

# 一种新型多孔金属制备方法及其缓冲吸能性能研究

冯彦科<sup>1,2</sup> 何 凯<sup>2</sup> 毛 贺<sup>2</sup> 王 跃<sup>2</sup> 左启阳<sup>2</sup>

<sup>1</sup>(华南理工大学 机械与汽车工程学院 广州 510640)

<sup>2</sup>(中国科学院深圳先进技术研究院 集成所精密工程中心 深圳 518055)

**摘 要** 多孔金属材料是一种比密度小、比刚度强、吸能效果好的理想型功能材料,因此一直是国内外众多学者研究的热点。文章提出了一种以立方体为基本单元的多孔金属制备方法,为研究其作为吸能材料的力学性能,对制备样品进行了准静态和动态的冲击实验,根据实验结果进行了相应的分析和总结,从而验证了该制备方法的可行性,拓展了多孔金属材料的种类范围,也为进一步优化该多孔金属的制备方法和工艺提供了实验基础。

**关键词** 多孔金属; 制造方法; 力学试验; 吸能

**中图分类号** TB 31 **文献标志码** A

## Research on a New Type of Cellular Metal Fabrication Method and Energy Absorption Properties

FENG Yanke<sup>1,2</sup> HE Kai<sup>2</sup> MAO He<sup>2</sup> WANG Yue<sup>2</sup> ZUO Qiyang<sup>2</sup>

<sup>1</sup>(School of Mechanical & Automotive Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

<sup>2</sup>(Key Lab of Precision Engineering, Institute of Integrated Technology Shenzhen Institutes of Advanced Technology, Chinese Academy of Sciences, Shenzhen 518055, China)

**Abstract** The porous metal material is an ideal functional material with low density, high specific stiffness, and good energy absorption effect. It has been widely studied and used for various applications. In this paper, a new method to fabricate porous metal based on cubic cells was studied. In order to study the mechanical properties of this energy absorbing material, some samples are prepared for the actual quasi-static and dynamic impact tests. By analyzing the experimental results, feasibility of the method can be verified. This work may extend the range of porous metal materials, and provide foundations for further optimization of porous metals.

**Keywords** porous metal; fabrication method; mechanical test; energy absorption

收稿日期: 2016-10-08 修回日期: 2016-12-05

基金项目: 深圳市孔雀计划技术创新资助项目(KQCX20130628112914289)

作者简介: 冯彦科, 硕士研究生, 研究方向为多孔金属材料制备工艺; 何凯(通讯作者), 正高级工程师, 研究方向为精密制造及自动化, E-mail: kai.he@siat.ac.cn; 毛贺, 工程师, 研究方向为多孔金属材料制备及应用; 王跃, 硕士研究生, 研究方向为有限元仿真; 左启阳, 博士后, 研究方向为多孔金属材料制备及应用。

## 1 引言

多孔金属材料是一种比密度低、比强度和比刚度高的新型轻质多功能材料,具有优异的声学性能、电磁屏蔽性能、隔热性能、耐腐蚀性能、阻尼减振和冲击能量吸收性能。尤其近年来在航空航天、高速列车等高科技领域被用于制造缓冲吸能元件,用于吸收碰撞过程中巨大的冲击能量<sup>[1,2]</sup>,因此具有广泛的应用前景,是近年来材料学领域发展的热点之一。根据多孔金属材料的内部孔隙连通性不同分为开孔型和闭孔型<sup>[3]</sup>,根据其排列方式不同又分为有序型和随机型。

目前,最具代表性的两种多孔金属材料是铝蜂窝和泡沫铝,国内外众多学者研究主要集中在制备方法<sup>[4,5]</sup>、结构、用途、准静态力学性能和动态力学性能等方面,并且已有的成形方法主要用于加工不规则的多孔泡沫,对于规则多孔金属的加工仍难以解决。Gibson 与 Ashby<sup>[6]</sup>对多孔材料的结构和力学性能进行了系统的概括和总结,并给出了多孔金属材料的本构关系。Mukai 等<sup>[7]</sup>对一种泡沫铝合金进行了动态和准静态压缩实验,得到相应的应力应变曲线,通过比较  $1 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$  和  $2.5 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$  应变率下的结果得出该泡沫铝合金具有明显的应变率敏感性。Tan 等<sup>[8]</sup>对这一种闭孔泡沫 Al-Si-Mg 合金的压缩行为进行了实验研究,随着冲击速度的提高,塑性坍塌应力也相应的提高。Pinto 等<sup>[9]</sup>对两种不同结构类型的金属泡沫体进行了压缩实验,结果表明当进行冲击或是准静态压缩加载时,组件使用双尺寸结构都会有更高的刚度和碰撞能量吸收效率。王中钢等<sup>[10]</sup>对铝蜂窝材料进行了准静态和动态冲击实验,获取了铝蜂窝材料特性与吸能能力之间的关系,得出铝蜂窝在低速冲击试验条件下吸能能力较准静态试验有所提升的结论。

本文提出了一种新型的以空心立方体为基本

单元的多孔金属构型方法,并通过准静态压缩试验和动态压溃试验系统地研究了新型多孔金属的缓冲吸能性能,形成了一个完整的设计、分析与制造体系。为进一步新型多孔金属吸能器的设计优化提供了设计依据与实验依据。

## 2 材料制备与实验仪器

### 2.1 材料制备

该新型规则多孔金属材料吸能器使用的基本型材是 5050 铝合金,板厚 0.15 mm。本文使用的小立方体的尺寸为毫米量级,边长为 5 mm。首先采用冲压的方式获得立方体上下两部分,采用直接扣合的方法制成一个个立方单元胞体;之后把这些单元体使用夹具按照一定规律拼接成单层的多孔金属材料;最后使用整机功率为 9 kW,型号为 YAG-W200A 的激光焊机对其进行焊接。由于实际的小立方体是由两部分扣合而成,会表现出各向异性,因此,基本分为以下两种不同的排列方式,如图 1 所示。并且发现,不同的排列方式会对激光焊接的难易程度、立方体之间的焊接强度以及整体吸能器的力学性能都会造成影响,这些均在本文中进行了研究。而多孔金属材料层与层之间的连接采用的是胶接工艺,其原因有两个:一是目前的实验设备还不足以满足层与层之间的焊接;二是实验研究表明,多孔金属材料单层面结构双面焊接时无法保证两面的每处受热都均匀一致,单层面在冷却收缩变形后会呈现一定的弧度,这会影响焊接效果。后续的研究中,会采用钎焊的方法实现多孔金属材料层与层之间的连接<sup>[11,12]</sup>。本文提出的胶接工艺如下:使用树脂胶 ergo1900 型胶粘(ergo1900 胶粘剂是一种丙烯酸结构胶,由 ergo1908 型树脂和 ergo1909 型固化剂 1:1 混合而成)喷在单层面上涂抹均匀,对齐边沿后加剧保压 1 小时,使胶粘剂

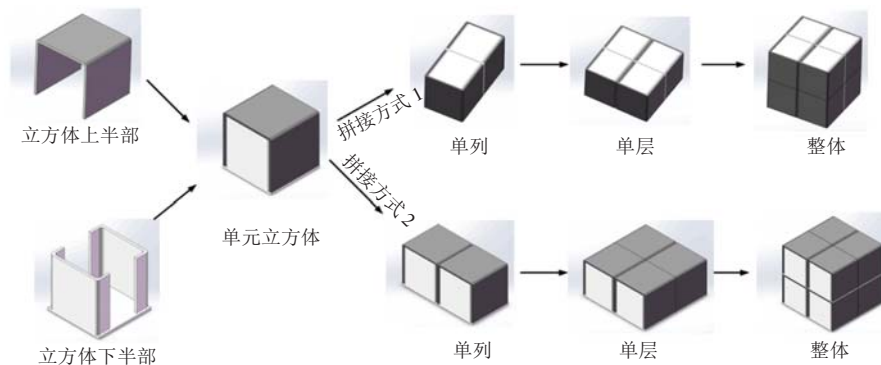


图 1 多孔金属的两种拼接方式

Fig. 1 Two kinds of porous metal splicing

充分固化。

## 2.2 实验仪器

本文主要从准静态和动态冲压两个方面对新型多孔金属缓冲器进行力学研究。实验仪器选用如下: 准静态实验采用 Instron 公司的落地式 Electropuls E10000 型试验机, 该试验机动态载荷最大载荷为 10 000 N, 静态载荷最大载荷为 7 000 N, 作动缸行程为 60 mm; 而冲击动力学实验采用的是落锤式冲击试验机 INSTRON CEAST9350, 其中落锤式冲击试验机能量范围 0.59~1 800 J、冲击速度 0.77~24 m/s、掉落高度(模拟)0.03~29.4 m、落锤配重 2.00~70.0 kg。

## 3 多孔金属缓冲吸能性能

多孔金属吸能器的一个重要应用就是作为能量吸收部件加装在汽车、地铁、城轨、高速列车、航天飞机上, 用于吸收意外事故撞击时产生的巨大冲击动能, 保护乘客和专用设备的安全。因此研究多孔金属的缓冲吸能性能具有非常重要的意义。目前对于新型材料的缓冲吸能性能主要采用准静态压溃试验和冲击动力学试验得到载荷-位移曲线, 对其载荷特性进行研究, 并计算出缓冲吸能性能相关的参数, 进而对其吸能性能进行全面评估。

吸能器在工作过程中, 外部的冲击力经过吸能器的作用, 其冲击力大大减小。在设计吸能器时, 必须要求其在工作过程中有一个稳定的吸能阶段, 并且缓冲力始终小于许用的峰值载荷。因此, 对于缓冲器而言, 在缓冲吸能过程中, 其载荷特性也非常重要。下面将结合典型的载荷-变形曲线, 如图 2 所示, 对多孔金属缓冲器的载荷特性进行研究。

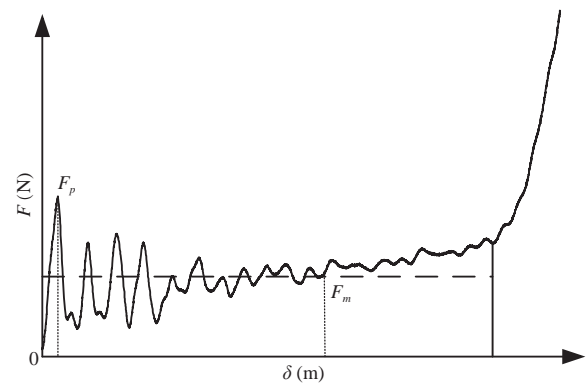


图 2 缓冲器在工作过程中的载荷-变形曲线

Fig. 2 Typical load-displacement curve of the energy absorber

### 3.1 准静态压缩试验

为研究激光焊接单层立方体时不同拼接方式对多孔金属吸能性能的差异, 本文在制备准静态压缩试验样件时, 将其分成两组。其中, 第一组单元体层之间采用排列方式 1 拼接; 第二组单

元体层之间采用排列方式 2 方式拼接，具体如图 3 所示。



(a) 第一组



(b) 第二组

图 3 准静态压缩实验样件

Fig. 3 Pieces of quasi-static compression

实验规格有： $4 \times 4 \times 6$ ， $4 \times 4 \times 8$ ， $4 \times 4 \times 10$  三种规格。

在加载过程中，保持加载工具头的移动速率恒定，设定初始应变速率为  $10^{-3} \text{ s}^{-1}$ ，直至加载力达到 9 kN 时自动停止返回。根据不同试件轴向高度，分别确定加载速率为 1.8 mm/min (试件  $4 \times 4 \times 6$ )、2.4 mm/min (试件  $4 \times 4 \times 8$ ) 和 3.0 mm/min (试件  $4 \times 4 \times 10$ )，根据压缩实验获得的力-位移数据，可以求得试样应力-应变曲线，以及试样的初始峰值载荷 ( $F_{\max}$ )，准静态压缩实验如图 4 所示。

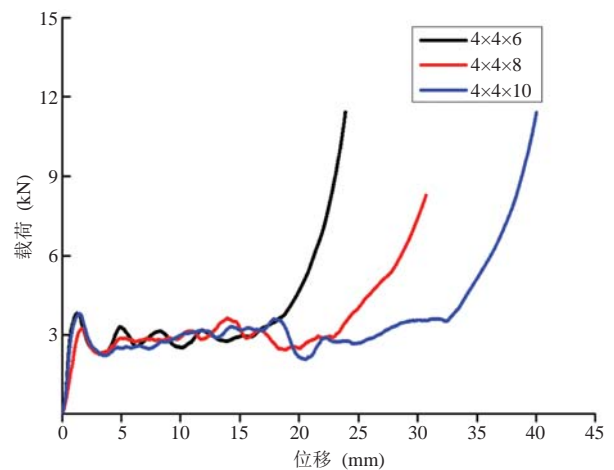
### 3.1.1 实验结果

实验数据分两组：第一组表示的是单层排列方式 1 焊接方式的结果，第二组表示的是单层排列方式 2 焊接方式的结果，试件准静态压缩实验力-位移曲线如图 5 所示。

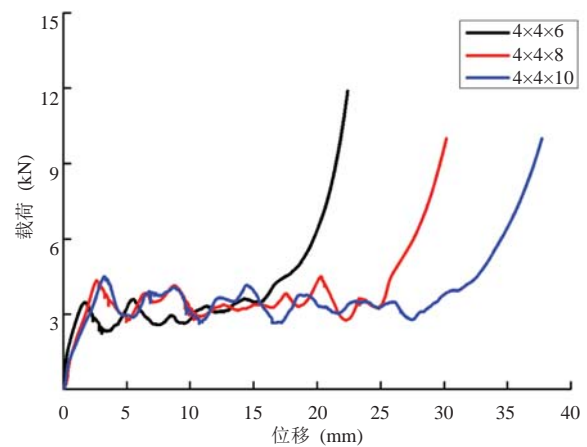


图 4 准静态压缩实验现场

Fig. 4 The test site of quasi-static compression



(a) 第一组



(b) 第二组

图 5 准静态压缩实验数据力-位移曲线

Fig. 5 The force - displacement curve of quasi-static compression



### 3.1.2 结果分析

从图 5 的数据图形来看, 本文提出的新型多孔金属材料和典型的 Gibson 和 Ashby<sup>[6]</sup>提出的静压曲线趋势基本类似, 都可分为三个阶段, 即弹性变形阶段、平台应力阶段和密实化阶段, 但又有一些区别。在本次实验的实际压缩过程中, 样件都不同程度地出现了部分突然坍塌的情况。分析原因是因为本次实验采用的立方体都是由上下两个分体直接扣合而成, 立方体内部存在些许间隙。在压缩过程中, 立方体之间和内部存在的间隙在外力的作用下出现了局部应力集中, 而其中的某些立方体到一定极限后突然发生了压溃。后续将继续改进制备工艺, 如采用特种胶, 将采用无序的排列的方式, 降低间隙对整体力学性能的影响。

其次, 单独从第一组或是第二组试件的压缩曲线结果来看, 无论是  $4 \times 4 \times 6$ 、 $4 \times 4 \times 8$  或是  $4 \times 4 \times 10$ , 三者的平台力阶段基本能够重合。从总体实验数据来看, 实验结果稳定可靠, 均值都在 3 kN 左右, 说明样件所受的平台应力与样件的高度无关。而从最大峰值应力来看, 第二组 3 个样件分别为 3.51 kN、4.34 kN 和 4.51 kN, 表现出了明显的差别, 即样件的高度越高, 初始峰值也就也大。反观第一组的 3 个样件中  $4 \times 4 \times 6$  和  $4 \times 4 \times 10$  弹性阶段基本重合并且最大峰值应力都为 3.85 kN, 而  $4 \times 4 \times 8$  则相对小一点, 最大峰值应力为 3.29 kN, 出现这种现象的原因是试件制备和实验操作时的误差。而且可以看出,

除了  $4 \times 4 \times 6$ , 第二组样件的初始最大峰值应力都高于第一组的相应样件。而从实际安全吸能方面考虑, 第一组的排列优于第二组。

### 3.2 动态冲击压溃试验

进行多孔金属的动态压溃试验, 得到载荷-位移曲线, 考察多孔金属的吸能性能。试样规格及分组如下:

试件规格有  $4 \times 4 \times 6$ 、 $4 \times 4 \times 8$ 、 $4 \times 4 \times 10$ 、 $7 \times 7 \times 10$  四种规格。实验试样与准静态实验相同, 如图 6 所示。

规格为  $4 \times 4 \times 6$ 、 $4 \times 4 \times 8$ 、 $4 \times 4 \times 10$  分为两种拼接方式, 实验试件编号如表 1 所示。其中, 试件编号下划线后第一个数字为 1 的为拼接方式 1, 下划线后第一个数字为 2 的为拼接方式 2, 因此这三种规格, 共分为 6 组, 每组有 2 个样品用于动态压溃试验落锤冲击实验, 现场如图 7 所示。

$7 \times 7 \times 10$  共 4 个, 全部用于动态压溃试验。



图 7 落锤式冲击试验

Fig. 7 Test of drop hammer impact



图 6 动态冲击压溃实验样件

Fig. 6 Pieces of dynamic impact crush

### 3.2.1 落锤冲击试验结果

(1) 落锤冲击试验的参数设定如表 1 所示。

(2) 落锤冲击试验载荷-位移曲线结果如图 8 所示。

### 3.2.2 结果分析讨论

与静力学实验不同，落锤冲击实验控制的加载选项为落锤能量，故在试验时所测量的材料必须吸收完落锤所设定的能量，否则对设备

造成不良影响甚至危险。因此，在实验时，必须进行试冲压样件，进行能量大概估算，对应编号以及根据设备的实际情况做配重和能量设置如表 1 所示，试件编号下划线后第二个数字为“1”的为试冲试件，为“2”的结果为实验结果取值数据。此次实验考虑对实验机器的保护，做得相对比较保守，实验数据基本上只显示预测的 50%~60%，虽没有出现密实化阶段，但

表 1 规格为 4×4×6、4×4×8、4×4×10 的试验参数

Table 1 Test parameters for specifications of 4×4×6/4×4×8/4×4×10

试样编号	长 (mm)	宽 (mm)	高 (mm)	平均静压强度 (Mpa)	压缩行程 (mm)	预计能量 (J)	落锤总重量 (kg)	实际压缩距 (mm)	实验设置能量值 (J)	接触瞬时冲击速度 (m/s)
4×4×6_1-1	20.56	20.45	31.90	7.13	22.62 / 70.91%	54.2105	12.05	9.16	30	3
4×4×6_1-2	20.61	20.50	32.13	/	22.85 / 71.12%	55.0291	12.23	10.95	40	3
4×4×6_2-1	20.33	20.36	32.35	8.63	24.05 / 74.34%	68.6877	15.26	20.88	40	3
4×4×6_2-2	20.50	20.24	32.24	/	23.94 / 74.26%	68.5389	15.23	11.47	50	3
4×4×8_1-1	20.37	20.55	43.13	7.16	31.00 / 74.18%	74.3305	16.52	12.30	40	3
4×4×8_1-2	20.42	20.50	42.60	/	30.47 / 71.53%	73.0609	16.24	15.55	60	3
4×4×8_2-1	20.40	20.39	42.80	8.75	31.72 / 74.11%	92.3588	20.52	16.62	60	3
4×4×8_2-2	20.45	20.25	42.91	/	31.83 / 74.18%	92.2684	20.50	20.89	75	3
4×4×10_1-1	20.47	20.55	53.50	7.69	38.45 / 71.87%	99.5044	22.11	16.08	60	3
4×4×10_1-2	20.66	20.57	53.65	/	38.60 / 71.95%	100.917	22.43	30.00	100	3
4×4×10_2-1	20.25	20.53	53.07	9.18	39.31 / 74.07%	119.953	26.66	13.97	60	3
4×4×10_2-2	20.38	20.26	53.55	/	39.79 / 74.30%	120.590	26.80	20.67	100	3

注：计算预计能量时，每个结果都乘以了 0.8 安全系数

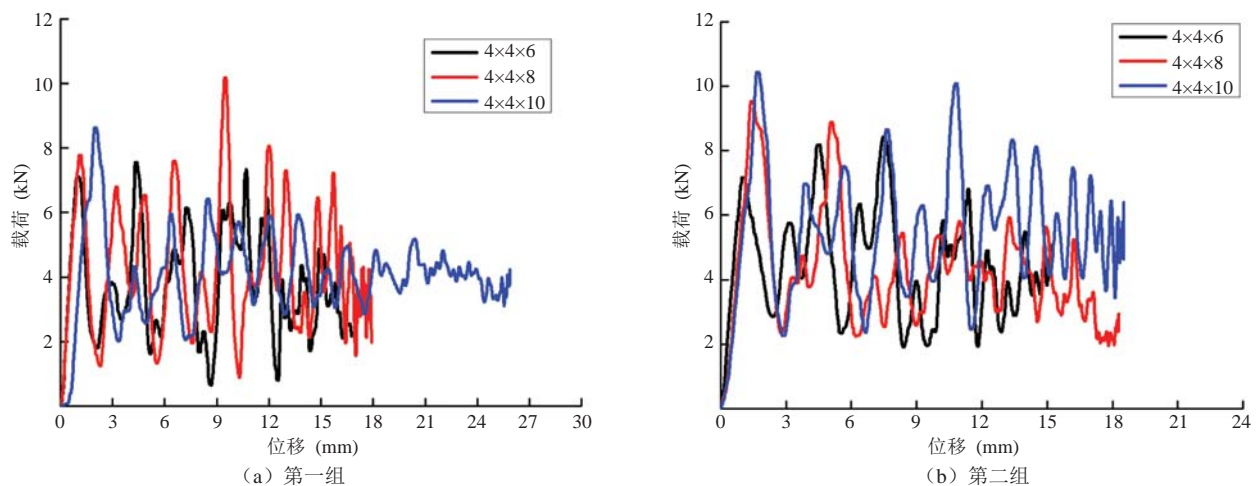


图 8 冲击试验载荷-位移曲线

Fig. 8 The load - displacement curve of impact test

是压缩行程基本在 71%~75%。从实验数据曲线(图 8)中可以看出, 实验中的小样件  $4 \times 4 \times 6$ 、 $4 \times 4 \times 8$ 、 $4 \times 4 \times 10$ , 前期实验数据跳动比较大, 之后数据曲线只有第一组的  $4 \times 4 \times 10$  逐渐趋近于某一个值。分析原因, 首先因为样件的横截面方向立方体比较少, 而 Onck 和 Andrews<sup>[13,14]</sup> 研究闭孔泡沫铝和开孔泡沫铝的单轴压缩实验响应表明, 试件尺寸最小应为胞孔尺寸的 6 倍以上, 才能避免试件边缘效应对力学性能的影响。其次, 是因为高度太小时, 落锤对多孔金属的作用距离过短, 内部应力还没达到基本平衡, 冲压就已经结束。也说明了增加高度会更有利于多孔金属的稳定吸能。除此之外, 前期波动过大的原因是落锤冲击时非线性接触, 而且样件在冲压之前, 在速度方向上立方体之间以及内部存在较多间隙。这和上述静压时类似, 导致立方体开始时基本是按照一层一层的部分压溃, 在达到一定层数之后, 层与层之间挤压变形紧密接触, 才出现整体变形, 应力也随之呈现稳定趋势, 而在这也同时提出了在以后实验冲压之前应对实验样件进行预压处理。最后, 从实验数据得出, 第一组初始峰值分别为 7.08 kN、7.79 kN 和 8.55 kN, 而第二组初始峰值分别为 7.14 kN、9.49 kN 和 10.45 kN。从结果可以看出, 初始峰值随着样件高度的增加而增加。其次, 第二组的初始峰值增长幅度较第一组的大, 相应样件的数值大小也明显高于第一组, 这些与静态分析结果相一致。因此从动态吸能角度考虑, 第一组明显优于第二组。

### 3.2.3 与类似研究的对比分析

作为冲击能量吸收材料, 目前在大变形吸震缓冲结构中, 蜂窝结构金属较为常见, 因其冲击能量吸收效果较佳, 因此已被用作制造铝蜂窝吸能器, 安装在专有轨道上运行的高速列车上。然而, 蜂窝金属大多属于二维结构件, 因此只能抵受单向冲击, 对多方位多角度的冲击无能为力。另外, 目前还有相当一部分的研究集中在泡沫金

属上, 但这种材料的组织不均匀, 且晶胞大小不易控制, 因此力学性能受到较大影响, 再者, 其制备工艺比较复杂, 生产成本较高, 价格昂贵。由于基体单元及组织结构上的独特性, 本文所展示的新型多孔金属材料在力学和缓冲性能方面, 拥有其他多孔金属材料所无法比拟的优势, 例如: 与蜂窝金属相比, 该新型多孔金属材料可以抵受来自空间正交三维方向的冲击, 且可以通过控制单元胞体的大小和数量的方式, 生成体积不一的、各种规格的整体多孔金属, 从而更有利于把其填充到被保护的部位内; 与泡沫金属相比, 该新型多孔金属材料组织均匀, 整体材料的晶胞一致性非常高, 且该材料的晶胞(即立方基体单元)尺寸可控, 因此材料的相对密度和孔隙率也就可控, 从而可根据实际情况来制备不同规格的多孔材料, 满足不同的应用需求。此外, 由于该新型多孔金属由冲压获得, 因此, 其多孔晶体单元尺寸可控, 整个多孔材料的一致性非常高, 使得材料具备非常优良的性能。

## 4 结 语

本论文展示了一种新型基于板材冲压成形的多孔金属制备方法, 讨论了两种不同拼接方式下的缓冲吸收性能, 并得出从实际安全吸能角度考虑, 第一组的排列方式优于第二组。实验结果可为这种新型材料应用于制造高效、轻量化的冲击缓冲结构提供设计依据和数据支持, 同时也为进一步优化改进该种多孔金属材料的制备工艺提出了有建设性的方法。同时, 树脂胶会出现老化现象, 对材料的性能产生一定的影响。对此, 未来我们将会采取以下两种办法解决: (1) 选用另一种更佳的特种胶进行连接, 并通过后续的试验来加以分析和研究; (2) 采用钎焊的方法实现多孔金属材料层与层之间的连接。此外, 与现有蜂窝材料的制备工艺采用的滚压成型技术相比, 本文

的制备工艺在复杂度上略有提升,在接下来的研究中将考虑冲压模具单一化(拟十字送料)并实现自动化,采用机械臂和多激光焊接头同时工作,从而进一步简化流程,提高制备效率。

总的来说,该新型多孔金属具有很好的研究价值和前景。

### 参 考 文 献

- [1] Banhart J, Baumeister J, Weber M. Damping properties of aluminium foams [J]. *Materials Science and Engineering: A*, 1996, 205(1-2): 221-228.
- [2] Brene F, Niendorf T, Maier HJ. Additively manufactured cellular structures: impact of microstructure and local strains on the monotonic and cyclic behavior under uniaxial and bending load [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2013, 213(9): 1558-1564.
- [3] Boomsma K, Poulikakos D, Ventikos Y. Simulations of flow through open cell metal foams using an idealized periodic cell structure [J]. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 2003, 24(6): 825-834.
- [4] 刘培生, 黄林国. 多孔金属材料制备方法 [J]. *功能材料*, 2002, 33(1): 5-8.
- [5] 杨雪娟, 刘颖, 李梦, 等. 多孔金属材料的制备及应用 [J]. *材料导报*, 2007, 21(Z1): 380-383.
- [6] Gibson LJ, Ashby MF. *Cellular Solids: Structure and Properties* [M]. Cambridge University Press, 1999.
- [7] Mukai T, Kanahashi H, Miyoshi T, et al. Experimental study of energy absorption in a close-celled aluminum foam under dynamic loading [J]. *Scripta Materialia*, 1999, 40(8): 921-927.
- [8] Tan PJ, Reid SR, Harrigan JJ, et al. Dynamic compressive strength properties of aluminium foams. Part I—experimental data and observations [J]. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 2005, 53(10): 2174-2205.
- [9] Pinto P, Peixinho N, Silva F, et al. Compressive properties and energy absorption of aluminum foams with modified cellular geometry [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2014, 214(3): 571-577.
- [10] 王中钢, 鲁寨军. 铝蜂窝异面压缩吸能特性实验评估 [J]. *中南大学学报: 自然科学版*, 2013, 44(3): 1246-1251.
- [11] 彭明军, 孙勇, 段永华, 等. 钎焊蜂窝铝板侧压变形模式分析研究 [J]. *材料导报*, 2010, 24(6): 75-77.
- [12] 赵欢, 程方杰, 齐书梅, 等. 中温自反应钎焊铝蜂窝芯耐高温老化性能分析 [J]. *材料工程*, 2016, 44(11): 39-44.
- [13] Onck PR, Andrews EW, Gibson LJ. Size effects in ductile cellular solids, Part I: modeling [J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2001, 43(3): 681-699.
- [14] Andrews EW, Gioux G, Onck PR, et al. Size effects in ductile cellular solids. Part II: experimental results [J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2001, 43(3): 701-713.