不同质量条件下采用不同类型激振块组合获得最佳的振动性能数据

平台质量/kg	弹簧类型	激振块类型	振值峰峰值 (电机频率 ≥ 30 Hz) /mm	加速度有效值 (电机频率等于 50 Hz) /g
105	φ7 mm 或 φ8 mm	A+B+C	128	11.3
95	φ7 mm 或 φ8 mm	B+C	115	10.5
85	φ7 mm 或 φ8 mm	B+C	132	11.6
75	φ7 mm 或 φ8 mm	A+B	117	10.2

## 2.2 等离子球磨制备 W-C-Co 粉体性能测试

选择表 1 中平台质量在 85 kg 条件下，开展后续放电观察和粉末测试研究。在该振动条件下，球磨室内的磨球振动高度可以达到球磨罐内壁的上沿，有效

缩短了球磨室内的平均放电间距。在此条件下，在一个大气压（ $10^5$  Pa）的氩气中，可以观察到明显的均匀辉光放电现象。同时，在磨球和磨球之间也可以观察到微弱的放电细丝，如图 10 所示。表明了振动的磨球缩短了球磨室内的高压放电距离，实现了常压气氛的有效离化。这是因为在等离子体球磨过程中（如图 11 所示），其放电模式有两种<sup>[20]</sup>：近介质层的气体激励辉光放电等离子体和磨球间的丝状放电等离子体。前者放电模式提供了气体离化所需的主要能量，于整个球磨罐形成均匀辉光，并作为振动磨球的外部电场。在球磨罐的外电场作用下，当磨球开始振动，沿外电场方向振动磨球的两个半球面上游离着许多自由流动的正负电荷<sup>[21]</sup>，因此在邻近磨球之间形成了与外电场方向相同的丝状放电电场。后者的放电模式显著降低了球磨罐内部的气体放电间隙，有助于实现常压下的的大面积介质阻挡放电等离子体。

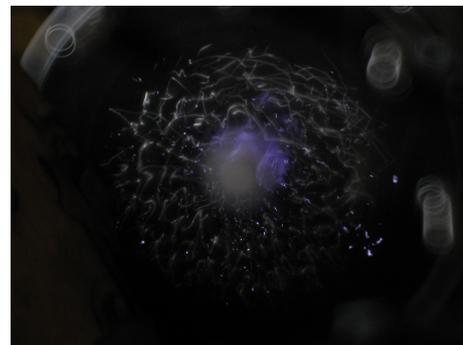


图 10 常压条件下球磨罐中的等离子体放电照片

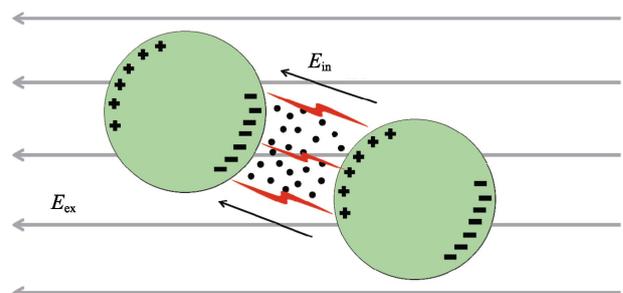


图 11 磨球间的放电

利用上述实验条件，在常压下的氩气中，分别选用了无放电振动球磨和等离子体放电辅助振动球磨（硬质合金磨球，球料比为 50:1，球磨时间为 3 h）制备出纳米复合 W-C-Co 粉末。对采用无放电振动球磨和等离子体放电辅助振动球磨所制备的纳米复合 W-C-Co 粉末分别进行 DSC 的差热分析，如图 12 所示。首先，从无放电振动球磨 3 h 的粉末的 DSC 曲线中可发现，在加热过程中具有两个明显的峰，一个是 698.3 °C 的吸热峰，对应 W 的氧化物与 C 发生还原反应，生成 CO。这是因为球磨过程及粉末收集过程中 W 发生了轻微的氧化。另一个是峰值在 892.5 °C 的放热反应，其对应为 W 与 C 生成 WC 的碳化反应温度

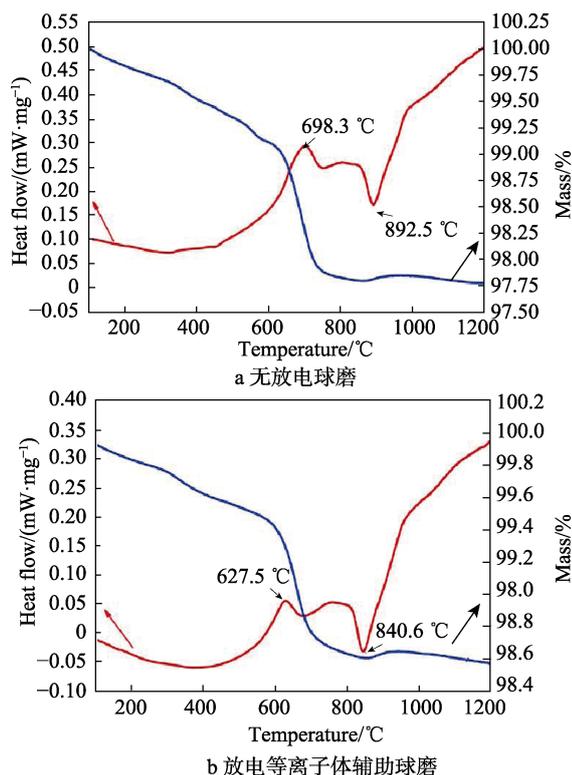


图 12 无放电球磨和放电等离子体辅助球磨 3 h 制备的 W-C-Co 粉末的差热分析曲线

区间。从曲线的变化趋势来看, 温度接近 1000 °C 时, 该放热峰才结束, 说明无放电振动球磨粉末中的 W 与 C 仍在发生碳化反应。然而, 常压下的等离子辅助振动球磨粉末 W 的氧化物与 C 的还原反应温度以及 W 与 C 的碳化反应温度均要比无放电振动球磨 W-C-Co 粉末均低, 其温度峰值分别是 627.5 °C 和 840.6 °C, 其 WC 的合成温度快速下降 50 °C 左右。这一结果说明, 常压 (10<sup>5</sup> Pa) 球磨罐内实现了气体的放电等离子体, 该等离子体辅助振动球磨显著提高 W-C-Co 复合粉末的活性, 降低 W 与 C 的反应温度。利用 Kissinger 法中机理函数计算 WC 合成反应活化能发现<sup>[22]</sup>, 通过等离子体辅助振动球磨合成的 W-C-Co 粉末的反应活化能为 290 kJ/mol, 显著低于无放电振动球磨的反应活化能 (330.7 kJ/mol)。由此也证明了, 在常压条件下, 气体放电等离子体有效降低了振动球磨合成粉末所需的活化能。这主要归因于等离子体在机械破碎的粉体表面产生很大的冲击力和热效应, 增加了粉末的表面能。这些均表明, 在 1 个大气压条件的氩气氛中, 由于金属磨球振动幅度的提高, 有效降低了球磨室内高压正负极的放电间距, 氩气在球磨振动过程中可以有效离化形成大量的等离子体, 实现了常压等离子体辅助球磨的效果。

### 3 结语

文中所研制的等离子球磨机综合了机械振动、高

压绝缘放电和粉末材料制备等跨学科知识。当振动平台选用  $\phi 7$  mm、 $\phi 8$  mm 两组弹簧, 根据平台质量的不同选择不同类型的激振块组合, 可以在 30 Hz 转速以上, 实现平台振幅峰值达到或者接近球磨罐内径值, 同时拥有 10g 以上的加速度有效值, 实现了球磨室内常压条件下大面积介质阻挡放电等离子体。常压下均匀放电等离子体和磨球机械能协同作用, 显著提高粉末活性, 降低化合物合成反应活化能, 从而显著提高所制备材料的性能。在整个试验进行过程中, 加深了学生对不同学科知识的理解和融合, 加强了学生对自主创新创业的锻炼。该装置已被制造生产, 并进行市场推广应用。

### 参考文献:

- [1] BENJAMIN J S. Dispersion Strengthened Superalloys by Mechanical Alloying[J]. Metallurgical Transactions, 1970, 1(10): 2943-2951.
- [2] KOCH C C. The Synthesis and Structure of Nanocrystalline Materials Produced by Mechanical Attrition: A Review[J]. Nanostructured Materials, 1993, 2(2): 109-129.
- [3] 戴乐阳, 陈清林, 林少芬, 等. 高能球磨中促进粉体细化的主要因素研究[J]. 材料导报, 2009, 23(22): 59-61.
- [4] 戴乐阳, 曾美琴, 童燕青, 等. 基于外场辅助的机械合金化研究[J]. 功能材料, 2005, 36(8): 1158-1161.
- [5] CALKA A, WEXLER D. Mechanical Milling Assisted by Electrical Discharge[J]. Nature, 2002, 419(6903): 147-151.
- [6] CALKA A, WEXLER D. Mechanical Milling Assisted by Electrical Discharge-recent Developments[J]. Journal of Metastable and Nanocrystalline Materials, 2004, 20: 111-117.
- [7] MOSBAH A, CALKA A, WEXLER D. Rapid Synthesis of Titanium Nitride Powder by Electrical Discharge Assisted Mechanical Milling[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2006, 424(1): 279-282.
- [8] YUAN Q, ZHENG Y, YU H. Synthesis of Nanocrystalline Ti (C, N) Powders by Mechanical Alloying and Influence of Alloying Elements on the Reaction[J]. International Journal of Refractory Metals and Hard Materials, 2009, 27(1): 121-125.
- [9] QUAN Y, ZHENG Y, YU H Z. Rapid Synthesis of Ti (C, N) Powders by Mechanical Alloying and Subsequent Arc Discharging[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2011, 21(7): 1545-1549.
- [10] 朱敏, 戴乐阳, 曹彪, 等. 一种等离子体辅助高能球磨方法: 中国, 200510036231[P]. 2006-01-11.
- [11] 王新新. 介质阻挡放电及其应用[J]. 高电压技术, 2009(1): 1-11.
- [12] 杨小平, 戴乐阳, 曾美琴, 等. 介质阻挡放电等离子体

- 及其在材料制备中的应用[J]. 材料导报, 2010, 24(s1): 320-324.
- [13] 朱敏, 鲁忠臣, 胡仁宗, 等. 介质阻挡放电等离子体辅助球磨及其在材料制备中的应用[J]. 金属学报, 2016, 52(10): 1239-1248.
- [14] 刘志杰. 大面积放电等离子体特性及其辅助高能球磨制备 AlN 粉末机理研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2016.
- [15] 郭晓庆. 提高偏心振动磨性能和动力学建模精度的研究[D]. 天津: 河北工业大学, 2012.
- [16] TORAMAN O Y, KATIRCIOGLU D. A Study on the Effect of Process Parameters in Stirred Ball Mill[J]. Advanced Powder Technology, 2011, 22(1): 26-304.
- [17] GONZÁLEZ G, D'ANGELO L, OCHOA J L, et al. The Influence of Milling Intensity on Mechanical Alloying[J]. Materials Science Forum, 2002, 386: 159-164.
- [18] GOCK E, KURRER K E. Eccentric Vibratory Mills—Theory and Practice[J]. Powder Technology, 1999, 105(1/2/3): 302-310.
- [19] 徐波, 王树林, 李生娟. 振动磨碎机动力学分析及仿真试验[J]. 机械工程学报, 2008, 44(3): 105-109.
- [20] LI Y, ZENG M Q, LIU J W, et al. Evolution of Metal Nitriding and Hydriding Reactions during Ammonia Plasma-assisted Ball Milling[J]. Ceramics International, 2018, 44(15): 18329-18336.
- [21] YE Q, LI J, ZHANG J. A Dipole-enhanced Approximation for a Dielectric Mixture[J]. J Electrostat, 2004(61): 99-106.
- [22] 胡荣祖. 热分析动力学[M]. 北京: 科学出版社, 2008.