

熔模铸造点阵 Al 的力学行为及吸能特性

薛金涛^{1,2} 韩福生¹ 黄英杰³ 史子木¹ 王幸福¹

(1.中国科学院合肥物质科学研究院固体物理研究所; 2.中国科学技术大学;
3.安阳师范学院物理与电气工程学院)

摘 要 研究了结构参数对铸造点阵 Al 力学行为及吸能特性的影响。采用计算机辅助设计、光固化技术及熔模铸造法相结合的工艺,制备出了金字塔型三维点阵 Al,对该材料的准静态压缩力学行为进行研究。夹角为 60°时,相对密度增加约 21%,平台流动应力增加近 142%,单位体积吸能增加近 159%,此时平台流动应力约 15 MPa,单位体积吸能为 2.7 MJ/m³,而当夹角增加至 65°时,平台流动应力则增加到 22 MPa,单位体积吸能为 10.6 MJ/m³。金字塔型三维点阵 Al 与一般多孔金属相似,压缩应力与材料结构参数密切相关并具有明显的弹性区、平台区和致密化区。

关键词 铸造;点阵 Al;长径比;应力应变行为;吸能特性

中图分类号 TG2;TB383 **文献标志码** A

DOI:10.15980/j.tzzz.2021.06.015

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Mechanical Behavior and Energy Absorption of Investment Casting Lattice Al

Xue Jintao^{1,2}, Han Fusheng¹, Huang Yingjie³, Shi Zimu¹, Wang Xingfu¹

(1.Institute of Solid State Physics, Hefei Institutes of Physical Science, Chinese Academy of Sciences;
2.University of Science and Technology of China; 3.School of Pyhsics & Electrical Engineering,
Anyang Normal University)

Abstract: The effects of structural parameters on the mechanical behavior and energy absorption properties of investment casting lattice Al were investigated. The pyramid-shaped 3D lattice Al was fabricated through the combination of computer-aided design, sterolithography apparatus and investment casting technology. The quasi-static compression mechanical behavior of the lattice Al were characterized and the mechanical properties of the lattice show obvious dependence on the structural parameters. When the inclination angle is 60°, the relative density, flow stress and energy absorption per unit volume are increased by 21%, 142% and 159%, respectively, where the plateau stress is around 15 MPa and the energy absorption per unit volume is 2.7 MJ/m³, which are increased to around 22 MPa and 10.6 MJ/m³ with the angle increasing to 65°, respectively. The pyramid-shaped 3D lattice Al is similar to common porous metals, where compression stress is closely related to the structural parameters of the material and has obvious elastic zone, platform zone and densification zone.

Key Words: Casting, Lattice Al, Length-diameter Ratio, Stress-Strain Behavior, Energy Absorption

近年来,制造业迅速发展,人造多孔金属材料种类不断增多,在航空航天、建筑、医疗卫生等诸多领域获得了广泛应用,以航空领域为例,很多结构件要求具备特殊力学性能的同时还要满足吸收冲击能量、提供散热等功能^[1],多孔铝等材料已经得到广泛应用,如点阵夹芯板结构已经作为缓冲吸能部件应用于航天飞行器上^[2]。多孔金属材料分为开孔材料和闭孔材料两种类型,开孔材料孔洞之间具有连通性,同时兼具吸声、散热、过滤等

功能,具有十分广阔的应用前景^[3~7]。开孔金属材料中两个较为重要的分支为泡沫金属和三维点阵金属,在受力变形时,前者的变形机制是弯曲主导型,而当交接点处杆单元个数是 12 时,后者的变形机制是拉伸主导型。相较而言,点阵金属具有更为优异的力学性能^[8,9],如当材料相对密度为 10%时,点阵金属的强度是泡沫金属的 3 倍^[10]。但是从拉伸主导型点阵金属的应力-应变曲线以及变形特征可以看出,当达到屈服应力时,杆

收稿日期:2021-01-15;修改稿收到日期:2021-02-19
基金项目:国家自然科学基金资助项目(51671187)
第一作者简介:薛金涛,男,1995 年出生,硕士研究生,合肥(230031),E-mail:jintxue@icloud.com
通信作者:韩福生,男,1955 年出生,研究员,合肥(230031),E-mail:fshan@issp.ac.cn
引用格式:薛金涛,韩福生,黄英杰,等. 熔模铸造点阵 Al 的力学行为及吸能特性[J]. 特种铸造及有色合金,2021,41(6):734-737.
XUE J T, HAN F S, HUANG Y J, et al. Mechanical behavior and energy absorption of investment casting lattice Al[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2021, 41(6):734-737.

件发生屈服,而出现软化现象^[11,12],该特征不利于其在吸能方面的应用^[13~15]。由于弯曲主导型的金字塔型点阵金属具有规则性排列的孔结构,并且压缩应力-应变曲线上也未出现软化现象^[16]。所以研究弯曲主导性的三维点阵金属材料具有重要的意义。

目前,点阵材料的制备方式有激光 3D 打印、编织和铸造等方法,其中,激光 3D 打印结果对激光打印参数依赖性较高^[17],易出现打印缺陷,而铸造法工艺成熟、操作简单。为了更好阐明弯曲主导性的金字塔型点阵金属的应力应变行为及其吸能特征对结构参数依赖关系,从而为进一步优化设计使其满足实际应用的需求提供参考,本课题以工业纯 Al 为基体,采用 3D 打印技术和熔模铸造相结合的方法制备出不同长径比和夹角的金字塔型点阵 Al,并对其压缩行为及吸能特性进行了考察,相较于现在流行的 3D 打印方式制备多孔金属,该方法制备的试样缺陷更少,成本更低,制备方法更简便。

1 试验过程

铸造法制备点阵 Al 试验流程示意图见图 1。金字

塔型点阵单胞是四棱锥顶对顶构成,使用 CATIA V5R20 软件设计出三维图,主要设计参数见图 2 和表 1。金字塔型点阵材料的关键结构参数主要有:杆件长度 L 、杆件的直径 D 、杆单元与单胞底面的夹角 ω 。作为多孔材料参数中的一种,相对密度是影响点阵材料力学性能的重要因素^[18],其数值为 $(\rho_0/\rho_s) \times 100\%$,其中, ρ_0 为制备的点阵材料的表观密度, ρ_s 为纯铝的密度。

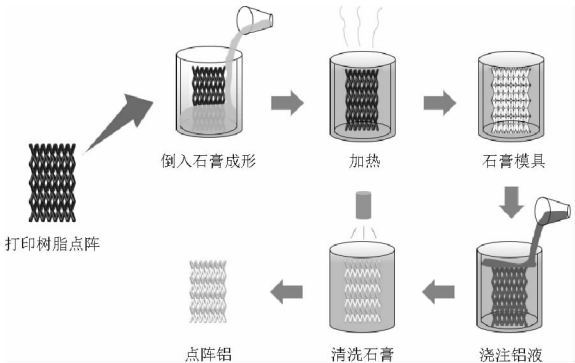


图 1 铸造法制备点阵铝试验流程示意图
Fig.1 Experimental flow chart of lattice aluminum prepared by casting method

以光敏树脂为原料,采用光固化技术制备出点阵模

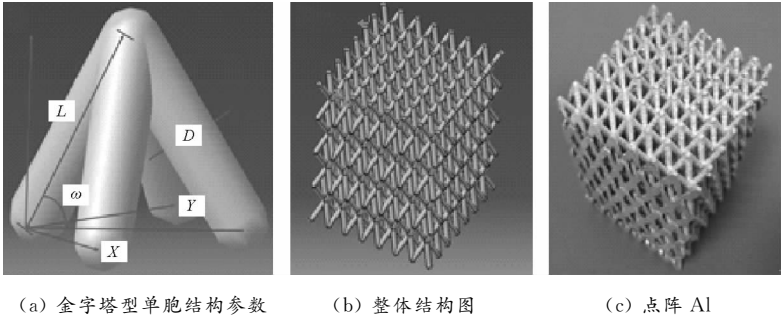


图 2 金字塔型点阵结构及点阵 Al

Fig.2 Structure of pyramid-shaped lattice and lattice Al

表 1 金字塔单胞结构参数

Tab.1 Structural parameters of pyramidal unit cell					
试样编号	杆径/mm	杆长/mm	夹角/(°)	长径比(L/D)	相对密度/%
1	1.7	5	60	2.9	51
2	1.7	6	60	3.5	40
3	1.7	7	60	4.1	33
4	1.7	6	62.5	3.5	44
5	1.7	6	65	3.5	48

型,然后以该模型为牺牲模,以质量分数为 99.7% 的工业纯铝为基体,通过熔模铸造工艺制备出点阵 Al。主要流程如下:把光敏树脂点阵材料置于铸铁模具中,然后将一定配比的石膏浆料浇入点阵材料的孔隙内,再经过自然干燥、低温烘干、高温焙烧等过程,使光敏树脂材料烧除、石膏固化,得到具有点阵结构型腔的石膏型。最后使用空压机以一定的压力将高温铝液压入石膏型,自然降温后,Al 液凝固后便得到点阵 Al 坯料,用高压

水枪冲洗石膏型,并用线切割技术切取 X/Y/Z 方向单胞个数分别为 7/7/4 的压缩试样,见图 2c。利用 Instron 3369 型力学试验机进行准静态压缩试验,压缩方向是 Z 轴方向,压缩速率为 2 mm/min。

2 试验结果与讨论

2.1 点阵 Al 的压缩应力应变行为

图 3 和图 4 是点阵 Al 的压缩应力-应变曲线。可以看出,与拉伸主导性点阵材料不同的是,应力-应变曲线在线弹性区过后没有出现软化现象,而是与一般弯曲主导性多孔材料相似,具有典型的 3 个区域,即线弹性区、应力平台区和致密化区^[19]。在线弹性区,点阵材料杆单元仅发生弹性变形,应力与应变成线性关系,其线性值虽然没有拉伸主导型点阵材料大,但是具有比开孔泡沫铝更强的线性关系。这种现象可能是由于其和开

孔泡沫铝一样是弯曲主导型多孔材料,但是又具有拉伸主导下点阵材料的规则性排列的结构。开孔泡沫铝的不规则排列使其在较低的应力时,部分单胞就会发生局部屈曲。在线弹性区与应力平台区之间呈圆滑过渡,应力平台区内应力随应变增加而稳中有升,升高幅度会随着结构参数而发生变化。由图 3a 可见,当夹角为 60° 时,长径比增大,相对密度减小,平台区应力上升的幅度值减小,流动应力下降。这是由于相对密度越小,其孔隙率越高,在压缩的过程中局部杆件不容易发生提前接触导致的。对于金字塔型点阵材料,当夹角和长径比相同时,其流动应力基本不变。本课题中,长径比增加时保持杆径不变,仅增大杆长。当夹角不变时,长径比增加就相当于杆长不变而使其杆径变粗,从而使得在相同的应变时,试样能够承受更大的力,因此长径比越小流动应力也就越大。另外,流动应力与长径比并非严格的反比例关系。当应变为 0.3 时,长径比由 4.1 降至 3.5,流动应力由 6.2 MPa 上升至 15 MPa。另外,流动应力与相对密度也并非线性关系,当相对密度由 0.33 增加至 0.51 时,其流动应力由 6.2 MPa 上升至 23.6 MPa。这说明长径比对流动应力的影响要大于对相对密度的影响,所以可以在相对密度变化不大的情况,适当减小长径比来获得更大的流动应力值。

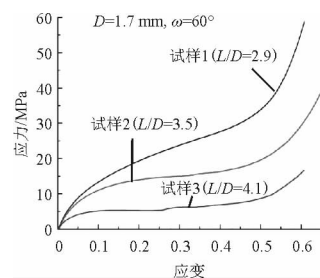


图 3 夹角为 60° 时长径比对试样压缩应力-应变曲线的影响
Fig.3 Effects of length-diameter ratio on the compression stress-strain curves of specimens at the inclination angle of 60°

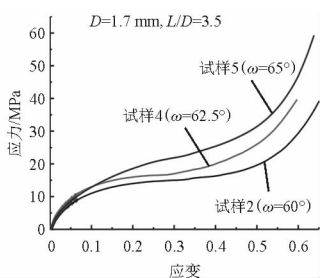


图 4 长径比为 3.5 时夹角对试样压缩应力-应变曲线的影响
Fig.4 Effects of inclination angle on the compression stress-strain curves of specimens at the length-diameter ratio of 3.5

由图 4 可见,长径比为 3.5 时,随着夹角增大,点阵 Al 流动应力上升。这是因为在试样尺寸相同的情况下,夹角越大,单胞个数会越多,从而导致相对密度增加,所以流动应力也就越大。从表 1 中也可以看出,当长径比一定,角度在 $60^\circ \sim 65^\circ$ 之间时,虽然角度变化不大,但可以使相对密度发生较大的变化,从而使得流动应力明显增加。另外,通过受力分析可以看到,夹角增大时,杆件在竖直方向受到的分力会变大,同时水平方向受到的分力又减小,所以更不容易发生屈服,从而导致其流动应力更大。

2.2 Al 基点阵材料的吸能特性

吸能是点阵 Al 的一个重要特征,可以利用点阵 Al 制作缓冲机构应用到航天器着陆装置、汽车保险杠以及精密仪器的保护装置中等。所以对点阵 Al 的吸能表征的研究也十分重要,通常用单位体积吸能量(W)和能量吸收效率(E)来衡量点阵 Al 的吸能特性。其中单位体积吸能量计算公式为:

$$W = \int_0^{\epsilon_m} \sigma_m d\epsilon \quad (1)$$

能量吸收效率是指点阵 Al 压缩至一定应变时,单位体积吸能量与应力值的比值,计算公式为:

$$E = \frac{\int_0^{\epsilon_m} \sigma_m d\epsilon}{\sigma_m} \quad (2)$$

式中, σ_m 为应力; ϵ_m 为应变。

图 5 和图 6 为点阵 Al 的单位体积吸能曲线。可以看出,点阵 Al 的单位体积吸能量随着应变的增加而增加。在线弹性区,点阵 Al 的吸能量较少;进入平台区后,点阵 Al 的吸能量明显增加,这是因为在较宽的应变范围内,应力值很大并且变化较小;进入致密化区后,应力增加明显,这是因为点阵 Al 孔洞基本被压实,尽管其吸能量仍继续增加,但是该部分吸能主要靠致密 Al 基体吸收,并没有对被保护的物体起到保护作用。所以,点阵 Al 有效的单位体积吸能是致密点的单位体积吸能。角度为 60° 时,随着长径比的增加,点阵 Al 的吸收能力逐渐降低。这是由于应变相同时,随着长径比的增加,点阵 Al 的应力变小导致的,见图 5。当长径比为 3.5 时,夹角增大,相对密度增大,流动应力也变大,所以点阵 Al 的单位体积吸能增强,见图 6。

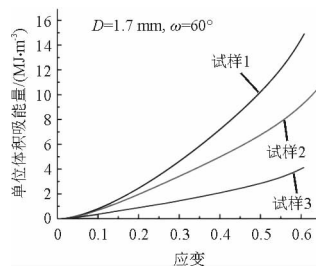


图 5 夹角为 60° 时长径比对试样单位体积吸能曲线的影响
Fig.5 Effects of length-diameter ratio on the absorbed energy curves per unit volume of specimens at the inclination angle of 60°

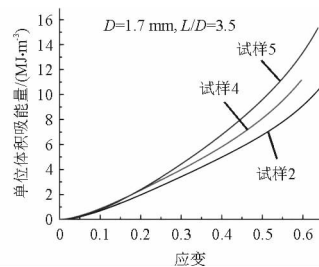


图 6 长径比为 3.5 时夹角对试样单位体积吸能曲线的影响
Fig.6 Effects of inclination angle on the absorbed energy curves per unit volume of specimens at the length-diameter ratio of 3.5

能量吸收效率曲线见图 7 和图 8。与单位体积吸能曲线不同的是,随着应变增加,能量吸收效率出现了先上升后下降的变化趋势。在弹性区和平台区,随着应变增加,能量吸收效率逐渐增大,能量吸收效率达到最

大值时的应变是致密点的应变^[12]。在致密化点附近时,能量吸收效率变化缓慢,并且维持较高的水平。这是因为从平台区进入致密化区也是圆滑的曲线,而没有非常明显的致密化点。进入致密化区后,能量吸收效率开始下降,这是由于应力值增加速度要大于相对的能量吸收值导致的。从图 7 可以看出,在应变小于 0.3 时,随着长径比增加,能量吸收效率逐渐增加,但是当应变大于 0.45 时,长径比为 3.5 时能量吸收效率最高,同时还发现,长径比为 2.9 和 3.5 时,其致密化点的应变均为 0.51,而长径比为 4.1 时,其致密化点的应变是 0.48。说明夹角不变,应力平台的长度与长径比不呈正比例关系。不同的是,当长径比不变时,随着夹角增大,致密化点的应变值变化不大,均在 0.51 附近,见图 8。致密点的单位体积吸能量见图 9。可以看出,通过适当的增加角度或减小长径比可以提高致密点时单位体积的吸能。

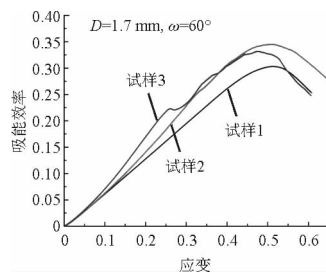


图 7 夹角为 60° 时长径比对试样能力吸收效率曲线的影响
Fig.7 Effects of length-diameter ratio on the energy absorption efficiency curves of specimens at the inclination angle of 60°

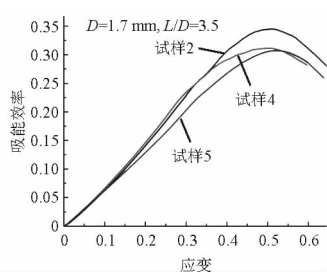


图 8 长径比为 3.5 时夹角对试样能力吸收效率曲线的影响
Fig.8 Effects of inclination angle on the energy absorption efficiency curves of specimens at the length-diameter ratio of 3.5

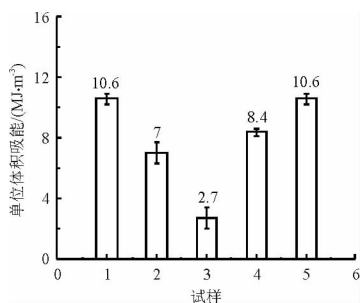


图 9 试样的单位体积吸能

Fig.9 Absorbed energy per unit volume of specimens

3 结 论

(1)铸造金字塔型点阵 Al 的应力-应变行为与一般的泡沫 Al 相似,具有明显的线弹性区、应力平台区和致密化区。

(2)点阵 Al 的流动应力随着长径比的减小而增大,但是并非严格反比例关系。当长径比一定时,夹角增加,相对密度增大,点阵 Al 流动应力上升。

(3)在致密化点时,点阵 Al 的单位体积吸能量随着长径比的减小而增强,随着夹角的增大而增强。

参 考 文 献

- [1] 董多,朱冬冬,贺庆,等. A356 合金 3D Kagome 点阵夹芯板低压熔模铸造工艺[J]. 特种铸造及有色合金, 2016, 36(11): 1 175-1 177.
- [2] 陈东,吴永鹏,李忠盛,等. 轻质高强多功能点阵夹层结构研究进展[J]. 装备环境工程, 2020, 17(4): 87-94.
- [3] 陈军红,徐伟芳,陈勇梅,等. 泡沫铝变形与吸能特性研究[J]. 包装工程, 2017, 38(21): 15-19.
- [4] YAN C, HAO L, HUSSEIN A, et al. Evaluation of light-weight AlSi10Mg periodic cellular lattice structures fabricated via direct metal laser sintering[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2014, 214(4): 856-864.
- [5] 邢牧冬,杨思一,安钰坤,等. 核乏燃料运输容器减震器填充材料研究进展[J]. 包装工程, 2019, 40(21): 111-117.
- [6] 李宗岷,杨旭东,胡琪,等. 泡沫铝的低速冲击吸能性能[J]. 热加工工艺, 2019, 48(20): 29-33.
- [7] XUE Y Y, WANG W, HAN F S. Enhanced compressive mechanical properties of aluminum based auxetic lattice structures filled with polymers[J]. Composites, 2019, B171: 183-191.
- [8] DESHPANDE V S, ASHBY M F, FLECK N A. Foam topology: Bending versus stretching dominated architectures[J]. Acta Materialia, 2001, 49(6): 1 035-1 040.
- [9] 范华林,杨卫. 轻质高强点阵材料及其力学性能研究进展[J]. 力学进展, 2007, 25(1): 99-112.
- [10] EVANS A G. Lightweight materials and structures[J]. MRS Bulletin, 2001, 26(10): 790-797.
- [11] MOHSENIZADEH M, GASBARRI F, MUNTER M, et al. Additively-manufactured lightweight Metamaterials for energy absorption[J]. Materials & Design, 2017, 139: 521-530.
- [12] LING C, CERNICCHI A, GILCHRIST M D, et al. Mechanical behaviour of additively-manufactured polymeric octet-truss lattice structures under quasi-static and dynamic compressive loading[J]. Materials & Design, 2019, 162: 106-118.
- [13] LIU J, PATTOFATTO, STÉPHANE, et al. Impact strength enhancement of aluminum tetrahedral lattice truss core structures [J]. International Journal of Impact Engineering, 2015, 79: 3-13.
- [14] OSTOS J B, RINALDI R G, HAMMETTER C M, et al. Deformation stabilization of lattice structures via foam addition[J]. Acta Materialia, 2012, 60(19): 6 476-6 485.
- [15] 张钱城,卢天健,闻婷. 轻质高强点阵金属材料的制备及其力学性能强化的研究进展[J]. 力学进展, 2010, 40(2): 157-169.
- [16] MCKOWN S, SHEN Y, BROOKES W K, et al. The quasi-static and blast loading response of lattice structures[J]. International Journal of Impact Engineering, 2008, 35(8): 795-810.
- [17] 刘佩玲,陈康敏,赵振华. 激光 3D 打印 AlSi₁₀Mg 铝合金点阵结构材料的组织和力学性能[J]. 金属热处理, 2020, 45(9): 142-149.
- [18] WANG X, ZHENG Z, YU J. Crashworthiness design of density-graded cellular metals[J]. Theoretical & Applied Mechanics Letters, 2013, 3(3): 031 001.
- [19] 侯晓丽,齐明思,张伟,等. 孔径对球形开孔泡沫铝压缩及吸能性能的影响[J]. 包装工程, 2019, 40(19): 86-91.

(编辑:栗万仲)