

金属泡沫断裂韧性的试验研究*

王新筑^{1,2,3}, 周雄³, 朱炳杰⁴, 彭向和³

(1. 吉林大学汽车仿真与控制国家重点实验室, 吉林 长春 130025;

2. 湖南大学汽车车身先进设计制造国家重点实验室, 湖南 长沙 410082;

3. 重庆大学航空航天学院, 力学博士后工作站, 非均质材料力学重庆市重点实验室, 重庆 400040;

4. 国防科技大学航天科学与工程学院, 湖南 长沙 400040)

摘要:金属泡沫在实际应用中,断裂性能和断裂韧性对于承载的多孔金属泡沫有着重要的意义。基于美国试验材料学会相关标准,采用三点弯曲试样测定了铝泡沫的I型断裂韧性。研究表明,金属泡沫的断裂为脆性断裂,在裂纹尖端附近,孔壁最薄弱的区域最容易发生变形;随着进一步加载,一些孔壁发生断裂,微裂纹在断裂尖端附近出现。随着载荷的增加,主裂纹在缺口根部形成或由微裂纹合并而成,并开始多孔结构内传播。裂纹沿着结构最薄弱处传播,并产生次生裂纹和裂纹桥。裂纹总的扩展方式还是I型断裂。根据试验 $P-V$ 曲线特点,取最大载荷点对应的力与位移求解出铝泡沫的裂纹尖端临界张开位移的平均值为0.051 mm。

关键词:金属泡沫;断裂韧性;三点弯曲;裂纹尖端张开位移

中图分类号:V252 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-2486(2016)04-174-05

Experimental investigation on fracture toughness of metal foam

WANG Xinzhū^{1,2,3}, ZHOU Xiong³, ZHU Bingjie⁴, PENG Xianghe³

(1. State Key Laboratory of Automotive Simulation and Control, Jilin University, Changchun 130025, China;

2. State Key Laboratory of Advanced Design and Manufacture for Vehicle Body, Hunan University, Changsha 410082, China;

3. Chongqing Key Laboratory of Heterogeneous Material Mechanics, Postdoctoral Station of Mechanics,

College of Aerospace Engineering, Chongqing University, Chongqing 400040, China;

4. College of Aerospace Sciences and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: In practical applications, fracture properties and fracture toughness of porous metal foam for bearing are very important. Based on ASTM standards, three-point bending of aluminum foam samples was used to determine I type fracture toughness. It is shown that the fracture of metal foam is brittle fracture. The deformation is localized in the thinnest regions of the cell walls surrounding the crack tip. With further loading, some cell walls existed fracture phenomenon and microcracks appear in the vicinity of the crack tip. With the increasing of load a main crack is initiated at the notch root or at the pre-crack by a coalescence of microcracks, and starts to propagate through the cell structure. The crack follows the weakest path through the structure and creates the secondary cracks and crack bridges. The main way of crack extension is I type fracture. According to the $P-V$ curve characteristics, taking the force and displacement of the maximum load point to calculate the critical crack tip opening displacement, the average crack-tip opening displacement is 0.051mm.

Key words: metal foam; fracture toughness; three-point bending; crack-tip opening displacement

临近空间是指距地面20~100 km的空域,临近空间飞行器的发展涉及国家安全与和平利用空间,是目前国际竞相争夺空间技术的焦点之一,是综合国力的体现。由于临近空间飞行器具有广阔的军民两用前景,近年来已受到世界上许多国家的广泛关注,纷纷投入很大力量竞相研究开发。

对于飞行器,减轻结构重量、提高有效载荷是设计者追求的永恒主题。传统的设计方案通常是将结构系统与功能系统分开考虑,这样就增加了飞行器的重量,降低了其使用性能及可靠性。美国国防部(Department of Defense, DOD)和美国国家航空航天局(National Aeronautics and Space

* 收稿日期:2015-05-28

基金项目:汽车仿真与控制国家重点实验室开放基金资助项目(20121110);汽车车身先进设计制造国家重点实验室开放基金资助项目(31315010);中央高校基本科研业务费资助项目(CDJZR14325501);中国博士后基金面上资助项目(2011M500067)

作者简介:王新筑(1976—),男,黑龙江友谊人,讲师,博士,硕士生导师,E-mail:wzx@cqu.edu.cn

Administration, NASA) 在 21 世纪规划中提出要研制和发射大量轻质量、低成本的小型机动飞行器,以完成一系列科学研究和军事探测任务^[1]。为此,必须对现有飞行器的结构及研制方法进行革命性的变革。

金属泡沫材料是 20 世纪 80 年代后期国际上迅速发展起来的一种物理功能与结构一体化的新型工程材料。多孔结构和金属特征使其得以具备其他实心材料未有的功能,如防震、吸声、隔声、阻燃、屏蔽、耐候、耐湿、质轻、可渗透性等,在航空航天、交通运输、建筑、能源等高技术领域具有广阔的应用前景^[2-3],引起越来越多研究人员的广泛关注,并对其的物理和力学性能进行研究^[4-9]。金属泡沫最有前途的应用就是作为临近空间飞行器上的超轻复合材料夹芯结构的芯子和缓冲吸能及吸声降噪装置等。

在实际应用中,断裂性能和断裂韧性对于承载的多孔金属泡沫有着重要的意义,材料断裂韧性的测定对于断裂安全设计与缺陷评定、冶金因素对材料性能影响的研究、产品质量的控制与验收、材料组织设计与工艺优化、防止断裂事故的发生等都有重要的意义。因此,对金属泡沫的断裂韧性进行研究具有十分重要的实际意义。

目前,国内外关于金属泡沫的研究文献较多,但多集中于泡沫的压缩和拉伸性能,对金属泡沫的现有研究也多采用弹性断裂力学方法进行研究。Gibson 和 Ashby^[2]最早研究发现脆性开孔泡沫的断裂韧性 K_{IC} 和相对密度 $\bar{\rho}$ 存在以下关系:

$$K_{IC} = 0.65\sigma_y (\pi l)^{1/2} \times \bar{\rho}^{3/2} \quad (1)$$

式中, σ_y 为孔壁材料的屈服强度, l 为孔径尺寸。

此后,一些学者的工作都验证了式(1)的正确性^[10-11]。Olurin 等^[12]采用界面单元模型来描述泡沫的断裂韧性,宋宏伟等^[13]在扫描电镜下对只有几个孔的金属泡沫试件进行了压缩,研究了孔壁的断裂机制和失效模式。在拉伸模式下,线弹性断裂力学概念被应用到带切口的试件或其他类型泡沫结构^[14]中。

然而,铝泡沫属于韧性金属泡沫,闭孔韧性金属泡沫的断裂机理要比开孔金属泡沫和脆性金属泡沫的情形复杂得多。此时,不再适合用线弹性断裂力学的分析方法来求解,这是因为韧性金属泡沫具有大的塑性区,而且试件尺寸也受到加工工艺的限制。因此,必须采用弹塑性断裂力学试验,如 J 积分或裂纹尖端张开位移 (Crack-Tip Opening Displacement, CTOD) 试验来测定其断裂韧性。研究表明^[15]:当裂纹桥充分发展时,可用 J

作为泡沫的断裂韧性,然而,并非所有金属泡沫的 J- Δa 曲线都出现了平台区,并非所有的平台区都伴随有大的裂纹扩展,如何从 J- Δa 曲线对金属泡沫的初始或稳态断裂韧性进行评价,目前还没有理想的解决方法。但采用临界裂纹尖端张开位移的测定方法进行评估,是一种非常有效而且简单直接的方法,已被工程实际所接受和应用,裂纹尖端张开位移的特征值是材料在弹塑性条件下的一个断裂韧性指标,它表示材料抵抗裂纹开裂或扩展的能力,是含裂纹弹塑性材料抵抗裂纹扩展能力的度量和衡量材料断裂性能的重要指标。材料的断裂性能指标必须通过试验来测定。

但到目前为止,金属泡沫的临界断裂韧性值还没有相应的测试标准。因此,根据闭孔韧性铝泡沫的自身特点,基于弹塑性断裂力学分析方法及美国试验材料学会 (American Society for Testing Material, ASTM) 相关标准设计了闭孔泡沫断裂韧性试验,采用测定临界裂纹尖端张开位移的方法对闭孔铝泡沫的断裂韧性进行相关试验研究。

1 断裂韧性试验

断裂韧性测试中常采用三种标准试样:三点弯曲试样、紧凑拉伸试样、C 型拉伸试样,其中,三点弯曲试样是采用最广的一种。参考美国材料试验协会 ASTM E1290-08 标准^[16],裂纹张开位移试验方法是用带有预制的单边切口弯曲试样进行三点弯曲加载,记录载荷 P 和裂纹嘴张开位移 V 的关系曲线,然后在 $P-V$ 曲线上找出相应的特征点,将该特征点的 P, V 值带入到规定的计算式中,得出对应裂纹开裂的特征张开位移值。其中以张开型裂纹最容易引起脆性断裂,所以目前断裂韧性试验多限于 I 型加载,试验原理如图 1 所示。

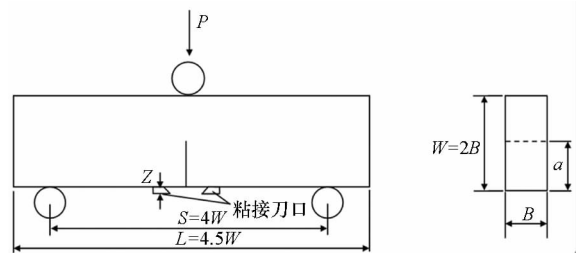


图 1 三点弯曲断裂试验示意图

Fig. 1 Sketch of 3-point bending fracture test

图 1 中, a 为试件预制裂纹的长度, B 为试件厚度, W 为试件高度, S 为试件跨距, L 为试件全长, Z 为刀口厚度。标准规定该试验 $S/W=4, W=2B$, 试样的厚度等于被检测材料的厚度 (即全厚度试

样)以保证裂纹前缘有相同的约束,对裂纹长度的要求是:对于 $W = 2B$ 的试样, $a = (0.45 \sim 0.55)W$ 。

所采用的闭孔铝泡沫是通过熔体发泡法制备,平均孔径为 2.0 mm 左右,相对密度为 0.09,试件的尺寸既要满足测试仪器的要求,又要考虑孔结构的尺寸因素。为排除孔结构尺寸因素的影响,获得可信的试验结果,试件的韧带尺寸和初始裂纹长度应取平均孔径的 7 倍以上,试件的厚度应在平均孔径的 5 倍以上,因此试件厚度 B 取为 15 mm,从而 $W = 2B = 30$ mm,跨距 $S = 4W = 120$ mm, $L = 4.5W = 135$ mm,从而保证金属泡沫材料在弯曲载荷作用下处于平面应变状态下。初始裂纹采用电火花技术加工而成,裂纹长度 $a = 0.5W = 15$ mm,安装引伸计的刀口厚度为 1.8 mm。

安装三点弯曲试样过程比较复杂。首先根据试验的尺寸调整支点的距离,并保证试样放置后裂纹位置居中。然后放置好试样,把引伸计固定在试样的刀口位置。引伸计的数据线与计算机相连。然后需要调整上夹头的位置,使其恰好接触试样的上表面。具体做法:首先对试样施加非常小的荷载,然后卸载至零,注意观察计算机显示的加载曲线,荷载不能超过正式试验时的卸载荷载。压头与泡沫上表面的接触位置很重要,要保证压头的中心线和泡沫下表面的裂纹重合,以确保是 I 型裂纹扩展和得到准确的断裂韧性值。试验采用 Instron5569 万能试验机进行位移加载,温度 21° ,湿度 56%,加载速度为 2 mm/min,奥林巴斯显微镜被用来观察断裂过程中裂纹扩展情况,试验机自动记录弯曲载荷和压头位移,引伸计自动记录裂纹顶端张开位移。试验中测定的曲线为跨中荷载 P 和裂纹嘴两侧夹式引伸计的张开位移 V 。典型的荷载-裂纹嘴张开位移($P-V$)曲线如图 2 所示。

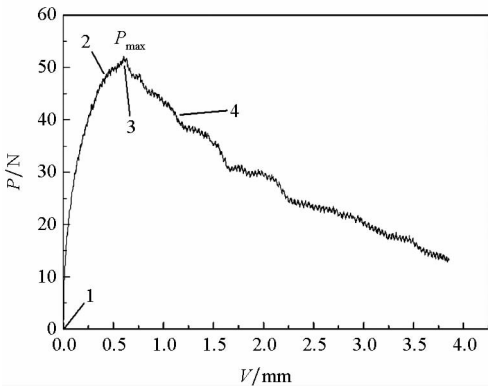


图 2 典型闭孔铝泡沫的 $P-V$ 曲线

Fig. 2 Typical fracture test $P-V$ response of close-cell Al foam

2 断裂韧性的理论基础

断裂力学中,夹式引伸计的刀口张开位移 V 与裂纹顶端张开位移 δ 之间应有如下的比例关系^[17]:

$$\frac{\delta}{V} = \frac{r(W-a)}{r(W-a) + (a+Z)} \tag{2}$$

即

$$\delta = \frac{r(W-a)}{r(W-a) + (a+Z)} V \tag{3}$$

式中, Z 为安装引伸计的刀口厚度, r 为转动因子。

在国家标准 GB/T2358-94^[18] 中列出了常见的几种 $P-V$ 曲线形式,如图 3 所示。在 1,2 的情况下,取脆性失稳断裂点或突进点对应的荷载 P_c 与裂纹嘴张开位移的塑性部分 V_{cp} ,按式(3)换算出 δ_c ;在 3,4 的情况下,取脆性失稳断裂点或突进点对应的荷载 P_u 与裂纹嘴张开位移的塑性部分 V_{up} ,按式(3)换算出 δ_u ;在 5,6 的情况下,取最大荷载点或最大荷载平台开始点对应的荷载 P_{max} 与位移 V_{mp} ,按式(3)换算出 δ_m 。

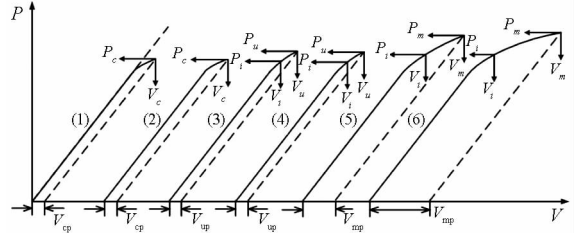


图 3 国家标准中列出的几种 $P-V$ 曲线类型

Fig. 3 Several $P-V$ curves in GB [16]

3 分析与讨论

由于铝泡沫结构的不均匀性,在断裂测试时可以预料到有局部效应的存在,图 4 是韧性铝泡沫预制裂纹的根部前端在不同加载阶段时的显微照片,从图中可以清楚地看到裂纹的开始和扩展。加载有裂纹的试样,将导致裂纹尖端附近的塑性屈服。

在裂纹尖端附近,孔壁最薄弱的区域最容易发生变形,随着进一步加载,一些孔壁发生断裂,微裂纹在断裂尖端附近出现。离裂纹尖端几个孔径远处的孔壁,在其他区域未变形时也可能塑性变形,并出现几个孔径大小、包含有局部变形和微裂纹的所谓断裂发展区。在较高载荷作用下,局部屈服在整个试样长度上都有可能发生,因此,金属泡沫的塑性区很难定义,随着荷载的增加,主裂纹在缺口根部形成,或由微裂纹合并而成,并开始在多孔结构内传播。裂纹沿着结构的最薄弱处

传播,并产生次生裂纹和裂纹桥。裂纹总的扩展方式还是I型断裂。

由图2的 $P-V$ 试验曲线可知,从加载的初始开始,铝泡沫就一直在发生非线性变形。高峰后的曲线抖动原因主要是由于裂纹在穿过不同泡沫层所引起的。

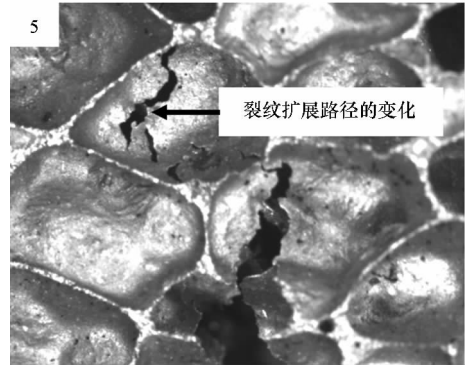
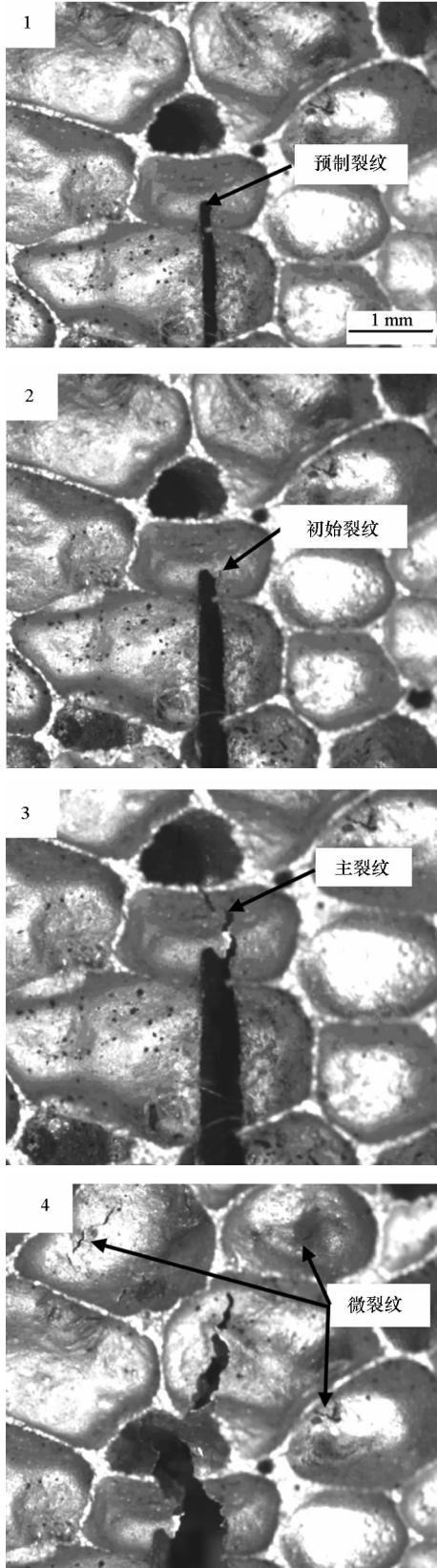


图4 典型闭孔铝泡沫的初始裂纹和裂纹扩展的照片

Fig. 4 Images to demonstrate crack initiation and propagations in a typical close-cell Al foam

根据图2所示的 $P-V$ 曲线形式可知,应取最大载荷点对应的 P_{\max} 与位移 V_{mp} ,按式(3)计算 δ_m ,经计算, δ_m 的平均值为0.051 mm。与金属材料相比,这个数值还是相对较小的,从而说明金属泡沫容易发生I型断裂,韧性较差。

4 结论

根据闭孔韧性铝泡沫的自身特点,基于弹塑性断裂力学分析方法及ASTM相关标准设计了闭孔泡沫断裂韧性试验,采用带有预制的单边切口弯曲试样进行三点弯曲加载来测定铝泡沫的I型断裂韧性,用临界裂纹尖端张开位移方法对闭孔铝泡沫的断裂韧性进行研究。研究表明,铝泡沫的断裂为脆性断裂,在裂纹尖端附近,孔壁最薄弱的区域最容易发生变形,随着进一步加载,一些孔壁发生断裂,微裂纹在断裂尖端附近出现。随着载荷的增加,主裂纹在缺口根部形成,或由微裂纹合并而成,并开始在多孔结构内传播。裂纹沿着结构的最薄弱处传播,并产生次生裂纹和裂纹桥。裂纹总的扩展方式还是I型断裂。根据试验 $P-V$ 曲线特点,取最大载荷点对应的力与位移求解出铝泡沫的裂纹尖端临界张开位移平均值为0.051 mm。

参考文献 (References)

- [1] Michael O. Multifunctional structures: the future of spacecraft design [C]//Proceedings of 5th International Congress on Adaptive Structures, Sendai, Japan, 1994.
- [2] Gibson L J, Ashby M F. Cellular solids: structure and properties [M]. 2nd ed. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 1997: 35-60.
- [3] Ashby M F, Evans A G, Fleck N A, et al. Metal foams: a design guide [M]. USA: Butterworth-Heinemann, 2000: 8-16.
- [4] Sugimura Y, Meyer J, He M Y, et al. On the mechanical performance of closed cell Al alloy foams [J]. Acta

- Materialia, 1997, 45(12): 5245–5259.
- [5] Beals J T, Thompson M S. Density gradient effects on aluminium foam compression behaviour [J]. Journal of Materials Science, 1996, 32(13): 3595–3600.
- [6] Schwartz D S, Shih D S, Evans A G, et al. Porous and cellular materials for structural applications [C]//Proceedings of the Materials Research Society Symposium, 1998.
- [7] Andrews E, Sanders W, Gibson L J. Compressive and tensile behaviour of aluminum foams [J]. Materials Science & Engineering A, 1999, 270(2): 113–124.
- [8] Fusheng H, Zhengang Z. The mechanical behavior of foamed aluminum [J]. Journal of Materials Science, 1998, 34(2): 291–299.
- [9] Markaki A E, Clyne T W. Characterisation of impact response of metallic foam/ceramic laminates [J]. Materials Science & Technology, 2000, 16: 785–791.
- [10] Brezny R, Green D J. Uniaxial strength behavior of brittle cellular materials [J]. Journal of the American Ceramic Society, 1993, 76(9): 2185–2192.
- [11] Huang J S, Gibson L J. Fracture toughness of brittle honeycombs [J]. Acta Metallurgica et Materialia, 1991, 39(7): 1617–1626.
- [12] Olurin O B, Fleck N A, Ashby M F. Deformation and fracture of aluminium foams [J]. Materials Science & Engineering A, 2000, 291(1/2): 136–146.
- [13] Song H W, He Q J, Xie J J, et al. Fracture mechanisms and size effects of brittle metallic foams: in situ compression tests inside SEM [J]. Composites Science & Technology, 2008, 68(12): 2441–2450.
- [14] Chen C, Fleck N A, Lu T J. The mode I crack growth resistance of metallic foams [J]. Journal of the Mechanics & Physics of Solids, 2001, 49(2): 231–259.
- [15] Degischerl H P, Kriszt B. 多孔泡沫金属 [M]. 左孝青, 周芸, 译. 北京: 化工工业出版社, 2005: 86–120.
Degischerl H P, Kriszt B. Metal foam: a design guide [M]. Translated by ZUO Xiaoqing, ZHOU Yun. Beijing: Chemical Industry Press, 2005: 86–120. (in Chinese)
- [16] Standard Test Method for Crack-Tip Opening Displacement (CTOD) Fracture Toughness Measurement. Philadelphia: american society for testing and materials [S]. ASTM Standard D1290–08, 2008.
- [17] 程靳, 赵树山. 断裂力学 [M]. 北京: 科学出版社, 2006: 168–170.
CHENG Jin, ZHAO Shushan. Fracture mechanics [M]. Beijing: Science Press, 2006: 168–170. (in Chinese)
- [18] 国家技术监督局. GB/T2358–1994 金属材料裂纹尖端张开位移试验方法 [S]. 北京: 中国标准出版社, 1994.
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. GB/T 2358–1994 Test method for crack-tip opening displacement measurement of metallic materials [S]. Beijing: Standards Press of China, 1994. (in Chinese)