

文章编号: 1001-4888(2013)04-0481-09

轻质泡沫混凝土的劈裂破坏力学行为分析*

李丹^{1,3}, 尚帅旗², 陶俊林¹, 王宁¹

(1. 西南科技大学土木工程与建筑学院; 2. 西南科技大学环境与资源学院;

3. 四川省非金属复合与功能材料重点实验室一省部共建国家重点实验室培育基地, 绵阳 621010)

摘要: 利用平台巴西圆盘加载方式和钢质压条加载方式, 对两种厚度为 25mm 和 50mm、不同密度的轻质泡沫混凝土(400~1000kg/m³)进行巴西圆盘劈裂试验, 研究密度和厚度对泡沫混凝土裂纹宽度、劈裂强度、断裂韧度、断裂能的影响规律。结果表明, 在橡胶垫平台巴西圆盘和钢质压条加载方式下, 其劈裂断裂特征大致分为四个阶段: 线性弹性段、非线性弹性段、起裂阶段、失稳阶段。同样加载率下最大裂纹宽度随着泡沫混凝土密度增加逐渐减小, 劈裂拉伸强度、断裂韧度、断裂能呈幂函数形式增加。借鉴 Reinhardt 非线性软化曲线, 对不同密度泡沫混凝土的应力软化关系进行曲线拟合, 建立基于拉伸强度、断裂韧度等控制参数的应力—裂纹宽度关系三段式模型。基于试验结果, 对理想多孔材料细观力学预测模型进行修正, 获得泡沫混凝土孔隙率与拉伸强度的半经验公式。

关键词: 泡沫混凝土; 裂纹扩展过程; 应力软化曲线; 断裂韧度; 断裂能

中图分类号: TU55 **文献标识码:** A **DOI:** 10.7520/1001-4888-13-004

0 引言

泡沫混凝土是用物理方法将表面活性剂——泡沫剂水溶液制成泡沫, 再将泡沫加入到由水泥、骨料、掺合料、外加剂和水等制成的料浆中, 经混合搅拌、浇注成型、自然或蒸汽养护制成的多孔混凝土。而泡沫混凝土保温、隔热、抗震性能优良, 是一种既可工厂化生产成各种形状的预制品, 又可现场浇筑, 在各类建筑工程中具有广泛的应用前景^[1-4]。从上世纪 50 年代开始, 对于较轻质泡沫混凝土(密度 < 1000kg/m³)的抗压强度及抗拉力学性能, 国内外学者进行了相关研究, 主要工作集中在外添加剂对泡沫混凝土力学性能的影响规律^[5-8]。M. R. Jones 指出由于泡沫混凝土特别高的干燥收缩应变和相对低的拉伸强度及刚度性能, 用其直接替代普通混凝土是不可能的, 将必须开发更多创新的结构形式^[9]。而轻质泡沫混凝土不仅能达到较高的孔隙率, 还具有波阻抗低、造价低、抗冲击能量效果好等优点, 将泡沫混凝土作为复合防护结构的内衬材料可用于衰减冲击波, 以自身遭到破坏为代价来保护内层混凝土, 提高整体防护结构的抗爆能力。为了将泡沫混凝土更好地应用在防冲击载荷的军用和民用防护工程领域, 有必要对不同密度的轻质泡沫混凝土在静动态加载下抵抗裂纹失稳扩展即抵抗脆断的能力进行细致研究, 本文基于巴西圆盘静态加载试验对轻质泡沫混凝土抵抗裂纹扩展的能力进行了试验研究。

巴西圆盘试验也称劈裂试验, 沿圆盘试样的直径施加载荷, 使试样沿直径开裂破坏, 此方法主要用来间接测量岩石、混凝土、陶瓷和玻璃等脆性材料的拉伸强度、断裂韧度^[10,11]。中心起裂条件是保证巴

* 收稿日期: 2013-01-16; 修订日期: 2013-06-17

基金项目: 国家科技支持子课题(2011BAE14B05-2), 国防基础科研项目(B3120110004), 四川省非金属复合与功能材料重点实验室开放基金(11ZXFK08), 西南科技大学博士研究基金(09ZX7128)

通讯作者: 李丹(1975—), 男, 博士, 讲师。E-mail: danli@swust.edu.cn

西圆盘试验测试方法有效性的前提,王启智等^[12]指出平台试样相比传统巴西试样,其主要优点是当平台对应的加载角 $2\alpha \geq 20^\circ$ 时,可以保证加载过程中试样在中心部位起裂。Clobesde 等^[13]用圆弧加载巴西试验方法研究了多孔氧化铝的断裂性能。Jonsen 等^[14]用圆弧加载巴西试验方法研究了不同密度的金属粉末压制试样的拉伸强度。庞海燕等^[15]对 PBX 炸药进行不同加载形式的巴西试验,得出主要结论为:橡胶垫巴西试验方法能够比较准确、稳定地表征 PBX 等强度较低材料的拉伸强度,主裂纹不仅从样品的中心贯通样品的直径,并且在受压区域没有次裂纹产生。试件产生裂纹后,基体中应变具有不均匀性,应力—应变关系不再适用。因此通过试验获得混凝土材料软化曲线 $\sigma-W$ 关系(其中 σ 为软化区域的应力, W 是裂纹张开位移)是较为准确描述混凝土材料裂纹起裂和发展过程的有效途径和方法。国内外学者已通过线性、非线性等形式建立了 $\sigma-W$ 软化曲线模型。Schorn^[17]等采用金属铝柱作为刚性架,获得了混凝土拉伸过程中的应力下降段曲线。张君^[18]等采用逆分析法,建立由抗弯实验获得的荷载—裂纹口张开位移曲线逆推混凝土软化关系。这些研究表明,不同巴西劈裂加载方式适用于不同的试验材料。本文为了获得不同密度泡沫混凝土的拉伸强度、断裂韧度和断裂能,对两种厚度 25mm 和 50mm、密度等级为 $400 \sim 1000 \text{kg/m}^3$ 的泡沫混凝土进行静态巴西劈裂试验,结合平台巴西圆盘与钢质压条两种加载方式,研究密度和厚度对泡沫混凝土裂纹宽度、劈裂强度、断裂韧度及断裂能的影响规律。

1 试验材料

水泥:拉法基 P·O42.5R; 四川江油巴蜀火电厂Ⅲ级粉煤灰(FA); 外加剂 A:KS-JS50Z 减水剂; 外加剂 B:聚丙烯(PP)纤维; 外加剂 C:速凝剂(主要成分为铝酸钠); 外加剂 D:稳泡剂(主要成分为羟丙基甲基纤维素醚)。制备尺寸为直径 117mm,厚度分别为 25mm 和 50mm 的泡沫混凝土圆形试件,密度等级为 $400 \sim 1000 \text{kg/m}^3$,每种密度制备五个试件,水胶比为 0.3,发泡剂采用复合发泡剂, $m_{\text{水}} : m_{\text{发泡剂}} = 20 : 1$,泡沫混凝土配合比如表 1 所示。泡沫混凝土均采用机械拌和及人工制作,试模成型静置 48h 后拆模自然养护。

表 1 泡沫混凝土配合比
Tab. 1 Mix ratio of foam concrete

基体/%		外加剂/%(占基体总量)			
水泥	粉煤灰	PP 纤维	减水剂	速凝剂	稳泡剂
78	22	0.5	2.5	4	0.06

2 试验过程

为了避免加载时的边界应力过度集中引起较大剪切带,对于低密度等级($400 \sim 500 \text{kg/m}^3$)泡沫混凝土试件,在试件平台与加载端之间使用了厚度为 10mm 的橡胶垫片。而对于高密度等级($600 \sim 1000 \text{kg/m}^3$)泡沫混凝土试件,其抗压强度较高,为了比较加载方式对泡沫混凝土劈裂行为的影响,采用平台橡胶垫片及钢制压条两种加载方式进行对比试验。对泡沫混凝土试件制作加载平台,采用文献[12]中的建议值,平台张角为 $2\alpha = 30^\circ$ 。两种加载方式如图 1 所示,利用 300kN 微机控制电液伺服万能试验机对不同密度泡沫混凝土试件进行巴西劈裂试验,加载速率为 0.0833mm/s ,利用摄影系统全程拍摄泡沫混凝土试件劈裂加载过程,观察其损伤劈裂过程。

3 试验结果及讨论

3.1 典型试件拉伸断裂过程的分析

钢制压条加载方式下,劈裂拉伸试验其典型载荷位移曲线如图 2 所示。试验结果表明:采用钢制压条加载方式、不同密度的泡沫混凝土平均临界载荷 P_C 是平台橡胶垫片加载方式的 $0.31 \sim 0.52$ 倍。根据文献[16]的结论,对于不同加载方式,需根据其破坏方式选用不同计算公式获得试件的抗拉强度。

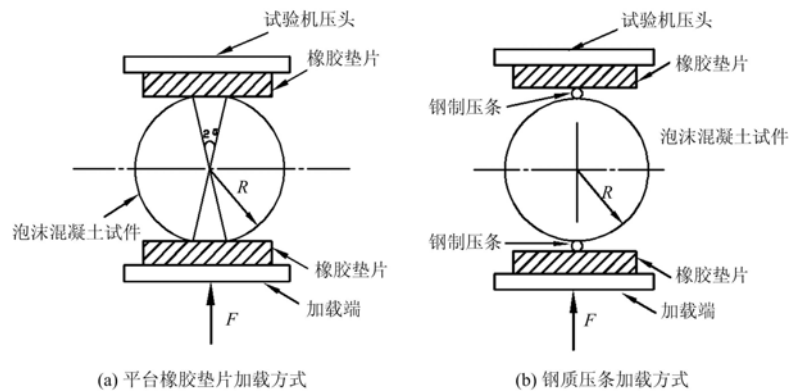
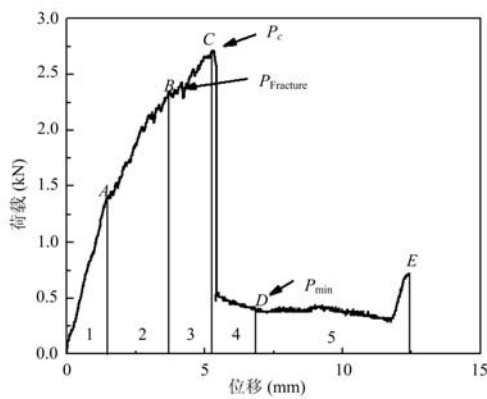


图 1 巴西圆盘加载试验示意图

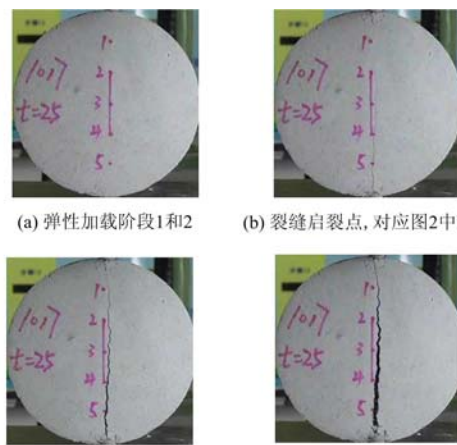
Fig. 1 The experimental setup using Brazilian Disk



- 1. 线弹性段, 2. 非线性弹性段, 3. 裂缝稳定扩展段
- 4. 裂缝非稳定扩展段, 5. 劈裂后的二次加载

图 2 典型泡沫混凝土试件的荷载位移曲线
(密度 $1017\text{kg}/\text{m}^3$, 厚度 25mm)

Fig. 2 Curve of a typical load and displacement for the foam concrete specimen
(Density of $1017\text{kg}/\text{m}^3$, Thickness $t=25\text{mm}$)



(c) 最大荷载 P_c 点, 对应图 2 中 C 点 (d) 试件劈裂, 对应图 2 中 E 点

图 3 钢制压条加载方式下典型泡沫混凝土试件的劈裂拉伸过程
(密度 $1017\text{kg}/\text{m}^3$, 厚度 25mm)

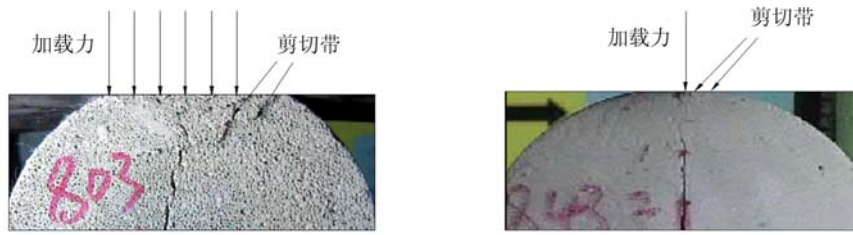
Fig. 3 Splitting tensile test of typical foam concrete specimen by the steel strip loading
(Density of $1017\text{kg}/\text{m}^3$, Thickness $t=25\text{mm}$)

在平台圆盘加载方式与钢质压条加载方式下, 试件断裂模式及演化规律基本上是一致的, 故文中只给出了在钢质压条加载方式下典型泡沫混凝土试件裂纹的发展过程, 如图 3 所示。图 3 为密度 $1017\text{kg}/\text{m}^3$ 的泡沫混凝土典型阶段的劈裂拉伸裂纹发展图, 对应图 2 中荷载与位移曲线上的不同加载点。图 2 的第 1 阶段为泡沫混凝土试件早期的线弹性阶段, 直至达到图 2 中 A 点; 图 2 中 A 点—B 点为第 2 阶段, 泡沫混凝土试件处于非线性弹性阶段; 第 3 阶段, 当 B 点出现初始裂纹, 裂纹起始位置通常在靠近试件中心处, 裂纹处于稳定增长状态, 此状态延续到荷载达到最大值(图 2 中 C 点); 图 2 中 C 点—D 点为第 4 阶段, 为裂纹的非稳定扩展阶段, 荷载迅速减小, 裂纹长度、宽度不断增大; 第 5 阶段, 从 D 点开始, 进入到劈裂后的二次加载阶段, 荷载泡沫混凝土试件劈裂破坏过程进展缓慢。

在靠近加载端部, 由于剪切带存在, 其软化效应会促成优先断裂通道, 试样通常不会完全沿对称轴劈裂, 如图 4(a)、(b) 所示。

3.2 裂纹发展过程

密度等级在 $400\sim 500\text{kg}/\text{m}^3$ 的泡沫混凝土抗压强度较低, 采用钢质压条加载方式容易使钢质压条陷入试件中, 平台加载虽对低密度泡沫混凝土适用, 但容易产生次生裂纹, 所得试验数据不理想。因此对密度等级在 $600\sim 1000\text{kg}/\text{m}^3$ 的泡沫混凝土试件进行钢质压条加载, 获得荷载时间曲线, 由径向受集



(a) 平台橡胶垫片加载(密度803kg/m³, 厚度 t=25mm) (b) 钢制压条加载(密度843kg/m³, 厚度 t=25mm)

图4 不同加载方式下泡沫混凝土试件加载端应力集中现象图

Fig. 4 Stress concentration phenomenon at the end of the Specimen under different loading patterns

中力压缩的巴西圆盘的拉应力计算公式^[12](见式(1))求得钢质压条巴西圆盘名义拉应力—时间曲线,同时拍摄影像进行图像处理,沿试件产生的裂纹长度等距取5个点,测量等距5点处的裂纹张开位移,求取5点处的裂纹张开位移平均值,获得其裂纹张开位移随时间的变化曲线。按照此试验方法,通过巴西劈裂试验间接获得了不同密度等级的泡沫混凝土应力—裂纹宽度($\sigma-w$)关系曲线,如图5所示。

$$\sigma = \frac{2P}{\pi Dt} \tag{1}$$

式中, P 为集中力; D 为直径; t 为厚度; σ 为名义拉应力; w 为裂纹宽度。

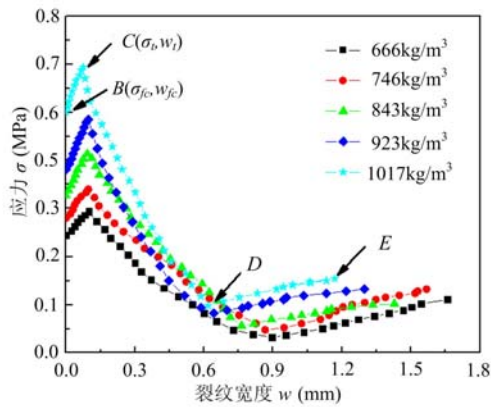


图5 应力 σ 与裂纹宽度 w 曲线

Fig. 5 Curves of stress and crack width

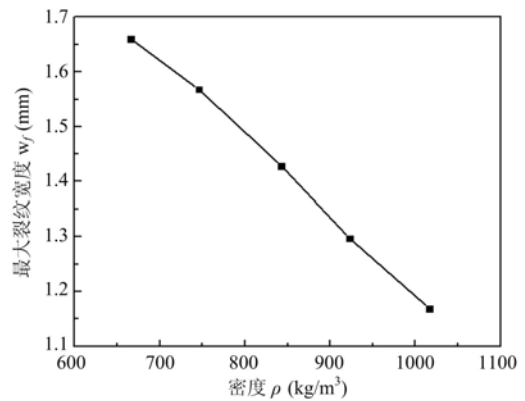


图6 密度 ρ 与最大裂纹宽度 w_f 关系

Fig. 6 Curve of density and maximal crack width

泡沫混凝土应力—裂纹宽度曲线有三个较为明显的变化阶段,利用回归方法对图5中密度等级600~1000kg/m³的泡沫混凝土应力—裂纹宽度试验曲线分三段进行拟合,得到劈裂拉伸条件下泡沫混凝土的应力—裂纹宽度软化模型,如式(2)、(3)所示。

第一段(图5中B点—C点):

$$\sigma = \frac{\sigma_t - \sigma_{fc}}{w_t} w + \sigma_{fc} \quad (0 \leq w \leq w_t) \tag{2}$$

式中, σ_{fc} 为起裂强度; σ_t 为拉伸强度; w_t 为拉伸强度 σ_t 对应的裂纹宽度。

借鉴 Reinhardt^[19] 建议的非线性软化公式对应力—裂纹宽度曲线第二段(图5中C点—D点)、第三段(图5中D点—E点)进行拟合,泡沫混凝土软化效应与普通混凝土有所不同,其非线性软化公式如下:

$$\frac{\sigma}{\beta_i} = \left[c_1 + \left(c_2 \frac{w}{w_f} \right)^3 \right] \exp\left(-c_3 \frac{w}{w_f} \right) - \frac{w}{w_f} (c_1 + c_2^3) \exp(-c_3) \quad (w_t \leq w \leq w_f) \tag{3}$$

式中, $i=1,2$; c_1, c_2, c_3 为材料参数; w_f 为最大裂缝宽度,即为第二次上升达到最高点时所对应的裂纹宽度,由试验确定。式(3)中待定参数取值如表2所示。

表 2 拟合公式(2)中的参数值
Tab. 2 Fitting formula (2) undetermined parameter value

	β_i	c_1	c_2	c_3	拟合度 R
第二段曲线(C-D)	$\beta_1 = \sigma_i$	0.18	4.32	6.93	0.99
第三段曲线(D-E)	$\beta_2 = K_{IC}$	-71.43	-12.43	6.93	0.97

不同密度等级泡沫混凝土—最大裂纹宽度对应关系,如图 6 所示。相同加载率下最大裂纹宽度随着泡沫混凝土密度增加逐渐减小,最大裂纹宽度从 666kg/m³ 所对应的 1.66mm 降至 1017kg/m³ 所对应的 1.17mm。

3.3 劈裂拉伸强度

当采用钢质压条加载方式时,加载过程中钢质压条易陷入密度较低的试件中,为了全面研究不同密度(400~1000kg/m³)泡沫混凝土的断裂特性,3.3.3、3.4、3.5 涉及的劈裂拉伸强度、断裂韧度、断裂能均以平台橡胶垫片加载方式的试验结果作为计算依据。对同密度等级、同一厚度泡沫混凝土的拉伸强度求取有效数据的平均值,劈裂拉伸强度可根据文献[20]中公式(2a)获得,具体表达式见下式:

$$\sigma_t = 0.92 \frac{2P_c}{\pi D t} \tag{4}$$

式中, P_c 是图 2 和图 5 中 C 点对应的临界载荷; D 为试件直径; t 为厚度。

泡沫混凝土厚度为 25mm 和 50mm 时,根据其拉伸强度对应不同密度的散点图,拟合关系曲线见图 7。泡沫混凝土劈裂拉伸强度与密度关系密切,随着密度的增加,其劈裂拉伸强度呈幂函数形式增加。文献[14]中指出,当 $t/D \leq 0.25$ 时满足平面应力状态。本试验中,厚度 $t = 25\text{mm}$ 时,其 $t/D = 0.21$,满足平面应力状态,厚度 $t = 50\text{mm}$ 时,其 $t/D = 0.43$,不满足平面应力状态。通过多组试验发现:泡沫混凝土厚度 $t = 25\text{mm}$ 时的增长速率与厚度 $t = 50\text{mm}$ 时的增长速率相近,厚度 $t = 25\text{mm}$ 的增长速率略高于厚度 $t = 50\text{mm}$ 的增长速率。泡沫混凝土试件厚度 $t = 25\text{mm}$ 和 $t = 50\text{mm}$ 的初始起裂载荷 P_{Fracture} 与最大载荷 P_c 的比值相对集中在 77.5%~92.5%之间,如图 8 所示。

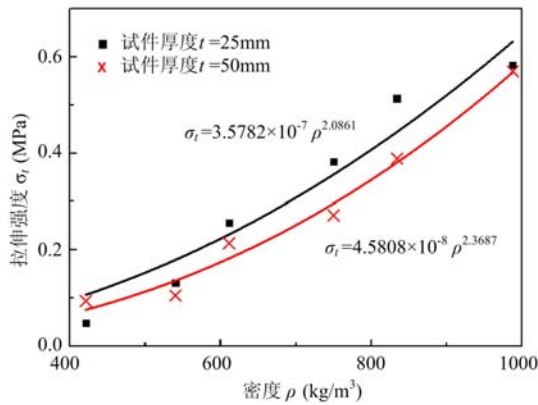


图 7 密度 ρ 与拉伸强度 σ_t 的关系曲线
Fig. 7 Curves of density and tensile strength

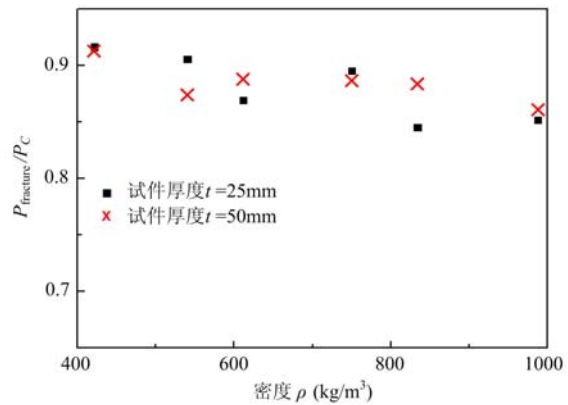


图 8 初始起裂载荷 P_{Fracture} 与最大载荷 P_c 的比值和密度 ρ 的关系

Fig. 8 Ratio of initial crack load P_{Fracture} and maximum load P_c versus density

由于胞孔分布不均、大小不一等细观参数引起不同密度下的泡沫混凝土实际应力降低,故对 Boccaccini 等^[21]建立的理想多孔拉伸强度 σ_t 与孔隙率 n 的关系式引入修正系数 α ,改写的半经验公式为:

$$\sigma_t = \alpha \sigma_0 (1 - n)^{K_i} \tag{5}$$

式中, α 为修正系数; σ_0 为净浆混凝土的拉伸强度; K_i 为气孔对基体的应力集中系数; n 为泡沫混凝土的

孔隙率, $n=1-\rho/\rho_0$, ρ 为泡沫混凝土的密度, ρ_0 为净浆混凝土的密度。

彭震等^[22]在规则多孔铜的拉伸性能及其各向异性的研究中提出,当试样中气孔形状近似等于球形时,公式(5)中的 K_t 取为 3,且本文试验中 $\sigma_0=3.689\text{MPa}$, $\rho_0=2395\text{kg/m}^3$ 。基于以上数据,对试验所得泡沫混凝土的孔隙率与拉伸强度数据进行拟合,拟合曲线如图 9 所示。由拟合公式代入公式(5)算得修正系数 $\alpha=2.69$,得出适合本试验条件泡沫混凝土孔隙率与拉伸强度的半经验公式:

$$\sigma_t = 2.69\sigma_0(1-n)^3 \quad (6)$$

3.4 断裂韧度 K_{IC}

断裂韧度是材料的重要力学性能指标,文献[20]中提出的计算断裂韧度的公式为:

$$K_{IC} = 0.59 \frac{P_{\min}}{\sqrt{Rt}} \quad (7)$$

式中, K_{IC} 为断裂韧度; P_{\min} 为局部最小载荷(对应图 2 中的 D 点); R 为试样半径; t 为试样厚度; 0.59 为对应平台张角 $2\alpha=30^\circ$ 的系数。

根据试验所得数据,可得混凝土厚度为 25mm 和 50mm 时泡沫混凝土的密度 ρ 与断裂韧度 K_{IC} 的散点图,同时拟合泡沫混凝土密度 ρ 与断裂韧度 K_{IC} 的关系曲线,如图 10 所示。泡沫混凝土的断裂韧度与拉伸强度变化规律相似,随着密度的增加呈幂函数形式增加,厚度为 25mm 时的增长速率略高于厚度为 50mm 时的增长速率,两种厚度的断裂韧度差随密度的增加变化不大。

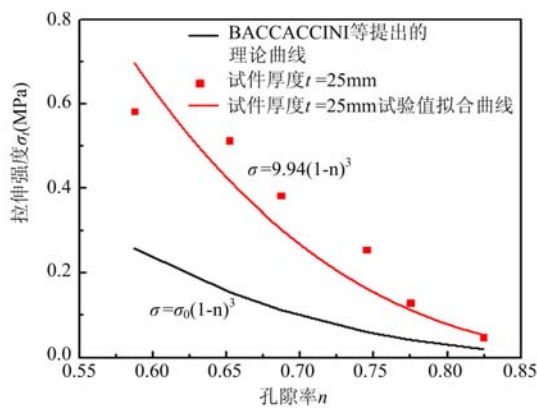


图 9 孔隙率 n 与拉伸强度 σ_t 的关系曲线

Fig. 9 Curves of porosity and tensile strength

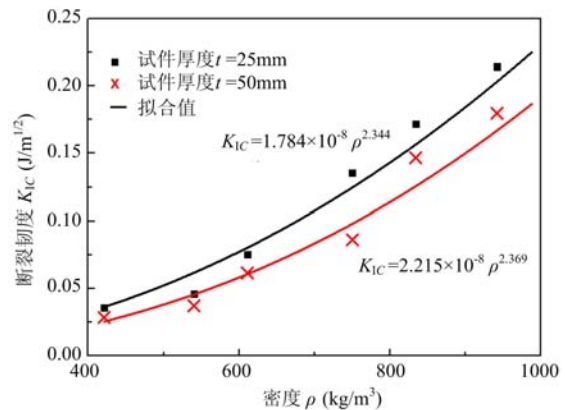


图 10 密度 ρ 与断裂韧度 K_{IC} 的关系曲线

Fig. 10 Curves of density and fracture toughness

3.5 断裂能

把试件裂缝完全开裂时单位面积上所需要的能量称为断裂能 G_f 。根据文献[14]的计算方法求取断裂能 G_f ,不考虑其他能量损失,耗散在断裂带上的能量等于试件裂缝完全开裂时所需要的能量。耗散能 W 为图 11 中曲线下的面积减去 1 点至 2 点连接的直线下的面积。

耗散能分散到断裂面积 A_f 上,断裂能 G_f 可由式(8)求得:

$$G_f = W/A_f \quad (8)$$

式中, W 为耗散能; A_f 为断裂面积,此处近似取 $A_f=Dt$, D 为试件直径, t 为试件厚度。

根据试验中载荷位移数据,得出厚度为 25mm 和 50mm 时的泡沫混凝土断裂能,拟合出泡沫混凝土两种厚度下密度与断裂能的关系曲线,如图 12 所示。泡沫混凝土试件的断裂能随着密度的增加不是线性增加,而是呈幂函数形式增加,断裂能变化范围在 $294\sim 1322\text{J/m}^2$ 之间。同一密度下泡沫混凝土试件厚度为 25mm 时的断裂能略大于试件厚度为 50mm 时的断裂能。

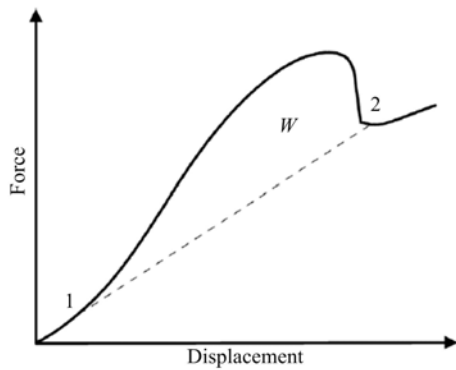
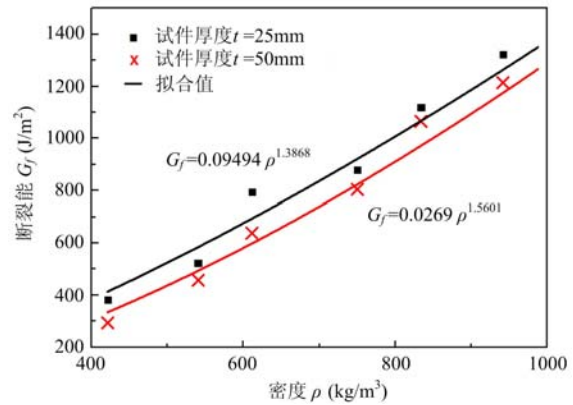
图 11 耗散能 W 的计算^[14]Fig. 11 Calculation of the total dissipated energy^[14]图 12 密度 ρ 与断裂能 G_f 的关系曲线

Fig. 12 Curves of density and fracture energy

4 结论

(1) 对两种厚度为 25mm 和 50mm 的泡沫混凝土进行静态巴西圆盘劈裂试验, 可以获得泡沫混凝土巴西劈裂试验的有效载荷位移曲线, 其劈裂拉伸特征大致分为四个阶段: 线性弹性段、非线性弹性段、起裂阶段和失稳阶段。

(2) 泡沫混凝土裂纹的最大宽度随着密度的增加逐渐减小, 从 666kg/m^3 所对应的 1.66mm 降至 1017kg/m^3 所对应的 1.17mm , 降低了 0.49mm 。基于拉伸强度、断裂韧度等材料控制参数, 对不同密度泡沫混凝土的应力—裂纹宽度曲线进行三段拟合, 并建立了线性、非线性的表达式。

(3) 随着泡沫混凝土密度的增加, 其劈裂拉伸强度、断裂韧度和断裂能呈幂函数形式增加。

(4) 在 $t=25\text{mm}$ (满足平面应变条件, 径厚比 $t/D \leq 0.25$) 与 $t=50\text{mm}$ (不满足平面应变条件, $t/D \geq 0.25$) 的两种情况下, 试件厚度对其劈裂拉伸强度、断裂韧度、断裂能的影响较小。断裂能变化范围在 $294 \sim 1322\text{J/m}^2$ 之间。

(5) 提出考虑孔隙率的泡沫混凝土拉伸强度半经验公式, 通过与试验数据拟合, 获得本试验条件下泡沫混凝土拉伸强度半经验公式的修正系数。

参考文献:

- [1] 陈茜, 伍勇华. 现浇轻质泡沫混凝土在屋面工程中的应用[J]. 施工技术, 2011, 40(35): 79—80 (CHEN Qian, WU Yonghua. Application of Lightweight Foam Concrete in Roof Engineering [J]. Construction Technology, 2011, 40(35): 79—80 (in Chinese))
- [2] 水中和, 李跃. 泡沫混凝土整体浇筑墙体工程应用研究[J]. 新型建筑材料, 2011, 3: 25—29 (SHUI Zhonghe, LI Yue. Study on engineering application of foam concrete for integrated cast-in-place wall [J]. New Building Materials, 2011, 3: 25—29 (in Chinese))
- [3] 王武祥, 谢尧生. 泡沫混凝土在建筑物补偿地基中的应用[J]. 新型建筑材料, 1997, 7: 40—42 (WANG Wuxiang, XIE Yaosheng. Foam concrete application in compensating foundation base of building wall [J]. New Building Materials, 1997, 7: 40—42 (in Chinese))
- [4] 俞心刚, 李德军, 田学春. 煤矸石泡沫混凝土的研究[J]. 新型建筑材料, 2008, 1: 16—19 (YU Xingang, LI Dejun, TIAN Xuechun. Study on Coal Gangue Foam Concrete [J]. New Building Materials, 2008, 1: 16—19 (in Chinese))
- [5] Kunhanandan Nambiar E K, Ramamurthy K. Models relating mixture composition to the density and strength of foam concrete using response surface methodology [J]. Cement and Concrete Composites, 2006, 28(9): 752—760.
- [6] 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(6):388—396.
- [7] 张磊蕾, 王武祥. 聚合物对泡沫混凝土孔结构和性能的影响研究[J]. *混凝土与水泥制品*, 2011, 9(185):9—12 (ZHANG Leilei, WANG Wuxiang. Influences Research of Polymer on Pore Structure and Properties of Foam Concrete [J]. *China Concrete and Cement Products*, 2011, 9(185):9—12 (in Chinese))
- [8] 牛云辉, 卢忠远, 严云. 外加剂对泡沫混凝土性能的影响[J]. *混凝土与水泥制品*, 2011, 3(179):9—13 (NIU Yunhui, LU Zhongyuan, YAN Yun. Influences of Additives on Performances of foam concrete [J]. *China Concrete and Cement Products*, 2011, 3(179):9—13(in Chinese))
- [9] Jones M R, Mc Carthy A. Preliminary views on the potential of foamed concrete as a structural material [J]. *Magazine of Concrete Research*, 2005, 57(1):21—31.
- [10] 中华人民共和国行业标准编写组. GB/T50266—99 工程岩体试验方法标准[S]. 北京:中国计划出版社, 1999 (The People's Republic of China Industry Standards Compilation Group. GB/T50266—99 Standard for test methods of of engineering rock mass[S]. Beijing:China Planning Press, 1999 (in Chinese))
- [11] ASTM C496—86. Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Cylindrical Concrete Specimens[S]. 1986.
- [12] 王启智, 贾学明. 用平台巴西圆盘试样确定脆性岩石的弹性模量、拉伸强度和断裂韧度—第一部分:解析和数值结果[J]. *岩石力学与工程学报*, 2002, 21(9):1285—1289 (WANG Qizhi, JIA Xueming. Determination of elastic modulus, tensile strength and fracture toughness of brittle rocks by using flattened brazil disc specimen-part I: analytical and numerical results [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2002, 21(9):1285—1289 (in Chinese))
- [13] Clobes J K, Green D G. Validation of single-edge V-notch diametrical compression fracture toughness test for porous alumina[J]. *Journal of Materials Science*, 2002, 37:2427—2434.
- [14] Jonse P, Haggblad H A, Sommer K. Tensile strength and fracture energy of pressed metal powder by diametric compression test [J]. *Powder Technology*, 2007, 176:148—155.
- [15] 庞海燕, 李明, 温茂萍. 不同加载形式的PBX炸药巴西试验[J]. *含能材料*, 2012, 20(2):205—209 (PANG Haiyan, LI Ming, WEN Maoping. Different Loading Methods in Brazilian Test for PBX [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials*, 2012, 20(2):205—209(in Chinese))
- [16] 何满潮, 胡江春, 熊伟. 岩石抗拉强度特性的劈裂试验分析[J]. *矿业研究与开发*, 2005, 25(2):12—15 (HE Manchao, HU Jiangchun, XIONG Wei. Splitting Test and Analysis of Rock Tensile Strength [J]. *Mining Research and Development*, 2005, 25(2):12—15(in Chinese))
- [17] Schorn H, Berger T. Test method for determining process zone position and fracture energy of concrete [J]. *Exp. Tech.*, 1989, 29:29—33.
- [18] 张君, 刘骞. 基于三点弯曲实验的混凝土抗拉软化关系的求解方法[J]. *硅酸盐学报*, 2007, 35(3):268—276 (ZHANG Jun, LIU Qian. A method to solve tension softening relationship of concrete from the three-point bending test [J]. *Journal of the Chinese Ceramic Society*, 2007, 35(3):268—276(in Chinese))
- [19] Reinhardt H W, Shilang Xu. Crack extension resistance based on the cohesive force in concrete [J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 1999, 64:563—587.
- [20] 王启智, 吴礼舟. 用平台巴西圆盘试样确定脆性岩石的弹性模量、拉伸强度和断裂韧度—第二部分:试验结果[J]. *岩石力学与工程学报*, 2004, 23(2):199—204 (WANG Qizhi, WU Lizhou. Determination of elastic modulus, tensile strength and fracture toughness of brittle rocks by using Flattened Brazilian disk specimen-part II: experimental results[J]. *Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2004, 23(2):199—204 (in Chinese))
- [21] Boccaccini A R, Ondracek G, Mombello E. Determination of stress concentration factors in porous materials [J]. *Science Letters*, 1995, 14: 534—536.
- [22] 彭震, 杨天武, 李再久. 规则多孔铜的拉伸性能及其各向异性[J]. *中国有色金属学报*, 2011, 21(5):1046—1051 (PENG Zhen, YANG Tianwu, LI Zaijiu. Tensile properties and anisotropy of ordered porous copper [J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2011, 21(5):1046—1051 (in Chinese))

Analysis of Splitting Failure Mechanical Behavior of Lightweight Foam Concrete

LI Dan^{1,3}, SHANG Shuai-qí², TAO Jun-lin¹, WAN Ning¹

(1. School of Civil Engineering and Architecture, Southwest University of Science and Technology; 2. School of Environment and Resources, Southwest University of Science and Technology; 3. State Key Laboratory Cultivation Base for Nonmetal Composites and Functional Materials of Sichuan Province, Mianyang 621010, China)

Abstract: Using platform Brazilian disc loading and steel bars loading, Brazilian disk splitting experiment for foam concrete specimens with two different thicknesses ($t=25\text{mm}$ and $t=50\text{mm}$, respectively) and with different dry bulk densities ranging from 400kg/m^3 to 1000kg/m^3 were carried out to study the influence of the density and thickness on the crack width, splitting strength, fracture toughness and fracture energy. Results show that the splitting fracture can be divided into four characteristic stages: linear elastic stage, nonlinear elastic stage, crack initiation stage and instability stage. Along with the increase of dry bulk density, the splitting tensile strength, fracture toughness and fracture energy of foam concrete increase in the foam of power function, whereas the maximum crack width decreases gradually. Based on Reinhardt nonlinear softening curve, stresses softening experimental data of foam concrete with different densities was used for nonlinear curve fitting. A three-stage model relating stress and crack width is established based on control parameters such as tensile strength and fracture toughness. Based on test results, micromechanical prediction model for ideal porous materials is revised, and a semi-empirical formula relating porosity and tensile strength of foam concrete is obtained.

Keywords: foam concrete; crack propagation process; stress softening curve; fracture toughness; fracture energy