

水泥-聚苯乙烯轻质材料的准静态压缩力学行为

朱洪波, 李 晨, 吴梦雪, 吴凯凡

(同济大学 先进土木工程材料教育部重点实验室, 上海 201804)

摘要: 根据 Gibson-Ashby 模型中的多孔材料力学行为理论, 对水泥-聚苯乙烯轻质材料的准静态压缩应力-应变曲线进行了预测, 并通过试验对其进行验证, 分析了纤维、乳胶粉、压缩比及养护方式对应力-应变曲线的影响. 讨论了脆性抗压强度的变化规律, 根据 Gibson 模型的强度理论拟合、分析了抗压强度与密度的关系. 结果表明: 材料的压缩应力-应变曲线可根据 Gibson 理论中弹性多孔材料和弹脆性多孔材料的应力-应变曲线进行复合, 预测结果与实验结果基本一致; 纤维、乳胶粉、压缩比和养护方式对曲线的线弹性、平台、密实化三个阶段均有一定的影响, 也影响材料的脆性抗压强度; 纯水泥组、加纤维组和高压缩比组脆性抗压强度的拟合相关性较高, 而由于乳胶粉和蒸汽养护影响了孔壁的破坏强度, 所以该两组的拟合相关性较低.

关键词: 水泥; 聚苯乙烯; 压缩力学行为; Gibson-Ashby 模型; 强度拟合

中图分类号: TU528.2

文献标志码: A

Mechanical Performance of EPS-cement-based Lightweight Materials upon Quasi-static Compressive Tests

ZHU Hongbo, LI Chen, WU Mengxue, WU Kaifan

(Key Laboratory of Advanced Civil Engineering Materials of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 201804, China)

Abstract: The compressive stress-strain curve of EPS-cement-based lightweight materials was presumed based on the porous materials' Gibson-Ashby theory. The presumptions were compared with experimental results. The influences of fiber, latex, compress ratio and curing condition on the stress-strain curves were analyzed. The diversification of brittle compressive strength was investigated. The relationship between compressive strength and density was also fitted according to Gibson Model. The results figure out that the stress-strain curve can be treated to be formed from those of elastic porous materials and elastic-brittle porous

materials, and that the presumptions show good correspondence to the experimental results. Fibers, latex, compress ratio and curing condition will affect the Linear Elastic, Plateau and Densification of the stress-strain curves, as well as the brittle compressive strength. The compressive strength and density of Series C, F and H can be fitted well under Gibson Model. Series L and S cannot be fitted so exactly owing to the differential of the strength of pore wall to the model.

Key words: cement; expanded polystyrene; compressive mechanical performance; Gibson-Ashby model; fitting of compressive strength

水泥基材料是一种典型的脆性材料, 但可采用不同的方法提高其韧性, 使其成为一种抗冲击材料^[1]. 提高水泥基材料的韧性通常有两种途径: 一般采用纤维增韧提高材料的裂后强度, 并通过纤维的断裂与拔出吸收冲击能量^[2-3]; 也可以将水泥基材料与高分子材料复合, 并通过材料的韧性破坏吸收冲击能量^[4-5]. 对于第二种方法, 最常用的材料即为膨胀聚苯乙烯颗粒.

聚苯乙烯混凝土的抗冲击性能通常通过其在动态压缩试验或准静态压缩试验中的能量吸收进行表征. 例如, 胡泽斌等^[5]通过动态压缩试验研究了冲击荷载下混凝土的吸能性能, 得出其与聚苯颗粒掺量的关系; 丁国博等^[6]分析了该条件下混凝土的压缩力学行为与养护龄期的关系; BABU 等^[7]研究了含粉煤灰的聚苯乙烯混凝土的准静态压缩力学行为, 得出了聚苯颗粒掺量对混凝土韧性性能的影响规律; XU Y 等^[8]则研究了聚苯乙烯混凝土的压缩应力-应变曲线, 并提出聚苯颗粒含量对抗压强度影响显著.

本文采用自制测试装置, 分析了一种水泥-聚苯乙烯轻质材料作为地下隧道结构保护材料的抗冲击

收稿日期: 2014-10-27

基金项目: 国家自然科学基金(51302189)

第一作者: 朱洪波(1965—), 男, 副教授, 工学博士, 主要研究方向为水泥基建筑材料. E-mail: 08013@tongji.edu.cn

通讯作者: 李 晨(1988—), 男, 博士生, 主要研究方向为水泥基建筑材料. E-mail: lichen_0712@163.com

性能^[9-10]. 水泥-聚苯乙烯轻质材料可以看作多孔的水泥基体与聚苯乙烯颗粒胶结在一起形成的复合材料,这两种材料都是多孔性材料. 多孔性材料力学行为符合 Gibson-Ashby 理论^[11-12],这一理论也广泛应用于泡沫金属^[13]、多孔陶瓷^[14]、泡沫混凝土^[15]、膨胀聚苯乙烯^[16]等材料的研究中. 本文以 Gibson 理论为基础,对水泥-聚苯乙烯轻质材料的准静态压缩力学行为进行了理论预测,通过实验对结果进行了验证,并对材料的脆性抗压强度进行了拟合,同时讨论了纤维、乳胶粉、压缩比、养护方式等材料性能的影响.

1 实验

1.1 原材料与试块成型

水泥,江南小野田水泥有限公司 P·II 52.5 硅酸盐水泥. 聚苯颗粒,上海雷恩节能建材有限公司生产,粒径 1~5 mm. 聚丙烯纤维,市售,长度 8 mm,直径 20~50 μm . 可再分散乳胶粉,德国瓦克(上海)公司提供,型号为 5010N.

采用半干料压缩工艺成型 $\varnothing 15.6 \text{ cm} \times 6 \text{ cm}$ 圆柱体试块,压缩比(松散料与压缩成型后的试件高度比)分别为 0.75 和 0.60,成型 1 d 后分别采用标准养护 28 d 和蒸汽养护 8 h 两种养护方式.

试样配合比及成型方式见表 1,按照纯水泥(C),加纤维(F),加乳胶粉(L),高压压缩比(H),蒸汽养护(S)分为 5 组,各组的水泥掺量分别为 200,233,267,300,333,367 和 400 g,对应水灰比分别为 0.35,0.35,0.35,0.34,0.33,0.32 和 0.31.(高水泥掺量下降低水灰比以保证拌合料为干硬性.)

表 1 配合比与成型方式

Tab.1 Mix proportion and preparation methodology

组别	配合比					压缩比/%	养护方式
	水泥/g	水灰比/%	聚苯颗粒/L	纤维/g	乳胶粉/g		
C	200~400	31~35	1	0	0	75	标准养护
F				2.67	0	75	标准养护
L				0	8	75	标准养护
H				0	0	60	标准养护
S				0	0	75	蒸汽养护

1.2 测试方法

养护至龄期的试样在 60 $^{\circ}\text{C}$ 烘箱中干燥 24 h 后测量质量,并除以体积得到干密度,用于强度拟合. 准静态压缩试验采用龙盛电子万能试验机进行,加载速度为 $2.0 \text{ kN} \cdot \text{s}^{-1}$,由电脑自动采集压力-位移曲线,换算为应力-应变曲线,以应力-应变曲线中脆性破坏时的应力值作为材料的脆性抗压强度. 每个配合比成型 3 个试样进行测试,以三条应力-应变曲线中较为居中的作为最终结果,以三条曲线中脆性抗压强度的平均值作为该配比的脆性抗压强度.

2 实验结果与分析

2.1 压缩曲线的理论预测

根据 Gibson 理论,多孔材料的压缩应力-应变曲线一般分为三个阶段:线弹性、平台与密实化. 根据不同材料的破坏机理及应力-应变曲线表现,一般将材料分为三类:弹性多孔材料、弹塑性多孔材料及弹脆性多孔材料,三种材料的应力-应变曲线见图 1.

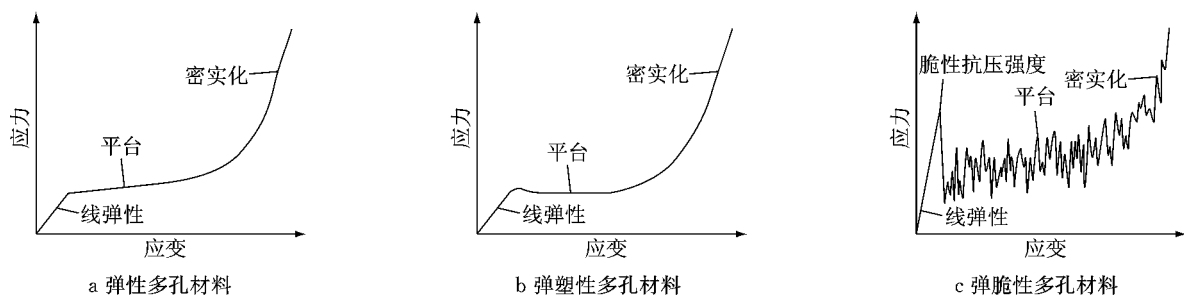


图 1 多孔材料的压缩应力-应变曲线

Fig.1 Stress-strain curves of porous materials

聚苯颗粒是一种典型的弹性多孔材料,其压缩应力-应变曲线如图 1a. 在压缩过程中,孔壁发生弯曲,形成线弹性. 这一阶段,聚苯颗粒的弹性模量约

为 4~5 MPa ^[17]. 当压缩应力达到材料的屈服强度时,孔壁发生弹性屈服,应力开始保持恒定,产生平台. 当孔壁完全接触时,材料本身发生压缩,应力迅

速升高,进入密实化阶段。

多孔性的水泥基体则是一种弹脆性多孔材料,其典型应力-应变曲线如图 1c. 压缩时,孔壁弯曲产生线弹性,此时,材料的弹性模量约为 1 000 MPa(对于体积密度为 $500 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 的泡沫混凝土)^[3,18]. 当压缩应力达到孔壁强度极限,即材料的脆性抗压强度(见图 1c),孔壁发生塌陷. 此后,在脆性压损过程中,孔壁破碎并发生位移,并在某些区域聚集或搭接,使平台阶段应力出现许多峰值,但这时的强度远低于脆性抗压强度. 当空穴完全塌陷,孔壁完全接触时,应力上升,进入密实化阶段. 在脆性压损过程中,孔壁破碎形成的碎片可能落于材料主体结构外,因此密实化阶段应力上升有限. 一般对于水泥基多孔材料,由于平台阶段应力远低于脆性抗压强度,因此在大多数研究中,应力-应变曲线的测量只包含线弹性。

根据以上分析,聚苯颗粒与多孔性水泥基体的压缩应力-应变曲线如图 2 所示:在线弹性阶段,聚苯颗粒的弹性模量和强度远低于多孔性水泥基体;平台阶段,聚苯颗粒应力基本不变,水泥基体应力上下波动,但低于脆性抗压强度;密实化阶段,聚苯颗粒的应力迅速上升,多孔性水泥基体应力上升缓慢. 当两种材料复合在一起时,水泥浆体包裹于聚苯颗粒表面,并形成多孔性基体,材料的压缩应力-应变曲线可能发生如下变化:线弹性阶段由于水泥基体包裹聚苯颗粒形成的孔结构比普通泡沫混凝土差,其强度与弹性模量介于两条曲线之间;平台阶段由于水泥基体粘附于聚苯颗粒外不易发生位移,始终保持相互搭接,强度几乎保持不变,同时搭接作用使水泥基体在破坏后可以继续支撑材料强度发展,因此该段强度高于多孔性水泥基体;密实化阶段水泥基体不易发生散落,应力升高较快。

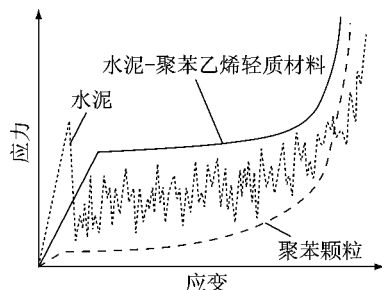


图 2 水泥-聚苯乙烯轻质材料应力-应变曲线的理论预测
Fig. 2 Theological presumption of stress-strain curves

2.2 压缩曲线的实验验证

通过准静态压缩试验,得到各组在水泥掺量 200, 300 和 400 g 时的应力-应变曲线如图 3. 可以看到,各组的应力-应变曲线基本与上文的分析相一致:线弹性阶段弹性模量和脆性抗压强度均低于普

通泡沫混凝土^[3,18],平台阶段应力保持恒定,密实化阶段应力随应变迅速上升. 在各组配比下,随着水泥掺量提高,线弹性阶段材料的抗压强度与弹性模量提高,平台阶段缩短,密实化提前且应力上升更加迅速。

加入纤维后(图 3b),应力-应变曲线在线弹性与平台之间变得平滑,表明此时材料由脆性破坏转变为具有塑性破坏的特点(参照图 1b). 事实上,水泥基体的强度远高于聚苯颗粒,在线弹性阶段末水泥基体发生脆性破坏,这一强度即认为是水泥-聚苯乙烯轻质材料的脆性抗压强度. 而在压缩过程中,纤维可以进一步阻止水泥基体破坏后碎片的位移,使应力在一定程度上得以继续升高,因此线弹性末期破坏形式具有塑性破坏的特点. 同时,纤维可以阻止材料在压缩破坏过程中的横向膨胀,使材料更易被压实,因此密实化阶段强度上升比纯水泥组更快. 这一结果在高水泥掺量下更加明显,因为高水泥掺量下纤维在水泥基体中锚固的更牢固。

当加入乳胶粉后(图 3c),应力-应变曲线的线弹性阶段同样具有弹塑性多孔材料的特点(参照图 1b). 研究表明,聚合物会在水泥基体内形成网状膜层^[19-20],在破坏过程中聚合物分子间发生滑移,使材料具有一定的塑性破坏特征. 同时,乳胶粉使水泥基体与聚苯颗粒之间的界面得到增强^[21],使水泥基体破坏后很难发生位移或散落,因此密实化阶段应力上升比纯水泥试样更加显著。

采用 0.60 的压缩比(图 3d),制备过程中聚苯颗粒被压缩的更加密实,单位体积水泥量更多,材料的应力-应变曲线在各阶段均高于压缩比 0.75 的情况。

采用蒸汽养护,材料的应力-应变曲线同样具有弹塑性多孔材料的特点(图 1b). 在蒸汽养护的高温作用下,材料表面的聚苯颗粒发生破裂^[22],降低了材料表面的强度. 当试样受到压缩时,表面层在较低应力下首先发生破坏,破坏过程由外及内逐步发生,破坏应力也逐步增大. 严格意义上,此时材料仍发生脆性破坏,但破坏过程使应力-应变曲线具有塑性破坏的特点. 随着水泥掺量增加,材料表面聚苯颗粒的破坏对表面强度影响减弱,因此高水泥掺量下应力-应变曲线中塑性破坏的特点不明显。

2.3 脆性抗压强度

一般认为,由于水泥基体的抗压强度远高于聚苯颗粒,其孔壁弯曲提供的应力也大大高于聚苯颗粒,因此材料的脆性抗压强度更大程度上来源于水泥基体的孔壁弯曲. 水泥-聚苯乙烯轻质材料的脆性抗压强度如图 4. 显然,随着水泥掺量增大,各组的抗压强度均明显提高。

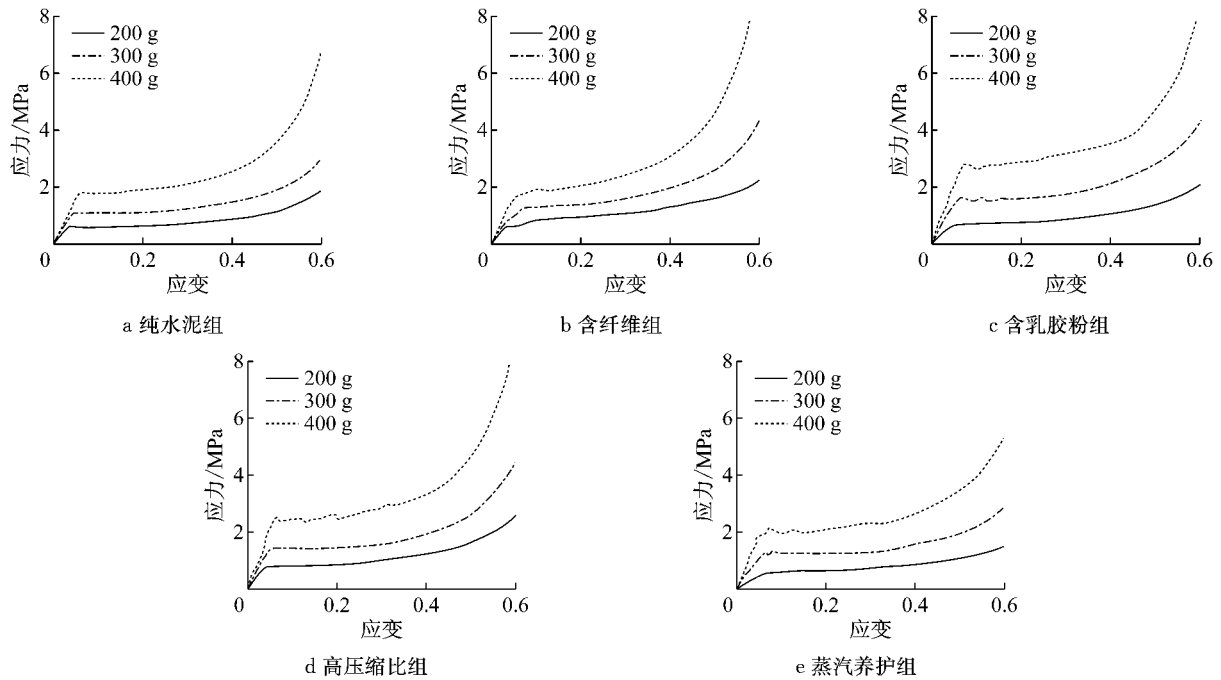


图 3 材料的压缩应力-应变曲线实验结果

Fig.3 Experimental results of stress-strain curves

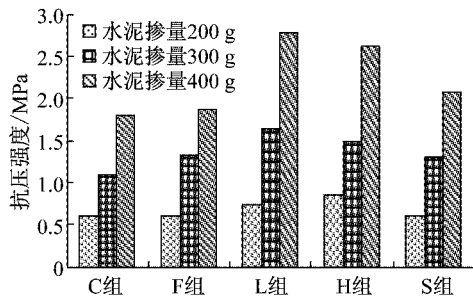


图 4 脆性抗压强度

Fig.4 Brittle compressive strength

加入纤维后,材料的抗压强度略微提高.一般认为,当材料达到抗压强度极限时,材料的破坏首先发生于最薄弱的或存在缺陷的位置.如 2.2 所述,纤维能够阻止发生破坏的水泥基体碎片产生位移或散落,碎片直接形成搭接,使应力继续升高,材料的抗压强度提高,但这种作用较微弱.加入乳胶粉能够使水泥基体与聚苯颗粒的粘结界面得到增强^[21],使多孔性水泥基体的孔壁不易发生弯曲,进而有效提高材料的强度.增大压缩比一方面相当于提高了单位体积的水泥掺量,另一方面使聚苯颗粒更好地搭接,减少了材料内部由于成型不均匀造成的宏观孔隙,明显提高抗压强度.采用蒸汽养护则对高水泥掺量下抗压强度有提高作用.一般认为,蒸汽养护会促使延迟钙矾石(delayed ettringite formation, DEF)的生成^[23],形成膨胀内应力,降低混凝土强度.然而水泥-聚苯乙烯轻质材料是一种多孔材料,少量水泥浆体包裹于聚苯颗粒外并相互搭接.蒸汽养护产生的

膨胀可能使材料的孔隙得到一定的填充,增加材料的密实度,减少缺陷,进而提高抗压强度.然而,2.2 节也提到,蒸汽养护会使材料表面的强度降低,这一作用在低水泥掺量下更加明显,因此低水泥掺量下蒸汽养护并未提高材料的抗压强度.

2.4 抗压强度拟合

对于普通聚苯乙烯混凝土,水泥基体的强度远高于聚苯颗粒,多数研究直接对水泥基体的强度进行拟合分析得到聚苯乙烯混凝土的强度拟合^[15,24].对于水泥-聚苯乙烯轻质材料,同样认为其脆性抗压强度主要来源于多孔性水泥基体,因此采用 Gibson 模型中的多孔材料强度理论^[11-12]拟合其强度.根据 Gibson 理论,具有开口孔的多孔材料强度与容重存在以下关系,即

$$\frac{\sigma_{\sigma}^*}{\sigma_{fs}^*} = C_1 \left(\frac{\rho^*}{\rho_s} \right)^{3/2}$$

式中: σ_{σ}^* 为脆性抗压强度; σ_{fs}^* 为孔壁断裂强度; ρ^* 为材料的体积密度; ρ_s 为材料的真密度,取硬化水泥浆体的真密度 $1960 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$; C_1 为比例系数,对于弹脆性多孔材料一般取 0.2.用 $V_x = \rho^* / \rho_s$ 表示材料的相对密度,将上述关系变为

$$\sigma_{\sigma}^* = 0.2 \sigma_{fs}^* (V_x)^{3/2}$$

用 ORIGIN 软件对各组试样在 7 种水泥掺量下的强度进行拟合,得到的拟合曲线如图 5,拟合数据结果见表 2.

如表 2 中给出的图 5 中曲线拟合的相关系数和标准差等参数看出,纯水泥组、含纤维组与高压压缩比

表 2 脆性抗压强度拟合数据结果

Tab.2 Statistical results of fitting between σ_{cr}^* and ρ^*

组别	孔壁强度/ MPa	标准差/ MPa	相关系数 R^2	残差平方和
C	44.2	1.07	0.972	0.037 9
F	44.3	1.26	0.962	0.055 5
L	60.4	3.02	0.912	0.329 6
H	45.2	1.20	0.960	0.083 9
S	55.3	1.57	0.961	0.073 1

组的拟合相关系数较高,标准差与残差平方和都较小,而且数据点均匀分布在拟合曲线两侧,表明这三组的脆性抗压强度与 Gibson 模型符合度较高.同时,三组拟合结果得到的孔壁断裂强度相近.孔壁断裂强度指的是孔壁材料在受压过程中弯曲破坏的强度,因为水泥-聚苯乙烯轻质材料中水泥与聚苯颗粒之间存在粘结作用,所以在一定程度上改变了孔壁断裂强度的变化规律.但由于聚苯颗粒为憎水性材料,其与水泥基体之间的界面键合作用较弱^[21,25],其

对孔壁断裂强度的影响有限,因此其脆性抗压强度符合 Gibson 模型.加入纤维或增大压缩比,并不影响水泥与聚苯颗粒之间的相互作用,因此也不改变孔壁强度,这与拟合结果一致.表 2 显示,三组的孔壁强度在 44.2~45.2 MPa 之间.

对含乳胶粉组拟合的相关系数则较低,标准差和残差平方和也较大.由于聚合物能够显著提高聚苯颗粒与水泥基体之间的键合作用力^[21],孔壁的弯曲变形受到聚苯颗粒的限制.同时,乳胶粉可以大幅度提高水泥基材料的弯曲强度.在这两种作用下,孔壁断裂强度提高,这也与拟合结果一致,表 2 显示其孔壁破坏强度提高到 60.4 MPa.而由拟合曲线(图 5c)看到,当相对密度较低时,数据点分布在曲线下方,密度较高时则相反.这是因为高密度下水泥基体对聚苯颗粒包裹性更好,乳胶粉的胶结作用发挥更明显,孔壁强度更高.

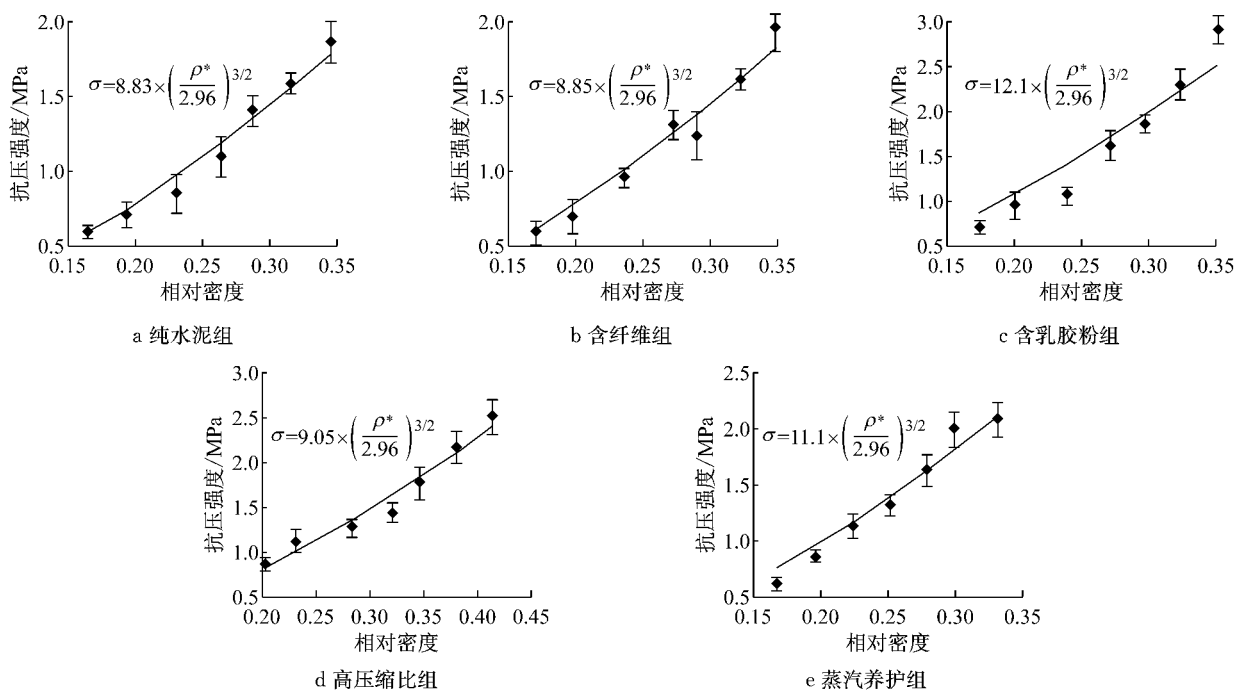


图 5 脆性抗压强度拟合曲线

Fig.5 Fitting curves of brittle compressive strength

对蒸汽养护组拟合的相关系数较高,标准差和残差平方和较小.但可以看到,在较低的相对密度下,数据点明显分布在曲线下方.上文提到,蒸汽养护使聚苯颗粒发生破裂,这一结果在低容重下更加明显,这也导致了低容重下孔壁破坏强度较低,拟合结果产生偏差.同时,由于延迟钙矾石的生成,水泥基体强度提高,因此蒸汽养护组孔壁强度提高,表 2 显示其可达 55.3 MPa.

3 结论

(1) 根据 Gibson 模型中弹性、弹脆性多孔材料的压缩应力-应变曲线,预测了水泥-聚苯乙烯轻质材料的准静态压缩应力-应变曲线,该结果与实验结果具有较好的一致性.

(2) 提高水泥掺量,材料应力-应变曲线中线弹

性阶段弹性模量提高,平台段缩短,密实化阶段强度提高较快.加入纤维、乳胶粉或采用蒸汽养护,线弹性末趋于塑性破坏.加入纤维、乳胶粉或增大压缩比,平台缩短,密实化阶段强度提高较快.

(3) 加入纤维,脆性抗压强度略微提高;加入乳胶粉、增大压缩比或在高水泥掺量下采用蒸汽养护,脆性抗压强度均有较大提高.

(4) 采用 Gibson 模型拟合抗压强度与密度的关系,纯水泥组、加纤维组和高压压缩比组的拟合相关性较高,加乳胶粉组和蒸汽养护组由于影响了孔壁破坏强度,使拟合相关性较低.

参考文献:

- [1] Banthia N P. Impact resistance of concrete[D]. Vancouver: University of British Columbia, 1987.
- [2] Kwan W H, Ramli M, Cheah C B. Flexural strength and impact resistance study of fibre reinforced concrete in simulated aggressive environment [J]. Construction and Building Materials, 2014, 63(30): 62.
- [3] Wang Z L, Liu Y S, Shen R F. Stress-strain relationship of high-strength fiber concrete in compression[J]. Construction and Building Materials, 2008, 22(5): 811.
- [4] Antil Y. An experimental study on rubberized concrete[J]. International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering, 2014, 4(2): 309.
- [5] 胡泽斌,许金余,彭高丰,等. 冲击荷载作用下聚苯乙烯混凝土的吸能特性[J]. 硅酸盐学报, 2010, 38(7): 1173.
HU Zebin, XU Jinyu, PENG Gaofeng, et al. Energy-absorption property of expanded polystyrene concrete under impact[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2010, 38(7): 1173.
- [6] 丁国博,许金余,胡泽斌,等. 冲击荷载作用下早强 EPS 混凝土的力学性能[J]. 振动与冲击, 2011, 30(3): 269.
DING Guobo, XU Jinyu, HU Zebin, et al. Mechanical properties of early-strengthened polystyrene concrete under impact load[J]. Journal of Vibration and Shock, 2011, 30(3): 269.
- [7] BABU D S, BABU K G, WEE T H. Properties of lightweight expanded polystyrene aggregate concretes containing fly ash [J]. Cement and Concrete Research, 2005, 35(6): 1218.
- [8] XU Y, JIANG L, XU J, et al. Mechanical properties of expanded polystyrene lightweight aggregate concrete and brick [J]. Construction and Building Materials, 2012, 27(1): 32.
- [9] Zhu H B, Li C, Wang P M, et al. Impact resistance of a novel expanded polystyrene cement-based material[J]. Journal of Wuhan University of Technology: Material Science Edition, 2014, 29(2): 284.
- [10] 朱洪波,李晨,闫美珠,等. 水泥-聚苯乙烯轻质材料的制备及抗冲击性[J]. 同济大学学报:自然科学版, 2014, 42(5): 745.
ZHU Hongbo, LI Chen, YAN Meizhu, et al. Preparing and impact resistance properties of lightweight material with cement and expanded polystyrene [J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2014, 42(5): 745.
- [11] 吉布森,阿什比. 多孔固体结构与性能[M]. 刘培生译. 北京: 清华大学出版社, 2003.
- GIBSON L J, ASHBY M F. Cellular solids, structures and properties [M]. Translated by LIU Peisheng. Beijing: Tsinghua University Press, 2003.
- [12] Gibson L J, Ashby M F. The mechanics of three-dimensional cellular materials [J]. Proceedings of the Royal Society of London, Series A, Mathematical and Physical Sciences, 1982, 382(1782): 43.
- [13] Cheng X Y, Li S J, Murr L E, et al. Compression deformation behavior of Ti-6Al-4V alloy with cellular structures fabricated by electron beam melting [J]. Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials, 2012, 16(12): 153.
- [14] Zhang L F, Ferreira J M F, Olhero S, et al. Modeling the mechanical properties of optimally processed cordierite-mullite- alumina ceramic foams by X-ray computed tomography and finite element analysis[J]. Acta Materialia, 2012, 60(10): 4235.
- [15] Bouvard D, Chaix J M, Dendievel R, et al. Characterization and simulation of microstructure and properties of EPS lightweight concrete [J]. Cement and Concrete Research, 2007, 37(12): 1666.
- [16] Ossa A, Romo M P. Micro-and macro-mechanical study of compressive behavior of expanded polystyrene geofoam [J]. Geosynthetics International, 2009, 16(5): 327.
- [17] Ossa A, Romo M P. Confining stress influence on EPS water absorption capability [J]. Geotextiles and Geomembranes, 2012, 35(12): 132.
- [18] 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.
- [19] Wang R, Wang P M, Li X G. Physical and mechanical properties of styrene-butadiene rubber emulsion modified cement mortars[J]. Cement and Concrete Research, 2005, 35(5): 900.
- [20] 钟世云,王培铭. 聚合物改性砂浆和混凝土的微观形貌[J]. 建筑材料学报, 2004, 7(2): 168.
ZHONG Shiyun, WANG Peiming. Study of morphology of polymer-modified mortar and concrete[J]. Journal of Building Materials, 2004, 7(2): 168.
- [21] Chen B, Liu J. Mechanical properties of polymer-modified concretes containing expanded polystyrene beads [J]. Construction and Building Materials, 2007, 21(1): 7.
- [22] 朱洪波,李晨,王文轩,等. 胶粉聚苯颗粒水泥基材料的力学性能与吸声性研究[J]. 新型建筑材料, 2011(12): 80.
ZHU Hongbo, LI Chen, WANG Wenxuan, et al. Research on sound absorbability and mechanics performance of adhesive polystyrene materials[J]. New Building Materials, 2011(12): 80.
- [23] Diamond S. Delayed ettringite formation—processes and problems[J]. Cement and Concrete Composites, 1996, 18: 205.
- [24] Miled K, Roy R L, Sab K, et al. Compressive behavior of an idealized EPS lightweight concrete size effects and failure mode [J]. Mechanics of Materials, 2004, 34(11): 1031.
- [25] 彭家惠,陈明凤,张建新. EPS 表面改性及其保温砂浆的耐候性与抗裂性[J]. 重庆大学学报:自然科学版, 2002, 25(1): 24.
PENG Jiahui, CHEN Mingfeng, ZHANG Jianxin. Investigation on EPS surface modification and EPS thermal insulation mortar's weather-resisting and crack-resisting[J]. Journal of Chongqing University: Natural Science Edition, 2002, 25(1): 24.