



球形粉体的制备方法及应用

施阳和, 郑 华

(华东交通大学 机电工程学院, 江西 南昌 330013)

摘要: 概述运用一定方法即可使不规则粉体颗粒变成球形的粉体球化的研究意义以及国内外研究状况, 详细论述制备球形粉体的物理方法和化学方法, 以二氧化硅、钛粉、钨粉为例阐述球形粉体的优异性能及其在各领域中的实际应用。结果表明, 球化后的粉体有更好的性能和更广泛的应用领域。

关键词: 粉体球化; 物理方法; 化学方法

中图分类号: TH4

文献标志码: A

文章编号: 1008-5548(2015)04-0071-05

Preparing Methods and Application of Spherical Particles

SHI Yanghe, ZHENG Hua

(School of Mechanical and Electrical Engineering,
East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China)

Abstract: Significance of particle spheroidization and research statuses in domestic and overseas were summarily introduced, which makes particles with irregular shape into spherical using a certain method. Physical and chemical methods for preparing spherical particles were illustrated. Taking titanium particles, silicon particles and tungsten particles as examples, excellent performances of the spherical particles and their application in industry were expatiated. The results show that the spheroidized particles have better performances and wider application areas.

Keywords: particle spheroidization; physical method; chemical method

为了适应科学技术发展的新需求, 材料学正向多范畴、复合性以及微型化等方向发展, 性能优异的粉体材料正日益显现出其特有的重要性。粉体材料的应用领域也逐渐增加, 已广泛应用在粉末冶金、热喷涂、航空、军工等领域。随着粉体材料应用领域的扩大, 对其实际应用性能的要求也逐渐提高, 为了满足性能更优越, 适应现代科技产品需求的微型化和集成化的功能要求, 必须制得纯度更高、粒径分布更均匀、流动性能更好的高质量粉体。传统的普通粉体

实用性不高, 流动性受到颗粒粒径不均匀、表面形貌不规则等因素的影响, 已经无法满足日新月异的科技发展的需求。

相对于普通粉体, 球形粉体颗粒粒径小且分布均匀, 表面形貌规则, 粉体的堆积密度显著增大, 可以很大程度上改善粉体的流动性和分散性, 最大限度地消除团聚的影响, 同时粉体内部的缺陷得到改善。由于球形粉体具有更优异的性能, 因此在新科技、新技术、新产品中得到广泛的应用。例如: 高纯超细球形二氧化硅具有良好的绝缘性和耐热性等, 因此被广泛用作超大规模集成电路的封装材料, 并应用在电子信息等高端产业中; 球形钛粉可用于军工、汽车、焊接、航空、航海等领域, 钛及其合金的应用可以提高材料的强度及耐磨、耐腐蚀性, 进而延长产品的寿命。

国外许多研究机构, 如美国马萨诸塞州高分子材料研究所在合成纳米复合材料、控制制粉过程等方面取得了突出成就。俄罗斯、日本、匈牙利等国家一直致力于等离子体制备球形粉体的研究。随着新科学技术的不断涌现, 国外的粉体技术不再仅是简单的制备球形粉体, 而是在新的理论水平和实践应用的基础上, 在与材料科学、生态、医学等学科领域的相互补充和交融中迅速发展。相对于国外, 我国粉体技术的研究起步稍晚, 已依托高校建立了一些粉体研究机构, 如清华大学粉体及新材料研究中心、江苏省超细粉体工程研究中心等。目前我国制备高性能粉体的设备还主要依赖于从国外进口, 在科技进步需求的背景下, 我国在粉体研究方面还有很多工作要做。本文中主要综述制备球形粉体的物理方法和化学方法, 概述几种常见球形粉体的实际应用。

1 粉体球化方法

1.1 物理方法

物理法制备球形粉体主要借助相应的设备, 以单纯的机械力使粉体颗粒之间相互作用, 从而粉碎物料。这种制备球形粉体的方法成本低、工艺简单、设备简陋, 但是产量大, 生产效率高。目前国内大部分工业生产所需的球形粉体都是通过这一方法制得。

收稿日期: 2014-09-26, 修回日期: 2014-12-06。

基金项目: 江西省自然科学基金项目, 编号: 20132BAB201047。

第一作者简介: 施阳和(1965—), 男, 博士, 副教授, 研究方向为石英加工及器件开发。E-mail: shi600148@163.com。

1.1.1 机械粉碎法

机械粉碎法即用机械力在颗粒内部化学结构不发生变化的条件下,使原始颗粒发生变形或者破裂,从而制得粉体。比较常见的机械粉碎法是球磨法。机械粉碎法制得的球形颗粒的粒径取决于原料状态、所用设备、工艺条件等因素^[1]。机械粉碎法所用设备简单,由于控制相应工艺参数就可以对所得粉体的粒径进行控制,因此可操作性高,可进行大批量的生产,而且对一些高熔点、难溶的金属也能进行机械粉碎,在工业生产中是比较常用的制备低质量级别球形粉体的方法。机械粉碎法制得的粉体颗粒形状不均匀,表面形貌较为粗糙,粉体的流动性差,团聚现象较为严重,因此这种方法不适于制备较高质量要求的粉体颗粒。

1.1.2 等离子法

等离子法是制备球形粉体的比较理想的方法。其主要工作原理如下:惰性气体在外加电流产生的磁场的作用下电离产生稳定的等离子体流,粉体原料经送粉系统进入反应器内,以等离子体流的高温为热源,在反应器内对原始粉体进行熔化和气化,然后再经过快速的冷凝过程实现对不规则粉体原料的球化^[2]。目前比较典型的等离子法是感应耦合等离子体法,它主要利用射频电源给缠绕在石英管上的螺旋线圈通入交变电流,交变电流产生变化的磁场,气体在电磁场的作用下发生电离,变化的磁场又感应出电场,等离子体流在库仑力和洛伦兹力的共同作用下加速运动并产生焦耳热,在适当的电流和气体流量的条件下可以得到稳定的高温等离子体流。通过送粉系统将原料送进反应器内,在辐射、对流、传导和化学 4 种传热机制作用下,粉体原料在等离子体炬中被加热熔化,然后迅速离开反应区域进入冷却区域,在压缩空气和循环冷却水的共同作用下凝固成球形颗粒^[3]。等离子体法制备球形粉体具有以下优势:1)球化率高。等离子体炬内最高温度可达 10 000 ℃,当原始颗粒进入炬中后被迅速加热融化,但是在离开等离子体炬后,温度迅速降低,这种较大的温度梯度有利于颗粒迅速冷凝成球形,球化率可达到 90% 以上。2)等离子体是由惰性气体产生,这样避免了颗粒被氧化,从而大大减少了氧、氮等元素的掺入,可制得较高纯度的球形粉体。3)原始粉体在等离子体炬中动态分散,可以避免颗粒的团聚和长大,制得的颗粒表面光洁度好,堆积密度增大,脆性降低,流动性好^[4]。4)制备的球形颗粒表面形貌几乎都呈现规则的球形,且粒径分布均匀。5)由于等离子炬内部温度高,因此针对一些高熔点的金属也可以用该方法制备球形粉体。6)热量利用率高且设备可操作性强。控制相应的工艺参数可得到不同粒径

的球形粉体。在等离子体法制备球形粉体的过程中,由于原始粉体沿轴向进入等离子体炬内,且炬内能量分布高度集中,因此对热量的利用率约为 85%。虽然等离子体技术在制备球形粉体方面有独特的优势,但是仍存在等离子设备价格昂贵、生产成本低、产出率低等问题。

1.2 化学方法

化学方法制备球形粉体主要通过化学反应或物相转换,由离子、原子、分子经过晶核形成和晶体长大而得到球形粉体^[5],常用于制备粒径较小(纳米级)的球形粉体。

1.2.1 气相法

气相法制备球形粉体的原理如下:在气体或者加热等方式的辅助下,将原始粉体气化,然后通过一定的设备将气体喷出,使其在气态下发生相应的物理变化或化学反应得到基本粒子,在基本粒子处于球形液滴状态时,使其快速凝聚、冷却形成球形颗粒。气相法在制备球形粉体的过程中涉及到合成基本粒子后的成核以及晶核的成长、凝聚等过程,在这一过程中可以通过控制粒子成核速率来控制粒径^[6]。比较常见的气相法有等离子气相法、化学气体凝结法、溅射法等。目前应用较多的是等离子气相法,该法利用处于激发态的高温等离子体使原始粉体迅速加热、熔化,离开等离子体炬后温度迅速降低,利用这种温度梯度使粒子快速成核长大,再经过冷凝过程得到球形颗粒。气相法制得的球形粉体纯度更高、粒径小且易控制、反应快、分散性好,所需生产成本低,但是对反应气氛要求高(高温),反应过程迅速,因而对设备性能要求高,技术难度大,安全性能较差。随着更先进设备的应用,其工业化应用程度将会得到很好的改善。

1.2.2 液相法

液相法是目前工业上应用较多的方法,液相法制备球形粉体的主要原理如下:选择几种与需制备粉体有关的可溶性无机盐为原料,按所需比例配置成溶液,使各元素呈游离状态,再选择合适的沉淀剂使金属离子均匀沉淀或结晶出来(也可用蒸发、升华、水解等操作)^[7],最后将沉淀或结晶经脱水、加热分解等步骤制得所需的超细球形粉体。典型的液相法有沉淀法、乳液法、溶胶-凝胶法、水热合成法、喷雾法等。液相法制得的球形粉体表面光洁度好,粒径易控制,颗粒纯度更高,所需设备操作性高,但是制得的粉体分子间隙大,目前该方法具有较好的应用前景,在新的理论和技术平台上还需更深层次的研究和探索。

沉淀法先把沉淀剂加到金属盐溶液中沉淀处理,再将沉淀物加热到一定温度使其水解,最后经过脱水等相应程序得到所需化合物^[8]。共沉淀法、均相沉淀

法、金属醇盐水解法等均为常见沉淀法。沉淀法的优势是所需设备简单,过程易操作,工业化应用前景好,在反应中适当地控制沉淀离子的浓度有助于减少团聚现象,并且沉淀生成速度通过相应的方法可以得到控制,但是沉淀法制得的球形粉体粒径大,球化率低,粒径分布不规律。张龙等^[9]对制备球形二氧化硅的新工艺进行了研究,采用化学沉淀法,以工业级硅酸钠为硅源,加入分散剂、表面控制剂、沉淀剂这些辅助试剂成功制备出粒径为 400 nm 的球形二氧化硅微粉;同时分析目的产物产率、表面形貌的影响因素,运用相应仪器进行了样品表征分析。巢曷轩^[10]采用共沉淀法,以氯化铝和硫酸铝为原料,尿素为沉淀剂,制备氢氧化铝前驱体,并研究了前驱体的球化规律,探讨了不同工艺条件和表面活性剂用量对球化的影响。

乳液法是采用 2 种互不相溶的溶剂在表面活性剂的辅助下形成均匀分布的乳液,从乳液中析出固相的方法。此过程可使成核、生长、聚结等过程都在一个微小的球形液滴内进行,最后经过凝聚、冷却过程即可制得球形粉体。乳液法可以制得粒径均匀分布的球形粉体,粉体球化率高,所需设备简单易操作,通过控制试剂用量、体系 pH、反应温度等因素可得到不同粒径的球形粉体,但是该方法制备球形粉体过程的化学反应复杂,制得粉体的分子间隙大。乳液法需要表面活性剂的辅助,研发利用率更高、性能更好的表面活性剂,并对微乳液的性质和组成进行研究,立足现有理论上进行创新是该领域的热点。卜相妹^[8]利用乳液法制备微米级球形二氧化硅,并详细讨论了在反应条件不同的情况下,搅拌速率、陈化时间对颗粒表面形态、粒度、粒径分布的影响。Yin 等^[11]在水溶液中制备出聚苯乙烯包覆的单分散 $\text{Al}(\text{OH})_3$ 微球,通过电镜分析得出这些微球有序排列结构十分稳定。

溶胶-凝胶法利用金属酸盐的分解或聚合反应制备金属氧化物或金属氢氧化物均匀分布的溶胶,再经过浓缩、干燥、热处理等步骤可得到所需粉体。该方法操作性强,过程可控,但是所需成本费用较高,并且对环境不利,工业应用可行性低。王富平等^[12]采用溶胶-凝胶法,以正硅酸乙酯为硅源,将无水乙醇和硅源放在烧瓶内恒温搅拌,然后加入蒸馏水和氨水,再恒温搅拌,最后得到球形二氧化硅粉体。

水热合成法在密封状态(高温或高压)下,在以水或其他液体为介质的超临界体系中,利用溶液中的物质进行特殊的高温化学反应,经过分离和热处理制得所需粉体^[13]。水热合成法制备球形粉体对工作环境要求相对复杂一些,要求高温、高压,反应过程需要在封闭的容器内进行,并且对原料质量要求较高,相对于气相法,水热合成法需要高温的灼烧,这样可以避免

团聚现象的出现,大大地提高了球形粉体的烧结性能。水热合成法能制备粒径较小的颗粒,同时,制得的粉体颗粒粒径分布规律、分散性好,并且通过控制工艺条件就可以制备不同粒径的粉体;然而这种方法对工作环境要求苛刻,所需设备要求较高,安全性能差,因此水热合成法的应用受到了限制。李清海等^[14]利用水热法以硅酸钠为硅源制得了球形二氧化硅粉体,同时还研究了碳酸钠溶液浓度、温度以及 pH 对球形粉体的影响。

喷雾法主要是将原始粉体配制成溶液,然后通过相应的方法使其雾化,进而获得所需球形粉体的方法,包括制备、雾化、收集、干燥等后续处理过程^[15]。喷雾法制备的粉体粒径分布均匀,颗粒大部分呈球形,而粒径大小主要取决于所用设备的规格。

2 常见球形粉体及其应用

2.1 二氧化硅

硅元素在地球中的含量较大,居于第 2 位,大自然中大部分硅元素以化合物二氧化硅的形式存在。二氧化硅具有耐高温、硬度大、介电性能良好、耐腐蚀、热膨胀系数小、应力低等独特的性能,是一种用途广泛的材料。在微电子行业中,二氧化硅在集成电路封装领域是不可或缺的优质材料;同时,由于二氧化硅具有稳定的化学性质和独特的光学性能(可透过红外线、紫外线等),因此在特种陶瓷、军工、精细化工、半导体、光学器件等众多领域也被广泛应用。随着世界的信息化、网络化程度的加深,以集成电路为代表的微电子技术产业在生产、生活中的地位越来越重要。

鉴于二氧化硅粉体在工业上的应用领域的扩大,性能更优异的球形二氧化硅粉体更能满足科技进步的需求。球形二氧化硅具有以下特点:1)粉体表面流动性好,在集成电路封装中,可以提高粉体的填充量。这样热膨胀系数就越小,介电能力越好,生产出来的电子器件寿命长,性能更好。2)球化后形成的塑封应力集中小,成品率高,这样会缩短生产周期^[16],降低产品在运输等过程中损坏的可能性。3)球化后得到的颗粒表面形貌规则,在生产加工成品的过程中减小了模具的磨损,降低了成本,延长了模具的使用寿命。目前,我国球形二氧化硅粉体的制备技术还不够完善,大部分都是从国外进口,因此,对球形二氧化硅粉体的研究是一项关系国家经济、国防等基础性产业的重要课题。

目前,日本在这方面的研究具有世界领先水平,已经实现了大批量生产并运用到军工、大规模集成电路等领域。江苏省连云港东海硅微粉有限责任公司于 2006 年 10 月提出了“大规划集成电路封装及 IC 基板

用球形硅微粉产业化”项目,以南京理工大学特种超细粉体工程研究中心为依托并取得了江苏省科技成果转化基金项目的支持。该项目的实施对提升我国硅微粉行业的技术水平、对电子行业的发展和国家的经济发展都具有十分重要的意义。此外,我国的研究人员^[17]利用溶胶-凝胶法制得的单分散球形二氧化硅粉体可以用于制备电磁波领域中的光子晶体。

2.2 钛粉

钛及其合金是应制造业的发展需要而被广泛应用的重要金属。钛具有密度小、耐腐蚀、耐高温、焊接性能好等优良性能,现已应用于汽车、航空航天以及精密机械器件的制造、热喷涂、涂料等领域^[18]。钛粉末冶金近净成形技术在制造业中的应用已较为成熟,利用这种技术再结合计算机模型可直接制取成品或接近成品尺寸的零部件,这样可以降低成本,缩短加工周期^[19]。在国防工业中,热喷涂钛涂层技术主要用于修复工件受损部位以及制备保护部件在高温、腐蚀、破坏性强等恶劣环境中工作的功能涂层。纯钛及其合金的高强度的特点使其能运用于制造刀具、汽车齿轮等。在医学上,钛被称为“亲生物金属”,可以用于制造人工心瓣、人工手臂等。

鉴于钛粉在工业生产中的重要地位,成本低、纯度高、原料利用率高的球形钛粉生产技术的研发已成为粉体制备技术研究的重点。钛粉的球化经历了不同阶段:粉末冶金制备—真空电弧炉熔炼和精密铸造—制备球形钛粉的诸多方法,但是现有的这些方法制备球形钛粉都有成本高并且材料利用率低等缺点^[20-21]。当前,我国的钛粉球化技术主要利用雾化法,而国外已经将等离子喷雾技术运用于制备球形钛粉中,以制得满足更高需求的球形钛粉。随着高科技的出现,球形钛粉的制备技术将拥有美好的前景。

古忠涛等^[22]等用射频等离子体球化技术制得球形钛粉,采用扫描电子显微镜观察球化前、后钛粉的粒径及表面形貌,分析了加料速率、携带气量对球化率的影响。通过实验分析得到等离子体法是制备球形粉体较好的方法,这种方法所需工艺简单、制得的粉体性能更优异,制得的球形钛粉球形度好,粒度分布均匀,球化率高,颗粒的表面形貌规则,粉体流动性得到大幅改善,具有很好的工业应用前景。

2.3 其他粉体

近年来,为满足工业科技发展的需求,难溶金属及其化合物的应用备受关注。钨的熔点高、密度大,因此在制造业以及国防工业中具有特殊用途^[23]。在制造业中,球形钨粉因其独特的性能而备受关注,现已应用于多孔材料的制备、板材业、热喷涂、电子信息、军工、汽车、粉末冶金等领域。通过控制设备的工艺参

数,球形钨粉制备的多孔材料透气性能也更趋完美。在粉末冶金工艺中,球形钨粉的压坯在烧结过程中收缩非常均匀,可以较好地实现尺寸控制^[24]。球形钨粉及其合金因能耐高温而用于制造高级汽车的曲轴、缸筒,军工里的枪筒、炮筒、穿甲弹等,同时由于球化后的钨粉流动性得到了提高,因此应用在热涂层领域中制得的涂层致密性好,而且耐磨性更好。尽管钨可以作为高温材料,但是其抗氧化能力较差,在 1 000 ℃以上便会发生氧化,生成三氧化二钨,因此,在高温中使用时需要以惰性气体进行保护。鉴于球形钨粉良好的工业前景,对其制备过程、工艺及实际应用的研究也需要更加深入。姜文伟等^[25]利用等离子体技术,以普通钨粉为原料制得球形钨粉,分析了球化前、后粉体的扫描电镜图像,发现球化后粉体的粒径、形貌、流动性均得到大幅提高。钨合金的应用也比较广泛,例如碳化钨具有硬度高、熔点高、电阻小等特点,在车床刀具、装甲弹芯以及需要耐磨材料的行业具有很重要的地位。吴红等^[26]以氩气和氢气为气源,粒径为 1~3 μm 的碳化钨为原料,以循环的氩气为冷却保护气体制备球形碳化钨粉体,同时采用相应的仪器来观测粒径以及表面形貌的变化,通过不同的参数来控制颗粒的粒径,比较球化前、后颗粒的流动性等物理性能,结果表明球化后碳化钨粉体的物理性能更加优异。

氧化铝材料具有高强度、抗磨损、耐高温、耐化学腐蚀和超光滑表面等一系列优异特性,成为极其重要的结构陶瓷和载体材料,现已被广泛应用于航空航天、冶金、电子、核技术等高科技工业领域^[27]。在工业生产上,氧化铝粉体常用在玉石、宝石以及陶瓷的制造中,同时其因具有较高的硬度,还可用作耐磨材料。氧化铝也可用作耐火材料,将氧化铝与其他金属结合而得到的复合材料可用于耐火砖、坩埚、锻造所需的加热炉等场合,还可以作为密封材料、填补材料用在电子元件及集成电路中。随着氧化铝材料的广泛运用,尤其在陶瓷、汽车、航天等先进领域的应用,需制备出流动性好、性能稳定的高纯超细球形氧化铝粉体,以满足科技发展的需求。钟良等^[28]采用频率为 3.5 MHz、额定功率为 100 kW 的等离子体发生器,以费氏粒径为 8~15 μm 的氧化铝颗粒为原料,在等离子技术下制得球形氧化铝粉体,采用扫描电镜观察球化前、后粉体的粒径以及表面形貌的变化,主要对影响球化速率及粒径的因素进行讨论,为后续研究奠定了基础。

3 结论

本文中论述了粉体球化物理和化学方法,并针对一些研究实例对硅微粉、钛粉、钨粉等一些主要粉体

球化方法进行详细阐述,同时综述了常见的球形粉体在工业生产中的应用,得出以下结论:球化后的粉体粒径分布均匀,堆积密度大,表面形貌规则,流动性和分散性得到了很大的提高;球化后的粉体具有更优异的性能,在各领域的应用也将更广泛。

参考文献(References):

- [1] 王燕民. 采用高压辊磨-搅拌磨复合系统的湿法超细研磨研究[C] // 中国颗粒学会 2006 年年会暨海峡两岸颗粒技术研讨会论文集, 2006: 60-64.
- [2] BOLOT R, CODDET C, SCHREUDERS C, et al. Modeling of an inductively coupled plasma for the synthesis of nanoparticles [J]. Journal of Thermal Spray Technology, 2007, 16 (5/6): 690-697.
- [3] 施阳和, 邵宗恒. 高频等离子体球化石英粉的数值模拟研究[D]: 南昌: 华东交通大学, 2012.
- [4] 古忠涛, 叶高英, 刘川东, 等. 射频等离子体球化 Ti 粉体的研究[J]. 材料开发与应用, 2009, 24(4): 30-34.
- [5] 李长青. 粉体工程[M]. 北京: 机械工业出版社, 2010.
- [6] 竺培显, 孙勇, 方吕昆 等. 气化法制备金属超细粉末的有关问题探讨[J]. 昆明理工大学学报: 理工版, 2001, 26(6): 110-113.
- [7] 易回阳. 液相法制备纳米微粒的研究进展[J]. 化学世界, 2001(7): 385-386.
- [8] 卜相妹. 微米级球形二氧化硅粉体的制备及其工艺技术研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2008.
- [9] 张龙, 文彬. 球形二氧化硅微粉制备新工艺[J]. 长春工业大学学报: 自然科学版, 2012, 33(5): 559-566.
- [10] 巢禹轩. 水溶液沉淀法制备超细球形氧化铝的工艺研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2012.
- [11] YIN Jiliang, QIAN Xuefeng, YIN Jie, et al. Aqueous route to prepare large-scale array of highly ordered polystyrene/aluminum hydroxide microspheres[J]. Journal of Solid State Chemistry, 2004, 177(10): 3603-3609.
- [12] 王富平, 李三喜, 张文政. 球形二氧化硅的制备与改性[J]. 当代化工, 2010, 39 (1): 1-3.
- [13] RATH C, SAHU K K, ANAND S, et al. Preparation and characterization of nanosize Mn-Zn ferrite[J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 1999, 202 (1): 77-84.
- [14] 李清海, 翟玉春. 球形 SiO₂ 超细粉的制备及其烧结行为[J]. 东北大学学报: 自然科学版, 2004, 25(11): 1080-1083.
- [15] 韩涛, 彭玲玲, 涂铭旌, 等. 机械力化学-喷雾干燥法制备球形 YAG:Ce 粉体及其发光特性[J]. 功能材料, 2013, 44 (增刊 1): 116-119.
- [16] 李凤胜. 微米级球形二氧化硅粉体的控制制备研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2008.
- [17] 赵丽, 余家国, 程蓓, 等. 单分散二氧化硅球形颗粒的制备与形成机理[J]. 化学学报, 2003, 61(4): 562-566.
- [18] 谢焕文, 蔡一湘, 刘辛, 等. 球形钛粉制备工艺现状[C] // 2013 广东材料发展论坛——战略性新兴产业发展与新材料科技创新研讨会论文集摘要, 2013: 199.
- [19] 谢焕文, 邹黎明, 刘辛, 等. 球形钛粉制备工艺现状[J]. 材料研究与应用, 2014, 8(2): 78-81.
- [20] GUO Shuangquan, GE Changchun, FENG Yunbiao. Research on low-cost plasma spheroidization technology for spherical tungsten powder used in thermal spraying[J]. Powder Metallurgy Industry, 2010, 20(3): 1-4.
- [21] TIAN Kaiwen, SHANG Fujun, SHI Honggang, et al. Research on the preparation technology of super-fine tungsten powder by induction plasma[J]. Ordnance Material Science and Engineering, 2010, 33(1): 63-66.
- [22] 古忠涛, 叶高英, 刘川东, 等. 射频等离子体球化钛粉的工艺研究[J]. 粉末冶金技术, 2010, 28(2): 120-124.
- [23] 刘正春, 王志法, 李方, 等. 钨粉的等离子体球化[J]. 稀有金属与硬合金, 1999, 9(3): 7-10.
- [24] 李艳军, 林涛, 郭志猛, 等. 酸沉淀法制备超微细球形钨粉[J]. 中国钨业, 2011, 26(3): 37-39.
- [25] 姜文伟, 普崇恩. 等离子喷雾法制取球形钨粉工艺探讨[J]. 硬质合金, 2000, 17(2): 85-88.
- [26] 吴红, 黄伟, 赵鸿雁, 等. 等离子法制备球形碳化钨粉技术研究[J]. 兵器材料科学与工程, 2013, 36(4): 65-68.
- [27] JANG J, TAKANA H, PARK S, et al. Advancement of in-flight alumina powder spheroidization process with water droplet injection using a small power DC-RF hybrid plasma flow system[J]. Journal of Thermal Spray Technology, 2012, 21(5): 900-907.
- [28] 钟良, 侯力, 古忠涛. 射频感应等离子体制备球形氧化铝的工艺研究[J]. 强激光与粒子束, 2014, 26(8): 089003-1-089003-3.