

DOI: 10.13957/j.cnki.tcxh.2017.02.002

多孔陶瓷的制备方法及其应用

李 进, 邓哲哲, 涂晓诗, 陈艳林
(湖北工业大学材料与化学工程学院, 湖北 武汉 430068)

摘 要: 多孔陶瓷因其具有孔隙率高, 可耐高温, 耐腐蚀, 比表面积大以及化学性质稳定等优点, 使它在生物, 吸音隔热, 废气处理, 航空航天等领域有着良好的应用。因此, 吸引了多数学者对其进行研究。本文主要总结了近年来多孔陶瓷制备方法的研究进展, 同时介绍了多孔陶瓷的多种应用前景。

关键词: 多孔陶瓷; 制备方法; 应用

中图分类号: TQ174.75 文献标志码: A 文章编号: 1000-2278(2017)02-0138-06

Fabrication and Application of Porous Ceramics Materials

LI Jin, DENG Zhezhe, TU Xiaoshi, CHEN Yanlin

(School of Material and Chemical Engineering, Hubei University of Technology, Wuhan 430068, Hubei, China)

Abstract: Porous ceramics have a lot of applications in many areas, such as biology, noise insulation, heat insulation, exhaust treatment and aviation, because of its high porosity, high temperature resistant, corrosion resistance, high surface area and stable property. Therefore, porous ceramics attract many scholars' attention. This article introduces the fabrication of porous ceramics and also exhibits application of porous ceramics.

Key words: Porous ceramic; Fabrication; Application

0 引 言

多孔陶瓷是一种新型陶瓷功能材料, 也是一种节能环保型材料。可用来作为废气的过滤材料, 保温隔热材料, 生物材料等。依据其孔径大小可分为: 微孔陶瓷, 介孔陶瓷, 宏孔陶瓷, 其孔径分别为: 微孔 <20 nm, 20 nm $<$ 介孔 <500 nm, 宏孔 >500 nm。它的原料品种多样, 可以用SiC, Al_2O_3 , Si_3N_4 , Y_2SiO_5 , $Ti_3Si(Al)C_2$, YB_4 , TiB_2 ^[1-9]等为原料。除上述原料外, 现在还有学者将一些废弃矿渣及废玻璃或建筑废料来作为制备多孔陶瓷的原料。

陶瓷本身具有稳定的物化性质, 例如耐磨损, 耐高温, 耐腐蚀等优点, 因此多孔陶瓷同样也具备陶瓷的普遍优点。除此之外, 由于多孔陶瓷有着较高的气孔率, 它还可以用来作为过滤, 隔音, 隔热材料等。由于制备多孔陶瓷方法及原材料的不同, 导致孔隙率, 强度等机械性能的差异, 因而它们的功能也不尽相同, 具备不同性能的多孔陶瓷在不同方面有着不同的应用。

收稿日期: 2016-08-17。 修订日期: 2016-10-12。
通信联系人: 陈艳林(1970-), 女, 副教授。

1 多孔陶瓷的制备

1.1 传统制备方法

1.1.1 颗粒堆积成型法

颗粒堆积成型法, 是指向骨料中加入组成成分相同的微细颗粒, 微细颗粒在高温的条件下产生液相, 易于烧结, 从而导致骨料相互连接形成多孔结构。陶瓷空隙的均匀程度同骨料颗粒有关, 骨料颗粒越均匀, 制备出来的多孔陶瓷的孔隙也就分布得越均匀。利用此方法制备出的多孔陶瓷, 孔径大小与骨料颗粒直径大小成正比, 骨料颗粒越大, 形成的多孔陶瓷的平均孔径就越大。此外, 烧结的温度和种类以及添加剂的含量同样会影响小尺寸分布和孔径大小, 如将少量的钇添加到 ZrO_2 粉体中来增加它的可塑性, 压制成坯体后用 1250 °C来烧结, 可获得 ZrO_2 多孔陶瓷^[12]。

Li^[7]等人使用直接在空气中烧结 $SiO_2-Al_2O_3$ 微球形颗粒的方法来制备莫来石基多孔陶瓷。这是一种简单且非常有效的制备多孔陶瓷的方法, 他们在

Received date: 2016-08-17. Revised date: 2016-10-12.
Correspondent author: CHEN Yanlin(1970-), female, Associate professor.
E-mail: chenyl70@126.com

烧结温度为1550 °C下获得了孔隙率为81.37%,抗压能力为 6.25 ± 0.91 MPa的莫来石基多孔陶瓷。

1.1.2 添加造孔剂法

添加造孔剂法是将造孔剂加入陶瓷坯料中,利用造孔剂在坯体中占有一定的空间,再通过高温烧结、排塑等方法让造孔剂离开基体从而形成孔隙来制备多孔陶瓷。选择的造孔剂一般是易挥发的物质,如炭粉、萘、淀粉、聚乙烯醇等,或者是熔点较高,但可以溶于水,酸或碱性溶液的化合物,如 Na_2SO_4 、 CaSO_4 、 NaCl 等,都可作为造孔剂^[13,14]。

张龙^[15]等人用煤间接液化残渣作为基料,碳酸钙作为造孔剂,高岭土作为粘合剂,比例设计为液化残渣:碳酸钙:高岭土=11:4:5,制备所得到的多孔陶瓷表面呈现凹凸不平絮状无规则状态,疏松多孔,该产品可用于金属废水离子处理,除尘,气体净化等。此外,他们还用响应面法来优化煤灰做造孔剂的制备工艺,将当地特有沙柳木磨成粉与粉煤灰混合作为添加剂制备出显气孔率为34.23%的微孔结构陶瓷试样,可用于除尘净化空气,变废为宝^[16]。

Eom^[17]等人利用葡萄糖和酵母为模板来制备SiC多孔陶瓷,他们将聚硅氧烷、炭黑、SiC、 Al_2O_3 、 Y_2O_3 混合并添加了可膨胀的小球和PMMA球两种造孔剂,通过高温还原以及煅烧处理制备出了SiC双孔隙结构的多孔陶瓷,该多孔陶瓷具有较高的渗透性。

1.1.3 发泡工艺法

发泡工艺法是使用易产生气泡的物质在浆料中形成气孔,气孔的孔径相对均匀,干燥后烧结坯体然后制得多孔陶瓷。泡沫的产生及固定是发泡工艺中最为关键的一步,泡沫可以通过机械起泡,化学反应释放气体起泡,发泡剂分解起泡等方式来实现。但是由于泡沫有比较大的表面自由能,因此在热力学中泡沫是不稳定的,所以泡沫的固定更为重要。泡沫由于液膜排液、泡沫聚集、奥氏熟化等现象变得十分不稳定,因此在用发泡法制备多孔陶瓷时必须要让泡沫浆料在较短时间内固化成拥有高强度的陶瓷坯体。

目前固化泡沫发展经历了如下几个阶段:第一个阶段,使用天然高分子通过60–180 °C进行加热处理来固化泡沫。第二个阶段,凝胶注膜,它是利用有机单体原位聚合形成三维网络凝胶,并让陶瓷浆料迅速固化成有高强度的多孔陶瓷坯体,但生产成本高且还会对环境造成一定的污染。第三阶段,新型凝胶体系,此方法有效地减少了凝胶注膜法对

环境的污染,但是价格较为昂贵。

Li^[18]等人用粉煤灰作为主要原料, $\text{Al}(\text{OH})_3$ 做Al源, AlF_3 为添加剂,淀粉作为发泡剂,在温度为1550 °C下烧结,制备出了抗压强度约为100 MPa、孔隙率约为55%、具有莫来石晶须的增强莫来石多孔陶瓷。

Yu^[19]等人以 Si_3N_4 为主要原料, Al_2O_3 与 Y_2O_3 作复合添加剂,用短链两亲分子没食子酸丙酯作为发泡剂,最后制备出了抗压强度为106 MPa的多孔陶瓷。

1.1.4 有机泡沫浸渍法

有机泡沫浸渍法是用有机泡沫作为模板,将调制好的陶瓷浆料均匀涂覆在模板上或将模板浸入浆料中,排除空气,让浆料充分浸润模板,使浆料均匀附着在有机泡沫模板上,然后经过干燥处理后煅烧,高温煅烧可以灼失消除有机泡沫模板,从而得到多孔陶瓷。这种多孔陶瓷有压力损失小,表面积大,质量轻,流体接触效率高等优点,可作为固体热双向交换器,电极替换材料等,还可应用于工厂高温烟气的处理。

江夏^[20]等人利用水溶性酚醛树脂等树脂为粉剂,规格为10–30 PPI的有机泡沫做模板来制备高纯度碳化硅多孔陶瓷,这种陶瓷具有很好的抗热震性能,并可在高温环境中重复使用。

1.2 新型制备方法

1.2.1 冷冻干燥法

冷冻干燥法^[21]是近几年发展起来的制备技术。该工艺是将陶瓷骨料与一定分散剂、粘结剂作用下的水或有机液相均匀混合,制成浆料,然后将混合均匀的浆料倒入模具,使它快速冷冻凝固成型,让液相基体迅速冰化晶化成为固体,之后通过减压或真空干燥,让凝固相升华从而在浆料内部留下定向排列的孔结构,最后进行烧结制备出多孔陶瓷。

刘晓光^[22]等人采用聚甲基丙烯酸钠做分散剂,聚乙烯醇作为结合剂,用冷冻干燥工艺制备氧化硅多孔陶瓷。试验中当pH值为10, SiO_2 的zeta电位为-60 mV时,制备出了无团聚、孔结构均匀具有定向贯通孔结构的氧化硅多孔陶瓷,显气孔率为61.48%–69.41%,且闭口气孔率小于2.26%。氧化硅多孔陶瓷表面经石墨烯或金属材料表面修饰后可以用来吸波,并可提高吸波效率,减少电磁波对环境的污染。

Zhang^[23]等人以水为分散剂,通过用冷冻干燥法来制备 Y_2SiO_5 多孔陶瓷,他们通过固-液反应来制备 Y_2SiO_5 粉末,浆料主要是由蒸馏水,0.3wt.%的阴离子分散剂聚甲基丙烯酸铵,粘合剂聚乙烯

醇, 防冻剂甘油和 Y_2SiO_5 粉末混合而成的, 当浆料中固体含量从15%增长到30%时, 孔隙率从71%减少到62%, 孔径大小也从40 μm 减小到10 μm , 但是抗压强度从1.87 MPa增长到了8.42 MPa, 介电常数也从1.86增长到了2.85。

1.2.2 生物模板法

生物模板法^[23, 24]是利用生物矿化及仿生学原理来制备多孔陶瓷, 是目前一种制备多孔陶瓷的一种新方法。该方法是借助自然界中一些生物结构的特性或催化活性来合成新材料的一种方法。该方法可以复制天然材料的形态, 还可以用某些生物结构作为模板来引导无机材料的自组装。天然的生物材料结构多样, 资源丰富, 可再生且绿色环保, 但生物模板来自于自然, 在自然不断地进化下就形成了形态各异的生物模板; 因此研究过程中存在很多不便之处, 例如空隙尺寸很难控制, 孔隙之间的连通性也不好。研究表明通过添加不同的表面活性剂可以有效地调节陶瓷孔径大小, 还可以通过改变煅烧温度来制备出不同晶粒尺寸和孔隙率。虽然现在利用生物模板来制备具有生物形态的多孔陶瓷已经取得了很大的成果, 但是仍然存在很多问题需要我们去解决, 比如如何避免开裂现象的产生, 如何避免挠曲以及剥落现象的产生, 从而进一步提高生物多孔陶瓷的力学性能。

天然的木材, 植物的茎秆, 竹子, 棉花, 海绵等都可以用作生物模板。若用木材作为模板, 需要将木材高温炭化后形成多孔碳骨架, 这种骨架很好地保留了木材原有的生物多孔结构, 然后将陶瓷浆料渗入木材中, 再通过高温烧结制备出多孔陶瓷。由于木材有比较好的可塑性, 因此可以制造出比较复杂的木制样品, 从而实现复杂陶瓷样品的制备。使用生物模板法制备多孔陶瓷时, 可以用气相渗入法, 将浆料在高温下变为气体, 慢慢渗入到多孔的生物模板中。这种方法得到的产物纯度高, 能够最大程度保持生物模板的结构。还可以用熔融渗入法, 将基料与多空生物碳模板一起放入充满惰性气体高温炉中加热, 当达到熔点时浆料会浸入模板中最终形成多孔陶瓷。该方法的优点是制备时间短, 得到的是净尺寸陶瓷复合材料。

张伊骛^[23]等人利用牛骨煅烧的方法得到多孔双相磷酸钙材料从而来制备生物陶瓷, 通过高温煅烧牛骨法制备的多孔双相磷酸钙材料具有优异的骨诱导性。

1.2.3 溶胶-凝胶法

溶胶-凝胶法主要是用来制造微孔陶瓷材料,

尤其是用来制造微孔陶瓷膜。它是利用溶胶在胶化过程中, 胶体离子之间互相连接而成空间网状结构, 在这些网状孔隙中充满了溶液, 溶液在烧结过程中会蒸发, 留下很多微小空隙, 这些孔隙大多为纳米级, 可以制备孔隙很小的陶瓷材料。该方法制备出的多孔陶瓷气孔分布均匀, 其最大的优越性在于可以方便得到多种复合膜。最新的溶胶-凝胶法主要有三种: 利用均称粒子半径为模板再结合溶胶-凝胶法; 利用表面活性剂为模板结合溶胶-凝胶法; 利用特殊结构的化合物为模板再结合溶胶-凝胶法。

Ma^[3]等人利用海藻水凝胶来制备 Si_3N_4 多孔陶瓷, 获得的样品具有一致的孔隙分布, 孔隙密度高, 具有很好的机械强度以及分层式孔结构等优点。

Zhang^[5]等人利用冷冻铸造以及溶胶凝胶法制备出了一种新型的硅胶 Y_2SiO_5 多孔陶瓷。他们研究表明, 将多孔的 Y_2SiO_5 浸入硅胶中制备出的多孔陶瓷, 在室温下的热传导率降低, 抗压强度显著增加。它的抗压能力可达到9.3 MPa, 导热率能够降低到0.260 W/(m·K), 其可以用来作为高温绝缘材料。

1.2.4 3D打印技术法

随着3D打印技术的发展, 现在多孔陶瓷同样也可以用3D打印技术来制备, 3D打印技术可以提高多孔陶瓷的加工和制备效率, 孔隙大小及孔隙率可由电脑进行控制, 但是还不能一步制备出高强度的多孔陶瓷, 并且成本较高。

Tarafder^[25, 26]等人利用3D打印技术制备的多孔陶瓷材料形成具有良好的生物吸收特性的多孔磷酸支架结构, 孔隙率为63%, 抗压强度为10 MPa, 连通性好, 该材料在医学方面具有很大的应用价值。

1.2.5 放电等离子烧结法

放电等离子烧结法^[27]是一种快速烧结技术, 具有升温速度快, 烧结时间短, 可控性强等特点。Wang^[9]等人利用放电等离子烧结方法制备出了 TiB_2 多孔陶瓷。该研究中为了能够得到高孔隙率的多孔陶瓷, 他们在 TiB_2 粉末中添加了 TiO_2 和 B_4C , B_4C 来作为发泡剂(它们在高温下可产生 CO_2 与 B_2O_3 气体)。

2 多孔陶瓷的应用

2.1 过滤材料和催化剂载体

多孔陶瓷可根据它的开气孔率,抗热震能力与化学稳定性来判断是否能适合作为过滤材料,一般多孔陶瓷过滤器的孔隙率在40%–80%之间,孔隙大小为10–5000 μm 。现在有些工厂对废水,废液进行处理时采用的就是微孔陶瓷膜过滤器。

由于多孔陶瓷化学性能稳定,具有较大的比表面积,吸附性好,抗热震能力强等优点,因此很多工业生产都用它来作为催化剂的载体。目前,世界上90%左右的汽车尾气催化净化处理器的载体都为多孔陶瓷,蜂窝状堇青石陶瓷为应用最广泛的陶瓷载体;烧覆功能膜后,它可将尾气中的有毒气体,如 CO , NO_2 , HC 和烃类等,转化成无毒的 CO_2 , N_2 和 H_2O ,有效地缓解了汽车尾气给环境带来的污染。

2.2 保温隔热材料

多孔陶瓷由于其内部有很多闭气孔,低导热率,高热稳定性,因此多孔陶瓷可用来作为具有优良性能的保温隔热型材料。隔热材料是因为该材料具有低导热率,因此材料才会隔热保温。多孔陶瓷的导热率与其孔隙率呈负相关,孔隙率越高,导热率越低,但与此同时,其强度也会随之降低。因此多孔陶瓷的增强增韧可为其带来更广泛的应用范围,同时也会成为我们研究的一个方向。

2.3 生物材料

多孔羟基磷灰石陶瓷^[23]有着很好的生物相容性且无毒无副作用,并且这种材料还有较高的强度,这是目前一种较为理想的骨骼材料,在医学领域具有着重要的意义。

陶瓷与木制品结合,能够制造出木基陶瓷,木基陶瓷材料有着优良的电磁屏蔽效应,是一种良好的电磁屏蔽材料。木基陶瓷材料还可作为自润滑材料以及轻质结构材料。

2.4 节能环保型材料

随着经济的发展,废弃矿物,废弃建筑材料随之增多,造成了资源浪费,环境污染等问题。大量的盐碱土无法利用,造成了土地资源的浪费。多孔陶瓷可以有效地解决上述问题。上文中提到Cao^[10], Hua^[11]等人分别利用废玻璃和建筑废物来制备多孔陶瓷,刘欣^[30]等人利用蛇纹石尾矿作为基料,废弃的陶瓷砖抛光渣作为发泡剂,并向基料中添加滑石、低温砂、膨润土,制备出了发泡保温板,上述例子都有效地利用了目前无法处理的废弃物来制备多孔陶瓷,节约了资源,保护了环境并同时降低了生产多孔陶瓷的成本。Jalali^[28]等人研究出利用多孔陶瓷移除土壤中的盐,使盐碱地能够得到

更好地利用,节约了土地资源,并有效地缓解了土地资源紧缺的问题。

2.5 吸音材料

噪音是人类社会四大污染之一,对人们日常生活产生了很大的影响。多孔陶瓷吸音材料具有较好的耐磨性,耐热性,抗腐蚀性以及良好的抗热震能力,其三维网状结构更有利于吸收声音^[29]。但同样由于其强度韧性较低,应用范围受到限制,因此多孔陶瓷的增强增韧将是未来继续研究的方向。

2.6 航空航天材料

多孔陶瓷由于有较好的化学稳定性,抗热震能力,耐腐蚀性和低导热率,使其成为运用于飞机以及航天器的一种理想耐热隔热的材料。

2.7 海绵城市材料

近年来,每年汛期时我国许多城市都会出现城市内涝现象,因此,国家《十三·五规划》已明确指出,我国城镇将逐步建成海绵城市。多孔陶瓷渗水砖可作为一种很好的海绵城市地基建材,其不仅具有节约水资源、治理环境污染的功能,还可调节城市温度及湿度,缓解城市热岛效应。多孔陶瓷渗水砖可利用固体废弃物为原料制备,是一种绿色节能环保型材料。李国昌^[31]等人以黄金尾矿为主料,以煤矸石作为造孔剂制备出了性能良好的渗水砖,他们发现该多孔陶瓷渗水砖的性能与其原料配比有着较大的关系。

3 结 语

多孔陶瓷除了具有陶瓷的特性外,还具有很多普通陶瓷以外的特有性质,因此多孔陶瓷可以应用于很多方面,不仅可以应用在材料表面的防腐蚀,还可以应用在航空航天,军事装备,陶瓷复合材料等方面,并在电子领域也有很广泛的应用。制备多孔陶瓷的方法有多种,每种制备方法都有它独特的优点以及缺点。不同方法制备出来的多孔陶瓷,它们的物理及化学特性也不尽相同,因此我们可以通过用途指导我们选择最合适的制备工艺,并选择合适的原料,添加剂等来获得我们所需要的最好性能。由于陶瓷本身的脆性,以及随着陶瓷孔隙率越高,强度就会有所下降,限制了它的应用领域。因此还有更多更先进的制备方法等待着我们去进一步研究。

参考文献:

- [1] Wang F, Yin J, Yao D, et al. Fabrication of porous SiC ceramics

- through a modified gelcasting and solid state sintering[J]. Materials Science and Engineering: A, 2016, 654: 292–297.
- [2] Liu J, Zhang X, Wu H, et al. Evaluating the Sintering Kinetics of Porous SiC Ceramics[J]. Refractories and Industrial Ceramics, 2015, 55(6): 545–548.
- [3] Ma N, Du L, Liu W, et al. Preparation of porous Si₃N₄ ceramics with unidirectionally aligned channels[J]. Ceramics International, 2016, 42(7): 9145–9151.
- [4] Zhang R, Han B, Fang D, et al. Porous Y₂SiO₅ ceramics with a centrosymmetric structure produced by freeze casting[J]. Ceramics International, 2015, 41(9): 11517–11522.
- [5] Zhang R, Qu Q, Han B, et al. A novel silica aerogel/porous Y₂SiO₅ ceramics with low thermal conductivity and enhanced mechanical properties prepared by freeze casting and impregnation[J]. Materials Letters, 2016, 175: 219–222.
- [6] Dong N, Sun X, Ma Y, et al. Effect of TiO₂ addition on the properties of Ti₃Si(Al)C₂ based ceramics fabricated by reactive melt infiltration[J]. Ceramics International, 2016, 04: 126.
- [7] Li N, Zhang X Y, Qu Y N, et al. A simple and efficient way to prepare porous mullite matrix ceramics via directly sintering SiO₂-Al₂O₃ microspheres[J]. Journal of the European Ceramic Society, 2016, 36(11): 2807–2812.
- [8] Guo Q, Xiang H, Sun X, et al. Preparation of porous YB₄ ceramics using a combination of in-situ borothermal reaction and high temperature partial sintering[J]. Journal of the European Ceramic Society, 2015, 35(13): 3411–3418.
- [9] Wang J. Fabrication and thermophysical properties of porous TiB₂ ceramics fabricated by reactive spark plasma sintering[J]. International Journal of Refractory Metals and Hard Materials, 2015, 51: 141–145.
- [10] Cao J, Lu J, Jiang L, et al. Sinterability, microstructure and compressive strength of porous glass-ceramics from metallurgical silicon slag and waste glass[J]. Ceramics International, 2016, 42(8): 10079–10084.
- [11] Hua K, Shui A, Xu L, et al. Fabrication and characterization of anorthite-mullite-corundum porous ceramics from construction waste[J]. Ceramics International, 2016, 42: 6080–6087.
- [12] Deng Z Y, Ferreira J M F, Tanaka Y, et al. Microstructure and thermal conductivity of porous ZrO₂ ceramics[J]. Acta materialia, 2007, 55(11): 3663–3669.
- [13] 黄扬风. 新型多孔陶瓷的制备工艺与应用[J]. 佛山陶瓷, 2015, 25(12): 15–18.
HUANG Y F. Foshan Ceramics, 2015, 25(12): 15–18.
- [14] 黄新友, 马旭, 王选, 等. 多孔陶瓷的制备工艺及应用的现状[J]. 中国陶瓷, 2015, 51(9): 5–8.
HUANG X Y, MA X, WANG X, et al. China Ceramics, 2015, 51(9): 5–8.
- [15] 张龙, 薛振华, 李正兰. 煤间接液化残渣基多孔陶瓷的制备及对 Pb²⁺ 吸附性能的研究[J]. 陶瓷学报, 2016, 37(1): 58–62.
ZHANG L, XUE Z H, LI Z L. Journal of Ceramics, 2016, 37(1): 58–62.
- [16] 张龙, 薛振华, 李正兰. 响应面法优化粉煤灰基多孔陶瓷的制备工艺[J]. 中国陶瓷, 2016, 52(3): 53–58.
ZHANG L, XUE Z H, LI Z L. China Ceramics, 2016, 52(3): 53–58.
- [17] Eom J H, Kim Y W, Raju S. Processing and properties of macroporous silicon carbide ceramics: A review[J]. Journal of Asian Ceramic Societies, 2013, 1(3): 220–242.
- [18] Li S, Du H, Guo A, et al. Preparation of self-reinforcement of porous mullite ceramics through in situ synthesis of mullite whisker in flyash body[J]. Ceramics International, 2012, 38(2): 1027–1032.
- [19] Yu J, Yang J, Li H, et al. Study on particle-stabilized Si₃N₄ ceramic foams[J]. Materials Letters, 2011, 65(12): 1801–1804.
- [20] 江夏, 李小燕, 周耀. 高纯碳化硅泡沫陶瓷的制备[J]. 佛山陶瓷, 2015, (5): 6–8.
JIANG X, LI X Y, ZHOU Y. Foshan Ceramics, 2015, (5): 6–8.
- [21] 刘岗, 严岩. 冷冻干燥法制备多孔陶瓷研究进展[J]. 无机材料学报, 2014, 29(6): 571–583.
LIU G, YAN Y. Journal of Inorganic Materials, 2014, 29(6): 571–583.
- [22] 刘晓光, 薛文东, 李妍, 等. 快速冷冻干燥法制备多孔氧化硅陶瓷[J]. 人工晶体学报, 2016, 45(1): 35–39.
LIU X G, XUE W D, LI Y, et al. Journal of Synthetic Crystals, 2016, 45(1): 35–39.
- [23] 张伊骁, 许晨阳. 牛骨转化双相磷酸钙生物陶瓷材料的制备[J]. 山东工业技术, 2016, (8): 26.
ZHANG Y X, XU C Y. Shandong Industrial Technology, 2016, (8): 26.
- [24] 安招鹏, 王俊勃, 姜凤阳, 等. 生物SiC多孔陶瓷的研究进展[J]. 应用化工, 2014, 43(9): 1697–1700.
AN Z P, WANG J B, JIANG F Y, et al. Applied Chemical Indust, 2014, 43(9): 1697–1700.
- [25] Tarafder S, Balla V K, Davies N M, et al. Microwave-sintered 3D printed tricalcium phosphate scaffolds for bone tissue engineering[J]. Journal of tissue engineering and regenerative medicine, 2013, 7(8): 631–641.
- [26] Tarafder S, Davies N M, Bandyopadhyay A, et al. 3D printed tricalcium phosphate bone tissue engineering scaffolds: effect of SrO and MgO doping on in vivo osteogenesis in a rat distal femoral defect model[J]. Biomaterials science, 2013, 1(12):

- 1250-1259.
- [27]冯海波, 周玉, 贾德昌. 放电等离子烧结技术的原理及应用[J]. 材料科学与工艺, 2003, 11(3): 327-331.
FENG H B, ZHOU Y, JIA D C. Material Science and Technology, 2003, 11(3): 327-331.
- [28]Jalali J, Balghouthi M, Ezzaouia H. Characterization of porous clay ceramics used to remove salt from the saline soils[J]. Applied Clay Science, 2016, 126: 259-267.
- [29]孙进兴, 刘培生. 多孔吸声陶瓷的研究进展[J]. 陶瓷学报, 2015, 36(4): 347-352.
SUM J X, LIU P S. Journal of Ceramics, 2015, 36 (4): 347-352.
- [30]刘欣, 李家科, 程凯. 蛇纹石尾矿资源化制备发泡陶瓷的研究[J]. 陶瓷学报, 2013, 34(4): 461-466.
LIU X, LU J K, CHENG K. Journal of Ceramics, 2013, 34(4): 461-466.
- [31]李国昌, 王萍. 黄金尾矿透水砖的制备及性能研究[J]. 金属矿山, 2006, (6): 78-82.
LI G C, WANG P. Metal Mine, 2006, (6): 78-82.