

新型塑性加工制备球形孔多孔金属及其性能*

施国栋 何德坪 何思渊 丁龙

(东南大学材料科学与工程学院 南京 210096)

摘要 将铝板塑性加工成半球孔层金属结构薄层, 以此为基本单元按一定方式连接形成球形孔多孔金属, 研究了孔结构对球形孔多孔金属性能的影响. 结果表明, 平板层相连的球形孔结构, 使其强度高于同样条件下堆积的空心金属球结构. 这种新型球形孔多孔金属的强度较高, 能够有效地吸收能量, 铝板的厚度和孔隙率对其压缩和能量吸能性能有明显的影

关键词 金属材料, 冲压, 多孔金属, 孔隙率, 压缩吸能, 球形孔

分类号 TG146

文章编号 1005-3093(2009)02-0143-06

New type of porous metal with spherical pore prepared by plastic working and properties

SHI Guodong HE Deping** HE Siyuan DING Long

(Department of Materials Science and Engineering, Southeast University, Nanjing 210096)

* Supported by National Key Basic Research No. 2006CB601201 and National Natural Science Foundation Nos.50471031 and 50231010.

Manuscript received May 20, 2008; in revised form November 7, 2008.

** To whom correspondence should be addressed, Tel:(025)83794119, E-mail: dphe@seu.edu.cn

ABSTRACT A novel method to prepare metallic structure with hemisphere layer formed by metal sheet plastic processing and connect it to novel porous metal in certain ways is proposed. The strength of structure composed of interconnected flat plate layers is greater than that of structure composed of accumulative metallic balls with air core in the same condition. This structure has high strength and can absorb energy, and the thickness and porosity of aluminum sheet have obvious effect on its compressive property.

KEY WORDS metallic materials, punch, porous metal, porosity, compression and energy absorption, spherical pore

球形孔泡沫铝合金具有完善的孔结构, 与多边形高孔隙率泡沫铝合金相比, 压缩屈服强度是后者的 3~7 倍, 吸能能力是后者的 3 倍左右^[1]. 但是, 制备完善的球形孔结构泡沫铝合金有一定的难度.

为了获得多样化多孔金属, 已经发展了熔体发泡法、熔体渗流法、固态烧结法、熔体注气法、粉末发泡法、精密铸造法和格栅等各种制备方法^[2-5]. 但是, 这些方法的工艺复杂、价格较高, 或孔形、孔径和孔隙率等不易控制. 采用塑性压力加工方法先将板材(例如铝、铁、铜、钛)形成半球孔层, 作为球形孔多孔金属的基本单元, 再按照一定的规律组合可以形成

多种球形孔金属^[6]. 本文使用文献 [6] 的方法制备一种新型球形孔多孔金属, 研究球形孔多孔金属的孔结构以及压缩和吸能性能.

1 实验方法

1.1 新型球形孔多孔金属的制备

为形成新型球形孔多孔金属的基本单元金属半球层, 采用抗蚀性与成形性好的纯铝薄板, 用冲压模具将厚度分别为 1.08 mm, 0.88 mm, 0.68 mm 的铝板在室温下制成直径为 8 mm 的半球, 均匀排列成 4×4 的半球层铝薄板(图 1).

采用焊接、胶接或铆接等方法将 8 层半球层薄板连接起来, 得到类似体心立方的结构, 形成图 2、图 3 所示的新型球形孔多孔金属. 图 2 为 A 类, 凹面在外; 图 3 为 B 类, 凸面在外.

实验中将聚酰胺树脂和环氧树脂 1 : 1 混合作

* 国家重点基础研究 2006CB601201 和国家自然科学基金 50471031, 50231010 资助项目.

2008 年 5 月 20 日收到初稿; 2008 年 11 月 7 日收到修改稿.

本文联系人: 何德坪, 教授

为胶,把半球铝孔层连接成类似体心立方结构球形孔铝,样品的尺寸长 55.0 mm,宽 55.0 mm,高 33.3 mm,孔径 $d=8$ mm. 由厚度 1.08 mm, 0.88 mm, 0.68 mm 的铝薄板所制得的球形孔多孔金属样品,孔隙率分别为 53%, 62%, 69%. 当 $P=63\%$ 时 $\rho=1$, 当冲压薄板

壁厚为 0.68 mm, 球形孔多孔金属可浮于水上.

将试样的室温压缩试验在 WD210A 型万能试验机上进行,其分辨率为 100 N, 量程 100 kN, 以 2 mm/min 的压缩速率进行单向压缩. 试样的厚度为 1.08 mm, 孔径为 8 mm 的铝半球板, 对凹面在外的 A 型和凸面在外的 B 型进行静态压缩实验.

落锤冲击实验在落锤装置上进行. 将加速度传感器固定在落锤顶, 将力传感器固定于低部, 由计算机采集数字信号. 落锤冲击实验样品为厚度 1.08 mm 的纯铝板, 冲压直径为 10 mm 的半球层. 分别用 8 片板制得 4 层凹面在外的类似体心立方结构 A 型. 厚度为 14.5 mm. 凹面在的外球形孔多孔金属在冲击实验时安装了直径为 25 mm 的圆柱冲头.

2 结果与讨论

2.1 孔隙率与孔径、厚度及孔壁间距的关系

设孔的半径为 R , 两孔壁之间的间距为 δ , 平板为长 L 正方形, 每张板上有 X 个孔, 板厚度为 B , 共由 N 层板组成多孔金属. 图 4 中 ABCD 为底层球心, E 为上层球心.

图 5 中两层板之间高度为

$$h = \sqrt{4R^2 - 2(R + \delta/2)^2} \quad (1)$$

实体板的体积为 $V_{\text{sheet}} = NL^2B$. 将多孔材料看成一

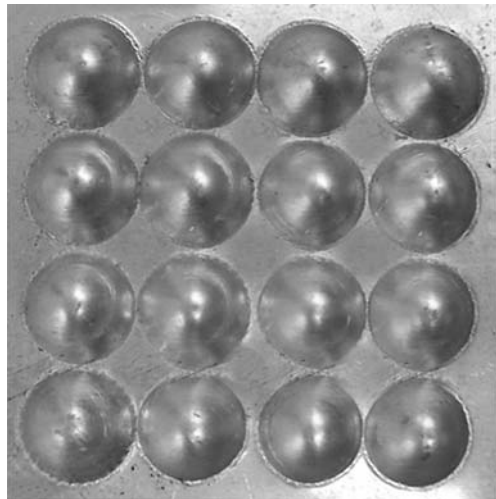


图 1 4×4 半球层铝薄板
Fig.1 Metal Al hemisphere layer 4×4



图 2 凹面在外平板层相连的类似体心立方结构多孔金属 A 型

Fig.2 Porous metal with bcc structure connected by flat lamellar with external concave type A



图 3 凸面在外平板层相连的类似体心立方结构多孔金属 B 型

Fig.3 Porous metal with bcc structure connected by flat lamellar with external convex type B

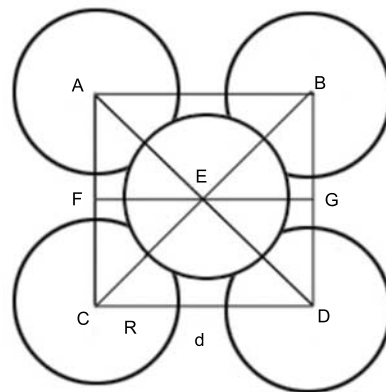


图 4 半球金属层薄板平面示意图
Fig.4 Schematic plan of hemisphere metal sheet

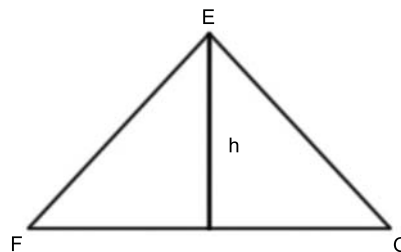


图 5 半球铝层薄板纵面示意图
Fig.5 Vertical plane of hemisphere Al sheet

个长方体, 多孔材料体积为

$$V = L^2 \frac{N}{2} \sqrt{4R^2 - 2(R + \delta/2)^2} + NL^2 B \quad (2)$$

当 $h > R$, 上层板的顶部不会接触到下层板平面处. 多孔材料孔隙率为

$$P = 1 - \frac{V_{\text{sheet}}}{V} = 1 - \frac{NL^2 B}{L^2 \frac{N}{2} \sqrt{4R^2 - 2(R + \delta/2)^2} + NL^2 B}$$

$$P = \frac{\sqrt{4R^2 - 2(R + \delta/2)^2}}{\sqrt{4R^2 - 2(R + \delta/2)^2} + 2B} \quad (3)$$

由 (3) 式可得

$$P = f(B) \quad P = f(R) \quad P = f(\delta) \quad (4)$$

由 3、4 式可见, 多孔金属的孔隙率与材料的种类没有关系, 只与板的厚度 B , 孔径 R 的大小和孔壁之间的间距 δ 有关. 由式 3 计算出的理论孔隙率列于表 1.

表 1 理论孔隙率
Table 1 Theoretic porosity

	B/mm	d/mm	R/mm	Porosity/P
1	1.08	2	8	74.3%
2	0.88	2	8	78%
3	0.68	2	8	82.1%

理论计孔隙率时, 将多孔材料理想的看成一个很大的长方体, 公式 (3) 对 A、B 两种球形孔多孔金属都是适用的. 而实际测量排水时在边缘部分是有孔隙的, 所以实际排水测量体积要小些, 因此理论孔隙率偏高.

当 $h = R$ 时, 上层板的顶部会接触到下层板平面处. 理论孔隙率为 $P = \frac{R}{R+2B}$.

2.2 球形孔多孔金属的静态压缩

对相同条件下 A 型和 B 型球形孔多孔金属静态压缩, 其应力应变曲线如图 6 所示.

从图 6 可见, 通过改变结构, 凹面在外新型球形多孔金属 A 型的强度较 B 型得到了很大的提高, 应力应变曲线 A 型位于 B 型上方, 具有较大强度和能量吸收性能. 图 7 给出了铝板厚度为 1.08 mm 的 B 型的类似体心立方结构球形孔多孔铝在压缩过程中的照片. 在压缩过程中, 由于最上层和最下层的半球壳体最为薄弱, 首先被压弯曲变形, 中间的壳体压入下层的板中, 使得最上层和最下层的边缘发生一定的弯曲 (图 7a). 随着最上层和最下层的壳体的塌陷, 中间层受到挤压变形.

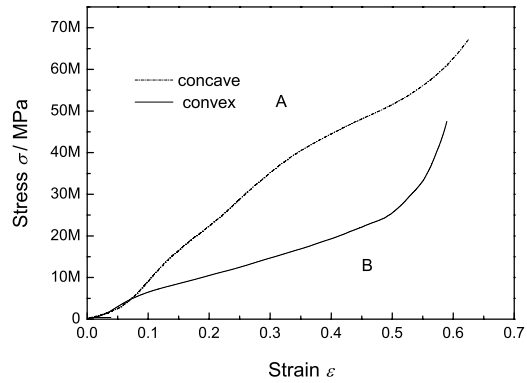


图 6 凹、凸面在外压缩 ($\sigma - \varepsilon$) 曲线

Fig.6 Compression curves of external convex and concave

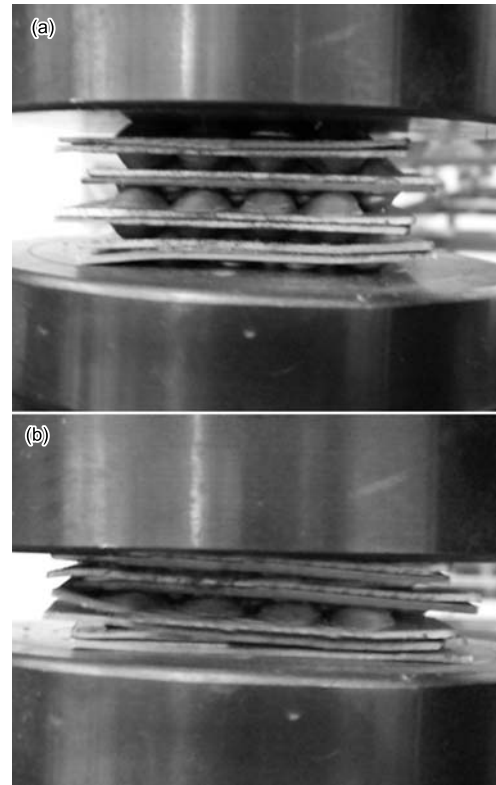


图 7 变形后的半球层相连的类似体心立方结构多孔金属

Fig.7 Distortion of porous metal with bcc structure connected by hemisphere layer (a) $\varepsilon=0.2$; (b) $\varepsilon=0.4$

板厚度不同的 B 型球形孔多孔铝的压缩 ($\sigma - \varepsilon$) 曲线比较, 如图 8 所示. 图 8 表明, 用三种不同厚度铝板所制得的新型球形孔多孔铝样品的压缩 ($\sigma - \varepsilon$) 曲线, 都由弹性段、平缓段和紧实段 3 部分组成. 在线弹性段, 压缩曲线开始表现为线弹性段. 在此区间应力与应变呈线性关系, 由于最上层和最下层有较薄弱的部分, 在较小应力下首先变形, 该阶段的应变小于 10%; 在平缓段, 应力增加较少而应变却迅速增大,

长而平的平缓上升段使得平板层相连的类似体心立方结构多孔金属有高的压缩吸能性能;随着压缩应力的继续增大,应变继续增加,当压缩应变超过 50%(一般在 50%~65% 之间),壳体之间的孔洞被压实至相互接触,于是导致应力的迅速上升,从而进入致密化阶段。

比较 3 种不同厚度铝板所制得同样孔径球形孔多孔铝样品的压缩 ($\sigma - \varepsilon$) 曲线可见,随板厚度的减小,多孔金属的 $\sigma - \varepsilon$ 曲线下移,压缩屈服强度下降。由于铝板厚度的减小,作为密实部分铝板平板厚度减小,应变明显增加。从图 8 可见,板厚增加使得能量吸收性能得到提高。

B 型不同板厚球形孔多孔金属能量吸收效率 (E) 比较,如图 9 所示。计算平板层相连的类似体心立方结构多孔金属的 $\sigma - \varepsilon$ 曲线与应变轴之间包含的面积,得到其吸收的能量。其能量吸收能力为 $W = \int_0^\varepsilon \sigma d\varepsilon$, 吸能效率为 $E = \frac{\int_0^\varepsilon \sigma d\varepsilon}{\sigma \varepsilon}$ 。

图 9 表明,在线弹性阶段,多孔铝合金的能量吸收增加较慢,但是能量吸收效率迅速增加,在形变 $20\% \leq \varepsilon \leq 30\%$ 时达到峰值与泡沫铝板相似;随着应变的增大,吸能能力 W 增大,能量吸收效率 E 在宽范围 ($15\% \leq \varepsilon \leq 50\%$) 维持在一个较高水平 (50% 以

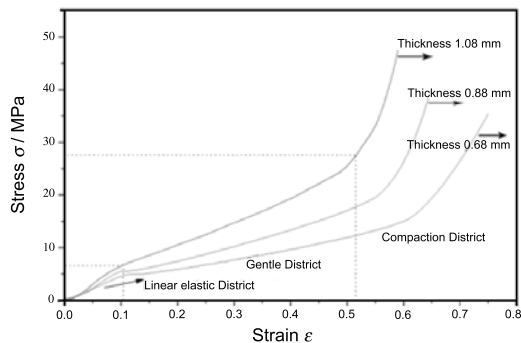


图 8 压缩 ($\sigma - \varepsilon$) 曲线

Fig.8 Compression curves ($\sigma - \varepsilon$)

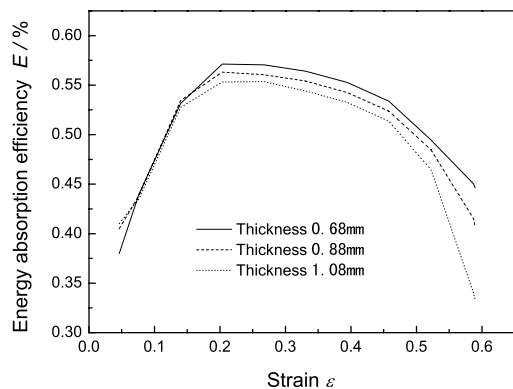


图 9 吸能效率 (E)

Fig.9 Curve of energy absorption efficiency (E)

上)。在紧实阶段,随着应变的增大应力继续增大,能量吸收效率降低。由此可见,在现有的实验条件下,形成球形孔多孔金属的厚度与吸能效率的提高并不是很明显。

2.3 与体心立方堆积的空心金属球形形成多孔金属性能的比较

一种先制成金属空心球再将其按照体心立方堆积形成球形孔多孔金属的方法,最近得到了发展,将其与本文获得的球形孔多孔金属的性能进行比较。

根据 Sanders 体心立方堆积的空心金属球屈服应力和相对密度的闭孔结构经验公式^[7,8], $\sigma_y / \sigma_{ys} = 0.81(\rho / \rho_s)^{1.35}$, 其中 σ_y 为屈服应力, σ_{ys} 为实体材料的屈服应力, ρ 是多孔金属的相对密度, ρ_s 为实体的密度。铝板的屈服应力为 30 MPa, 理论计算给出,孔径相同不同壁厚时的屈服应力分别为 6.5 MPa, 4.4 MPa, 3.7 MPa。对于本文制备的球形孔多孔铝,图 8 中的试验数据为 7.1 MPa, 5.2 MPa, 4.5 MPa。比较表明,半球层相连的类似体心立方的球形孔多孔金属屈服应力明显高于体心立方堆积的空心金属球。其原因是,由平板层相连的球形孔结构,强度高于同样厚度体心立方堆积的空心金属球。

2.4 球形孔多孔金属的落锤冲击实验结果及分析

使用 8 片铝板制得 4 层球形孔 A 型多孔铝试样,进行落锤冲击实验,冲击过程时间大约 7 ms。落锤从距离试样表面 1.5 m 的高处自由落下,重锤落下时的速度为 5.02 m/s,理论速度 $V = 5.42$ m/s,两者相对误差为 7.75%。因为后者未考虑落锤下落过程中空气阻力、钢丝摩擦阻力、落锤与导轨摩擦阻力等的影响所致。冲击质量为 20.6 kg,冲击初速度设定为 5.02 m/s,则初始冲击能量为 259.56 J。速度 $dV(t) = \frac{1}{M} \int_0^t F(t) dt$, 冲击点位移 $D(t) = \int_0^t V(t) dt$ 。图 10 给出了冲击力与时间的关系曲线。冲击力曲线在上升段有明显的抖动,而下降段却很光滑,说明材料损伤发生在冲击加载阶段。各点的位移与速度列于表 2。设冲击锤与球形孔多孔金属接触面为坐标零点,向上为正方向,则表中位移和速度都为负值。

在位置①之前冲击头打入半球铝板弹性,部分剪切破坏;从位置①到位置②,屈服变形。从位置②到位置③,第一层和第二层的半球相互挤压,冲击力变大,进一步拉伸第一层铝板;从位置③到位置④,上面两层屈服变形;从位置④到位置⑤,一二层半球铝板全部塌陷,继续拉伸,三四层半球铝板开始受到集中冲击力;从位置⑤到位置⑥,第四层半球的凸面冲塌;从位置⑥到位置⑦,四层半球铝板全部塌陷;从位置⑦之后为 4 层平铝板冲击压缩;从位置⑧完全塌陷,没有变形。

表 2 各点的位移与速度

Table 2 Displacement and velocity of each point

Position	Time/ms	Displacement/mm	Velocity(m/s)
1	0.4	-1.99	-4.90098
2	0.6	-2.96	-4.77469
3	0.8	-3.89	-4.51275
4	1.2	-5.61	-4.1141
5	1.45	-6.61	-3.80239
6	1.8	-7.84	-3.29161
7	2.75	-10.14	-1.38567
8	3	-10.4	-0.73318

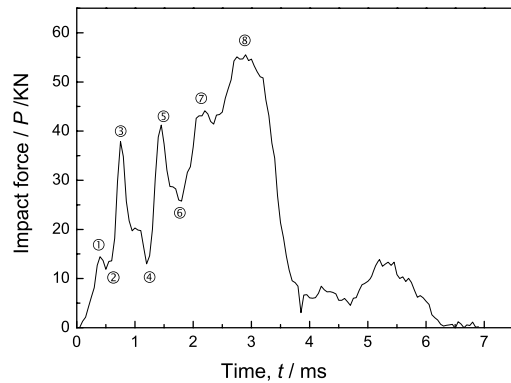


图 10 冲击力与时间的关系

Fig.10 Variation of the impact force with time

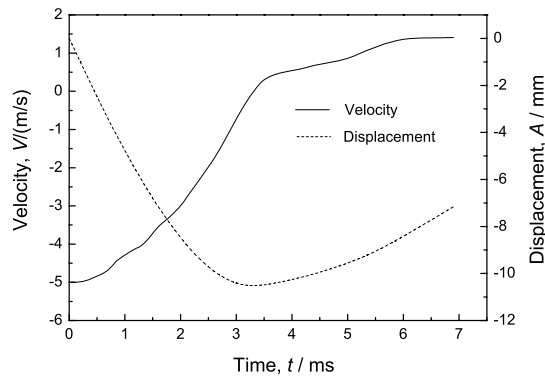


图 11 速度、位移与时间的关系

Fig.11 Variation of the velocity and displacement with time

在落锤冲击板的过程中,接触瞬时速度最大负值 -5.02 m/s,凹面在外半球层多孔金属的中心最大位移为 10.51 mm,最大冲击载荷为 55.54 KN,可计算出的材料冲击点速度和冲击点位移曲线(图 11).凹面在外半球层多孔金属使得落锤动能很快的减少,并且冲击力峰值没有很快地增大,冲击力有明显的回落,表明具有很好的能量吸收效果.完全塌陷后,落锤的剩余速度为 -1.39 m/s.如果将全部塌陷近似为完全弹性碰撞,则因弹性势能的释放反弹最大速度为 1.40 m/s.

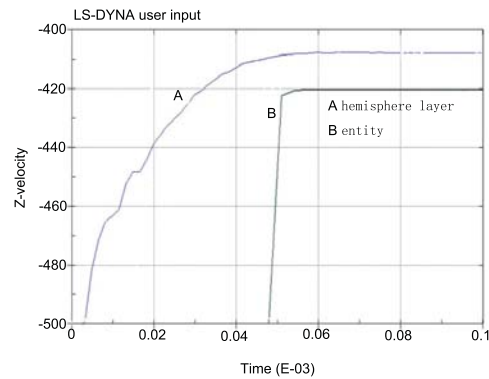


图 12 高速冲击物穿过球形孔多孔金属与实体速度衰减

Fig.12 Velocity damping of hemisphere porous metal and entity through with high-speed impact

3 讨论

同样的材料其结构不同,性能区别很大.图 2 中的 A 型结构,由于整体结构较紧密,没有薄弱区域,平板层与半球层依然相连,使得具有较高的强度.冲击实验结果表明,应力没有迅速的提高(图 10),在上升段有明显的抖动,具有很好的能量吸收和保护作用,适合作为一较高强度、塑性变形及较高吸能应用场合.而图 3B 型结构,上下表面层仅为半球层,较内部薄弱些,相当于实现了材料的梯度,使得静态压缩应力应变曲线很平缓,平板层与半球层依然相连强度又高于单纯体心立方堆积的金属球,具有良好的能量吸收性能.

ANSYS 中设置相同的约束和动、静摩擦系数,弹丸直径为 25 mm,初速度为 500 m/s,方向垂直于靶面.通过 ANSYS 对球形孔多孔金属和同样实体材料,进行弹丸侵彻模拟计算,结果如图 12 所示.曲线 A 为多孔金属,曲线 B 为实体金属.穿透用 2 张厚 1 mm 钢板制得直径 10 mm 的 A 型球形孔多孔金属,速度衰减到 403.3 m/s,穿透 2 mm 厚实体钢板,速度

衰减到 420.6 m/s. 其原因是, 在冲击过程中, 球形孔多孔金属通过变形做功增加了能量的吸收. 另外, 在侵彻过程中球形孔多孔金属的厚度比实体大, 作用时间远长于实体金属, 应力的增大过程更为平缓.

4 结 论

1. 将铝薄板冲压成铝半球层, 再将铝半球层按照类似体心立方的结构连接, 制备出球形孔多孔金属, 其 $\sigma - \varepsilon$ 曲线由弹性变形段、平缓段和紧实段组成. 凹面在外比凸面在外的类似体心立方结构强度得到了很大的提高.

2. 半球层相连的类似体心立方结构多孔金属的 $\sigma - \varepsilon$ 曲线的弹性模量和屈服应力比体心立方堆积的空心金属球制得的多孔金属有明显提高. 在板层相连的类似体心立方结构多孔金属的压缩吸能试验中较长的应变范围内保持较高吸能效率.

3. 凹面在外半球层多孔金属在落锤冲击落锤垂直集中冲击载荷的作用下产生较大的变形, 冲击力峰值不能很快的增大, 具有很好的能量吸收效果.

参 考 文 献

- 1 Zou Yi, He Deping, Jiang Jiaqiao, New type of spherical pore Al alloy foam with low porosity and high strength, Science in China (Ser. B), **47**(5), 407-413(2004)
- 2 Gibson L J, Ashby M F, Cellular Solids: Structure & Properties, edited by Gibson L J, Ashby M F (New York, Cambridge University Press, 1997) p.18
- 3 Ashby M F, Lu T J, Metal foams: A survey, Science in China (B), **46**(4), 521(2003)
- 4 Banhart J, Fleck N A, Mortensen A, Cellular Metals: Manufacture Properties and Application, International Conference on Cellular Metals and Metals Foaming Technology, edited by Banhart J, Fleck N A, Mortensen A(Berlin, Verlag MIT, 2003) p.36
- 5 Srinivasan V, Weidner J W, An electrochemical route for making porous nickel oxide electrochemical capacitors, J Electrochem Soc, **144**(8), 210(1997)
- 6 HE Deping, SHI Guodong, HE Siyuan, One innovated method for preparing porous metal, Chinese Patent, 200710024898.6(2007)
(何德坪, 施国栋, 何思源, 一种多孔金属的制备方法, 中国专利, 200710024898.6(2007))
- 7 W.S.Sanders, L.J.Gibson, Mechanics of BCC and FCC hollow-sphere foams, Materials Science and Engineering A, Volume 352, Issues 1-2, 15 July 2003, p.150-161