

加载速率对点阵铝力学行为及吸能特性的影响

黄英杰¹, 薛莹莹², 汪聃³

(1. 安阳师范学院 物理与电气工程学院, 河南 安阳 455000; 2. 烟台大学 机电汽车工程学院, 山东 烟台 264005; 3. 延安大学 物理与电子信息学院, 陕西 延安 716000)

摘要: 目的 研究基体材料和加载速率对点阵铝力学性能和吸能特性的影响规律。方法 针对工业纯铝、6063 铝合金为基体的点阵铝在 3 种不同的加载速率下进行压缩力学试验。结果 加载速率从 2 mm/min 增加到 250 mm/min 时, 点阵纯铝的屈服强度增加了 2 MPa, 点阵 6063 铝合金的屈服强度增加了 7.6 MPa; 加载速率从 250 mm/min 增加到 500 mm/min 时, 点阵纯铝的屈服强度变化不大, 而点阵 6063 铝合金的屈服强度增加了 8.2 MPa; 当加载速率一定时, 点阵 6063 铝合金的屈服强度要大于点阵纯铝。结论 点阵 6063 铝合金的力学性能和单位体积吸能随着加载速率的增大而增大, 并且点阵 6063 铝合金的力学性能和吸能特性要大于点阵纯铝。

关键词: 点阵铝; 加载速率; 屈服强度; 吸能特性

中图分类号: TB484.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2020)15-0064-07

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2020.15.010

Effects of Loading Rate on the Mechanical Behavior and Energy Absorption of Al Lattice Truss

HUANG Ying-jie¹, XUE Ying-ying², WANG Dan³

(1. School of Physics & Electrical Engineering, Anyang Normal University, Anyang 455000, China;

2. School of Electromechanical and Automotive Engineering, Yantai University, Yantai 264005, China;

3. School of Physics and Electronic Information, Yan'an University, Yan'an 716000, China)

ABSTRACT: The work aims to study the effects of basis materials and loading rate on the mechanical behavior and energy absorption of Al lattice truss. The compressive mechanics of Al lattice truss with industrial pure aluminum and 6063 aluminum alloys as basis materials were tested at three different loading rates. When the loading rate increased from 2 mm/min to 250 mm/min, the yield strength of the pure Al lattice truss increased by 2 MPa, and the yield strength of the 6063 aluminum alloys based lattice truss increased by 7.6 MPa. When the loading rate increased from 250 mm/min to 500 mm/min, the yield strength of the pure Al lattice truss remained constant; however, the yield strength of the 6063 aluminum alloys based lattice truss increased by 8.2 MPa. At the same loading rate, the yield strength of 6063 aluminum alloys based lattice truss was higher than that of pure Al lattice truss. The mechanical properties and energy absorption per unit volume of 6063 aluminum alloys based lattice truss increase with the increase of loading rate, and the mechanical properties and energy absorption of 6063 aluminum alloys based lattice truss are much higher than those of pure Al lattice truss.

KEY WORDS: Al lattice truss; loading rate; yield strength; energy absorption

收稿日期: 2019-12-19

基金项目: 陕西省自然科学基金 (2019JQ-833); 陕西省教育厅专项科研计划 (19JQ0974); 延安大学博士科研启动项目 (YDBD2018-21)

作者简介: 黄英杰 (1988—), 男, 博士, 安阳师范学院讲师, 主要研究方向为多孔金属材料。

多孔铝是一种在铝基体内均匀分布着大量规则或不规则孔洞, 具有质轻、比强度高、缓冲吸能、隔音降噪、传热散热等诸多优异性能一体的新型材料^[1-3]。其在航空航天、武器舰船、包装工程、建筑装饰等领域具有广泛的应用, 产生了巨大价值^[4-7]。根据多孔铝内部孔洞是否规则, 可将多孔铝分为泡沫铝和点阵铝, 其中泡沫铝是内部孔洞不规则排列, 点阵铝是以一个单胞为单元向四周进行规则排列^[8-9]。由于开孔泡沫铝和点阵铝的孔洞之间都具有连通性, 所以在受到冲击载荷时, 不会由于内部孔封闭而反弹, 在缓冲时更容易吸收能量^[10-13]。在耐冲击范围内, 泡沫铝的峰值压缩载荷与冲击能力呈线性关系, 孔隙率为 60% 的泡沫铝可以吸收 140 J 的冲击能量^[14]。球体开孔泡沫铝具有优良的压缩及吸能特性, 当相对密度较大时, 泡沫铝压缩性能与吸能性能更好, 呈正相关关系^[15]。虽然泡沫铝在静态条件下都具有优异的吸能特性, 但是孔结构胞壁在力学上属于弯曲主导型结构, 所以其金属骨架刚度和强度较低, 从而限制了其在结构承载方面的应用^[16-17]。研究发现相对于泡沫金属而言, 点阵金属在剪切模量、抗压强度以及吸能能力上更为优异, 是非常有前景的缓冲吸能材料, 所以研究其力学性能和吸能特性的影响因素, 显得尤为重要。点阵金属动态冲击研究表明, 点阵结构可以在抵抗冲击、吸收冲击能及消耗冲击能上有很大的优势, 另外失效应力受冲击速度影响比较明显^[18-19]。

在实际的工程应用中, 受各种复杂多变环境的影响, 防护装置会遇到各种不同的冲击速度, 研究加载速率对点阵铝力学性能的影响规律, 可以满足实际应用设计出最佳的缓冲吸能材料提供重要的参考。另外, 基体材料也是影响点阵铝力学性能的重要参数, 所以研究基体材料对点阵铝以及加载速率对不同基体材料点阵铝的影响是非常有必要的。

1 试验

文中设计的点阵结构为金字塔型点阵结构, 结构参数中杆长为 3.5 mm, 杆径为 1 mm, 杆与底面夹角为 60°, 相对密度约为 0.37。采用工业纯铝和 6063 铝合金为基体材料, 制备具有不同性能的点阵铝。点阵铝采用渗流法制备, 其工艺原理见图 1。首先将一定配比的石膏浆料倒入放有低熔点点阵模型的模具当中, 经过干燥、焙烧后得到具有点阵腔体的石膏模型, 然后利用空气加压的方式使高温铝液渗入到点阵腔体中。经过后期处理便可得到金字塔型点阵铝见图 2。对点阵 6063 铝合金采用 T6 的热处理工艺进行固溶强化, 利用 Instron 3369 型力学试验机对点阵铝进行压缩试验, 压缩方向为 z 轴方向, 见图 2b。用于压缩试验的样品在 x/y/z 方向的单胞数量为 7/7/4。为了研究加载速率对点阵铝力学性能和吸能性能的影响, 对点阵纯铝和点阵 6063 铝合金施加 3 种加载速率,

分别为 2, 250, 500 mm/min。

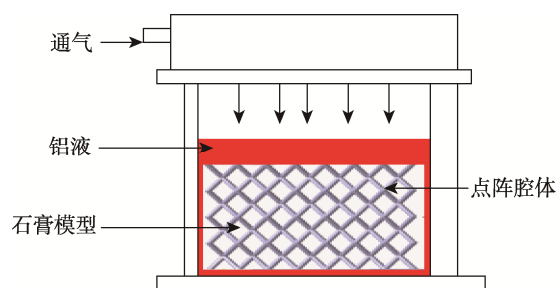


图 1 渗流法制备点阵铝示意
Fig.1 Schematic diagram of preparation of Al lattice truss with infiltrating process

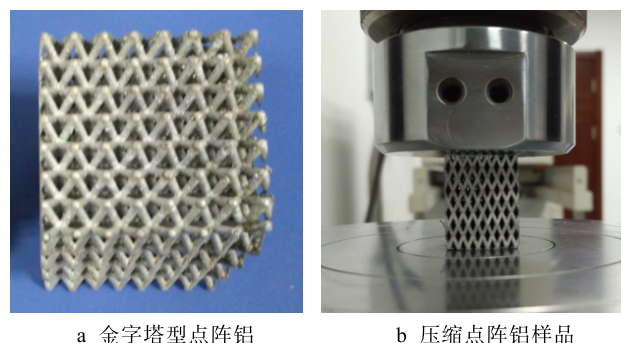


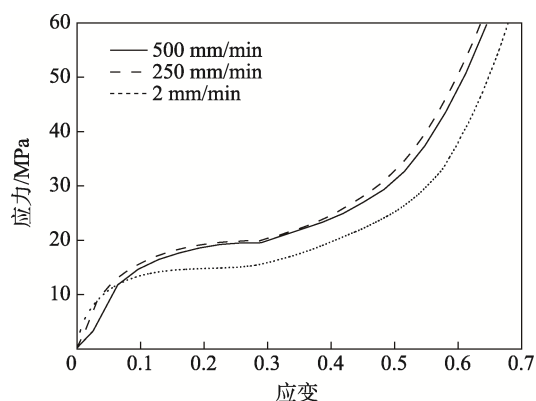
图 2 金字塔型点阵铝压缩样品
Fig.2 Compressed pyramidal aluminum based lattice samples

2 结果与分析

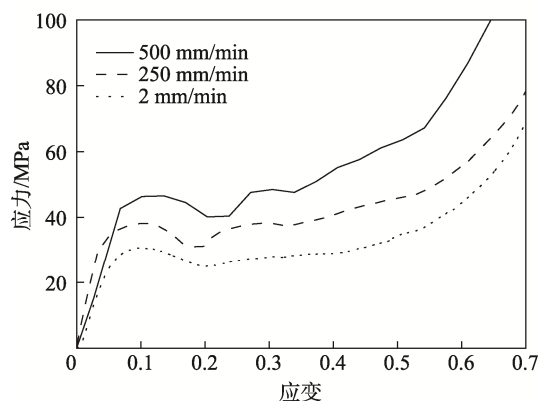
2.1 点阵 Al 的应力应变行为

点阵纯铝和点阵 6063 铝合金的压缩应力-应变曲线分别见图 3a 和图 3b。从图 3 可以看出, 在不同加载速率下点阵纯铝的应力-应变曲线有着相似的特征, 可以分为 3 个变形区域, 即应力与应变呈线性关系的线弹性区域、应力随着应变缓慢增加的应力平台区域以及应变发生较小变化时应力就迅速增大的压实致密区域。与点阵纯铝不同的是, 点阵 6063 铝合金的应力-应变曲线除了具有上述 3 个特征之外, 还有 1 个非常明显的变形阶段, 在弹性阶段结束时应力会达到最大值, 即为屈服强度, 随后应力下降, 达到最低值。这是由于 6063 铝基体塑性较差, 在压缩的过程中, 应力达到最大值时部分杆件会发生脆断导致的。无论是点阵纯铝还是点阵 6063 铝合金, 力学行为都表现出非常明显的应变率效应。当加载速率从 2 mm/min 增大到 250 mm/min, 屈服强度和流动应力都显著增强。当加载速率从 250 mm/min 增加到 500 mm/min 时, 点阵纯铝的应力应变曲线几乎重合, 而点阵 6063 铝合金屈服强度和流动应力增加还是非常明显。此现象可能是基体材料本身对加载速率的敏感性所致。

压缩速率相同时, 点阵铝随基体材料的变化规律见图 4, 由于 6063 铝合金基体的强度要大于纯铝基



a 点阵纯铝



b 点阵6063铝合金

图3 加载速率对点阵铝压缩应力应变曲线的影响

Fig.3 Effect of loading rate on the compression stress-strain curves of Al lattice truss

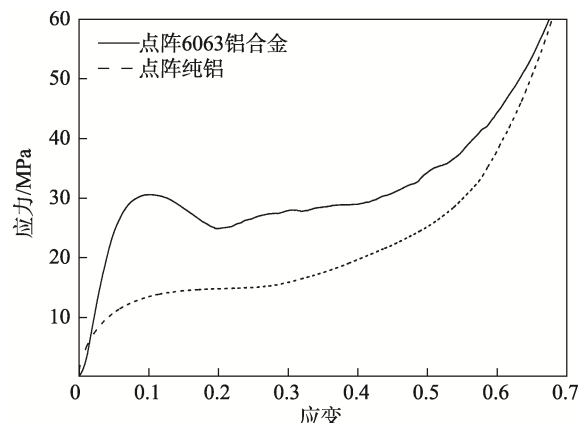
体,点阵6063铝合金应力-应变曲线始终在点阵纯铝的应力-应变曲线上方,其屈服强度要明显大于后者,见图5。当加载速率为2 mm/min时,点阵6063铝合金的屈服强度为30.6 MPa,而点阵纯铝的屈服强度仅为13.5 MPa,前者是后者的2倍以上。从屈服强度值随着加载速率变化的特征看出,点阵6063铝合金的屈服强度跟加载速率成线性关系,当加载速率从2 mm/min增加到250 mm/min时,点阵纯铝的屈服强度变大,而当加载速率从250 mm/min增加到500 mm/min时,点阵纯铝的屈服强度变化不大。另外,在弹性阶段,点阵6063铝合金要比点阵纯铝斜率更大,说明前者的弹性模量要大于后者。

2.2 点阵Al的吸能特性

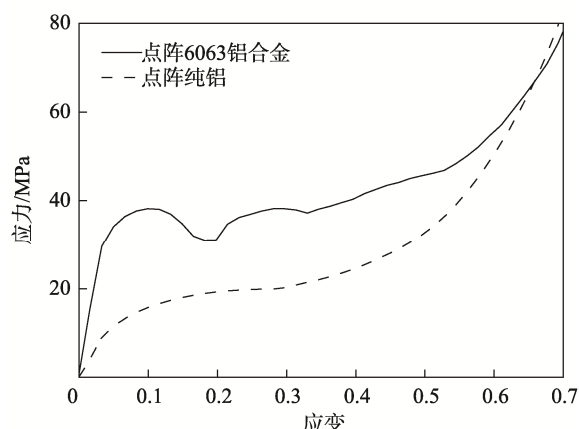
从点阵铝的应力-应变曲线可以看出,具有很长的应变范围内应力保持不变,根据应力以及应变的计算公式,可知在压缩很长的一段距离内,外力基本保持不变,说明其能够吸收外力做的功。其吸能量可以由应力-应变曲线下的面积来衡量,即单位体积吸能量(W)的计算公式为:

$$W = \int_0^{\varepsilon_m} \sigma_m d\varepsilon \quad (1)$$

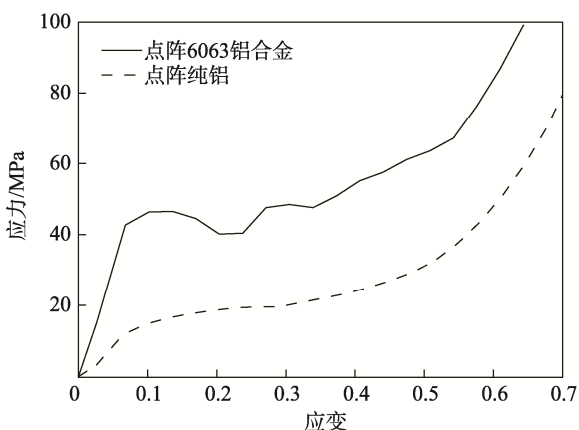
另外,能量吸收效率(E)同样也是表征吸能特性的重要指标,其计算公式为:



a 压缩速率2 mm/min



b 压缩速率250 mm/min



c 压缩速率500 mm/min

图4 基体对点阵铝压缩应力应变曲线的影响

Fig.4 Effect of basis material on the compression stress-strain curves of Al lattice truss

$$E = \frac{\int_0^{\varepsilon_m} \sigma_m d\varepsilon}{\sigma_m} \quad (2)$$

式中: σ_m 为应力值; ε_m 为应变值。

点阵纯铝和点阵6063铝合金不同加载速率时的单位体积吸能随应变的变化曲线见图6。从图6中可知,点阵铝的单位体积吸能量与应变成正比例关系。当应变相同时,加载速率对其单位体积吸能量也有显著的影响,尤其是较大应变时,影响相对而言更大。例如,当应变为0.1时,加载速率为2 mm/min的点

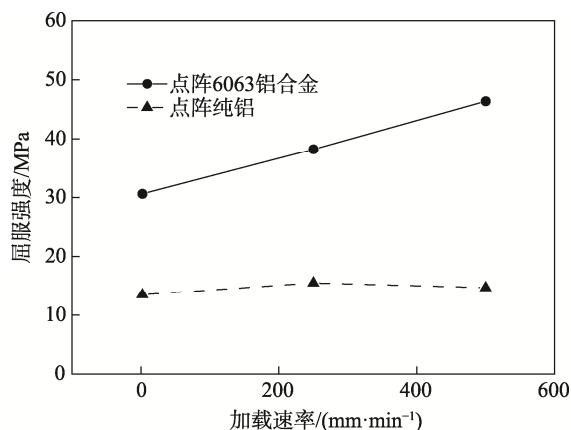


图 5 点阵铝屈服强度对加载速率的依赖性
Fig.5 Effect of loading rate on yield strength of Al lattice truss

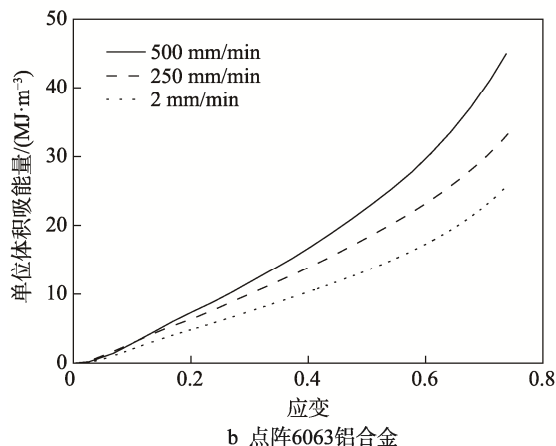
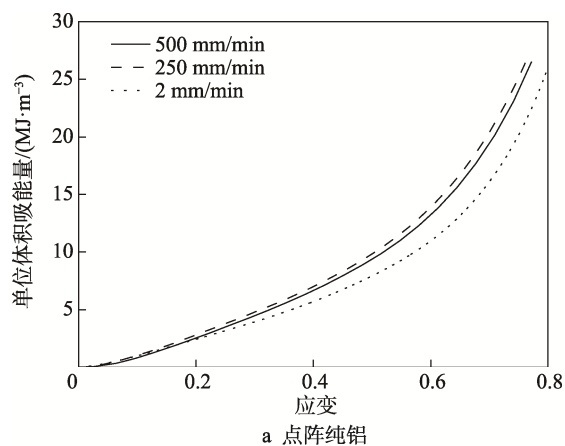
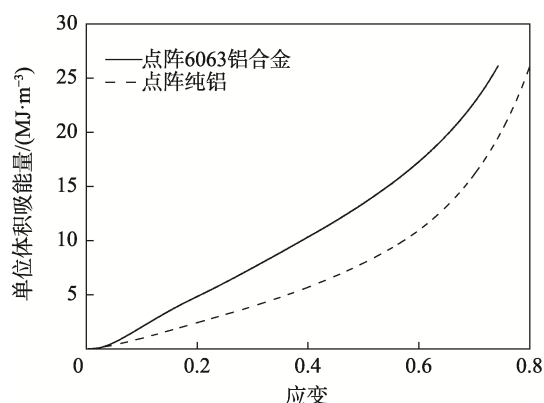


图 6 加载速率对点阵铝单位体积吸能曲线的影响
Fig.6 Effect of loading rate on the curves of energy absorbed per unit volume of Al lattice truss

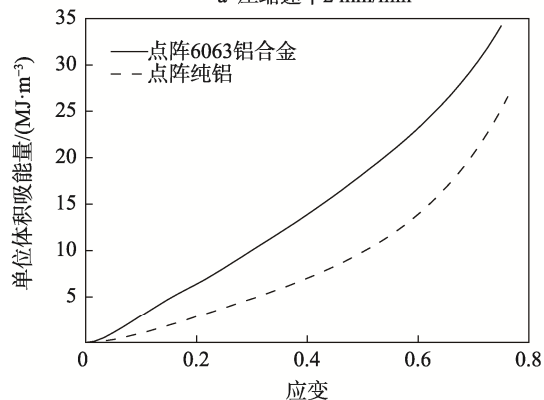
阵纯铝的单位体积吸能量为 0.8 MJ/m^3 ，加载速率为 250 mm/min 的点阵纯铝的单位体积吸能量为 1.0 MJ/m^3 ，加载速率为 500 mm/min 的点阵纯铝的单位体积吸能量为 1.0 MJ/m^3 ；应变为 0.5 时，加载速率为 2 mm/min 的点阵纯铝的单位体积吸能量为 7.9 MJ/m^3 ，加载速率为 250 mm/min 的点阵纯铝的单位体积吸能量为 10.0 MJ/m^3 ，加载速率为 500 mm/min

的点阵纯铝的单位体积吸能量为 9.0 MJ/m^3 。这是由于当应变小于 0.1 时为线弹性区，此时应力值随加载速率变化较小，进入应力平台区域后，流动应力值随着加载速率的增大而增大，所承受的载荷也就越大，所以能量吸收能力也就越强。另外，当加载速率为 250 mm/min 和 500 mm/min 时，点阵纯铝的单位体积吸能量变化不明显，这是由于此时点阵纯铝的流动应力随加载速率的变化不明显所导致。

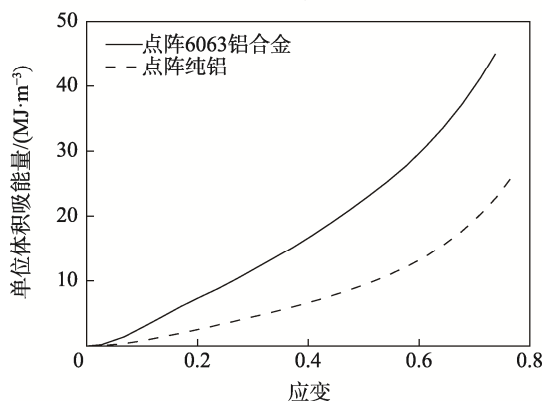
当加载速率不变时，点阵铝的单位体积吸能量随着基体材料的变化见图 7，从图 7 中可以看出，当应变相同时，点阵 6063 铝合金的单位体积吸能量要大于点阵纯铝。例如，当加载速率为 2 mm/min 、应变



a 压缩速率 2 mm/min



b 压缩速率 250 mm/min

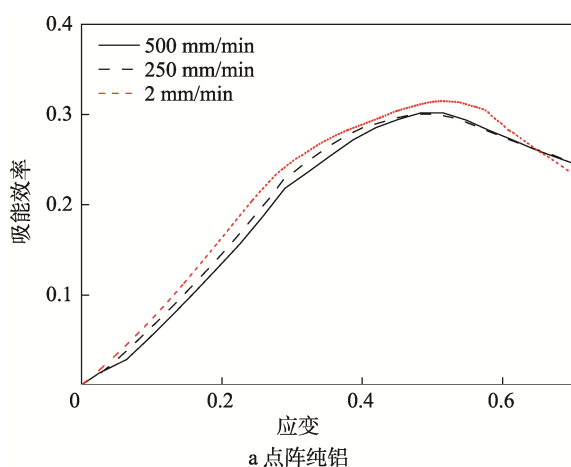


c 压缩速率 500 mm/min

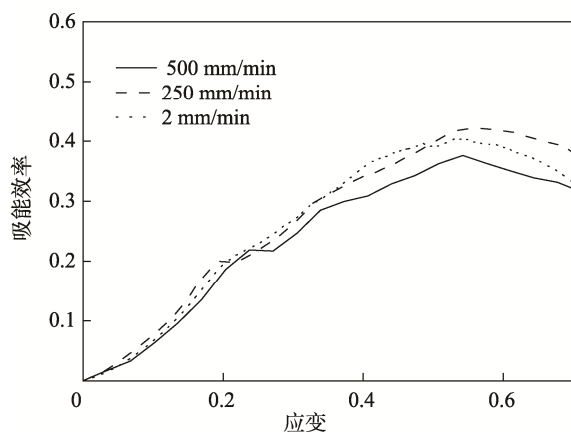
图 7 基体对点阵铝单位体积吸能曲线的影响
Fig.7 Effect of basis material on the curves of energy absorbed per unit volume of Al lattice truss

为 0.5 时,点阵 6063 铝合金的单位体积吸能量为 13.4 MJ/m^3 , 比点阵 6063 纯铝的单位体积吸能量增长了 5.5 MJ/m^3 ; 当加载速率为 250 mm/min 、应变为 0.5 时,点阵 6063 铝合金的单位体积吸能量为 18.0 MJ/m^3 , 比点阵 6063 纯铝的单位体积吸能量为 8.0 MJ/m^3 ; 当加载速率为 500 mm/min 、应变为 0.5 时,点阵 6063 铝合金的单位体积吸能量为 22.5 MJ/m^3 , 比点阵 6063 纯铝的单位体积吸能量增长了 13.5 MJ/m^3 。这是由于 6063 铝合金的强度要大于纯铝的强度,在压缩相同的变形量时,点阵 6063 铝合金的受力要大于点阵纯铝所导致。

当基体材料相同时,加载速率不同的点阵铝吸能效率随应变变化的曲线见图 8。从图 8 中可以看出,可以分为 2 个阶段,在进入致密化点之前,点阵铝的吸能效率与应变的关系是正比例关系,吸能效率达到最大值的应变范围在 $0.5 \sim 0.6$ 之间,此后吸能效率与应变的关系成反比例关系。点阵铝最大吸能效率随着加载速率的变化而发生变化。当加载速率为 2 mm/min 时,点阵纯铝的最大吸能效率为 0.32; 加载速率为 250 mm/min 时,点阵纯铝的最大吸能效率为 0.30; 加载速率为 500 mm/min 时,点阵纯铝的最大吸能效率为

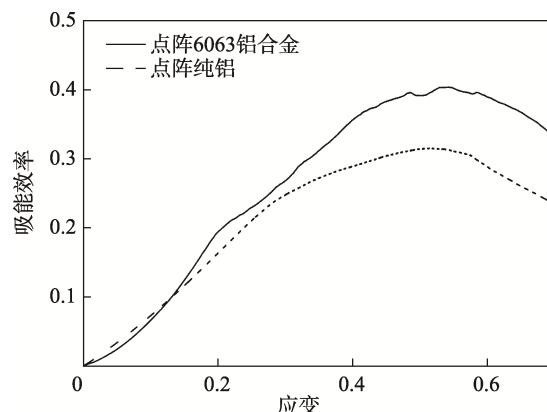


a 点阵纯铝

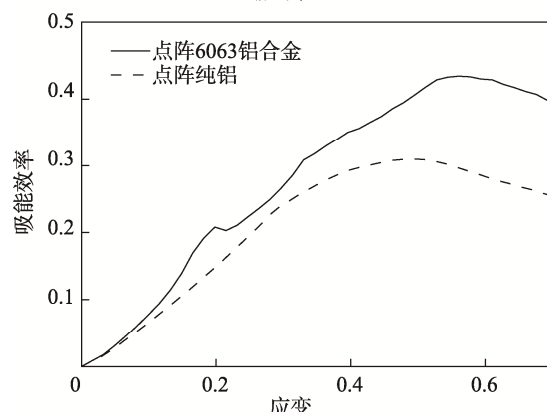


b 点阵6063铝合金

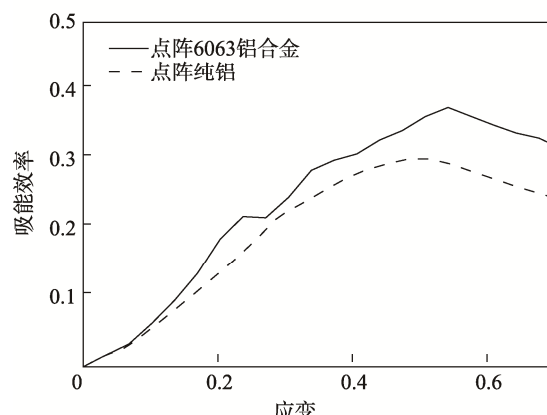
图 8 加载速率对点阵铝吸能效率曲线的影响
Fig.8 Effect of loading rate on energy absorption efficiency curves of Al lattice truss



a 压缩速率2 mm/min



b 压缩速率250 mm/min



c 压缩速率500 mm/min

图 9 基体对点阵铝能量吸收效率曲线的影响
Fig.9 Effect of basis material on the energy absorption efficiency curves of Al lattice truss

0.30。这种现象是由于加载速率较大时随着应变的增加应力值增加,比单位体积吸能量增加更多导致的。基体材料不同,应变相同时,点阵铝的吸能效率也有所不同,见图 9。从图 9 中能够看出,几乎在所有的应变范围内,点阵 6063 铝合金的吸能效率都大于点阵纯铝。尤其是应变大于 0.5 以后,点阵 6063 铝合金的吸能效率表现出非常大的优势。根据以上情况可知,点阵铝的吸能特性可以通过提高基体材料的强度来改善。

3 结语

通过点阵纯铝和点阵 6063 铝合金在加载速率为 2, 250, 500 mm/min 的应力-应变曲线, 对点阵铝在不同加载速率下的力学性能和吸能特性以及基体对点阵铝力学性能和吸能特性的影响进行了分析, 得出以下结论。

1) 点阵纯铝在不同的加载速率下的应力-应变曲线都分为线弹性区域、应力平台区域和压缩致密区域, 而点阵 6063 铝合金除了具有上述 3 个阶段之外在压缩应力达到最大值后还出现 1 个软化区域。

2) 点阵 6063 铝合金的屈服强度、流动应力、单位体积吸能量和能量吸收效率随着加载速率的增大而增大; 点阵纯铝在加载速率从 2 mm/min 增加至 250 mm/min 时, 力学性能和吸能特性增加比较明显, 而当加载速率从 250 mm/min 增加至 500 mm/min 时, 力学性能和吸能特性变化不大。

3) 在加载速率和结构参数相同的情况下, 点阵铝的屈服强度、流动应力、弹性模量、单位体积吸能量和吸能效率都随着基体材料强度的增大而逐渐增大。

参考文献:

- [1] 邢攸冬, 杨思一, 安钰坤, 等. 核乏燃料运输容器减震器填充材研究进展[J]. 包装工程, 2019, 40(21): 111—117.
XING You-dong, YANG Si-yi, AN Yu-kun, et al. Research Progress in Impact Limiter Filling Materials for Nuclear Spent Fuel Transport Casks[J]. Packaging Engineering, 2019, 40(21): 111—117.
- [2] 曾繁波, 兰凤崇, 陈吉清, 等. 泡沫铝结构的吸能特性影响参数试验分析[J]. 机械设计与制造, 2014(9): 14—18.
ZENG Fan-bo, LAN Feng-chong, CHEN Ji-qing, et al. Effects of Energy Absorption Characteristics of Aluminum Foam Structures on Parameter Test Analysis[J]. Machine Design and Manufacturing, 2014(9): 14—18.
- [3] CHUNZE Y, LIANG H, AHMED H, 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.
- [4] KANKHODAPOUR J, RAEISI S. Micro-macro Investigation of Deformation and Failure in Closed-cell Aluminum Foams[J]. Computational Materials Science, 2014, 83(15): 137—148.
- [5] 侯晓丽, 齐明思, 张伟, 等. 孔径对球体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.
HOU Xiao-li, QI Ming-si, ZHANG Wei, et al. Effect of Pore Size on Compression and Energy Absorption Properties of Open-cell Aluminum Foam with Spherical Pores[J]. Packaging Engineering, 2019, 40(19): 86—91.
- [6] LIU J, STEPHANE P, FANG D, et al. Impact Strength Enhancement of Aluminum Tetrahedral Lattice Truss Core Structures[J]. International Journal of Impact Engineering, 2015, 79: 3—13.
- [7] GREGORY W K, DOUGLAS T Q, HAYDN N G W. Shear Behavior of Aluminum Lattice Truss Sandwich Panel Structures[J]. Materials Science & Engineering A, 2008, 472: 242—250.
- [8] HUANG Y J, XUE Y Y, WANG X F, et al. Mechanical Behavior of Three-dimensional Pyramidal Aluminum Lattice Materials[J]. Materials Science & Engineering A, 2017, 696: 520—528.
- [9] GREGORY W K, VIKRAM S D, HAYDN N G W. Compressive Behavior of Age Hardenable Tetrahedral Lattice Truss Structures Made from Aluminium[J]. Acta Materialia, 2004, 52: 4229—4237.
- [10] BAO H Y, LI A Q. Study on Quasi-static Uniaxial Compression Properties and Constitutive Equation of Spherical Cell Porous Aluminum-polyurethane Composites[J]. Materials, 2018, 11(7): 1261—1265.
- [11] ZHANG C J, FENG Y, ZHANG X B. Mechanical Properties and Energy Absorption Properties of Aluminum Foam-filled Square Tubes[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2010, 20(8): 1380—1386.
- [12] ZHRNG Z J, WANG C F, YU J L. Dynamic Stress-strain States for Metal Foams Using a 3D Cellular Model[J]. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 2014, 72: 92—114.
- [13] LIANG X L, LUO H J, MU Y L, et al. Experimental Study on Stress Attenuation in Aluminum Foam Core Sandwich Panels in High-velocity Impact[J]. Materials Letters, 2017, 203: 100—102.
- [14] 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.
LI Zong-min, YANG Xu-dong, HU Qi, et al. Low Velocity Impact Energy Absorption Properties of Aluminum Foams[J]. Hot Working Technology, 2019, 48(20): 29—33.
- [15] 王晶, 齐明思, 张伟, 等. 相对密度对球体开孔泡沫铝压缩及吸能性能的影响[J]. 包装工程, 2019, 40(21): 105—110.
WANG Jing, QI Ming-si, ZHANG Wei, et al. Influence of Relative Density on Compression Properties and Energy Absorption of Spherical Open Cell Aluminum Foam[J]. Packaging Engineering, 2019, 40(21): 105—110.
- [16] DESHPANDE V S, ASHBY M F, FLECK N A. Foam Topology Bending Versus Stretching Dominated Architecture[J]. Acta Materialia, 2001, 49(6): 1035—1040.
- [17] 张钱城, 郝方楠, 李裕春, 等. 爆炸冲击载荷作用下车辆和人员的损伤与防护[J]. 力学与实践, 2014, 36(5): 527—539.
ZHANG Qian-cheng, HAO Fang-nan, LI Yu-chun, et al. Research Progress in The Injury and Protection to Vehicle and Passengers Under Explosive Shock Loading[J]. Mechanics in Engineering, 2014, 36(5): 527—539.
- [18] YIN S, MA L, WU L Z. Carbon Fiber Composite Lattice Structure Filled with Silicon Rubber[J]. Procedia Engineering, 2011, 10: 3191—3194.
- [19] 牟金磊, 李玉江, 张振华, 等. 垂向冲击作用下金字塔点阵夹芯单元结构失效分析[J]. 海军工程大学学报, 2016, 28(6): 5—9.
MU Jin-lei, LI Yu-jiang, ZHANG Zhen-hua, et al. Failure Analysis of Cell Sandwich Plate with Pyramidal Lattice Cores under Vertical Impact[J]. Journal of Naval University of Engineering, 2016, 28(6): 5—9.