

基于 NaCl Beads 制备的泡沫 Al 孔结构控制与表征

贾建刚, 井勇智, 刘第强, 郭铁明, 季根顺

(兰州理工大学 省部共建有色金属先进加工与再利用国家重点实验室, 甘肃 兰州 730050)

摘要: 以淀粉、蒸馏水、NaCl 粉末为原料, 混合制成胶状盐团后 70 °C 油浴加热, 同时在机械搅拌剪切的作用下得到球形度较高的 NaCl 小球, 然后经高温烧结获得粒径分布主要在 0.4~2.4 mm, 表面分布有少量微孔 (孔径 10~20 μm) 且纯净度很高的 NaCl 小球。选用 0.6~1.0 mm 的盐球作为造孔剂, 利用 Autotap 震动将铝粉填入“盐床”缝隙, 再经 200 MPa 冷压成型后获得生坯, 然后在蒸馏水中浸泡将盐球溶解去除, 最后在 460 °C 下烧结 2 h 得到结构可控且工艺重现性很高的三维连通开孔性泡沫铝, 其相对密度与孔隙率分别为 0.217 和 78.3%。泡沫铝胞洞之间的连通窗口数量平均在 4~6 个, 窗口尺寸在 120~200 μm 之间; 压缩载荷-位移曲线表明, 泡沫铝在压缩变形过程中经历了弹性变形阶段-坪应力区-应力陡增阶段, 表现出典型的泡沫金属压缩力学性能特点, 其最大抗压强度与杨氏模量分别是 2.42 MPa 和 0.38 GPa。

关键词: 造孔剂; 盐球; 泡沫铝; 多孔材料; 粉末冶金

中图分类号: TF125.6; TG146.21

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2019)10-3275-07

泡沫材料也称多孔材料, 具有密度低、比模量和比强度高、导电导热性低等特点^[1,2]。根据孔洞性质可分为开孔或闭孔多孔材料。闭孔泡沫材料较多应用在结构承载与能量吸收方面, 这是由于它能够致密材料的高强度特点与多孔材料的降重吸能性质良好结合; 开孔材料则应用在过滤、消音屏蔽、生物移植、催化剂载体、热交换等方面^[3-5]。这些应用有一个共同的特点就是利用孔洞的相互连通, 使介质能够通过材料内部, 并且高连通性可大大降低材料的刚度, 从而使产品达到或传质或降噪或降低力学性能的不同使用要求。此外, 开孔多孔材料的制备工艺众多, 且材料应用范围广泛, 因此成为当前的研究热点。

利用添加造孔剂法并结合粉末冶金技术制备内部连通的开孔多孔材料, 工艺过程易于控制。其中造孔剂对所制备产品的孔洞形貌、孔径尺寸、孔隙率、内部连通性以及力学性能至关重要。起初研究者利用球状碳酸氢铵颗粒 (粒径在 200~500 μm) 作为造孔剂与金属粉末进行充分搅拌混合均匀后装入模具中压制成型, 然后在低温下长时间保温处理使碳酸氢铵挥发以达到去除目的, 最后高温烧结成型; 这种方式对孔洞规则度与孔径都可控制, 但原料经过搅拌混合后压制所得的试样在空间结构上会存在一定数量的闭孔, 且在低温去除碳酸氢铵时释放大量气体, 容易使试样结构发生松弛^[6,7],

影响后期烧结产物的力学性能。而采用 NaCl 晶体作造孔剂时, 可通过溶解的方式去除, 这就避免了因造孔剂产生气体对结构造成的破坏。但 NaCl 晶体的立方形状使得形成的多孔材料结构强度较低, 同时降低了试样内部的连通性, 导致在去除造孔剂时的溶解速率很低, 使得造孔剂残留在坯体中的概率增加, 进而在烧结阶段造成 NaCl 对基体材料的腐蚀现象; 另外, 所得坯体还是 NaCl 与粉末搅拌混合压制所得, 这依旧会导致孔隙分布的均匀性受限。因此, 利用这种带有棱角形态的造孔剂无法有效控制多孔材料的结构与力学性能^[8-10]。

通过特殊工艺制备近球形的造孔剂, 可以获得结构规则、连通性高的开孔材料, 并解决造孔剂快速溶解的问题。这种近球形造孔剂是将淀粉、蒸馏水、NaCl 粉体混合, 在恒温油浴条件下进行搅拌成球和硬化, 经过烧结得到粒径在 1~7 mm 的 NaCl 球, 这种工艺所制盐球其表面存在一定数量的微孔, 有利于快速溶解^[10-12]。本实验在优化球形 NaCl 制备工艺基础上, 基于粉末冶金技术构筑了结构可控的多孔 Al, 并对其结构和性能进行初步研究。该方法亦可移植于其它多孔金属的开发制备过程, 具备较好的普适性。

1 实验

1.1 NaCl Beads (盐球) 的制备

收稿日期: 2018-10-29

基金项目: 国家自然科学基金 (51461029); 甘肃省科技重大专项计划 (1602GKDD012)

作者简介: 贾建刚, 男, 1977 年生, 博士, 副教授, 兰州理工大学材料科学与工程学院, 甘肃 兰州 730050, 电话: 0931-2973564, E-mail: lzjjjiajiangang@163.com

采用淀粉、蒸馏水和粒径小于 100 μm 的 NaCl 粉体为原料, 将 2 g 淀粉、10 mL 蒸馏水和 40 g NaCl 在烧杯中充分搅拌混合均匀后, 在 4 °C 下放置 24 h 或更长时间使其充分胶联。取一个 600 mL 烧杯并加入 200 mL 植物油, 将烧杯放置在恒温平台上加热至 70 °C。期间将盐团分数次缓慢加入烧杯, 以 1000 r/min 搅拌加热 7 min, 利用搅拌桨机械破碎获得盐球颗粒, 同时盐球中含有的淀粉在高温油浴过程中也进一步发生了交联硬化。炸制结束后将油滤出, 并用滤纸吸收盐球表面油污。采用箱式电阻炉将盐球在 740 °C 烧结 6 h 后随炉冷却, 以去除盐球中的淀粉、植物油等有机成分, 并使 NaCl 盐球烧结硬化。经孔径 2400~400 μm (8~40 目) 样品筛筛分, 可获得粒径分布在 0.4~2.4 mm 的洁净盐球。

1.2 可控多孔结构构筑

取 8 g 经筛分后尺寸在 0.6~1.0 mm 的盐球装入直径为 25 mm 的钢制模具中 (如图 1a 所示), 利用 Autotap 震实密度分析仪将盐球震实形成结构紧凑的“盐床”。然后装入 3.2 g 铝粉并放上顶杆, 每震动 100 次测量一次铝粉下降的位移高度, 直至高度方向不再发生位移变化, 此时粉末完全填充于“盐床”间隙, 该过程如图 1b, 1c, 1d 所示。然后对模具施加 200 MPa

压力, 获得盐球与铝粉末紧密结合的密实生坯; 生坯表面经 800#砂纸抛磨后, 用自来水将造孔剂溶出获得三维连通的泡沫铝素坯; 素坯在管式炉中氩气保护下 460 °C 烧结 2 h 后得到泡沫 Al 试样。

1.3 表征方法

利用傅里叶变换红外光谱仪 (Nexus670 FT-IR) 对经 50 °C 干燥 12 h 的盐团、油浴处理之后及烧结之后的盐球进行红外光谱检测; 利用体式显微镜和场发射扫描电子显微镜 (JSM-5600L) 观察盐球和泡沫 Al 烧结前后的宏观和微观形貌。

用精度为 0.1 mg 的电子天平称量泡沫铝的重量, 用游标卡尺测量直径与厚度, 进而计算泡沫 Al 试样的表观密度 (记作 ρ_0); 多孔试样骨架的密度采用纯铝的真实密度 (记作 ρ), 则泡沫铝的孔隙率 (ε) 与相对密度 (ρ_0/ρ) 之间的关系^[13]可表示为 $\varepsilon=(1-\rho_0/\rho)$ 。利用微机控制电子万能试验机 (MTS E.43) 测试多孔试样的压缩性能, 加载速度为 0.6 mm/min。

2 结果与讨论

2.1 NaCl Beads 的表征

图 2 所示为 NaCl 球的粒度分布和宏观及微观形貌。其中图 2a 是经油浴处理的盐球及其粒度分布。可以看出, 所制备的盐球呈椭球形。统计显示, 球径在 0.4~3.5 mm 之间, 其中盐球直径在 0.4~0.6 mm 之间的约 10%, 0.6~1.0 mm 约 40%, 1.0~1.2 mm 约 30%, 1.2~2.4 mm 约 15%, 大于 2.4 mm 约 5%, 图 2b 是经烧结并筛分后的宏观照片。其颜色由油浴后的淡黄色转变为亮白色, 表面较为光滑, 图中的左上、右上、左下、右下小图分别为粒径分布在 0.6~1.0、1.0~1.2、1.2~2.4、>2.4 mm 的盐球。图 2c 和图 2d 分别为盐球在 SEM 下放大 60 倍和 300 倍的形貌。可以看出, 盐球是由粒度约为 75 μm 不规则 NaCl 小晶体聚集而成, 小晶体之间形成烧结颈, 且有一定数量的微孔洞^[10], 直径在 10~20 μm 之间。

图 3a 示出了经干燥的盐团、油浴处理之后的盐球及烧结之后的盐球的红外光谱图, 图 3b 为盐球制备过程中涉及到的有机物分子结构图。其中淀粉是一种多糖聚合物 (结构见 3b 图上部), 其分子式通式为 $(C_6H_{10}O_5)_n$, 是一种六元环醚结构, 包含的官能团有 C-O 键, 羟基 (-OH), 亚甲基 (-CH₂-), 及醚键 (-O-) 与环醚连接构成的饱和直链烷基醚 (R-O-R')。淀粉中 R-O-R' 的峰域通常出现在 1125~1110 cm⁻¹ 区间, 而环醚支链醇中 C-O 键的伸缩振动一般出现在 1150~1050 cm⁻¹ 之间, 这样 2 个基团的振动峰就会发生重叠, 在图 3a 内 1 号谱线上的 1150~1070 cm⁻¹ 之间表现较为平

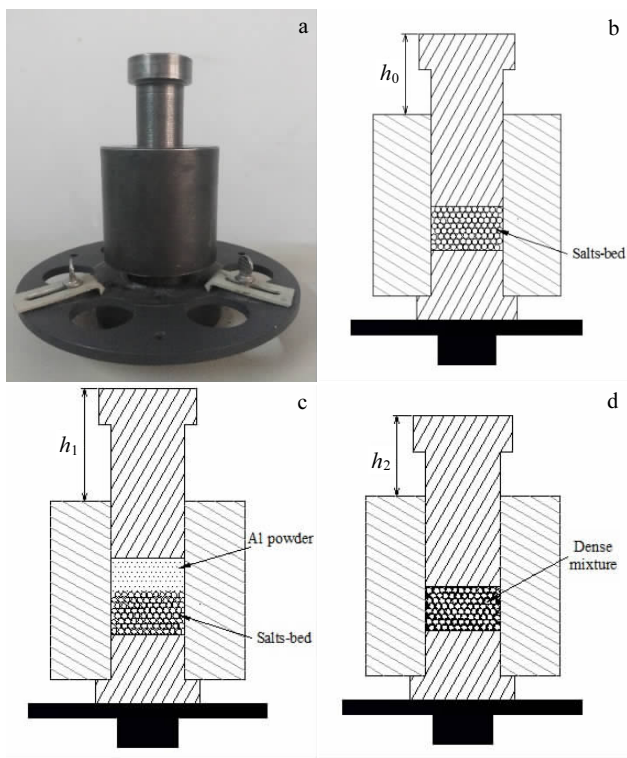


图 1 泡沫结构构筑过程示意图

Fig.1 Schematic process of foam structure construction

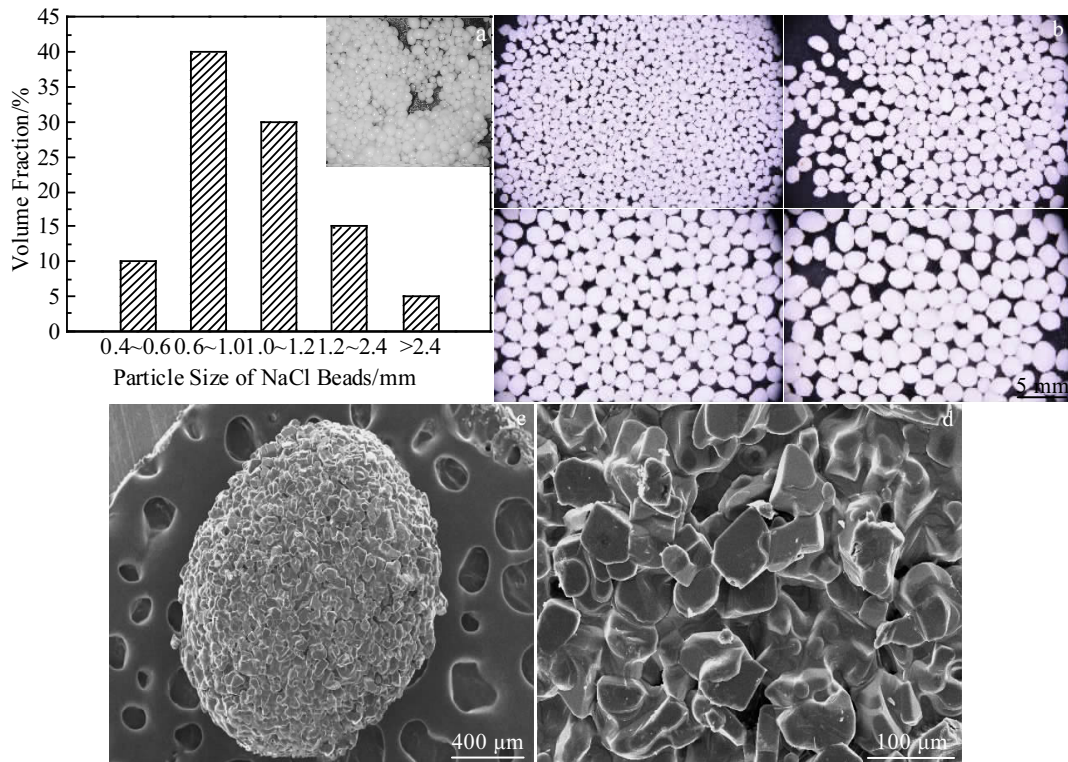


图 2 盐球的粒度分布和宏观与微观形貌

Fig.2 Particle size distribution (a), macroscopic (b), and microscopic (c, d) morphologies of NaCl beads: (b) OM morphology, (c) SEM morphology of salt spheres, and (d) SEM morphology of salt sphere surface

缓的一段峰域即为 R-O-R' 的检测峰, 同时醚环的六元环状使其环张力较小, 这就导致环上 C-O 键的伸缩振动向低波数偏移, 在 1 号谱线上 1030 cm^{-1} 处出现的峰便是环上 C-O 键所产生的。此外, 淀粉这种多糖类分子带有多个羟基 (-OH), 这些羟基的吸收峰叠加后造成吸收带变宽, 落在 $3570\sim 3050\text{ cm}^{-1}$ 之间, 1 号谱线上 3021 cm^{-1} 处出现的峰对应淀粉中多个羟基的振动峰。至于亚甲基 (-CH₂-) 基团, 它的强峰会出现在 2920 cm^{-1} 附近, 1 号谱线上 2920 cm^{-1} 处出现的峰则与亚甲基的标准强峰吻合^[14]。由于盐团中淀粉质量分数很低, 因此上述官能团伸缩振动峰的强度都相对较弱。

经油浴处理的盐球其红外光谱线如图 3a 内 2 号谱线所示, 谱线主要包含不饱和脂肪酸甘油酯 (植物油的主要成分) 中官能团的振动峰。不饱和脂肪酸甘油酯是由不饱和脂肪酸 ($\text{CH}_3(\text{CH}_2)_7\text{CH}=\text{CH}(\text{CH}_2)_7\text{COOH}$, 又称顺式十八碳一烯酸) 与甘油 ($\text{C}_3\text{H}_8\text{O}_3$) 化合而来, 结构见 3b 图下部, 所含有的官能团有烯基 (-C=C-), 酯基 (-COOR), C-O 键、C-H 键、C-C 键、甲基 (-CH₃)、亚甲基 (-CH₂-)、羟基 (-OH) 等。其中 C=C 为顺式, 其伸缩振动峰的平均值是 1657 cm^{-1} , 与 C=C 双键共碳的 C-H 键的伸缩振动峰一般在 $3040\sim 3010\text{ cm}^{-1}$ 之间

且峰值较弱, 2 号谱线上 1656 cm^{-1} 峰与 3012 cm^{-1} 峰分别对应顺式 C=C 双键及与 C=C 双键共碳的 C-H 键的伸缩振动峰。 1745 cm^{-1} 处的强峰为酯基 (-COOR) 振动峰, 1165 cm^{-1} 处的峰则归属与酯基共碳的 C-O 键伸缩振动峰。植物油中脂基官能团的伸缩振动波数与乙酸相同, 峰一般位于 $1745\sim 1738\text{ cm}^{-1}$ 之间, 与酯基共碳的 C-O 键伸缩振动范围在 $1200\sim 1175\text{ cm}^{-1}$, 2 号谱线上 1745 cm^{-1} 处出现的强峰即为酯基振动峰, 1165 cm^{-1} 处峰是与酯基共碳的 C-O 键的振动峰。而 2925 、 2856 、 1647 cm^{-1} 3 处依次变弱的峰高度吻合不饱和脂肪酸中众多亚甲基的标准谱带, 又由于亚甲基 (-CH₂-) 基团大于 4 个, 因此会在 720 cm^{-1} 处出现摇摆振动且峰较弱。至于直链上的 C-C 键一般振动峰比较弱且峰域在 $1385\sim 1370\text{ cm}^{-1}$ 之间, 2 号谱线上 1370 cm^{-1} 处之峰即为 C-C 键的峰^[14]。

经高温烧结的盐球的红外光谱线如图 3a 中 3 号谱线所示。与 2 号谱线对比可知, 盐球所携带的油脂经过烧结后已经去除干净, 谱线中仅有 3438 和 1125 cm^{-1} 处出现的峰分别对应淀粉中的羟基与饱和直链烷基醚的振动峰, 表明盐球中有淀粉残留, 但 2 处峰的透过率很高, 说明盐球中残留的淀粉含量非常低。

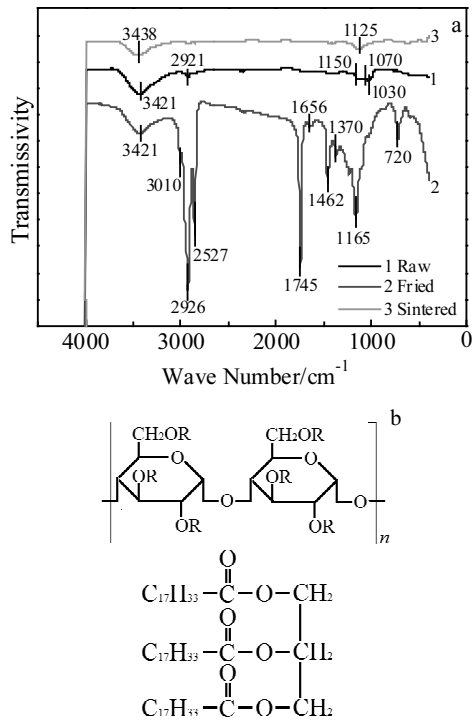


图 3 盐球制备不同阶段的红外光谱图；淀粉与不饱和脂肪酸甘油酯分子结构式
Fig.3 Infrared spectra of NaCl beads at different stages during preparation (a) and molecular structure of starch and unsaturated fatty acid glyceride (b)

2.2 多孔 Al 的结构控制与表征

图 4 为多孔 Al 制备过程中模具中铝粉在高度方向上的位移变化情况，即粉末高度（参见图 1）随震动次数的变化曲线。可以看出，3 个平行试样在震实过程中粉体高度的变化规律几乎完全一致。随着震动的进行，Al 粉不断填充盐床的缝隙，直至高度不再发生变化。然后经 200 MPa 下冷压，使模具中的物料发生冷塑性变形，从而获得致密化程度较高的密实坯体。由于原始状态下造孔剂的均匀有序排列，使后期去除造孔剂后的泡沫体素坯内部同样形成均匀有序的孔洞，犹如将造孔剂的形态“复制”下来，而这种利用造孔剂“复制”胞洞的方法能够获得重现性极高的多孔结构^[15,16]。

图 5a 和 5b 分别是经震实冷压后的生坯体在体式显微镜下放大 10 倍的平面和断面宏观图像。从图 5a 明显可见盐球与粉末的实际分布，同时在大颗粒的盐球附近分布有小尺寸盐球，这种分布现象是逐层排布的盐球造孔剂-粉末镶嵌结构经抛磨后显露在表层的盐球呈现半球部位截面和下一层结构中盐球初露顶部

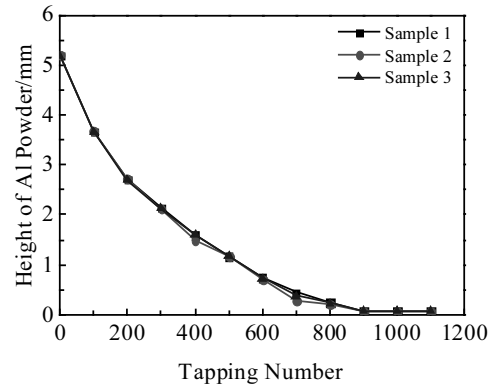


图 4 粉末成型高度随震动次数的变化曲线
Fig.4 Variation in the height of Al powder with the tapping number

截面而造成；从图 5b 所示断面形貌可以看出，造孔剂之间紧密接触的地方因粉末无法进入而在后期溶解时形成连通窗口，而盐球间隙填入的粉末便会形成孔洞间的孔棱。图 5c 和 5d 图分别为泡沫铝素坯的宏观形貌和造孔剂与粉末分布原理的模拟图。可以看出，坯体的径向孔隙率是由边缘向圆心呈减小的变化趋势。在两图中，圆周与 1 号圆形成的圆环内造孔剂排布相对较紧密，因而造孔剂之间形成的缝隙即被粉末填充的部分占整个环内面积的比例相对较小，因此在去除造孔剂后产生的孔隙率较大；1 号 2 号圆所夹的圆环内，造孔剂之间开始出现较大的空余面积（如图 5d 中阴影 S 区域所示即粉末填充的地方），这会导致造孔剂所占据的有效面积变小，因此在去除造孔剂后该环内的孔隙率会有所下降；而这种现象在 2 号圆内也同样出现。造成这种现象的原因是由于从圆周向圆心方向半径不断减小而使曲率不断增大，这样便限制了造孔剂的密实分布，导致坯体的孔隙率在径向上存在一定的非均匀性^[17,18]。

烧结后得到的泡沫铝宏观形貌呈现出明显金属光泽，泡沫铝平面与断面在体式显微镜下放大 7.5 倍形貌如图 6a 和图 6c 所示。图 6a 中孔洞形状表现为近球形，且能明显观察到第一层孔洞与内部连通的窗口，表明利用造孔剂预先排列复制胞洞方式可形成连通性较好的开孔泡沫体。图 6b、6d 分别为泡沫铝平面与断面的 SEM 形貌。可以看到胞洞的排布比较均匀，每半个胞内连通窗口的数量大都在 2~3 个，说明每个完整胞洞应包含有 4~6 个连通窗口，而窗口的尺寸范围在 120~200 μm 之间。在平行于压力的截面上（图 6c, 6d）胞洞明显呈椭圆形排列，这是由于物料在模具中经冷压时，盐球沿压力方向发生一定程度的塑性变形导致的。

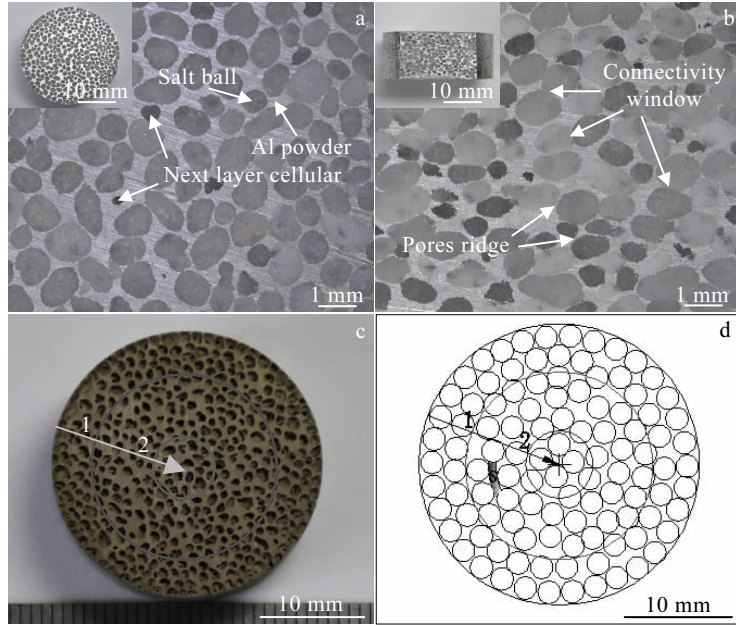


图 5 冷压生坯表面光学图片；冷压生坯断面光学图片；泡沫铝素坯宏观图片；造孔剂-粉末分布模拟图

Fig.5 Optical morphology of surface of cold pressed parts (a); cross-section morphology of cold pressed parts (b); macroscopic morphology of Al foam green parts (c); simulation diagram of space holder-powder distribution (d)

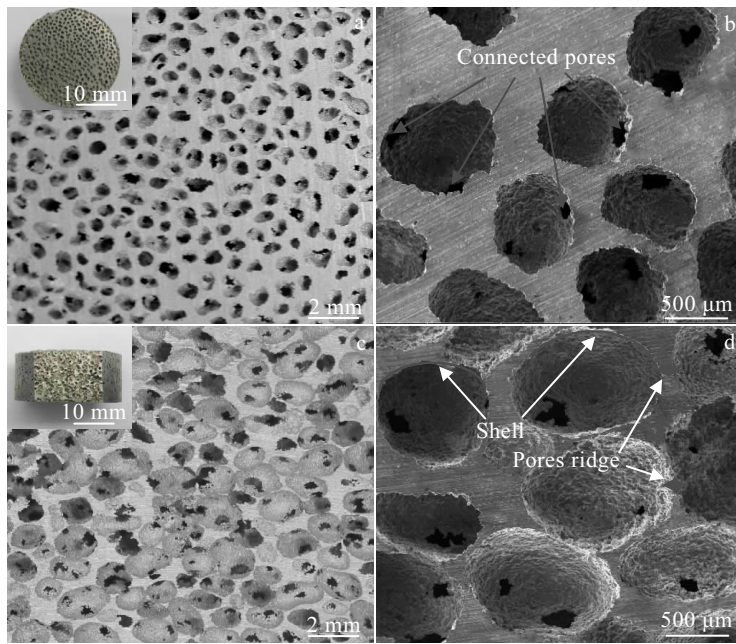


图 6 烧结泡沫铝平面与断面的光学及 SEM 形貌

Fig.6 OM (a, c) and SEM (b, d) morphologies of surface (a, b) and cross-section (c, d) for sintered Al foam

烧结后的泡沫铝平均密度经计算得 $\rho_0=0.586 \text{ g/cm}^3$ ，相对密度 ρ_0/ρ 等于 0.217，根据公式 $\varepsilon=(1-\rho_0/\rho) \times 100\%$ 可知泡沫铝的孔隙率 ε 为 78.3%。

2.3 泡沫铝的压缩性能

图 7a, 7b 分别是泡沫铝试样的压缩载荷-位移曲线与不同压缩时间段泡沫铝变形情况实物图。加载初期，试样所受到的压力可看作是由孔洞上下部位垂直于压力方向的壳状结构与孔洞之间的孔棱（参见图

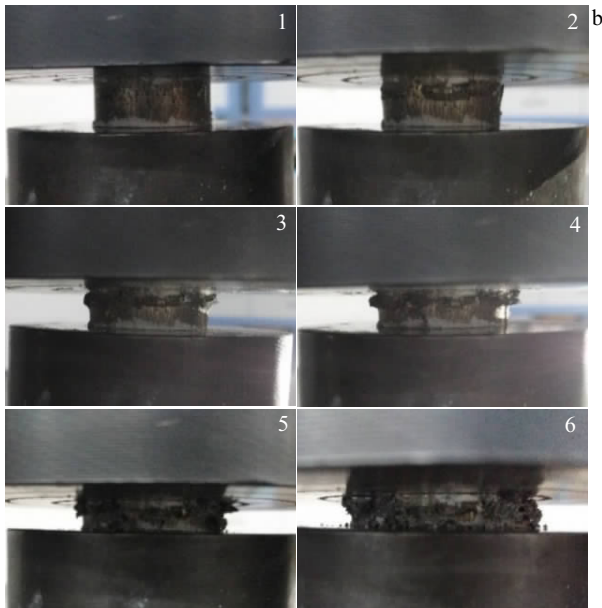
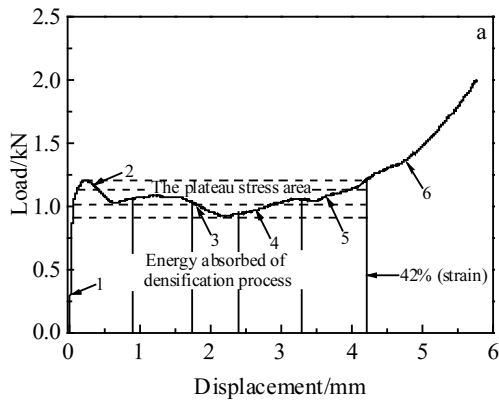


图 7 泡沫铝压缩载荷-位移曲线和泡沫铝在压缩变形不同阶段的实物照片

Fig.7 Load-displacement curve of Al foam (a) and pictures of Al foam at various stages of compression deformation (b) (1-8 s, 2-40 s, 3-190 s, 4-265 s, 5-373 s, 6-490 s)

6d) 共同承担, 这两处所受压力未达到使其发生变形的临界应力之前, 试样的压缩曲线便如致密金属一样呈线性变化^[19]。

当压力足以使壳状结构与孔棱发生变形时, 压缩曲线开始出现一段起伏不定的坪应力区^[2]。该区域内最高点与最低点的值分别为 1.2 和 0.92 kN, 而坪应力区产生起伏现象的原因是造孔剂颗粒在形状上的不规则性和胞洞之间存在的连通窗口导致形成的孔洞结构与孔壁曲率表现出非均匀性。所以当压力大于临界值后, 试样顶层二维排列的胞洞其壳状结构与孔棱开始发生弯曲变形, 直至失效产生裂纹, 导致整层孔洞彻底破裂。同样这种变形失效方式贯穿整个压缩过程, 使孔洞逐层发生溃败 (见图 7b); 试样自身的孔洞结构在压缩过程

中吸收能量, 以及试样内部可能存在缺陷, 因而造成压缩过程中出现波动起伏的坪应力区^[10,16,19]。

经过坪应力阶段之后压缩曲线开始上升且斜率较大, 这是由于孔洞彻底溃败后多孔结构变成密实结构而导致应力陡升^[2,20,21]。泡沫铝试样在 0.2%弹性极限应力处的抗压强度与杨氏模量分别是 2.42 MPa 和 0.38 GPa。对于粉末冶金法制备的泡沫铝而言, 大量孔隙会大大降低材料自身的刚度以及抗压强度, 因此泡沫材料与致密材料相比其自身强度与模量要小得多^[2]。

3 结 论

1) 以淀粉、蒸馏水、NaCl 粉末为原料, 混合制成胶状盐团后在 70 °C 油浴中加热, 同时在机械搅拌剪切的作用下可制备球形度较高的 NaCl 小球, 然后经高温烧结可以获得粒径分布主要在 0.4~2.4 mm、表面分布有少量微孔 (孔径 10~20 μm) 且纯净度很高的 NaCl 小球, 球径在 0.6~1.2 mm 范围的较小颗粒盐球占比达到整体的 70%。

2) 将盐球震实形成“盐床”, 再用震动填充的方法将 Al 粉压入“盐床”缝隙, 冷压后将盐球溶出后得到泡沫 Al 试样素坯, 经干燥、烧结后可得到孔结构重现性很高的泡沫 Al 试样。

3) 以直径为 0.6~1.0 mm 的盐球作造孔剂制备的泡沫 Al 的密度与相对密度分别为 0.586 g/cm³ 和 0.217, 孔隙率为 78.3%; 胞洞之间的连通窗口尺寸在 120~200 μm 之间, 且胞洞之间包含有 4~6 个连通窗口。试样压缩变形过程中经历了弹性变形阶段-坪应力区-应力陡增阶段, 表现出典型的泡沫金属压缩力学性能特点, 其最大抗压强度和杨氏模量分别为 2.42 MPa 和 0.38 GPa。

参考文献 References

[1] Deng X, Piotrowski G B, Williams J J *et al. International Journal of Fatigue*[J], 2005, 27(10-12): 1233
 [2] Ashby M F, Evans A, Fleck N A *et al. Applied Mechanics Reviews*[J], 2001, 54(6): 105
 [3] Wang Miao(王 淼), Wang Lucai(王录才). *Materials Review (材料导报)*[J], 2015, 29(3): 81
 [4] Dai Changsong(戴长松), Zhang Liang(张 亮), Wang Dianlong (王殿龙) *et al. Rare Metal Materials and Engineering(稀有金属材料与工程)*[J], 2005, 34(3): 337
 [5] Wang Yingwu(王应武), Xia Yu(夏 宇), Wang Zhiping(王志平) *et al. Materials Review(材料导报)*[J], 2013, 27(15): 132
 [6] Xie Bo(谢 波), Zhou Yun(周 芸), Guo Kunshan(郭坤山) *et al. Rare Metal Materials and Engineering(稀有金属材料与工*

- 程)[J], 2018, 47(1): 279
- [7] Wen C E, Mabuchi M, Yamada Y *et al. Scripta Materialia*[J], 2001, 45(10): 1147
- [8] Zhao Y, Han F, Fung T. *Materials Science & Engineering A*[J], 2004, 364(1): 117
- [9] Hao G L, Han F S, Li W D. *Journal of Porous Materials*[J], 2009, 16(3): 251
- [10] Jinnapat A, Kennedy A R. *Journal of Alloys & Compounds*[J], 2010, 499(1): 43
- [11] Goodall R, Despois J F, Mortensen A. *Journal of the European Ceramic Society*[J], 2006, 26(16): 3487
- [12] Goodall R, Mortensen A. *Advanced Engineering Materials*[J], 2007, 9(11): 951
- [13] Xiao Jian(肖 健), Qiu Guibao(邱贵宝), Liao Yilong(廖益龙) *et al. Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2015, 44(10): 2583
- [14] Weng Shifu(翁诗甫). *FT-IR Spectrometric Analysis*(傅里叶变换红外光谱分析)[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2010
- [15] Jinnapat A, Kennedy A. *Metals*[J], 2012, 2(2): 122
- [16] Goodall R, Marmottant A, Salvo L *et al. Materials Science & Engineering A*[J], 2007, 465(1-2): 124
- [17] Theuerkauf J, Witt P, Schwesig D. *Powder Technology*[J], 2006, 165(2): 92
- [18] Mueller G E. *Powder Technology*[J], 2010, 203(3): 626
- [19] Lhuissier P. *Comptes Rendus Physique*[J], 2014, 15(8-9): 696
- [20] Nava M G, Cruz-Ramírez A, Rosales M Á S *et al. Journal of Alloys & Compounds*[J], 2016, 698: 1009
- [21] Lan Fengchong(兰凤崇), Zeng Fanbo(曾繁波), Zhou Yunjiao(周云郊) *et al. Journal of Mechanical Engineering*(机械工程学报)[J], 2014, 50(22): 97

Pore Structure Control and Characterization of Al Foam Prepared by NaCl Beads

Jia Jiangang, Jing Yongzhi, Liu Diqiang, Guo Tieming, Ji Genshun

(State Key Laboratory of Advanced Processing and Recycling of Nonferrous Metal,

Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China)

Abstract: Starch, distilled water and NaCl powders as raw materials were mixed to form a colloidal salt paste and then thermally treated in 70 °C oil under vigorous stirring. Then highly spherical NaCl beads were obtained under the shear action of a blender. Afterwards, the “fried” NaCl beads with a particle size distribution of 0.4~2.4 mm were calcined and sintered at 740 °C, and thus the high purity NaCl beads with small amount of micro-pore (pores size 10~20 μm) on the surface were obtained. The 0.6~1.0 mm salt beads were selected to form a “salt bed” in a steel die and the aluminum powder was filled into the “salt bed” gap via a tapping method by the Autotap instrument. The tapped mixture was cold pressed under 200 MPa to obtain the green compact parts. Then the salts were dissolved and removed in distilled water and three-dimensional open-cell green Al foam with controllable structure and high reproducibility was derived. After sintering at 460 °C for 2 h, the final Al foam was obtained and its relative density and porosity are 0.217 and 78.3%, respectively. The number of connectivity windows between cellular aluminum cells is 4~6 in average, and the window size is 120~200 μm. The compressive load-displacement curve shows that the aluminum foam undergoes an elastic deformation stage, a plateau stress area, and a stress steep increase stage. The curve manifests the characteristics of foam metal compression mechanical properties, and its compressive strength and Young's modulus are 2.42 MPa and 0.38 GPa, respectively.

Key words: space holder; salt ball; foams Al; porous material; powder metallurgy

Corresponding author: Jia Jiangang, Ph. D., Associate Professor, State Key Laboratory of Gansu Advanced Nonferrous Metal Materials, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, P. R. China, Tel: 0086-931-2973564, E-mail: lzhhjiajiangang@163.com