

文章编号: 1001-1455(2008)02-0166-06

Taylor 撞击实验在泡沫铝合金 力学特性研究中的应用*

陈成军¹, 谢若泽¹, 张方举¹, 赵亚斌², 卢子兴²

(1. 中国工程物理研究院总体工程研究所, 四川 绵阳 621900;

2. 北京航空航天大学固体力学所, 北京 100083)

摘要: 由于泡沫铝合金具有可压缩性, 经典的 Taylor 理论模型已不适用于描述该类材料。在适当假设的基础上建立了泡沫铝合金 Taylor 撞击实验分析的理论模型, 并利用 Taylor 撞击实验数据验证了该模型的有效性, 研究了泡沫铝合金的动态力学特性。实验结果表明, 所考察的泡沫铝合金的应变率敏感性不强。

关键词: 固体力学; Taylor 模型; 动态冲击; 泡沫铝合金; 力学性能

中图分类号: O347 **国标学科代码:** 130 · 15 **文献标志码:** A

1 引言

Taylor 撞击实验是由 G. I. Taylor^[1] 在 1948 年建立的一种测定材料动态屈服应力的实验方法, 它用一平头圆柱形弹丸正撞击刚性靶, 通过对回收变形弹体外形尺寸的测量, 结合理论分析求出被测材料的动态屈服应力。由于 Taylor 实验方法简单, 得到了迅速的推广。其后, J. B. Hawkyard^[2]、S. E. Jones 等^[3-5] 进一步发展了 Taylor 实验的理论模型, 且随着高速摄影和计算机技术的发展, Taylor 实验成为测定致密金属材料动态屈服应力的有效方法。

近年来, 随着泡沫铝制造工艺的完善和制造成本的降低, 泡沫铝作为新型轻质缓冲、吸能材料的应用领域不断扩大。为了更加合理有效地使用泡沫铝, 国内外学者对泡沫铝的力学性能开展了大量的研究工作^[6]。相对于泡沫铝的静态力学性能而言, 其动态力学性能的研究还很不充分, 主要原因在于实验难度较大, 采用常规的 SHPB 实验技术很难获得准确可靠的动态应力-应变曲线。Taylor 实验在致密金属材料力学性能研究中的成功应用给了人们有益的启发, 目前国外已有学者尝试利用 Taylor 实验来研究多孔材料的动态性能^[7-9], 但国内还没有相关的研究工作发表。由于经典的 Taylor 理论已不适用于这种具有可压缩性、且压缩过程中密度变化很大的金属泡沫材料, 所以本文在适当简化的基础上建立了泡沫铝合金的 Taylor 理论分析模型, 并对泡沫铝合金圆柱试件进行了 Taylor 撞击实验, 尝试利用简单的 Taylor 撞击实验数据研究泡沫铝合金的动态力学特性。

2 理论模型

2.1 基本假设

根据实验观察可知, 泡沫铝合金试件经过撞击后的变形情况与致密金属试件有一定的相似性, 撞击后试件也分为变形段和不变形段两部分, 变形段出现一定程度的径向膨胀, 如图 1 所示。同时由图 1 可见, 变形段相对比较致密, 材料分布也较均匀, 且变形段的截面积沿轴向的变化很缓慢。因此, 当圆柱形泡沫铝弹丸以速度 v_0 撞击刚性墙时, 撞击后试件在撞击端附近的几何形状、密度将发生突然改变, 可简化为如图 2 所示的构形: 撞击前, 试件长为 L_0 , 截面积为 A_0 , 密度为 ρ_0 ; 撞击后, 变形段长度、截面积与密度分别为 h 、 A_c 和 ρ_c , 不变形段长度为 l 。因此, 理论分析可引入如下假设: (1) 因泡沫铝合金泡孔的

* 收稿日期: 2006-10-13; 修回日期: 2007-03-26

作者简介: 陈成军(1975—), 男, 硕士, 助理研究员。

尺寸远小于试件的尺寸,可认为试件材料是连续、均匀、各向同性的;(2)撞击过程中,坍塌破坏波(波速为 c)以强间断的形式传播,波前横截面积 A_0 与材料密 ρ_0 瞬时地变为波后的 A_c 和 ρ_c ,坍塌波过后材料变为静止。

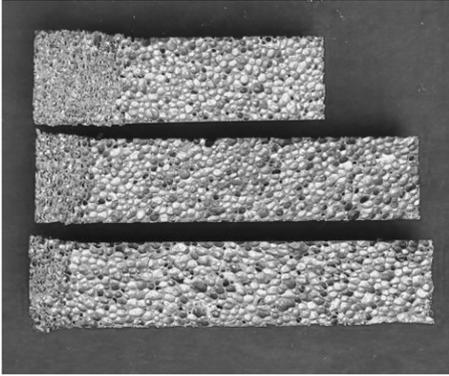


图 1 变形后试件形貌(纵剖面)

Fig.1 Macroscopic view of the deformed specimens

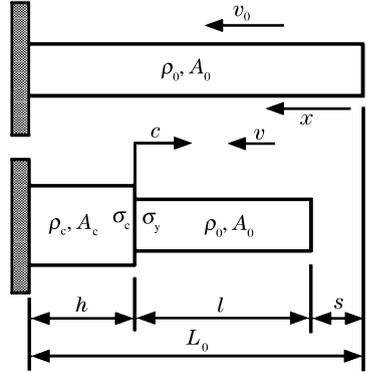


图 2 Taylor 撞击示意图

Fig.2 Schematic view showing a Taylor impact specimen

2.2 模型与分析

试件撞击刚性墙时,试件接触端的压应力立刻达到屈服应力 σ_y ,同时有一个压缩波以某一声速向自由端传播。随后,随着接触压力的增大,泡孔被压垮坍塌,此坍塌区以速度 c (这里简称为坍塌波)向自由端传播。对于未变形段,根据牛顿运动定律可得

$$\rho_0 \dot{v} = -\frac{\sigma_y}{l} \tag{1}$$

考察坍塌波阵面上的质量方程、动量方程,可得如下方程

$$\rho_0 A_0 (v + c) = \rho_c A_c c \tag{2}$$

$$\rho_0 A_0 (v + c)v = \sigma_c A_c - \sigma_y A_0 \tag{3}$$

而根据撞击过程中试件的总质量恒定,可得出未变形段长度的变化率为

$$\dot{l} = -\frac{\rho_c A_c c}{\rho_0 A_0} \tag{4}$$

另外,由图 2 所示的几何关系,容易得到

$$\dot{s} = -(\dot{l} + \dot{h}) \tag{5}$$

式中: s 为自由端移动距离。考虑到 $\dot{h} = c$,并将式(4)代入式(5),可得

$$\dot{l} = -\frac{\rho_c A_c}{\rho_c A_c - \rho_0 A_0} \dot{s} \tag{6}$$

以上即为 Taylor 撞击理论模型的基本关系式。结合实验数据,由上述基本方程可通过以下途径预测泡沫铝合金的屈服应力等材料参数。由式(2)可得

$$v = \frac{\rho_c A_c - \rho_0 A_0}{\rho_0 A_0} c \tag{7}$$

将式(7)代入式(1),并与方程(4)联立求解,可得

$$\ddot{l} = \frac{\rho_c A_c}{\rho_c A_c - \rho_0 A_0} \frac{\sigma_y}{\rho_0 l} \tag{8}$$

式(8)两端同乘 \dot{l} 后,求解微分方程得

$$(\dot{l})^2 = \frac{2\rho_c A_c}{\rho_c A_c - \rho_0 A_0} \frac{\sigma_y}{\rho_0} \ln l + C \tag{9}$$

式中: C 为积分常数,可由撞击初始条件确定。最后可以得到未变形段长度的变化率方程

$$\dot{l} = -\frac{\rho_c A_c}{\rho_c A_c - \rho_0 A_0} v_0 \sqrt{1 + \frac{2(\rho_c A_c - \rho_0 A_0)}{\rho_c A_c} \frac{\sigma_y}{\rho_0 v_0^2} \ln \frac{l}{L_0}} \quad (10)$$

如代入终止条件,即 $l=l_f$ (l_f 为实验后试件不变形段的长度)时, $\dot{l}=0$, 求解式(10)可得

$$l_f = L_0 \exp\left(-\frac{\rho_c A_c E_0}{(\rho_c A_c - \rho_0 A_0) \sigma_y}\right) \quad (11)$$

式中: $E_0 = \rho_0 v_0^2 / 2$, 描述试件的初始动能密度。如以试件最后的总长度 L_f 表达 l_f , 经简单推导, 式(11)可最终表达为

$$\sigma_y = \frac{\rho_c A_c E_0}{(\rho_c A_c - \rho_0 A_0) \ln \frac{L_0 (\rho_c A_c - \rho_0 A_0)}{\rho_c A_c L_f - \rho_0 A_0 L_0}} \quad (12)$$

式(12)即为求解试件材料的动态屈服应力 σ_y 的公式。

此外, 根据以上公式还可以得到试件撞击作用时间 t_f , 以及撞击作用过程中的平均应变率 $\dot{\epsilon}_m$

$$t_f = \frac{\rho_c A_c - \rho_0 A_0}{\rho_c A_c} \tau_0 \int_{u_f}^1 \frac{1}{\sqrt{1 + 2B \ln u}} du \quad (13)$$

$$\dot{\epsilon}_m = \frac{L_0 - L_f}{L_0 - l_f} \frac{1}{t_f} \quad (14)$$

式中: $\tau_0 = \frac{L_0}{v_0}$, $u = \frac{l}{L_0}$, $B = \frac{\rho_c A_c - \rho_0 A_0}{\rho_c A_c} \frac{\sigma_y}{\rho_0 v_0^2}$ 。

3 实验描述

3.1 Taylor 撞击

实验所用试件由闭孔泡沫铝铜合金制成, 基体为 ZL201 铝合金, 由东南大学采用熔体发泡法制备。泡沫铝的名义孔隙率为 85%, 表观密度为 0.38~0.41 g/cm³, 孔径约 2~3 mm。利用线切割加工成圆柱形试件, 尺寸为 $\varnothing 25 \text{ mm} \times 137 \text{ mm}$ 。

Taylor 实验的基本装置如图 3 所示。通过调整空气炮的气压可使试件以不同的速度正撞击刚性靶体, 试件的初始撞击速度由激光测速装置测得, 试件的初始撞击速度范围为 80~180 m/s。

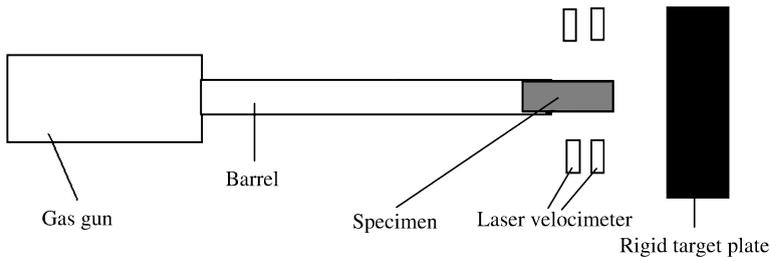


图 3 Taylor 实验原理图

Fig. 3 Schematic illustration of the basic principle of the Taylor test

3.2 密度 ρ_c 的确定

通过事后试件变形形貌的分析发现, 变形区泡孔并未完全压实, 密度 ρ_c 不能以基体材料的密度替代, 因此有必要进行测量。在初始撞击速度为 140~170 m/s 的范围内选取了 4 个试件的变形段部分进行密度 ρ_c 的测量。试件的质量采用电子天平(型号 MP200B, 分辨率 0.001 g)测得, 对其体积的测量则采用浮力法测定, 4 个试件变形段的密度 ρ_c 分别为: 1.24、1.19、1.18、1.08 g/cm³。为了简化 Taylor 实验的数据测量过程, 本文中取 4 个试样密度的平均值 1.17 g/cm³ 作为分析计算中的 ρ_c 。

4 实验结果与分析

图 4 给出了部分试件撞击后的变形图像。从图中可以直观地看出, 随着撞击速度的提高, 试件的坍塌

塌变形区逐渐变形增大,试件的剩余长度逐渐减小。当初始撞击速度达到某一临界值(160~170 m/s 之间)后,撞击过程中试件发生断裂破坏(见图 4 中最右端两个试件),其破坏面与试件轴线大致成 45° 夹角,而破坏面上的泡孔并无太大的压缩或扭曲变形。据此可以推断,这里选用的泡沫铝合金基体材料脆性较强,在压缩波作用下泡壁易发生剪切破坏。如果很强的压缩波后材料中的泡壁全部破坏,则泡沫合金也就失去了吸能作用,因此可以认为这种材料的吸能极限速度 $v_{cr}=160$ m/s。



图 4 部分试件的变形图像(从左向右撞击速度增大)

Fig. 4 Final geometries of the impact specimens

表 1 具体给出了 Taylor 撞击实验中试件的原始数据以及撞击后几何尺寸的实测值,表中的密度栏是根据试件的质量与几何尺寸计算得到。实验中试件 21、试件 3 和试件 2 撞击过程中发生断裂破坏,因而表中没有列出其撞击后长度。

根据表 1 的数据,利用式(12)就可以计算得到泡沫铝合金的动态屈服应力与其撞击速度之间的关系,见图 5(注:图 5、图 6 中数据点附近的数字编号与表 1 中的序号对应)。另外,图中还给出了材料在准静态压缩下的数据(准静态实验在 INSTRON1196 电子万能材料试验机上进行,试件尺寸为 $\varnothing 20$ mm \times 36 mm,加载速率为 2 mm/min)。不同撞击速度下,泡沫铝合金的动态屈服应力分布在 8.3~9.8 MPa 之间,数据较分散,似乎不能得到屈服应力与加载速率的关系。然而,分析表 1 可以看到,不同试件的密度是不同的,而泡沫材料的屈服强度与密度密切相关,因此,图 5 所示数据的分散性也可能是由于密度不同引起的。为了说明这一点,图 6 给出了试件密度与其动态屈服应力间的关系,可见,除个

表 1 Taylor 撞击实验数据

Table 1 Experimental data of the Taylor impact

序号	试件编号	质量/g	原始长度/ mm	原始直径/ mm	密度/ (g/cm ³)	撞击速度/ (m/s)	撞后长度/ mm	撞击端直径/ mm
1	9	26.912	136.54	24.96	0.403	79.85	120.20	29.10
2	26	26.333	136.70	24.96	0.394	105.15	109.24	29.34
3	13	26.986	136.70	24.86	0.407	114.68	103.52	28.30
4	11	26.871	136.52	24.89	0.405	125.25	99.98	30.84
5	6	26.000	136.70	25.00	0.387	126.11	99.70	28.60
6	23	27.008	136.55	24.91	0.406	130.05	98.63	30.10
7	5	26.000	136.80	25.00	0.387	141.03	91.40	30.00
8	16	26.952	136.69	24.90	0.405	145.41	85.91	28.80
9	1	29.000	136.85	25.02	0.431	148.75	86.97	28.50
10	27	26.928	136.52	24.86	0.406	155.20	86.69	29.28
11	21	26.810	136.54	24.92	0.403	159.09		28.20
12	4	26.000	136.80	25.00	0.387	159.44	82.00	29.60
13	3	26.000	136.70	24.90	0.391	170.45		
14	2	27.600	136.79	24.99	0.411	173.15		

别点外,动态屈服应力随密度的增加而增大,而密度导致的差异基本覆盖了撞击速度产生的差异。这样,由图 6 可以近似得出结论:泡沫铝合金的动态屈服应力与撞击速度关系不大。据此可以推断,图 5 所示实验数据的分散性很大程度上是由于试件的密度不同引起的,如果排除试件密度的差异,所有

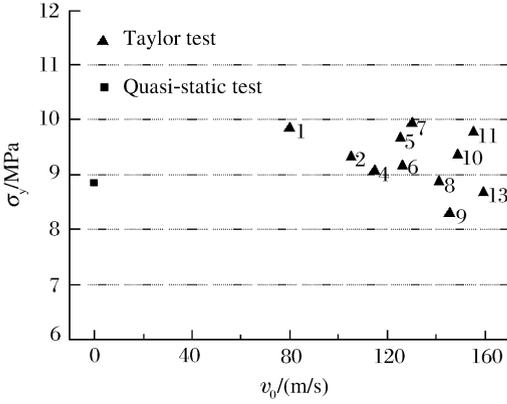


图 5 动态屈服应力与撞击速度的关系

Fig. 5 Correlation between velocities and the dynamic yield stresses

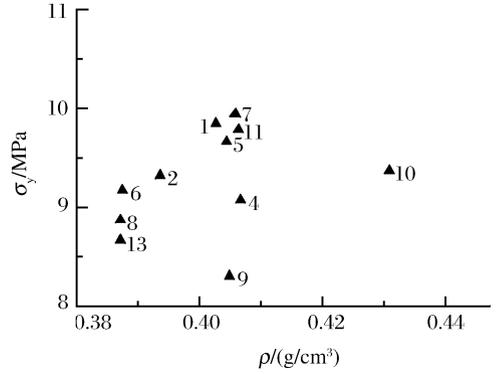


图 6 动态屈服应力与密度的关系

Fig. 6 Correlation between the density and the dynamic yield stress

Taylor 撞击实验数据点应能分布在准静态数据点附近较窄的带宽内。当然,泡孔结构的差异也会引起实验数据的分散,由于该问题很难做定量的描述,所以本文中不予详细讨论。综上所述,在所给的撞击速度范围内,本文中考察的泡沫铝合金动态屈服应力对撞击速度不敏感,即材料的应变率效应不明显,这与由 SHPB 实验得到的结果是一致的^[10]。

为校核本文理论模型的适用性,图 7 以量纲一参量的形式给出了试件变形后试件长度 L_t 与试件撞击速度 v_0 间的关系。图中的理论曲线是利用式 (12) 计算得到的,计算时泡沫铝合金的屈服应力 σ_y 取其静态实验值, v_{cr} 取为 160 m/s。由图 7 可见,本文的理论模型较好地描述了试件的变形情况。

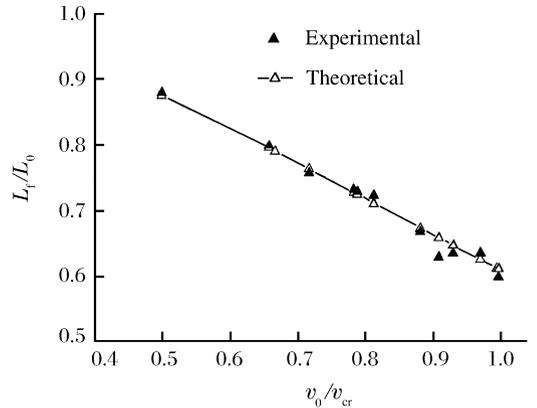


图 7 L_t/L_0 与 v_0/v_{cr} 之间的关系

Fig. 7 Relationship between L_t/L_0 and v_0/v_{cr}

5 讨论与结论

(1) 在适当假设下,导出了泡沫铝合金试件 Taylor 撞击实验分析的理论模型,获得的实验数据也证明了理论模型的正确性;

(2) Taylor 撞击实验结果表明,本文所考察的泡沫铝合金动态屈服应力对加载速率的敏感性不强,这与 SHPB 实验中得到的结论一致;

(3) Taylor 实验方法简单,数据处理简便。因此,在泡沫铝力学特性的工程分析中有一定的优势。但是,Taylor 撞击实验也存在着一定的局限性,在分析过程中已知的方程数量较少,因此需要引入较多的假设。一种可选择的改进方式是 Taylor-Hopkinson 杆撞击实验,即用圆柱试件撞击 Hopkinson 压杆,同时附加(相对于传统 Taylor 实验)测量压杆上的应变信号,利用较多的实验数据可望得到更好的分析结果。

参考文献:

[1] Taylor G I. The use of flat-ended projectiles for determining dynamic yield stress, I : Theoretical considerations

- [J]. Proceedings of Royal Society of London, Series A: Mathematical and Physcial Sciences, 1948,194(1038):289-300.
- [2] Hawkyard J B. A theory for the mushrooming of flat-ended projectiles impinging on a flat rigid anvil, using energy consideration[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 1969,11(3):313-333.
- [3] Jones S E, Gillis P P, Foster J C, et al. A one-dimensional, two-phase flow model for Taylor impact specimens [J]. Journal of Engineering Material and Technology, 1991,113(2):228-235.
- [4] Jones S E, Maudlin P J, Foster J C, et al. An engineering analysis of plastic wave propagation in the Taylor test [J]. International Journal of Impact Engineering, 1997,19(2):95-106.
- [5] Jones S E, Drinkard J A, Rule W K, et al. An elementary theory for the Taylor impact test[J]. International Journal of Impact Engineering, 1998,21(1-2):1-13.
- [6] 卢子兴,郭宇. 金属泡沫材料力学行为的研究概述[J]. 北京航空航天大学学报,2003,29(11):978-983.
LU Zi-xing, GUO Yu. Brief review of studies on the mechanical behavior of metallic forams[J]. Jornal of Beijing University of Aeonautics and Astronautics, 2003,29(11):978-983.
- [7] Lu G, Wang B, Zhang T G. Taylor impact test for ductile porous materials—Part 1: Theory[J]. International Journal of Impact Engineering, 2001,25(10):981-991.
- [8] Wang B, Zhang T G, Lu G. Taylor impact test for ductile porous materials—Part2: Experiments[J]. International Journal of Impact Engineering, 2003,28(5):499-511.
- [9] Lopatnikov S L, Gama B A, Haque M J, et al. Dynamics of metal foam deformation during Taylor cylinder-Hopkinson bar impact experiment[J]. Composite Structures, 2003,61(1):61-71.
- [10] 谢若泽,陈成军,张方举,等. 泡沫铝合金动态压缩力学性能的实验研究[J]. 工程设计与力学环境,2006,4(4):64-71.
XIE Ruo-ze, CHEN Cheng-jun, ZHANG Fang-ju, et al. Experimental studies on dynamic compressive mechanical behavior of aluminium-alloy foam[J]. Engineering Design and Mechanical Environment, 2006,4(4):64-71.

An application of Taylor impact experiment to study mechanical behaviors of an aluminum-alloy foam

CHEN Cheng-jun^{1*}, XIE Ruo-ze¹, ZHANG Fang-ju¹, ZHAO Ya-bin², LU Zi-xing²

(1. *Institute of Systems Engineering, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, Sichuan, China;*

2. *Institute of Solid Mechanics, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)*

Abstract: Considering the compressibility of an aluminum-alloy foam and the unavailability of the classic Taylor model to it, a theoretical model used to analyze the Taylor impact experiment of the aluminum-alloy foam was proposed based on some assumptions. The Taylor impact experiment was performed to validate the proposed model and to explore the dynamic mechanical properties of the aluminum-alloy foam. The experimental results show that the strain-rate sensitivity of the studied aluminum-alloy foam is not strong.

Key words: solid mechanics; Taylor model; dynamic impact; aluminum-alloy foam; mechanical properties

* Corresponding author: CHEN Cheng-jun
E-mail address: chengjunsd@sohu.com
Telephone: 86-816-2495614