

doi:10.11835/j.issn.1674-4764.2013.06.015

# 轻质泡沫混凝土吸能特性及其压溃流动应力方程

王建军<sup>1</sup>, 郭伟国<sup>1</sup>, 赵融<sup>1</sup>, 史亚杰<sup>2</sup>, 曾亮<sup>2</sup>

(1. 西北工业大学航空学院, 西安 710072; 2. 中国民航科学技术研究院, 北京 100028)

**摘要:**轻质泡沫混凝土是一种拦阻冲出跑道飞机的重要阻滞材料,为了揭示其压缩力学性能及变形破坏机制,利用 CSS4410 电子万能试验机、Instron Dynatup9250 落锤试验机以及 VHS 8800 高应变率系统,对密度为 0.21、0.31 g/cm<sup>3</sup> 的轻质泡沫混凝土,在压缩速度  $2 \times 10^{-5} \sim 12$  m/s 范围内的力学特征、破坏及变形机理等进行了系统研究,用理论模型对不同压头面积下的挤压强度进行预测,并建立挤压压溃流动应力方程。结果表明:此材料变形、压溃碎化到压实过程中,以压溃前驱界面运动为特征,变形具有显著的局部失稳特性;压缩强度依赖密度和冲击速度;所采用的理论模型可以较准确的预测不同压头面积下的挤压强度;所建立的压溃流动应力方程可以很好的描述材料的压缩挤压力学特性。

**关键词:**阻滞材料;混凝土;压缩;机制;吸能

**中图分类号:** V250.2    **文献标志码:** A    **文章编号:** 1674-4764(2013)06-0096-07

## Energy-absorbing Properties and Crushing Flow Stress Equation of Lightweight Foamed Concrete

Wang Jianjun<sup>1</sup>, Guo Weiguo<sup>1</sup>, Zhao Rong<sup>1</sup>, Shi Yajie<sup>2</sup>, Zeng Liang<sup>2</sup>

(1. School of Aeronautics, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, P. R. China;

2. China Academy of Civil Aviation Science and Technology, Beijing 100028, P. R. China)

**Abstract:** Lightweight foamed concrete is a new arresting material for arresting overrun aircraft. To reveal its compression properties and mechanism of deformation and destruction, a study on lightweight foamed concrete with different density, 0.21 and 0.31 g/cm<sup>3</sup> respectively, has been carried out. Experiment system include CSS4410 electronic universal testing machine and Dynatup9250 drop-hammer testing machine and VHS8800 high strain rate system. Then, extrusion strength under different indenter area is predicted with a theoretical model, and a crushing flow stress constitutive equation is proposed. The results show that it is characterized by the movement of crushing driving interface during the process of deformation, crush to compaction of the material, and the deformation is notably in local. The compression strength is relevant to density and impact velocity. Moreover, theoretical model can predict the extrusion strength under different indenter area exactly, and the crushing flow stress equation can describe mechanic properties of compression well.

**Key words:** arresting material; concrete; compression; mechanism; absorb energy

收稿日期: 2013-03-10

基金项目: 陕西省科学技术研究发展计划项目(2013KW13-02)

作者简介: 王建军(1987-),男,博士生,主要从事固体力学研究, (E-mail) jianjunw87@126.com。

郭伟国(通信作者),男,教授,博士生导师, (E-mail) weiguo@nwpu.edu.cn。

当飞机由于气象、机械故障和驾驶员操作失误等原因滑跑冲出跑道时,为了使乘员和飞机在小于约  $1g$  过载值下安全停止,就需要在机场跑道末端设置越界拦阻系统。虽然有些跑道末端的田地、水域或软沙土能起到某些程度的阻滞作用,但由于下雨或结冰等自然环境会失去阻滞作用,所以 1950 年代末 Schirtzinger<sup>[1]</sup> 就提出了通过在跑道末端铺设厚度渐增的可抑压的材料拦阻越界飞机的原理,1980 年代 Tuman<sup>[2]</sup> 提出用类似尼龙网缆索飞机或运动器。经过多年技术发展,工程材料阻滞系统 EMAS(Engineered Material Arresting System) 得到完善<sup>[3-4]</sup> 并已投入实用。而中国产的 EMAS 还处于研究阶段<sup>[5-8]</sup> 未投入实质应用。

在 EMAS 中,阻滞材料是系统的重要组成部分之一。由于要保障乘员和飞机的安全,决定了阻滞材料应当具有很低的密度以致在飞机冲入时引起低过载加速度值,并且各种性能指标在环境影响下具有耐久性。目前阻滞材料有高分子泡沫材料、易碎化复合材料、泡沫混凝土材料等。在泡沫混凝土性能研究方面,颜雪洲等<sup>[9]</sup> 通过泡沫混凝土受压全过程试验,以及与加气混凝土对比,分析研究了泡沫混凝土的力学性能,给出了泡沫混凝土受压应力—应变安全曲线方程。高波等<sup>[10]</sup> 分析了发泡混凝土生产中发泡剂泡沫的稳定性,及其对混凝土性能的影响。熊耀清,姚谦峰<sup>[11]</sup> 对蒸压加气混凝土和泡沫混凝土两种轻质多孔混凝土的基本力学性能进行了试验研究和本构模型的理论探讨。Ramamurthy 等<sup>[12]</sup> 和 Kearsley 等<sup>[13-14]</sup> 根据泡沫混凝土的基体材料组成进行归类研究,获得孔隙率与压缩强度的关系。周顺鄂等<sup>[15]</sup> 对泡沫混凝土的压缩特性及其抗压强度进行了系统的研究。

针对中国产新开发的轻质泡沫混凝土,本文对其压缩力学行为和变形破坏机制进行系统实验研究,并用理论模型对不同压头面积下的挤压强度进行预测,给出描述挤压压溃流动应力的方程。

## 1 材料及试验过程

### 1.1 材料

该轻质泡沫混凝土(Foamed Concrete,简称 FC)是按配比将粘土、沙子、水泥、粉煤灰陶粒、高分子材料等和水混合搅拌均匀,倒入泡沫搅拌,同时加减水剂、促凝剂等制成均匀流浆态;倒入模具然后放在振动台振动成型,室温放置 3 d 脱模,在 90% 相对湿度恒湿箱养护约 1 个月而成。如图 1 所示,成型的轻质泡沫混凝土是一种闭孔材料,通常泡沫直径

约为 1 mm 左右,而壁厚  $h$  大约 0.1 mm,图 1 中(c)、(d)图为 ZEISS SUPRA 55 扫描电子显微镜(SEM)下观察得的该材料的微观结构图,其中,(d)图为 SEM 观察得的孔壁的微观结构图。此轻质泡沫混凝土材料孔壁除受到压力和剪力外,主要以承受较大的弯矩载荷为受力特征,当基体材料和孔壁厚度相同时,泡沫直径越大,相同外载荷使其孔壁所承受的弯矩也越大,材料抗压强度降低,这正是低密度大孔径泡沫材料的受力特点。

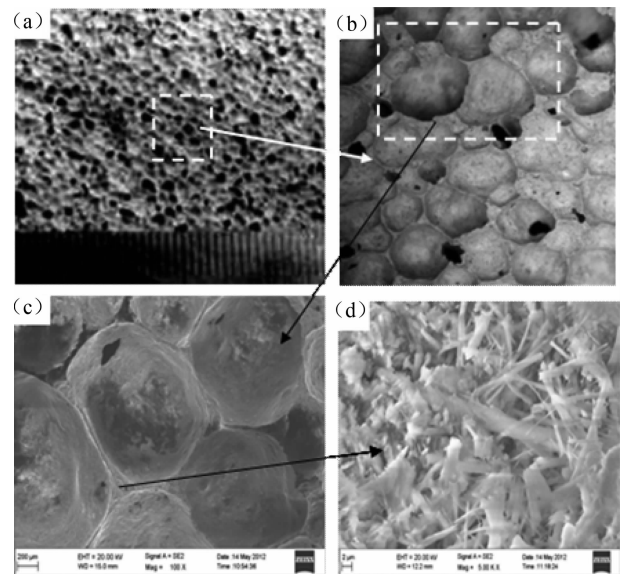


图 1 轻质泡沫混凝土的微观结构图

### 1.2 EMAS 中阻滞材料受力特点

首先分析一下 EMAS 中阻滞材料的工作原理,见图 2 示意图所示,当飞机机轮冲向 EMAS 阻滞材料(EMAS-Foam),机轮在水平方向(与机轮运动方向相同)具有惯性力,同时机轮具有垂直方向飞机的重力载荷,这 2 个外力通过阻滞材料来平衡,进而在水平方向形成阻滞拖曳力(与机轮运动方向相反),具体到机轮与阻滞材料接触面任意点,阻滞材料将会受到压缩力  $F_N$  和剪切力  $F_Q$ (见图 2 上部示意),这样在对本文的轻质泡沫混凝土力学性能测试中以研究其压缩和剪切力为主。

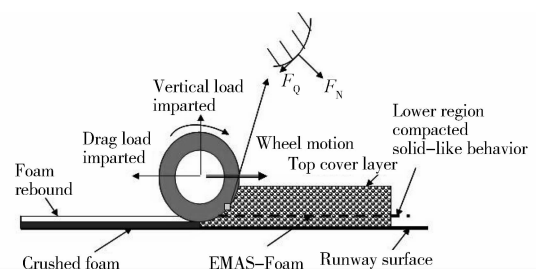


图 2 EMAS 中阻滞材料的工作原理图

### 1.3 试验过程

进行试验的试样有 2 种形状,一种是柱体,另一种是长方体。试样密度采用两种密度,分别为  $0.21$ 、 $0.31 \text{ g/cm}^3$ 。对于低速试验,采用 CSS4410 电子万能试验机进行压缩和剪切试验,对于高速试验,采用 Instron Dynatup9250 落锤试验机以及 VHS 8800 高恒定应变率系统进行,该设备最高速度可以到  $20 \text{ m/s}$ 。

## 2 试验结果与分析

### 2.1 压缩性能及行为

低应变率压缩试验是在 CSS4410 电子万能试验机进行的,图 3 为密度  $0.21 \text{ g/cm}^3$ ,图 3(a)为直径  $80 \text{ mm}$ ,高度  $40 \text{ mm}$  试样在压缩时的载荷位移曲线,图 3(b)由载荷位移得到的工程应力应变曲线以及相应的变形过程照片。从图中可以看出轻质泡沫混凝土压缩应力与应变曲线具有明显的 3 个区域:弹性区  $E_E$ ,平台压溃区  $E_C$  和致密区  $E_D$ 。弹性区  $E_E$  很小,此区常常忽略,当外载进一步增加,由于压头对材料的横向约束,靠近上下压头区的材料首先出现压溃区并与试样中间弹性区形成图 3 所示的前驱界面(driving interface)。继续压缩,压溃区增加,即前驱界面量增加。在平台压溃区  $E_C$  中,随着压缩加载,试样在弹性区出现沿加载方向的开裂。从图 3 可以清楚看出,在平台压溃区  $E_C$ ,应力随压缩连续下降,主要原因是,当试样两端压溃区增加时,实际上试样外表面斜削压溃脱落区增加(由于试样外围无约束),即承载弹性区横截面减小,出现载荷逐渐下降趋势。当两端的前驱界面相遇(往往试样两端前驱界面运动距离不对称),整个试样全压溃,进而曲线进入到密实区  $E_D$ ,压缩应力急剧增加,这在实际拦阻中压溃泡沫层形式相同,见图 2 中 Crushed foam。在实际飞机越界拦阻过程中,主要通过平台压溃区  $E_C$  变形破坏吸收飞机运动冲击的能量,所以在设计或计算中,主要以 EMAS 中阻滞材料平台压溃区  $E_C$  应力应变曲线为依据。

为了进一步考察材料的尺寸和边界效应,对同密度以及试样  $300 \text{ mm} \times 300 \text{ mm} \times 300 \text{ mm}$  立方体试样也进行了压缩,试样的变形破坏过程照片如图 4 所示,图中数字为试样名义应变量。从图 4 可清楚看到,其变形破坏也以压溃前驱界面运动为特征,由于侧向无约束,材料沿外侧面压溃斜削脱落,当压溃前驱界面相遇后再持续压缩将进入到密实区  $E_D$ 。

为了观测高应变率下轻质泡沫混凝土的压缩变形特征,利用 VHS 8800 高恒定应变率试验系统对

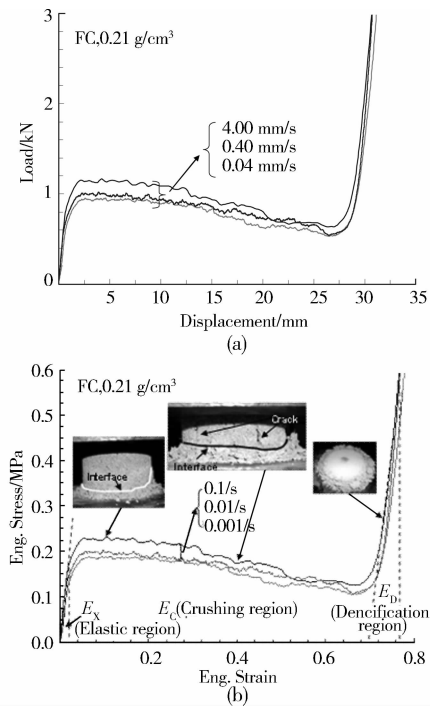


图 3 轻质泡沫混凝土在低应变率  $10^{-1}/\text{s}$  以下量级压缩变形特征

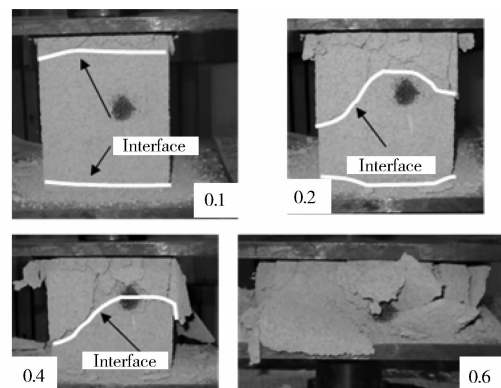


图 4 试样  $300 \text{ mm} \times 300 \text{ mm} \times 300 \text{ mm}$  立方体时压缩下变形破坏特征

$100 \text{ mm} \times 100 \text{ mm} \times 120 \text{ mm}$  的试样进行了不同高应变率压缩试验,结果见图 5 所示。从图可以看出压缩曲线和相应的变形破坏照片特征与图 3 相似。但值得注意的是在应变到达  $0.25$  时,压缩应力突然下降,通过高速摄影照片看出,在此阶段试样中部弹性区已出现裂纹且试样两端压溃散裂导致压缩载荷失稳。

当提高材料密度为  $0.31 \text{ g/cm}^3$ ,对该材料进行高应变率试验,试样变形破坏的特征见图 6 所示,与图 5 不同的是,进入压溃区后试样很快就出现沿加载方向的裂纹,整个试样的破坏压溃区很小,主要以在弹性区开裂失稳为主要破坏模式。

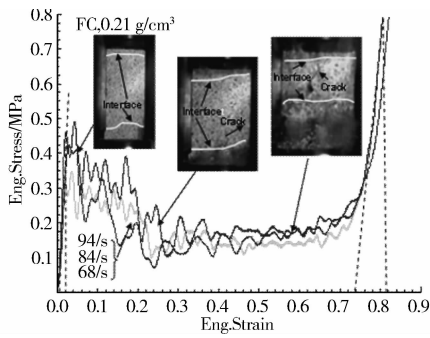


图 5 低密度轻质泡沫混凝土在高应变率压缩下变形特征

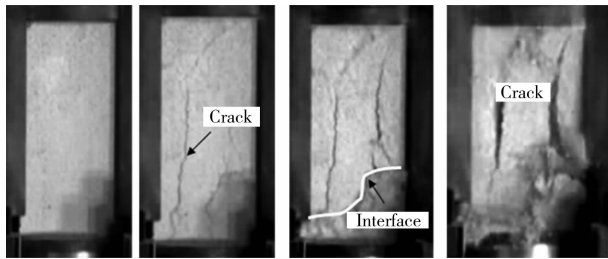


图 6 高密度 (0.31 g/cm<sup>3</sup>) 轻质泡沫混凝土在高应变率压缩下变形破坏特征

图 7 给出了低密度材料在不同压缩应变率下的曲线对照,从图中清楚看出,在应变约 30% 前,材料表现出显著的率敏感性,与图 3 和 5 对照材料的变形破坏特征分析发现,在材料未出现沿加载方向的裂纹前,材料率敏感性强。当出现沿加载方向裂纹后,材料实际已进入到了具有损伤的失稳加载阶段,对率敏感性减弱。

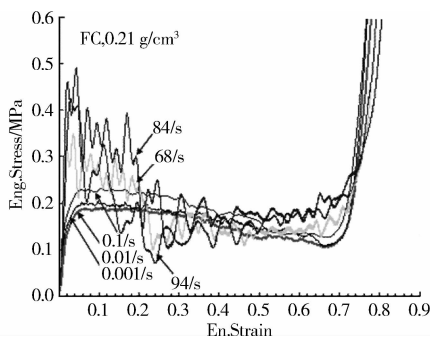


图 7 低密度轻质泡沫混凝土在不同应变率下应力应变曲线对照

## 2.2 横向约束下压缩行为

通过 2.1 节试验看出,在压缩情况下试样在接触压头区域首先出现压溃区,连续加载以压溃前驱界面连续运动为特征,当加载变形到一定程度,在试样中部弹性区会出现沿加载方向的开裂裂纹,材料密度越高出现裂纹阶段越早。根据压缩加载受力分析,这种现象的出现与试样横向约束有关,考虑到实

际使用中是飞机机轮挤压进轻质泡沫混凝土的,所以笔者进行了不同速度下的挤压试验。图 8 是不同速度下典型的应力与挤压深度比率(挤压深度与试样总高度之比)曲线对照,图 9 是在速度为  $8 \times 10^{-3}$  m/s 下的挤压试样剖切面照片。图 8 横坐标为挤压深度比率,从该图得出,随冲击速度增加,材料的压溃流动应力显著增加。并且从对应的挤压试样剖面图 9 看出,挤压变形破坏特征是,压头前端堆积的压溃区几何形状与尺寸随挤压深度连续变化,压溃区与材料弹性区形成的界面运动是主要变形特点,与图 3 到 6 的无约束压缩变形破坏特征不同。

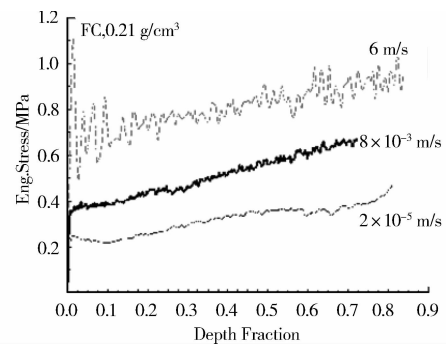


图 8 不同速度下的压溃流动应力与挤压深度比率的关系

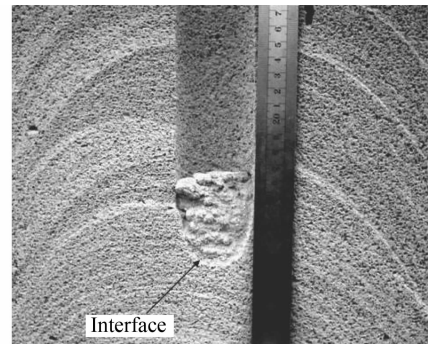


图 9 挤压材料的变形破坏特征

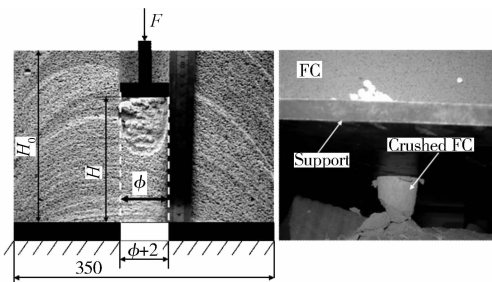
## 2.3 材料的剪切行为

见图 10 左图,取挤压头压盘直径  $\varphi = 50.8$  mm,支撑试样底板做一直径为 52.8 mm 的穿孔,该穿孔直径中心线与压盘中心一致。用于剪切试验的试样为低密度:  $0.21 \text{ g/cm}^3$ ,其尺寸为  $H_0 = 280$  mm 的立方体,图 10 右图为剪切的试验照片,表示压溃区通过了支撑底板的穿孔。剪切应力  $Q$  定义为:

$$Q = \frac{F}{H\pi\varphi} \quad (1)$$

式中,  $F$  为试验机所施加给试样的压力,  $H$  为试样剩余高度。按照图 10 的试验方法和式(1)的计算,获得速度在  $8 \times 10^{-3}$ 、 $2 \times 10^{-5}$  m/s 的剪切应力与加载

头挤压进试样比率(见图 11 左图,  $(H_0 - H)/H_0$ ) 曲线, 如图 11 所示。从图 11 看出, 剪切曲线初始线性上升段为材料弹性支撑表现, 当材料被压溃, 曲线进入屈服区, 在从 0 到 0.75 压进深度比率区域, 曲线呈现类似硬化上升, 从图 10 左图看出, 随压头压进深度增加, 试样的剪切段  $H$  变小, 但由于压头前端压溃区长度也增加, 导致剪切摩擦增加, 故曲线上升, 从图 11 也可以看出剪切压溃流动应力对加载速度敏感。通过与挤压应力比较, 剪切应力只是此材料挤压应力(图 8 应力)的 4%。所以在用此材料实际设计或数值计算中, 剪切强度常取为一很小值的固定常数。



注:左-剪切试样剖面图;右-剪切试验照片

图 10 剪切试验方法

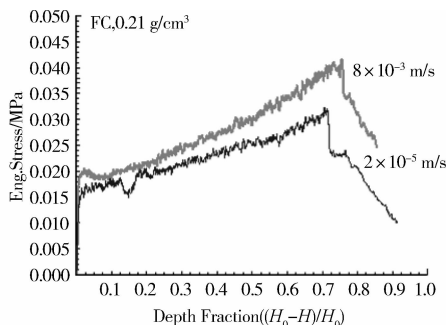


图 11 剪切应力与挤压深度比率随加载速度变化曲线

### 3 不同压头面积下挤压强度的预测

考虑轻质泡沫混凝土材料在飞机越界阻滞系统中实际应用时会出现不同面积下的挤压, 笔者对不同压头面积下的挤压进行了理论模型及挤压试验研究。脆性泡沫材料挤压强度往往不等于抗压强度(或抗碎强度, 单个胞孔结构出现孔壁坍塌破坏时承受的平均应力), 而是强烈地依赖于压头的尺寸<sup>[16]</sup>。脆性挤压强度  $\sigma_{ex}$  是指与刚性压头接触的胞孔胞壁出现大面积压溃时压头覆盖面的平均应力, 即挤压应力-挤入深度比率曲线中刚进入压溃平台时的压溃应力, 如图 12 所示。随着挤压的继续进行, 压溃的胞壁碎片在压头下方区域堆积, 形成压溃区, 从而

使作用力重新分布。抗压强度  $\sigma_{cr}$  为使单个胞孔的孔壁断裂时胞孔上的平均应力, 其大小与孔壁材料的断裂模量、胞孔结构等有关。Gibson 等<sup>[17]</sup> 通过理论模型, 得出抗压强度, 如下式所示:

$$\frac{\sigma_{cr}}{\sigma_{fs}} \approx 0.2(\varphi \frac{\rho^*}{\rho_s})^{3/2} + (1 - \varphi) \left( \frac{\rho^*}{\rho_s} \right) \quad (2)$$

式中:  $\sigma_{fs}$  为孔壁材料的断裂模量;  $\frac{\rho^*}{\rho_s}$  为材料的相对密度;  $\rho^*$  为材料的密度;  $\rho_s$  为基体的密度;  $\varphi$  为胞孔棱边所含固体的体积分数。当基体材料和胞孔结构确定, 该材料的抗压强度也就确定。

若在孔壁断裂时的最大挠度为  $\delta_c$  (与胞孔尺寸  $l$  相比,  $\delta_c$  很小), 且可认为断裂发生在距离材料表面约为  $l$  处, 如图 13 所示, 则任意时刻, 孔壁接触到刚性压头的机率为:

$$p = \frac{\delta_c}{l} \quad (3)$$

压头覆盖面积为  $A$ , 则在该面积下胞孔数量为:

$$n = \frac{A}{l^2} \quad (4)$$

在压头面积  $A$  下, 接触数量的概率服从二项分布, 即

$$P(0 \text{ 接触点}) = (1 - p)^n$$

$$P(1 \text{ 接触点}) = np(1 - p)^{n-1}$$

$$P(2 \text{ 接触点}) = \frac{1}{2}n(n-1)p^2(1 - p)^{n-2}$$

.....

有效接触的平均数为  $np$ , 标准差为  $[np(1 - p)]^{1/2}$ , 因为  $p$  很小, 在此可将标准差近似为  $(np)^{1/2}$ 。则根据“3 $\sigma$  原则”得有效接触的最大量是:

$$\text{平均数} + 3(\text{标准差}) = np + 3(np)^{1/2}$$

对应的最大作用力是有效接触点数乘以每个有效点处的作用力之最大值, 得挤压强度为:

$$\sigma_{ex} = \frac{F_m}{A} = C\sigma_{cr} \frac{\delta_c}{l} \left[ 1 + 3 \left( \frac{l^3}{A\delta_c} \right)^{1/2} \right] \quad (5)$$

其中:  $C$  为常数, 若所有孔壁都与压头接触, 接触几率为 100%, 此时胞孔排列整齐, 尺寸相同, 则挤压强度即为抗压强度, 有  $\sigma_{ex} = C\sigma_{cr} = \sigma_{cr}$ , 故常数  $C$  取 1。

$$\sigma_{ex} = \sigma_{cr} \frac{\delta_c}{l} \left[ 1 + 3 \left( \frac{l^3}{A\delta_c} \right)^{1/2} \right] \quad (6)$$

为研究不同压头面积对轻质泡沫混凝土材料挤压强度的影响, 本文用不同面积压头对两种密度的该材料进行了挤压试验, 压头面积分别选用 706.5、2 025.8、6 358.5 和 12 100 mm<sup>2</sup>。结合试验结果可确定式(6)的两个主要参数  $\sigma_{cr}$  和  $\delta_c$ , 如表 1 所示。不同压头面积测得的挤压强度与理论预测值的对比如图 14 所示。从图 14 中可以看出, 理论模型可以很好的预



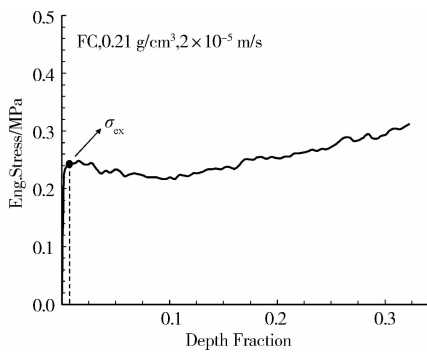


图 12 挤压强度定义

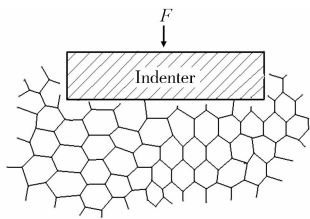


图 13 孔壁与压头的接触

测轻质泡沫混凝土材料的挤压强度,且从理论和试验结果可以得出:随着压头面积的增大,挤压强度不断减小,当压头面积增大到一定值后,挤压强度趋于一常数,即挤压强度反比于  $A^{1/2}$ 。

表 1 材料的主要参数

密度 $\rho^*$ / ( $g \cdot cm^{-3}$ )	相对密度 $\rho^* / \rho_s$	平均胞孔 直径 $l$ /mm	孔壁断裂挠度 $\delta_c$ /mm	抗压强度 $\sigma_{cr}$ /MPa
0.21	0.25	1.0	0.052	4.62
0.31	0.37	0.7	0.017	24.88

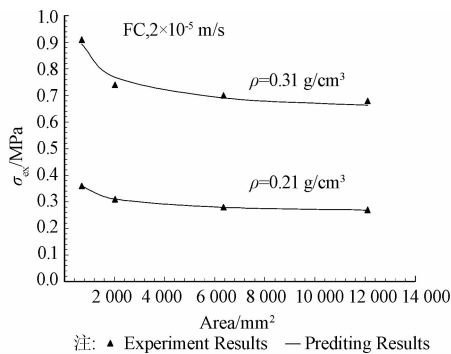


图 14 试验结果与预测结果的对比

#### 4 挤压压溃流动应力方程

在本文中,为给工程设计及数值计算提供基础,也考虑到在实际飞机越界拦阻过程中,主要通过飞机机轮挤压进材料,依靠材料平台压溃区  $E_c$  变形破坏吸收飞机运动冲击的能量,所以本文仅对有应用

前途的低密度轻质泡沫混凝土材料,在具有横向约束的挤压应力在不同速度下的挤压压溃流动应力方程进行研究,即建立挤压压溃流动应力-挤压深度比率曲线方程。参见图 8 曲线,根据曲线分析,弹性部分所占比例很小,而材料压溃屈服后,压溃流动应力呈现硬化特征,且根据对速度的敏感性,提出如下压溃流动应力方程:

$$\sigma = (\sigma_c + k\eta^m)(1 + C \ln(\frac{v}{v_r})) \quad (7)$$

式中:  $\eta$  是挤压深度比率,即挤压深度比试样总厚度  $((H_0 - H)/H_0)$ ;  $\sigma_c$ 、 $k$ 、 $C$  是材料常数,  $\sigma_c$  反映材料的初始压溃应力,  $k$  是对压溃流动硬化的衡量;  $m$  是反映压溃流动应力硬化的硬化指数,  $v_r$  是参考冲击挤压速度,取为  $2 \times 10^{-5}$  m/s。结合试验结果最后确定的方程为:

$$\sigma = (0.25 + 0.3\eta^{1.5})(1 + 0.1 \ln(\frac{v}{v_r})) \quad (8)$$

通过试验曲线和本构方程式(8)结果的比较可以看出,如图 15 所示,式(8)的挤压压溃流动应力方程能够较好地描述材料的力学性能。

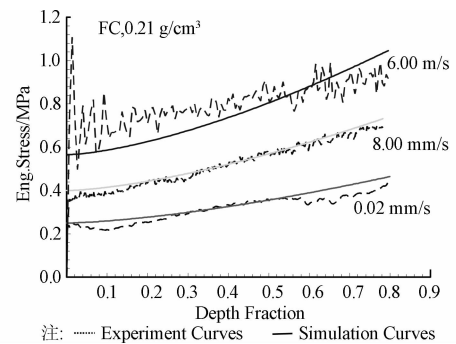


图 15 模型结果与试验曲线对比

#### 5 结论

轻质泡沫混凝土是一种理想的飞机越界阻滞材料,本文对该种材料的传热特性、不同速度的力学特性、破坏及变形机理等进行了系统的研究,得出以下结论:

- 1) 材料的压缩强度强烈依赖于材料的密度和加载速度,密度越大,加载速度越高,压缩强度越大。
- 2) 材料从弹性变形、压溃碎化到压实过程中,以压实前驱界面的形式运动为主,变形具有显著的局部失稳特性。
- 3) 考虑压头面积对材料挤压强度的影响提出的理论模型可以较准确的预测该材料在不同压头面积下的挤压强度。
- 4) 根据材料的挤压压溃流动应力对速度的敏感性提出的压溃流动应力方程可以很好的描述材料的

压溃流动应力。

#### 参考文献:

- [1] Schirtzinger J F. Method and means for decelerating aircraft on runways; United States, US3066896 [P]. 1959.
- [2] Tuman C. Aircraft arrestment system; United States, US4393996 [P]. 1983.
- [3] Heymsfield E, Tyler L, Halsey. Sensitivity analysis of engineered material arrestor systems to aircraft and arrestor material characteristics [J]. Journal of the Transportation Research Board, 2008, 2052: 110-117.
- [4] Heymsfield E, Hale W, Halsey T. Aircraft response in an airfield arrestor system during an overrun [J]. Journal of Transportation Engineering, 2012, 138: 284-292.
- [5] 王云, 郑小平, 姚福印, 等. 飞机越界阻滞系统动力学模型 [J]. 清华大学学报: 自然科学版, 2010, 50(7): 1109-1113.  
Wang Y, Zheng X P, Yao F Y, et al. Dynamic model of the arresting system for aircraft overrun [J]. Journal of Tsinghua University: Science and Technology, 2010, 50(7): 1109-1113.
- [6] 王维, 常虹. 飞机道面拦阻系统建模分析 [J]. 中国民航大学学报, 2009, 29: 10-13.  
Wang W, Chang H. Modeling and analysis on soft-ground arresting system for aircraft [J]. Journal of Civil Aviation University of China, 2009, 29: 10-13.
- [7] 赵融, 郭伟国, 王建军, 等. 一种新型轻质泡沫混凝土挤入行为的试验研究 [J]. 实验力学, 2012, 27(3): 354-360.  
Zhao R, Guo W G, Wang J J, et al. Experimental study of squeeze behavior for a kind of new lightweight foamed concrete [J]. Journal of Experimental Mechanics, 2012, 27(3): 354-360.
- [8] 李广良, 郭伟国, 赵融, 等. 混凝土复合泡沫材料的力学性能与唯象本构模型 [J]. 材料科学与工程学报, 2012, 30(3): 428-431.  
Li G L, Guo W G, Zhao R, et al. Mechanical properties and phenomenological constitutive model of lightweight foamed concrete [J]. Journal of Materials Science & Engineering, 2012, 30(3): 428-431.
- [9] 颜雪洲, 姚谦峰. 轻质泡沫混凝土力学性能试验研究 [J]. 工业建筑, 2007, 37: 962-964.  
Yan X Z, Yao Q F. Experiment study on the mechanical property of foamed concrete [J]. Industrial Construction, 2007, 37: 962-964.
- [10] 高波, 王群力, 周孝德. 混凝土发泡剂及泡沫稳定性的研究 [J]. 粉煤灰综合利用, 2004(1): 13-16.  
Gao B, Wang Q L, Zhou X D. Study on foaming agent of concrete and stability of foam [J]. Flyash Comprehensive Utilization, 2004(1): 13-16.
- [11] 熊耀清, 姚谦峰, 周孝德. 轻质多孔混凝土受压应力-应变全曲线试验研究 [J]. 四川建筑科学研究, 2010, 36(2): 228-232.  
Xiong Y Q, Yao Q F. Experimental study on the stress-strain curve of porous lightweight concrete [J]. Sichuan Building Science, 2010, 36(2): 228-232.
- [12] Ramamurthy K, Kunhanandan Nambiar E K, Indu Siva Ranjani G. A classification of studies on properties of foam concrete [J]. Cement and Concrete Composites, 2009(31): 388-396.
- [13] Kearsley E P, Wainright P J. The effect of porosity on the strength of foamed concrete [J]. Cement and Concrete Research, 2002 (32): 233-239.
- [14] Kearsley E P, Wainright P J. Porosity and permeability of foamed concrete [J]. Cement and Concrete Research, 2001(31): 805-812.
- [15] 周顺鄂, 卢忠远, 焦雷, 等. 泡沫混凝土压缩特性及抗压强度模型 [J]. 武汉理工大学学报, 2010, 32(11): 9-13.  
Zhou S E, Lu Z Y, Jiao L, et al. Compression property and compression strength model of foamed concrete [J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2010, 32(11): 9-13.
- [16] Dam C Q, Brezny R, Green D J. Compressive behaviour and deformation-mode map of an open-cell alumina [J]. J. Materials Research, 1990 (5): 163-171.
- [17] Gibson L J, Ashby M F. Cellular solids structure and properties [M]. 2nd ed. United Kingdom: Cambridge University Press, 1997.

(编辑 郭飞)