

# 溶液燃烧合成-粉末冶金法制备 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Cu}$ 多孔复合材料

杨腾<sup>1</sup>, 储爱民<sup>1\*</sup>, 李滔<sup>1</sup>, 赵玉萍<sup>2</sup>, 董泽熙<sup>1</sup>, 郭世柏<sup>1</sup>

(1.湖南科技大学材料科学与工程学院, 湖南湘潭 411201; 2.湖南科技大学土木工程学院, 湖南湘潭 411201)

**摘要:** 以硝酸铜、硝酸铝、葡萄糖和尿素为原料, 首先采用溶液燃烧合成和氢还原法制备了  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Cu}$  复合粉末, 然后将  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Cu}$  复合粉末与造孔剂氯化钠均匀混合后, 再将混合粉末冷压成型, 最后通过烧结-脱溶工艺制得  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Cu}$  多孔复合材料 (A-C-M)。采用 X 射线衍射 (XRD) 和扫描电子显微镜 (SEM) 对粉末原料和 A-C-M 的微观形貌进行表征分析, 使用万能试验机对 A-C-M 进行压缩性能测试, 研究葡萄糖添加量对燃烧产物粉末的影响, 探讨了  $\text{Al}_2\text{O}_3$  含量对 A-C-M 压缩性能的影响。结果表明, 葡萄糖与  $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$  的摩尔比为 1 时, 燃烧产物的比表面积达到了最大值, 为  $12.5 \text{ m}^2\cdot\text{g}^{-1}$ ; 燃烧产物经煅烧除碳后, 粉末颗粒的孔洞增加, 但因高温煅烧产生烧结作用, 其比表面积降低为  $10.2 \text{ m}^2\cdot\text{g}^{-1}$ ; 煅烧产物经氢还原后, 粉末颗粒破碎为絮状, 然而因还原高温的烧结作用, 使获得  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Cu}$  复合粉末的比表面积进一步降低为  $7.5 \text{ m}^2\cdot\text{g}^{-1}$ ; 随  $\text{Al}_2\text{O}_3$  含量的增加, A-C-M 孔隙率逐渐增加, 其抗压强度逐渐降低。

**关键词:**  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Cu}$  多孔复合材料; 溶液燃烧合成; 葡萄糖; 孔隙率; 压缩性能

**分类号:** TG123

## Preparation of $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Cu}$ porous composites by the combination of solution combustion synthesis and powder metallurgy method

YANG Teng<sup>1</sup>, CHU Ai-min<sup>1</sup>, LI Tao<sup>1</sup>, ZHAO Yu-ping<sup>2</sup>, DONG Ze-xi<sup>1</sup>, GUO Shi-bo<sup>1</sup>

(1. School of Materials Science and Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China; 2. School of Civil and Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China)

**ABSTRACT:**  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Cu}$  composite powder was prepared by solution combustion synthesis and hydrogen reduction method using copper nitrate, aluminum nitrate, glucose and urea as raw materials. The  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Cu}$  composite powder was uniformly mixed with the pore-forming agent sodium chloride, and then the mixed powder was cold-pressed. Finally, the  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Cu}$  porous composite material (A-C-M) was prepared by sintering-dissolution process. The microstructure of powder raw materials and A-C-M were characterized by X-ray diffraction (XRD) and scanning electron microscopy (SEM). The compression performance of A-C-M was tested by universal testing machine. The effect of glucose addition on the combustion product powder was studied. The effect of  $\text{Al}_2\text{O}_3$  content on the compression performance of A-C-M was discussed. The results show that when the molar ratio of glucose to  $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$  is 1, the specific surface area of the combustion product reaches a maximum of  $12.5 \text{ m}^2\cdot\text{g}^{-1}$ . After the combustion product is calcined to remove carbon, the pores of the powder particles increase, but the specific surface area is reduced to  $10.2 \text{ m}^2\cdot\text{g}^{-1}$  due to the sintering effect of high temperature calcination. After the calcination product was reduced by hydrogen, the powder particles were broken into floccules. However, due to the sintering effect of high reduction temperature, the specific surface area of the obtained  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Cu}$  composite

收稿日期: 2023-10-20; 修订日期: 2023-11-05

基金项目: 国家自然科学基金 (52174344); 湖南省自然科学基金 (2023JJ30222, 2021JJ30250); 湖南省大学生创业训练项目 (S202210534024X)。

\*通信作者: 储爱民 (1975—), 男, 教授, 博士, 主要从事粉末冶金新技术与纳米材料制备研究, 发表论文 50 余篇, E-mail: chuaiminandzyp@163.com。

powder was further reduced to  $7.5 \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ . With the increase of  $\text{Al}_2\text{O}_3$  content, the porosity of A-C-M increases gradually, and its compressive strength decreases gradually.

**Keywords:**  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Cu}$  porous composites; solution combustion synthesis; glucose; porosity; compressive properties

多孔铜基复合材料因其高孔隙率、导热性和导电性等优异性能，成为工业中广泛应用的 材料，如散热器、燃料电池、催化剂和多孔电极等<sup>[1-4]</sup>。多孔铜基复合材料的制备通常采 用粉末冶金、电沉积、熔融单向凝固和铸造法<sup>[5-7]</sup>等方法。在这些方法中，使用造孔剂的粉 末冶金法因其工艺简单和成本低廉，研究和应用较为广泛，其中造孔剂使用不同的金属盐 或者有机物，如碳酸钾，氯化钠，尿素等<sup>[8-10]</sup>。

在粉末冶金法中，原料粉末是决定材料性能和制造成本的关键，要获得高性能的  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Cu}$  多孔复合材料 (A-C-M)，需要首先制备出高纯度、细粒度和  $\text{Al}_2\text{O}_3$  颗粒细小且 掺杂分布均匀的  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Cu}$  复合粉末原料。 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Cu}$  复合粉末的制备方法很多，常见方法有 内氧化法<sup>[11]</sup>、原位合成法<sup>[12]</sup>、共沉淀法<sup>[13]</sup>等。其中，原位合成法包括溶液燃烧合成法<sup>[14]</sup>和 搅拌铸造法<sup>[15]</sup>等。溶液燃烧合成法具有成本低，反应速度快，产物比表面积高等优点。研 究表明，溶液燃烧反应过程中，燃料对燃烧产物的结构、相和形态有显著的影响<sup>[16]</sup>，而有 机碳源对燃烧产物及后续产物能起到均匀分散的作用<sup>[17]</sup>。

本文以硝酸铜，硝酸铝，葡萄糖，尿素和氯化钠为原料，首先采用溶液燃烧合成法制 备燃烧产物，然后将燃烧产物在空气中煅烧除碳，再将煅烧产物进行氢还原得到  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Cu}$  复合粉末，最后结合混粉-烧结-脱溶的粉末冶金工艺制备出 A-C-M。考查了原料中有机碳 源（葡萄糖）含量对燃烧产物粉末的影响；并对煅烧产物和氢还原产物与燃烧产物进行了 表征和对比分析；研究了 A-C-M 的孔径分布和显微结构规律；探究了  $\text{Al}_2\text{O}_3$  添加量对 A-C-M 实际孔隙率和压缩性能的影响。

## 1 实验材料及方法

### 1.1 原料

采用硝酸铜，硝酸铝，葡萄糖，尿素和氯化钠为原料。其中硝酸铜作为铜源，硝酸铝 作为  $\text{Al}_2\text{O}_3$  增强相的来源，尿素作为燃料，葡萄糖作为分散剂，氯化钠作为造孔剂。

### 1.2 实验方法

各原料的加入量均为优化配比：0.1 mol 硝酸铜 ( $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ )、0.005 mol 硝酸铝 ( $\text{Al}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ )、0.16 mol 尿素 ( $\text{CON}_2\text{H}_4$ ) 和 0~0.15 mol 的葡萄糖 ( $\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6$ )，合成燃 烧产物时设置的四组葡萄糖添加量分别为 0、0.05、0.1、0.15mol。将各原料加入装有 150 mL 去离子水的反应釜中，使溶液混合均匀，将反应釜置于 SK-4-10 万能电阻炉上加热， 加热温度为 200 °C。溶液在经历水分蒸发和浓缩冒泡后，突然发生膨胀，同时放出大量气 体，并引发自蔓延燃烧，体系温度迅速升高，膨胀物迅速转变为黑色产物，燃烧持续 1~2 min，反应结束后，得到疏松的燃烧产物。将燃烧产物放入马弗炉中，在 650 °C 下煅烧 1 h 得到除碳产物，然后于 500 °C 氢气中还原 2 h 获得  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Cu}$  复合粉末。

采用磁力搅拌器将  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Cu}$  和氯化钠混合均匀，然后利用 WHY-600 压力试验机将  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Cu}$ /氯化钠混合粉末冷压成形获得压坯，成形模具直径为 15 mm，保压 1 min，压力 为 300 MPa。将压坯放入 SK-4-10 管式炉在 940 °C 氢气氛围下保温 3 h 进行烧结，升温速率 为 8 °C·min<sup>-1</sup>。然后将烧结试样放入 90 °C 热水中浸泡 0.5 h 后，在管式炉中以氩气为保护气 体于 100 °C 下烘烤 3 h，得到 A-C-M。图 1 为制备 A-C-M 的工艺流程图。

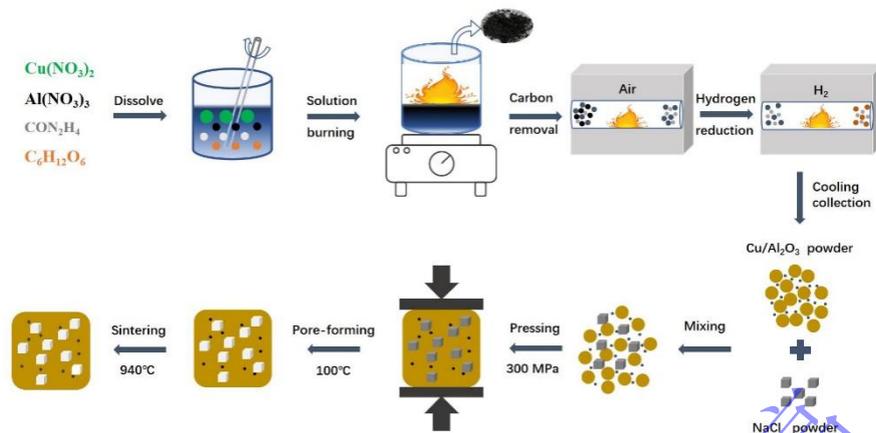


图 1 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Cu 多孔复合材料的制备工艺流程图

Fig.1 Preparation process flow chart of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> / Cu porous composites

### 1.3 测试与表征

采用 D8-Advance 型 X 射线衍射分析仪分析燃烧产物、除碳产物及氢还原产物的物相。采用 Mastersizer 3000 型激光粒度仪测量燃烧产物、除碳产物及氢还原产物的比表面积。采用 JSM-63380LV 型扫描电子显微镜观察燃烧产物、除碳产物、氢还原产物粉体以及烧结块体表面的形貌。采用万能试验机 (RGM-100) 测试 A-C-M 的压缩性能。利用电子分析天平, 采用阿基米德排水法测定 A-C-M 的密度, 材料孔隙率  $P$  为 100% 减去实际测得材料的密度 ( $\rho_s$ ) 与致密材料密度 ( $\rho_0$ ) 的比值, 如式 1-1 所示<sup>[18]</sup>:

$$P = [1 - (\rho_s / \rho_0)] \times 100\% \quad (1-1)$$

致密化应变评估是根据 DIN 50134 标准《金属多孔材料的压缩实验》确定的, 其中平均应力在应变 20~30% 范围内取得, 平台应力为该平均应力的 1.3 倍。所有样品的压缩实验按照工业标准 JIS H 7902 《多孔金属的压缩试验方法》进行测试和分析<sup>[19]</sup>, 应力计算公式如式 1-2 所示,  $F$  为载荷,  $A$  为截面积, 通过计算应力应变曲线下的面积来确定试样的能量吸收  $W$ , 能量吸收表达式如式 1-3 所示,  $\sigma$  表示样品应力,  $\varepsilon$  表示应变:

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (1-2)$$

$$W = \int_0^{\varepsilon_D} \sigma d\varepsilon \quad (\text{MJ} \cdot \text{m}^{-3}) \quad (1-3)$$

## 2 结果与讨论

### 2.1 燃烧产物的物相及形貌分析

图 2 为不同 C/Cu 比例制备燃烧产物的 XRD 图谱。由图 2 可知, 当 C/Cu 为 0 时 (未添加葡萄糖), 燃烧产物的主要物相组成为氧化铜 (如图 2(a)); 当 C/Cu 为 0.5~1.5 时, 燃烧产物的主要物相组成为铜、氧化铜和氧化亚铜。然而, 因 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 含量较低或 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 可能以无定形态存在的缘故<sup>[20]</sup>, XRD 图谱中未出现 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 对应的衍射峰。

加热过程中分解的氧化性和还原性气体发生氧化还原放热反应, 使硝酸盐转化为 CuO 和 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (式(1-4)和式(1-5)), 葡萄糖裂解为碳 (式(1-6))。加入葡萄糖后, 燃烧产物均出现了氧化亚铜和铜 (图 2(b)-(d)), 为燃烧过程中生成还原性气体 CO (式(1-7)) 与氧化铜发生还原反应而成 (式(1-8))。此外, 随葡萄糖量逐渐增加, XRD 图谱中衍射峰逐渐宽化, 馒头峰逐渐增强。原因可能是: 一方面, 随葡萄糖量增大, 其分解需要吸收大量的能量, 导致反应体系温度降低, 燃烧产物结晶差; 另一方面, 葡萄糖分解生成的无定形 C 增加 (式(1-6)), 使无定形的馒头峰增强。



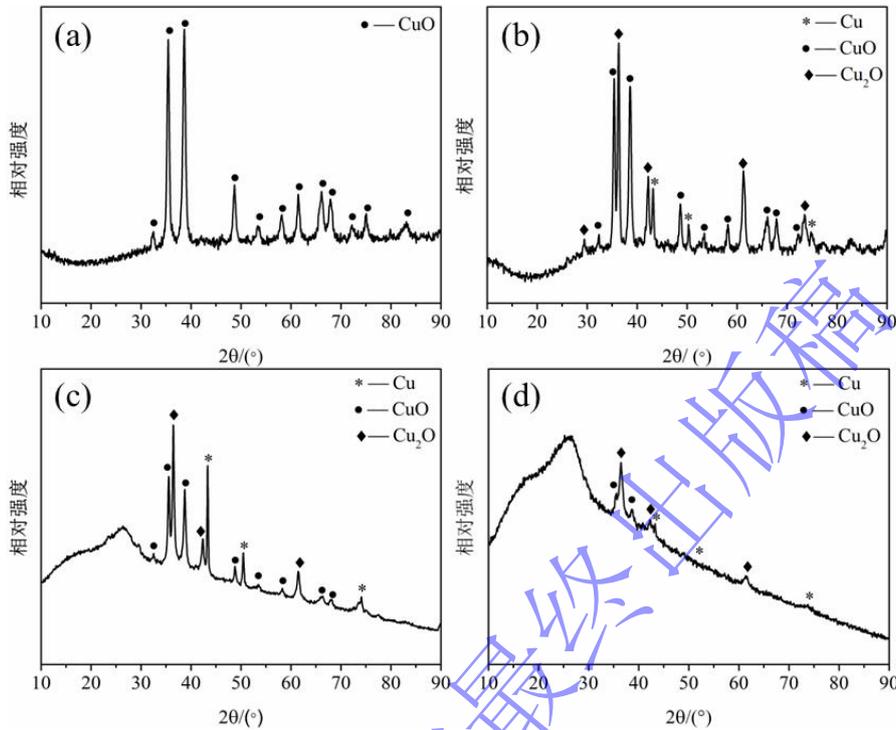
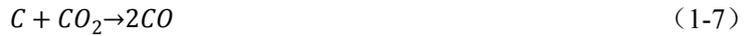
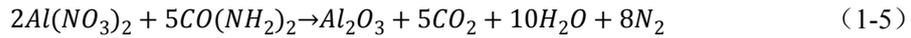


图2 不同 C/Cu 制备燃烧产物的 XRD 图谱

(a) 0; (b) 0.5; (c) 1; (d) 1.5

Fig.2 XRD patterns of the combustion products prepared with various C/Cu ratios

(a) 0; (b) 0.5; (c) 1; (d) 1.5

图3 为不同 C/Cu 条件下燃烧产物粉末的比表面积。由图3可知，当 C/Cu 为 0~1 时，燃烧产物粉末的比表面积随葡萄糖量增加而增大，当 C/Cu 为 1 时，燃烧产物粉末的比表面积达到了最大值，为  $12.5 \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ ；继续增加葡萄糖量，燃烧产物粉末的比表面积开始减小，C/Cu 为 1.5 时减小至  $7.2 \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ 。

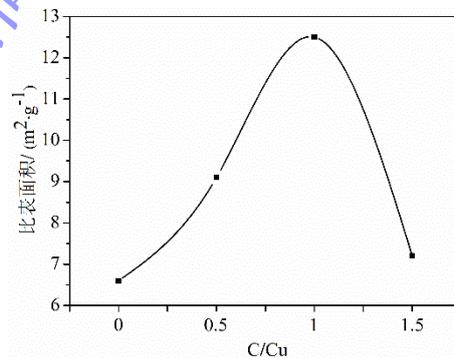


图3 不同 C/Cu 燃烧产物的比表面积

Fig.3 Specific surface area of the combustion products prepared with various C/Cu ratios

图4 为不同 C/Cu 制备燃烧产物的 SEM 形貌图。由图4(a)-(d)知，随着葡萄糖量的增加，粉末颗粒尺寸呈现出先增大后减小，然后又增大的趋势，且颗粒尺寸及表面形貌也发生了相应的变化。未添加葡萄糖时 (C/Cu=0)，粉末颗粒平均尺寸最小，且颗粒表面出现了大

量孔洞（图 4(a1)），归因于燃烧体系反应剧烈，瞬间形成大量气体冲击粉末颗粒表面而产生较多孔洞，另外，因没有葡萄糖的裂解吸热，体系燃烧温度高，对粉末颗粒产生较强的类似烧结的致密化作用<sup>[21]</sup>，这也是导致该样品比表面积最低的原因（图 3）；C/Cu 为 0.5 时，粉末颗粒平均尺寸增加，颗粒表面的孔洞数量明显减少，这是因为当添加一定量葡萄糖时，其裂解吸收了一定的能量使得体系温度下降，导致燃烧反应速度下降或反应时间延长，放出气体量相对较分散，对产物粉末的冲击分散作用减弱，因此生成颗粒尺寸变大，粉末颗粒表面的孔洞减少，但因葡萄糖的添加量相对较小，体系温度仍然较高，对粉末颗粒也产生了轻微的类似烧结作用，使粉末颗粒团聚成较大的疏松颗粒（图 4(b1)），因此相对未添加葡萄糖样品，其比表面积反而增大（图 3）；当葡萄糖量继续增加时（C/Cu 为 1），葡萄糖裂解释放一定量气体，对产物粉末也起到一定分散作用，因而粉末颗粒尺寸减小，然而体系反应剧烈程度的降低也使产物气体的释放不集中，对产物粉末的瞬间冲击作用减弱，因而颗粒表面仅出现少量孔洞（图 4(c1)），但同时因葡萄糖量的增加降低了体系的燃烧温度，也使高温导致的烧结作用大大减弱，因此产物粉末的比表面积迅速增加，达到了最大值（ $12.5 \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ ）。当葡萄糖量继续增加时（C/Cu 为 1.5），粉末颗粒的尺寸却又增大，这是因过量葡萄糖的裂解吸收了体系过多能量，使其燃烧放气过程延长，释放气体对粉末颗粒的冲击分散大大降低，使得颗粒尺寸增大（图 4(d1)），比表面积降低（ $7.2 \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ ）。

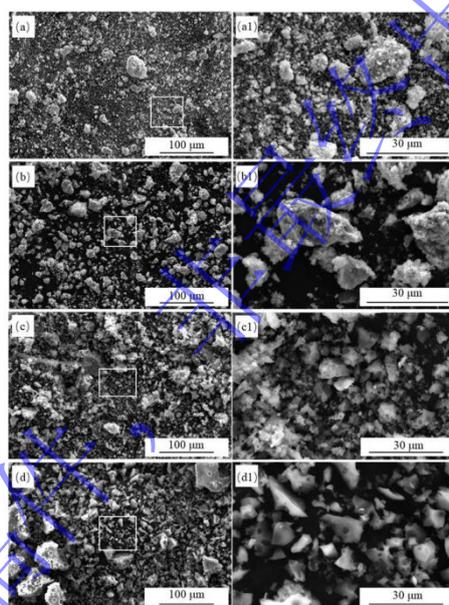


图 4 不同 C/Cu 比下制备燃烧产物的 SEM 图

(a) 0; (b) 0.5; (c) 1; (d) 1.5

Fig.4 SEM images of the combustion products prepared with various C/Cu ratios

(a) 0; (b) 0.5; (c) 1; (d) 1.5

## 2.2 煅烧产物的物相及形貌分析

图 5 为 C/Cu=1 除碳产物的 XRD 图。由图 5 可知，图谱中仅出现了 CuO 衍射峰，未发现  $\text{Al}_2\text{O}_3$  衍射峰，可能是因为  $\text{Al}_2\text{O}_3$  含量较少或  $\text{Al}_2\text{O}_3$  以无定形态存在的缘故。而燃烧产物中的 Cu 和  $\text{Cu}_2\text{O}$  在煅烧过程中全部转变为 CuO，反应方程分别如式 (1-9) 和 (1-10)。



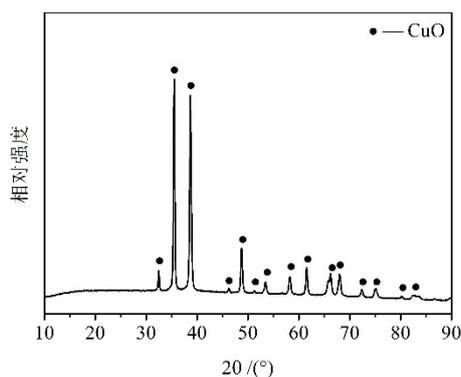


图 5 煅烧产物的 XRD 图

Fig.5 XRD pattern of the calcined product

C/Cu 为 1 制备的燃烧产物在空气中煅烧后得到除碳产物粉末。图 6 为 C/Cu=1 时获得除碳产物的 SEM 图。由图 6 可知，粉末颗粒均匀分散且表面出现大量孔洞，这些孔洞是由于燃烧产物中的碳发生氧化去除后形成，反应如式(1-11)。燃烧产物粉未经煅烧反应后，煅烧产物的比表面积为  $10.2 \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ ，相比对应的燃烧产物 ( $12.5 \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ )，其比表面积略微减少。这是因为，由图 6(a1) 与图 4(c1) 对比可知，尽管碳去除后形成了的大量孔洞，使粉末末颗粒表现为蜂窝状，但煅烧的高温使颗粒发生了烧结作用，降低了煅烧产物的比表面积。

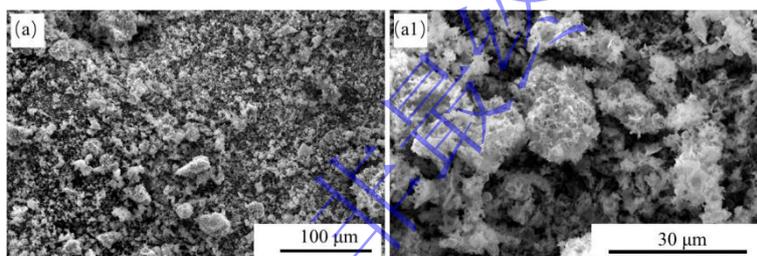


图 6 煅烧产物的 SEM 图

Fig.6 SEM images of the calcined product

### 2.3 氢还原产物的物相及形貌分析

将煅烧产物经氢还原后获得还原产物，图 7 为氢还原产物的 XRD 图谱。由图 7 可知，XRD 图谱中出现了 Cu 和  $\text{Al}_2\text{O}_3$  的衍射峰，表明煅烧产物中的 CuO 在氢还原过程中完全还原为 Cu (式(1-12))，而  $\text{Al}_2\text{O}_3$  也由煅烧产物的无定形态转变为结晶态。

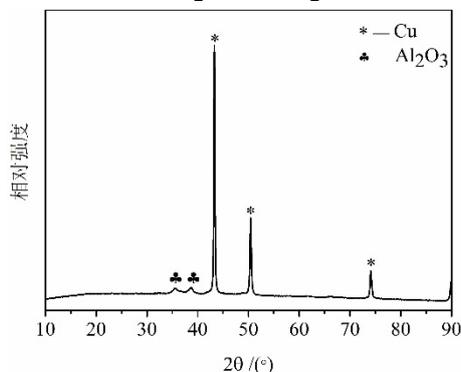


图 7 氢还原产物的 XRD 图

Fig.7 XRD pattern of the hydrogen reduction product

图 8 为还原产物的 SEM 图。由图 8 可知，相比煅烧产物（图 6），还原产物粉末颗粒由蜂窝状进一步破碎变为絮状，颗粒尺寸分布更均匀。实际上，煅烧产物粉末经氢还原后，比表面积由煅烧产物的  $10.2 \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$  减小为还原产物的  $7.5 \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ ，主要归因于氢还原过程中长时间高温产生的粉末颗粒烧结作用<sup>[22]</sup>，导致还原粉末颗粒的致密化。

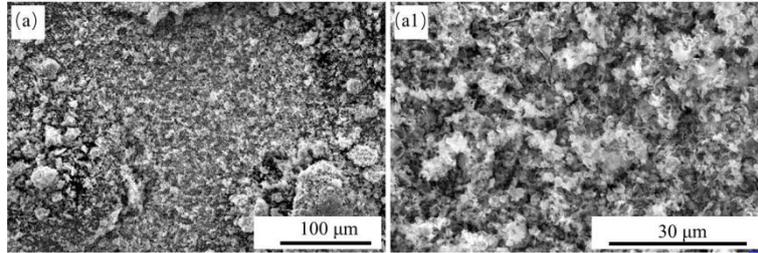


图 8 氢还原产物的 SEM 图

Fig.8 SEM images of the hydrogen reduction products

#### 2.4 A-C-M 的性能分析

图 9 为不同氧化铝含量烧结样品的 SEM 图（氯化钠含量均为 70%）。由图 9(a)-(c)可以明显看出，各试样表面孔的形貌与氯化钠颗粒的形貌基本一致。图 9(a1)-(c1)为各试样表面局部放大 SEM 图。由图 9(a1)可知，Cu 基体表面光滑，且 Cu 基体之间有明显的烧结颈存在。随着  $\text{Al}_2\text{O}_3$  含量的增加（图 9(a1)-(c1)），Cu 基体表面  $\text{Al}_2\text{O}_3$  颗粒数量逐渐增多，Cu 基体之间的烧结颈逐渐减少，且孔洞间隙变大。这是由于  $\text{Al}_2\text{O}_3$  与 Cu 基体结合性较弱， $\text{Al}_2\text{O}_3$  颗粒一定程度地阻碍了烧结颈的形成，导致微观小孔逐渐增多<sup>[23]</sup>。

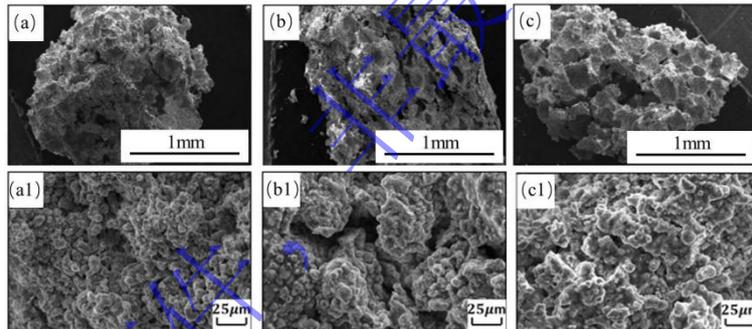


图 9 不同  $\text{Al}_2\text{O}_3$  含量的 A-C-M 的 SEM 图

(a) 0.05 mol%; (b) 0.10 mol%; (c) 0.15 mol%

Fig.9 SEM images of A-C-M with various  $\text{Al}_2\text{O}_3$  contents

(a) 0.05 mol%; (b) 0.10 mol%; (c) 0.15 mol%

不同  $\text{Al}_2\text{O}_3$  含量 A-C-M 的孔隙率如图 10 所示，其中各试样的氯化钠添加量均为 70 vol%。由图 10 可知，随  $\text{Al}_2\text{O}_3$  含量的增加，A-C-M 的孔隙率也逐渐增加。由于  $\text{Al}_2\text{O}_3$  颗粒与 Cu 基体互不相溶，阻碍了 Cu 基体之间的结合，因此  $\text{Al}_2\text{O}_3$  含量越多，Cu 基体之间的烧结致密化效果越差，基体之间的微观小孔增多，这与 A-C-M 微观形貌（图 9）分析结果一致。

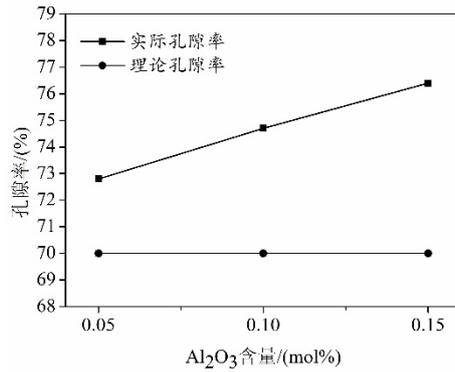


图 10 不同 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 含量的 A-C-M 的孔隙率

Fig.10 Porosity of A-C-M with various Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> contents

图 11 为不同 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 含量 A-C-M 的压缩应力-应变曲线图。对于 A-C-M 的应力-应变曲线可分为 3 个阶段<sup>[23]</sup>: 1) 随着材料应变量的增大, 应力随之增大的弹性变形阶段; 2) 材料应变继续增大, 应力基本保持不变的应力平台阶段; 3) 应变基本不变, 而应力增大的致密化阶段。由图 11 可知, 曲线变化与规律基本一致, 另外, 随着 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 含量继续增加, A-C-M 的抗压强度逐渐减小。平台应力和吸收能是多孔金属材料重要的力学性能参数<sup>[24]</sup>。根据公式 (2), 将不同 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 含量 A-C-M 的平台应力和吸收能进行计算, 结果如表 1 所示。由表 1 可知, A-C-M (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 含量为 0.05~0.15 mol%) 的平台应力和吸收能分别在 0.91~4.29 MPa 和 22.91~49.04 MJ·m<sup>-3</sup> 范围。

表 1 不同 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 含量的 A-C-M 的力学性能 (氯化钠含量均为 70 vol%)

Table 1 Mechanical properties of the A-C-M with various Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> contents (NaCl content is 70 vol%)

Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 含量/mol%	0.05	0.10	0.15
平台应力 $\sigma$ /MPa	4.29	2.32	0.91
吸收能 $W$ /(MJ·m <sup>-3</sup> )	37.35	49.04	22.91

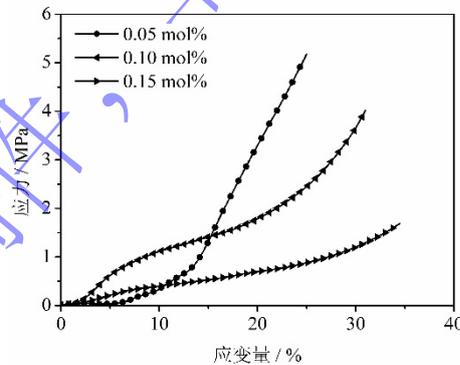


图 11 不同 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 含量的 A-C-M 的压缩应力-应变曲线

(a) 0.05 mol%; (b) 0.10 mol%; (c) 0.15 mol%

Fig.11 Compressive stress-strain curves of A-C-M with various Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> contents

(a) 0.05 mol%; (b) 0.10 mol%; (c) 0.15 mol%

### 3 结论

- 1) 以硝酸铜、硝酸铝、尿素和葡萄糖为原料, 采用溶液燃烧法制备前驱物粉末, 当 C/G 为 1 时, 前驱物的比表面积达到最大, 为 12.5 m<sup>2</sup>·g<sup>-1</sup>。
- 2) 以 C/Cu 为 1 时制备的燃烧产物粉末为原料, 在 650 °C 下空气中煅烧 1 h 可合成 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/CuO 复合粉末, 其比表面积为 10.2 m<sup>2</sup>·g<sup>-1</sup>, 且粉末颗粒表面出现大量孔洞。
- 3) 以 C/Cu 为 1 时制备的 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/CuO 煅烧产物为原料, 在 500 °C 下通氢气还原 2 h 可合成 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Cu 复合粉末, 其表面积为 7.5 m<sup>2</sup>·g<sup>-1</sup>。

- 4) A-C-M 表面孔的形貌与造孔剂氯化钠的形貌基本一致；随着  $\text{Al}_2\text{O}_3$  含量的增加，A-C-M 的孔隙率逐渐增加，其抗压缩强度逐渐降低。

#### 参考文献

- [1] Qiu T W, Liu M, Liu Y, et al. Development of new porous copper microchannel radiator. *Low Temperature and Superconductivity*, 2020, 48(8): 85  
(裘腾威, 刘敏, 刘源, 等. 新型多孔铜微通道散热器研制. 低温与超导, 2020, 48(8): 85)
- [2] Lei Z X, Xie G, Chen Z J. Preparation and energy storage performance of three-dimensional porous  $\text{VxOy@Cu}$  composite anode materials for lithium-ion batteries. *Journal of Tianjin Polytechnic University*, 2021, 40(6): 47  
(雷中祥, 解刚, 陈泽钧. 锂离子电池用三维多孔  $\text{VxOy@Cu}$  复合负极材料的制备及其储能性能. 天津工业大学学报, 2021, 40(6): 47)
- [3] Zhang S S, Ju C Y, Huang B S, et al. Preparation and catalytic oxidation properties of porous Cu-Cr alloy. *Transactions of Materials and Heat Treatment*, 2020, 41(6): 91  
(张顺顺, 鞠春燕, 黄本生, 等. 多孔铜铬合金的制备及催化氧化性能. 材料热处理学报, 2020, 41(6): 91)
- [4] Wang K, Zhang G G, Shao Z S, et al. Electrodeposition porous copper electrode as cathode electrode stabilization of p-nitrophenol. *Water & Wastewater*, 2022, 58(11): 64  
(王锷, 张国光, 邵志松, 等. 电沉积多孔铜电极作阴极电极芬顿降解对硝基苯酚. 给水排水, 2022, 58(11): 64)
- [5] Wang Q Z, Li N, Wang Q, et al. Pore morphology and compressive properties of open-celled porous Cu fabricated by using NaCl as pore former. *Materials for Mechanical Engineering*, 2011(4): 53  
(王清周, 李诺, 王倩, 等. 以 NaCl 为造孔剂制备开孔多孔铜的孔隙形貌及压缩性能. 机械工程材料, 2011(4): 53)
- [6] Li F F, Zhang F. Preparation method and application of porous metal material. *China Foundry Machinery & Technology*, 2021, 56(1): 82  
(李斐斐, 张芳. 多孔金属材料的制备方法及应用. 中国铸造装备与技术, 2021, 56(1): 82)
- [7] Zheng M, Yang J, Zhang H. Review on preparation and applications of porous metal materials. *Materials Reports*, 2022, 36(18): 74  
(郑敏, 杨瑾, 张华. 多孔金属材料的制备及应用研究进展. 材料导报, 2022, 36(18): 74)
- [8] Sabzevari M, Sajjadi S A, Moloodi A. Physical and mechanical properties of porous copper nanocomposite produced by powder metallurgy. *Advanced Powder Technology*, 2016, 27(1): 105
- [9] Ye B, Dunand D C. Titanium foams produced by solid-state replication of NaCl powders. *Materials Science and Engineering: A*, 2010, 528(2): 691
- [10] Shrivastava S, Pandey A, Dubey R, et al. Studies on microstructure, mechanical properties, and corrosion behavior, of partially open-cell magnesium foam through powder metallurgy route. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2022, 31: 8840
- [11] Ma S, Guo S Q, Su X, et al. Effect of oxygen source coefficient on properties of  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Cu}$  composites prepared by internal oxidation. *Shanghai Metal*, 2018, 40(3): 59  
(马帅, 郭曙强, 苏新, 等. 氧源系数对内氧化法制备的  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Cu}$  复合材料性能的影响. 上海金属, 2018, 40(3): 59)
- [12] Li G B, Sun J B, Guo Q M, et al. Morphology and Frictional Characteristics Fabrication of the nanometer  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Cu}$  composite by internal oxidation. *Journal of Materials Processing Technology*, 2005, 17: 336
- [13] Fu X L, Li C B. Study on freezing wear of nano- $\text{Al}_2\text{O}_3$ -reinforced copper matrix composites prepared by co-precipitation. *New Technology and New Technology*, 2009, (5): 87

- (符学龙, 李春波. 共沉淀法制备纳米  $\text{Al}_2\text{O}_3$  强化铜基复合材料微动磨损研究. 新技术新工艺, 2009, (5): 87)
- [14] Chu A M, Guo Z Q, Zhao Y P, et al. Study on preparation of  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Cu}$  composite powder by NaCl-assisted low-temperature combustion synthesis method. *Mining and Metallurgical Engineering*, 2019, 39(6): 133  
(储爱民, 郭自强, 赵玉萍等. NaCl 辅助低温燃烧合成法制备  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Cu}$  复合粉末的研究. 矿冶工程, 2019, 39(6):133)
- [15] Raju L S, Kumar A. A Novel Approach for Fabrication of  $\text{Cu}/\text{Al}_2\text{O}_3$  Surface Composites by Friction Stir Processing. *Procedia Materials Science*, 2014, (5) : 434
- [16] Siddique F, Gonzalez-Cortes S, Mirzaei A, et al. Solution combustion synthesis: The relevant metrics for producing advanced and nanostructured photocatalysts. *Nanoscale*, 2022, 14(33): 11806
- [17] Chen P Q, Qin M L, Chen Z, et al. A Novel Approach to Synthesize the Amorphous Carbon-Coated  $\text{WO}_3$  with Defects and Excellent Photocatalytic Properties. *Materials Design*, 2016, 106: 22
- [18] Wang J Z, Ao Q B, Ma J, et al. Preparation and compression properties of titanium alloy fiber porous materials. *Powder Metallurgy Technology*, 2023, 41(2):125  
(王建忠, 敖庆波, 马军, 等. 钛合金纤维多孔材料制备及压缩性能. 粉末冶金技术, 2023, 41(2): 125)
- [19] Japanese Industrial Standards Committee. JIS-H-7902 *Method for Compressive Test of Porous Metals*. Japanese Standards Association, Tokyo, 2008
- [20] Chu A M, Wang Z Q, Wang L, et al. Preparation of  $\text{Y}_2\text{O}_3/\text{Cu}$  composite powder. *Mining and Metallurgical Engineering*, 2017, 37(6): 109  
(储爱民, 王志谦, 王龙, 等.  $\text{Y}_2\text{O}_3/\text{Cu}$  复合粉末的制备研究. 矿冶工程, 2017, 37(6): 109)
- [21] Cao Z Q, Qin M L, Chu A M, et al. Glucose-assisted combustion-nitridation synthesis of well-distributed CrN nanoparticles. *Materials Research Bulletin*, 2014,52: 74
- [22] Chen P Q, Tai Y X, Cheng J G. Study on preparation and sintering properties of  $\text{Mo-La}_2\text{O}_3$  nanopowders by solution combustion method. *Powder Metallurgy Technology*, 2021, 39(3): 203  
(陈鹏起, 台云霄, 程继贵. 溶液燃烧法制备  $\text{Mo-La}_2\text{O}_3$  纳米粉体及烧结性能的研究. 粉末冶金技术, 2021, 39(3): 203)
- [23] Yang T, Tong H Y, Zheng Y, et al. Micromorphology and compressive properties of  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Cu}$  porous composites. *Journal of Materials and Heat Treatment*, 2023, 44(10): 42  
(杨腾, 佟海云, 郑毅, 等.  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Cu}$  多孔复合材料的微观形貌和压缩性能. 材料热处理学报, 2023, 44(10): 42)
- [24] Andrews E W, Gibson L J, Ashby M F. The creep of cellular solids. *Acta Materialia*, 1999, 47(10): 2853