

海绵铝的熔模铸造法制备及其压缩性能强化研究

杨 滨^{1,2} 刘 源^{2,3} 徐法庭^{1,2} 金云学¹
(1.江苏科技大学材料科学与工程学院; 2.清华大学材料学院;
3.清华大学先进成形制造教育部重点实验室)

摘 要 针对熔模铸造制备的高孔隙率开孔泡沫铝(海绵铝),通过前驱体海绵孔棱增粗来提高海绵铝的相对密度,并研究孔棱尺寸对其压缩性能的影响。结果发现,采用水性聚氨酯树脂能有效增粗聚氨酯海绵孔棱,制备出孔棱厚度为 0.472~0.918 mm,相对密度为 0.027~0.164 的海绵铝。单向压缩试验结果表明,孔棱增粗显著提高了海绵铝的强度,当孔棱厚度为 0.918 mm 时,其密实化平台应力最大,为 2.831 MPa,密实化吸能最大,达到 1.492 MJ/m³。这是由于孔棱厚度增加,相对密度提高,从而提高了海绵铝的能量吸收能力。

关键词 海绵铝;压缩性能;熔模铸造

中图分类号 TG249.5;TG146.21 文献标志码 A

DOI:10.15980/j.tzzz.2021.03.028 开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Preparation of Sponge Aluminum by Investment Casting Method and Strengthening of Compression Performance

Yang Bin^{1,2}, Liu Yuan^{2,3}, Xu Fating^{1,2}, Jin Yunxue¹

(1.School of Materials Science and Engineering, Jiangsu University of Science and Technology;
2.School of Materials Science and Engineering, Tsinghua University; 3.Key Laboratory for
Advanced Materials Processing Technology, Ministry of Education, Tsinghua University)

Abstract: Aiming at the high porosity open cell aluminum foam (sponge aluminum) prepared by investment casting method, the relative density of sponge aluminum is increased by increasing the thickness of the struct in the precursor, and the effects of struct size on the compression performance were investigated. The results reveal that the struct of polyurethane sponge can be thickened effectively by using waterborne polyurethane resin(WPU), and the foam aluminum with pore edge thickness of 0.472~0.918 mm and relative density of 0.027~0.164 were prepared. The results of uniaxial compression test indicate that the strength of sponge aluminum is greatly enhanced by increasing the struct. When the thickness of struct is 0.918 mm, the densification platform and energy absorption reach the maximum, which are 2.831 MPa and 1.492 MJ/m³, respectively. The reason is that the relative density is increased with the increase of struct thickness, improving the energy absorption capacity of sponge aluminum.

Key Words: Sponge Aluminum, Compressive Behavior, Investment Casting

开孔泡沫铝作为区别于闭孔泡沫铝的超轻型金属材料,其泡孔之间相互连通,凸显了其结构、功能的双重属性,具有密度低、孔隙率高、比强度高、比表面积大等特点,在减重、吸能、减震、吸声、电磁屏蔽、热管理等领域具有巨大的应用潜力^[1~5],是材料领域的研究热点之一。

目前,制备高孔隙率开孔泡沫铝主要采用石膏型铸造,又因是以聚氨酯海绵为母体制备出的,开孔泡沫铝又称为海绵铝,孔隙率可达 98%,主要应用于热交换、固气分离、固液分离、催化和电化学等诸多领域^[6]。然而,受预制体海绵的影响,极高的孔隙率往往导致海绵铝力学性能较差。研究发现,海绵铝的力学性能普遍较

收稿日期:2020-11-30;修改稿收到日期:2020-12-25
基金项目:国家自然科学基金资助项目(51771101)
第一作者简介:杨滨,男,1994 年出生,硕士研究生,江苏镇江(212000),E-mail: 781778065@qq.com
通信作者:金云学,男,1964 年出生,教授,江苏镇江(212000),E-mail: jinyunxue@126.com
通信作者:刘源,男,1974 年出生,副教授,北京(100084),E-mail: yuanliu@tsinghua.edu.cn
引用格式:杨滨,刘源,徐法庭,等. 海绵铝的熔模铸造法制备及其压缩性能强化研究[J]. 特种铸造及有色合金,2021,41(3):389-392.
YANG B, LIU Y, XU F T, et al. Preparation of sponge aluminum by investment casting method and strengthening of compression performance[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2021, 41(3):389-392.

低,这不利于海绵铝的生产和应用^[7]。王展光等^[8]研究发现,随着海绵铝孔隙率提高,其压缩屈服强度急剧降低,远低于球形孔泡沫铝的屈服强度,不足 0.03 MPa。而美国 ERG 航天公司采用熔模铸造生产出的海绵铝,孔隙率可达到 80%~97%,力学性能均较好^[6,9]。

熔模铸造制备的海绵铝没有孔壁,其孔结构是由孔棱支撑形成的,而支撑结构的失效是其强度下降的主要原因^[10,11]。网状聚氨酯是熔模铸造海绵铝所选用的母体材料,市面上的网状聚氨酯由于品质良莠不齐,制备出的海绵铝总会出现断棱、间膜、裂纹等缺陷。因此,有必要对网状聚氨酯进行孔棱加粗处理,从而间接增粗海绵铝的孔棱。对于孔棱增粗,MATZ A M 等^[12]采用喷胶-撒粉-加热的方法成功增粗了海绵,但这种方法难度极大,流程复杂,因此有必要选用更简易的增粗方法。鉴于此,本课题使用树脂对海绵进行直接增粗,并以此

为母体制备出相应的海绵铝,并对其压缩性能进行研究。

1 试验过程和方法

1.1 网状聚氨酯海绵的加粗

选用无明显网络间膜,孔隙率约为 98% 的 10 ppi 网状聚氨酯海绵作为母体材料。选用水性聚氨酯树脂(WPU)作为增粗材料,该树脂的粘度可以通过加水调节,还具有初凝时间长、流动性好、无刺激气味、固化后仍具有较好韧性等特点。增粗方法采用过量浸渍法:将水性树脂粘度调到 300 mPa·s 左右,然后将海绵浸入过量的树脂中 1 min,待充分浸渍后取出甩干,放入 60℃烘箱中烘烤 5 min,取出后将其悬挂风干,记为增粗 1 次,通过多次重复操作即可明显增粗网状聚氨酯的孔棱。多次增粗后的聚氨酯海绵见图 1。

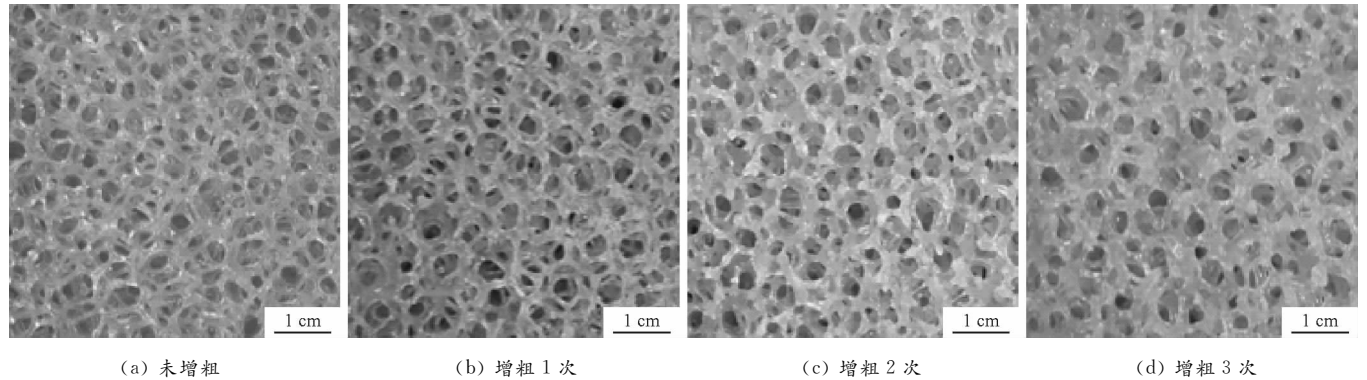


图 1 增粗 10 ppi 海绵结构对比

Fig.1 Structural comparison of thickened 10 ppi sponge

1.2 海绵铝的制备及试验方案

以 6061 铝合金作为基体材料,增粗后的 10 ppi 聚氨酯海绵作为母体,采用熔模铸造制备海绵铝,制得孔棱厚度为 0.472~0.918 mm,相对密度为 0.027~0.164 的海绵铝。试验装置见图 2。制备过程为:①将增粗处理的聚氨酯海绵放入模具中,然后用调制好的石膏浆料填满海绵;②将模具放入电阻炉中焙烧,以脱除石膏中的结合水、聚氨酯海绵以及水性聚氨酯树脂;③在模具

中放入 6061 铝锭,并将模具密封,抽真空;④将模具放入炉中加热、保温,并用氩气渗流,使铝液渗入石膏预制体中;⑤待模具温度下降,将试样取出并使用高压水枪冲洗去除石膏,得到海绵铝。

随后,将不同增粗次数的海绵采用相同的制备流程制备成海绵铝。表 1 为增粗后的海绵铝的孔结构参数。制备出的海绵铝孔结构见图 3。

表 1 增粗的海绵铝的结构参数

Tab.1 Structural parameters of thickened sponge aluminum		
增粗次数	相对密度	孔棱厚度/mm
0	0.027	0.472
1	0.068	0.641
2	0.119	0.730
3	0.164	0.918

海绵铝的单向压缩试验采用 WDW-3020 万能试验机进行,加载移动速度为 2 mm/min,采用电火花线切割成尺寸为 30 mm×30 mm×40 mm 的试样。对所采集的数据进行处理,绘制出应力-应变曲线等相关曲线进行分析。

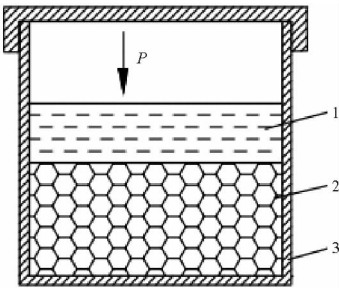


图 2 试验装置示意图

Fig.2 Schematic diagram of experimental apparatus

1.铝液 2.石膏预制体 3.增粗

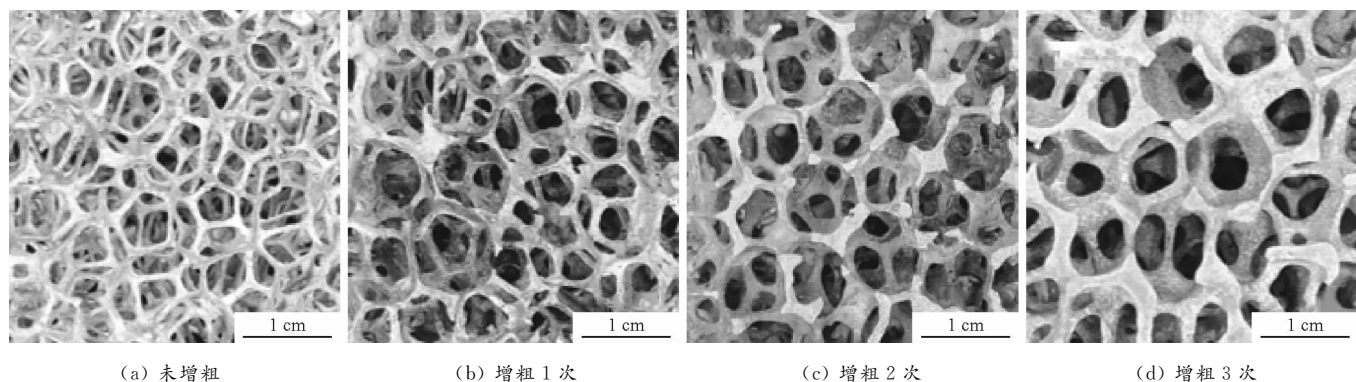


图 3 增粗 10 ppi 的海绵铝结构对比

Fig.3 Structural comparison of thickened 10 ppi sponge aluminum

2 试验结果与讨论

2.1 孔棱增粗的海绵铝的压缩特性

通常海绵铝由于内含大量孔隙,孔隙率在 90% 以上,这使得其具有很大的变形空间,压缩性突出。在单向压缩情况下,常规的海绵铝,孔棱在压力作用下逐步发生变形,压缩曲线分为线弹性段、平台段、致密段 3 个阶段,见图 4。其中,平台段构成了应力-应变曲线的主干。在压力作用下,孔棱逐层断裂并相互接触。在一定应变范围内,应力随着应变的逐渐增加变化不大,只会出现微小的起伏波动。这也是泡沫金属作为吸能缓冲材料最主要的特点。

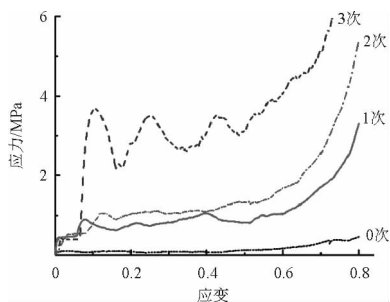


图 4 增粗海绵铝的应力-应变曲线

Fig.4 Stress-strain curves of thickened sponge aluminum

海绵铝增粗的实质是通过增粗孔棱,提升海绵铝的相对密度,以降低海绵铝整体的孔隙率来改善其力学性能的。随着增粗次数增多,海绵铝孔棱厚度得到提高,继而相对密度变大,孔隙率降低,平台段应力也得到显著提高,见图 4。在增粗 1 次及 2 次时,海绵铝的屈服强度得到明显提升,分别为 0.519 MPa 和 0.553 MPa,应力-应变曲线符合预期。但是当孔棱增粗到 3 次时,其应力-应变曲线发生了明显的变化。可以看出,在弹性变形与塑性变形阶段,增粗的 3 条曲线各有一个较低的平台,这是泡沫铝在由不均匀塑性变形转变为均匀塑性变形^[13]。其次,孔棱增粗 3 次以后海绵铝的屈服强度不再提高,其平台阶段塑性硬化的最大应力达 3.666

MPa,但其屈服强度只有 0.515 MPa。并且应力-应变的平台段出现十分大的波动,这是海绵铝逐层坍塌过程中,孔棱塑性硬化-断裂产生的应力波动,之所以波动较大,可能是聚氨酯海绵的孔棱增粗不均匀造成的,这不利于泡沫铝的吸能缓冲,因此增粗的方法需要改进。

2.2 增粗海绵铝的吸能特性

海绵铝的能量吸收量和吸能效率 η 是表征其吸能缓冲性能的重要指标。而孔棱增粗后的海绵铝,其应力-应变曲线中平台阶段和致密化阶段分界点较为模糊,且平台段的应力有明显波动,其能量吸收量和平台段的应力也难以定量。结合开孔泡沫铝和闭孔泡沫铝对吸能量和吸能效率的定义,作如下定义:能量吸收量即单位体积海绵铝所吸收的能量,通常指代应力-应变曲线下方的面积;而吸能效率定义为能量吸收量 W 与应变为 ϵ 时的应力值的比值,其表达式分别为^[9]:

$$W = \int_0^{\epsilon_i} \sigma(\epsilon) d\epsilon \quad (1)$$

$$\eta = \frac{W}{\sigma(\epsilon)} \quad (2)$$

式中, ϵ 为瞬时应变; σ 为应力,MPa; ϵ_i 为给定应变值; W 为能量吸收量,MJ/m³。

吸能效率最大曲线上的最大值所对应的应变被定义为密实化应变 $\epsilon_{\max}$,则海绵铝的密实化吸能量 $W_{\max}$ 计算如下。

$$W_{\max} = \int_0^{\epsilon_{\max}} \sigma(\epsilon) d\epsilon \quad (3)$$

海绵铝在平台阶段的平台应力 σ_p 可通过下式计算。

$$\sigma_p = \frac{\int_{\epsilon_0}^{\epsilon_{\max}} \sigma(\epsilon) d\epsilon}{\epsilon_{\max} - \epsilon_0} \quad (4)$$

式中, ϵ_0 是对应于应力-应变曲线上第一个应力峰值的应变^[9]。

最大吸能效率与密实化应变的确认见图 5。根据

上述公式,计算确定海绵铝的压缩参数见表 2。

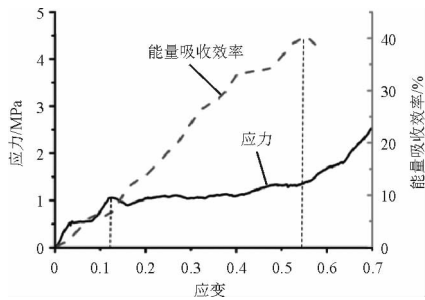


图 5 海绵铝应力-应变示意图

Fig.5 Stress-strain diagram of sponge aluminum

表 2 海绵铝的压缩参数

Tab.2 Compression parameters of sponge aluminum

增粗 次数	屈服强度/ MPa	密实化 应变	密实化平台 应力/MPa	密实化吸能量/ (MJ·m ⁻³)
0	0.102	0.550	0.081	0.038
1	0.519	0.530	0.820	0.387
2	0.553	0.500	1.118	0.522
3	0.515	0.480	2.831	1.492

孔棱厚度为 0.472~0.918 mm,相对密度为 0.027~0.164 的海绵铝的能量吸收曲线见图 6。可以看出,随着孔棱厚度增加,海绵铝的屈服强度得到提高,密实化平台和密实化吸能量也随之相应提高。这符合泡沫铝相对密度提高,吸能量增大的规律。特别是当增粗 3 次后,即孔棱厚度为 0.918 mm、相对密度为 0.164,海绵铝的密实化平台达到 2.831 MPa,密实化吸能量达到 1.492 MJ/m³。

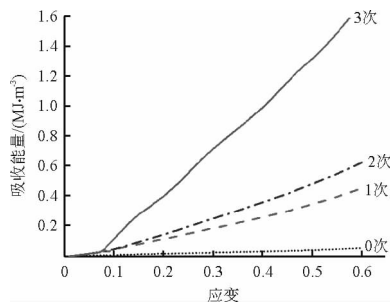


图 6 不同增粗次数的海绵铝的能量吸收随应变的变化

Fig.6 Energy absorption variation of sponge aluminum thickened different times with strain

3 结 论

- (1)采用水性树脂增粗聚氨酯海绵,成功制备出孔棱厚度为 0.472~0.918 mm,相对密度为 0.027~0.164 的海绵铝。
- (2)对增粗后的海绵铝进行压缩测试,发现海绵铝的整体强度得到明显提高,同时,增粗 3 次,即孔棱厚度在 0.918 mm,相对密度在 0.164 的海绵铝具有较好的力学性能,其屈服强度相较原样的 0.102 MPa,提升到

0.515 MPa,密实化平台应力达到 2.831 MPa,密实化吸能达到 1.492 MJ/m³。

参 考 文 献

[1] 韩福生. 超轻开孔泡沫铝及其在航天领域的应用[J]. 航天器环境工程, 2013,30(6):570-575.

[2] WAN T, LIU Y, ZHOU C, et al. Fabrication, properties, and applications of open-cell aluminum foams: A review[J]. Journal of Materials Science & Technology, 2020,6(2):11-24.

[3] LI Z, HUANG Y, WANG X, et al. Enhancement of open cell aluminum foams through thermal evaporating Zn film[J]. Materials Letters,2016,17(2):120-124.

[4] GUARINO S, RUBINO G, TAGLIAFERRI V, et al. Thermal behavior of open cell aluminum foams in forced air: Experimental analysis[J]. Measurement,2015,60(3):97-103.

[5] IASIELLO M, BIANCO N, CHIU W K S, et al. Thermal conduction in open-cell metal foams: Anisotropy and representative volume element[J]. International Journal of Thermal Sciences,2019,13(7):399-409.

[6] BANHART J. Manufacture, characterisation and application of cellular metals and metal foams[J]. Progress in Materials Science, 2001,21(46):559-632.

[7] 刘铭,程和法,黄笑梅,等. 用可溶石膏型预制块制备低密度开孔泡沫铝[J]. 特种铸造及有色合金,2010,30(5):462-464.

[8] 王展光,甄映红,彭开起,等. 超轻海绵铝的力学性能研究[J]. 粉末冶金工业,2016,26(6):41-45.

[9] KRISHNA B V, BOSE S, BANDYOPADHYAY A. Strength of open-cell 6101 aluminum foams under free and constrained compression[J]. Materials Science and Engineering, 2007, A45(13): 178-188.

[10] TORRENTS A, SCHAEGLER T A, JACOBSEN A J, et al. Characterization of nickel-based microlattice materials with structural hierarchy from the nanometer to the millimeter scale[J]. Acta Materialia, 2012, 60(22): 3 511-3 523.

[11] DAI R, WANG M, WANG D, et al. Understanding mechanical behavior of metallic foam with hollow struts using the hollow pentagonal dodecahedron model[J]. Scripta Materialia, 2020,18(2): 114-119.

[12] MATZ A M, MOCKER B S, MÜLLER D W, et al. Mesosstructural design and manufacturing of open-pore metal foams by investment casting[J]. Advances in Materials Science and Engineering, 2014, 20(14): 1-9.

[13] 那顺桑,李杰,艾立群. 金属材料力学性能[M]. 北京:冶金工业出版社,2011.

(编辑:刘卫)

欢迎使用在线稿件处理系统

投稿、查稿、审稿

敬请登录 www.special-cast.com