

纤维增强磷石膏轴心受拉应力-应变曲线研究*

Study on Axial Tensile Stress-strain Curve of Fiber-reinforced Phosphogypsum

邹庆余¹, 周理^{1,3}, 胡松², 徐一峰¹, 尹超¹

- (1. 贵州大学建筑与城市规划学院, 贵州 贵阳 550025;
2. 铜仁学院农林工程与规划学院, 贵州 铜仁 554300;
3. 贵州省山地人居智慧与绿色建造工程研究中心, 贵州 贵阳 550025)

摘要: 为研究纤维增强磷石膏的受拉应力-应变曲线, 将磷石膏粉、水泥、纤维的质量比设定为 90%、10%及 0.2%, 以水灰比 (0.7、0.8、0.9) 为变化参数, 制作了 12 个棱柱体试块。通过轴向单调拉伸试验, 分析了纤维增强磷石膏的受拉应力-应变曲线、抗拉强度、峰值应变等力学指标。对归一化曲线进行拟合, 给出了应力-应变曲线的数学表达式。研究表明, 受拉应力-应变曲线呈非线性变化, 且水灰比越低, 曲线越陡峭; 当水灰比从 0.7 增加至 0.8 及 0.9 时, 轴心抗拉强度分别降低了 11.4% 及 34.3%; 峰值拉应变受水灰比影响较小, 应变测量值位于 31.5 $\mu\epsilon$ ~54.8 $\mu\epsilon$ 区间。

关键词: 纤维; 磷石膏; 轴心受拉; 应力-应变; 试验研究

中图分类号: TU522 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-8249 (2023) 04-0053-06

DOI:10.19860/j.cnki.issn1005-8249.2023.04.009

ZOU Qingyu¹, ZHOU Li^{1,3}, HU Song², XU Yifeng¹, YIN Chao¹

- (1. College of Architecture and Urban planning, Guizhou University, Guiyang 550025, China;
2. College of Agroforestry Engineering and Planing, Tongren University, Tongren 554300, China;
3. Intelligent and Green Mountain Residence Engineering Research Center of Guizhou Province, Guiyang 550025, China)

Abstract: To study the tensile stress-strain curve of fiber-reinforced phosphogypsum, the mass ratio of phosphogypsum powder, cement and fiber was set at 90%, 10%, and 0.2%, and 12 prism test samples were fabricated with the water-cement ratio (0.7, 0.8, 0.9) as the change parameters. Through the axial monotonic tensile test, the tensile stress-strain curve, tensile strength, peak strain, and other mechanical indexes of fiber-reinforced phosphogypsum were analyzed. The normalized curves were fitted, and the mathematical expression of the stress-strain curve was given. The research shows that the tensile stress-strain curves are nonlinear, and the lower the water-cement ratio is, the steeper the curve is; when the water-cement ratio increases from 0.7 to 0.8 and 0.9, the axial tensile strength decreases by 11.4% and 34.3% respectively; the peak tensile strain is less affected by the water-cement ratio, and the measured strain values are in the range of 31.5 $\mu\epsilon$ ~54.8 $\mu\epsilon$.

Keywords: fiber; phosphogypsum; axial tension; stress-strain; experimental investigation

* 基金项目: 国家自然科学基金资助 (项目批准号: 52068007), 贵州省基础研究计划 (黔科合基础 [2020] 1Y417), 贵州大学引进人才科研基金资助项目 [2019 (08) 号]。

作者简介: 邹庆余 (1996—), 男, 硕士研究生。主要从事绿色建筑材料及其应用研究。

通信作者: 周理 (1983—), 男, 博士, 副教授。主要从事绿色建筑材料及其应用研究。

收稿日期: 2022-6-21

材料科学

0 引言

磷石膏是磷化工业副产品。目前,磷石膏排放主要集中在巴西、印度、中国等发展中国家,全球每年的磷石膏排放量大约为 2~3 亿吨^[1]。然而,应该注意到磷石膏的资源化利用率较低,大量磷石膏处于堆存状态,这不仅占用了大量的土地资源,还会对空气、水体、土壤等造成污染。由此可见,如何有效地提升磷石膏的综合利用率将是磷化工业可持续发展的关键。

近年来,国内外学者提出将磷石膏用作土壤改良剂^[2]、采空区回填材料^[3]、路基材料^[4]及制备建筑制品等。目前,利用磷石膏所制备的建筑制品主要有砌块砖^[5]、自流平砂浆^[6]、保温材料^[7]、隔音吸音材料^[8]、内置模块^[9]、墙体^[10]等。由此可见,在建筑工程中使用磷石膏是实现材料综合利用的有效途径之一。应该注意到:磷石膏在建筑工程中应用的关键在于材料的力学性能。为此,国内外学者对磷石膏的力学性能进行了广泛地研究,主要涉及磷石膏的抗压强度^[11-12]、抗折强度^[13]、弹性模量及泊松比^[14]、受压应力-应变曲线^[15]等。在建筑工程中,材料的受拉应力-应变曲线反映了拉力与变形之间的基本关系,对结构或构件的弹塑性全过程分析及破坏机理研究具有重要意义^[16]。迄今为止,有关磷石膏受拉力学行为的研究鲜有报道。对磷石膏受拉力学行为开展研究,可更好地促进磷石膏在工程中的应用与推广。

本研究在磷石膏掺料中加入一定量的纤维用以提升材料的抗拉能力。以水灰比为变化参数设计制作了 12 个棱柱体受拉试块。通过轴心拉伸试验,分析了试块的破坏特征、应力-应变曲线、承载力及峰值应变,并采用归一化方法拟合了磷石膏的受拉应力-应变曲线,研究成果可为工程应用提供参考。

1 试验

1.1 试块设计

试块制作所采用的原材料分别为磷石膏、水

泥、纤维和水。其中,磷石膏采用贵州磷化集团生产的袋装磷石膏粉, $\text{CaSO}_4 \cdot 0.5\text{H}_2\text{O}$ 含量为 70.2%; 水泥采用 P.O 32.5 级普通硅酸盐水泥; 纤维采用聚丙烯纤维,纤维直径为 $25\ \mu\text{m}$, 长度为 10 mm, 产品说明中显示的纤维抗拉强度为 450 MPa。水灰比是影响磷石膏制备的关键因素之一。在本研究中,依据水灰比的变化共设计了 3 种类型的配合比,每种配合比各制作 4 个试块,试块尺寸均为 $100\ \text{mm} \times 100\ \text{mm} \times 300\ \text{mm}$ 。各试块的详细信息如表 1 所示。试块制作时,先将称量好的水倒入搅拌桶,然后将纤维均匀地撒入水中,搅拌约 1 分钟,确保纤维分散。随后将固体原料倒入搅拌桶,搅拌约 2 分钟。然后将搅拌好的浆体倒入模具,制作磷石膏试块。

表 1 试块基本信息
Table 1 Basic information of samples

试块类型	磷石膏粉/%	水泥/%	纤维/%	水灰比
S-0.7	90	10	0.2	0.7
S-0.8	90	10	0.2	0.8
S-0.9	90	10	0.2	0.9

1.2 试验装置

试块浇筑完毕后,在室内环境中养护。根据(GB/T50081)《混凝土物理力学性能试验方法标准》^[17]所建议的方法对试块进行轴向拉伸试验。正式试验前,将试块烘干至恒重。在各试块侧面中部沿纵向粘贴应变片,用于测量试块在拉伸过程中的纵向应变。随后在试块两端安装专用夹具,确保夹具与试块中心对齐。待夹具安装完毕后,将试件连同两端夹具与万能试验机铰接夹具紧固连接。随后,启动试验机,开始拉伸试验。图 1 显示了试验装置及连接细节。

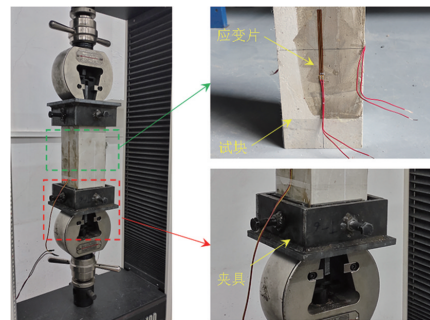


图 1 试验装置
Fig. 1 Test setup

2 破坏现象

各试块在拉伸过程中的破坏现象基本一致。在试块加载前期阶段，试块四周未见明显的开裂现象。当加载临近破坏荷载时，在试件的侧面出现横向裂缝，且裂缝开展速度很快，迅速贯通整个截面，试件裂开成两段。从各试块的破坏特征来看，贯通的横向裂缝基本位于试块端部，在距离试块端部约 100 mm 处。而试块中部未发现开裂现象，如图 2 所示。发生这种破坏的原因可能为：磷石膏试块端部采用专用夹具夹持，夹具在夹持过程中产生了一定的侧围力，进而对试块形成一定的剪切效应。试块拉伸时，在轴向拉力及剪切效应的共同作用下，靠近专用夹具处的截面，其应力率先达到材料拉伸强度，从而形成横向贯通裂缝，试块随即发生破坏。

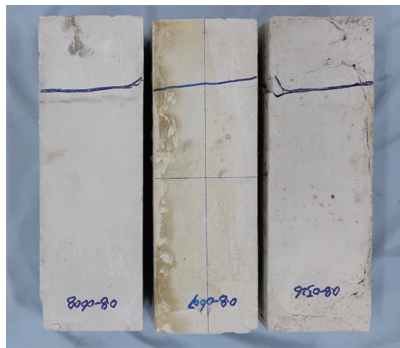


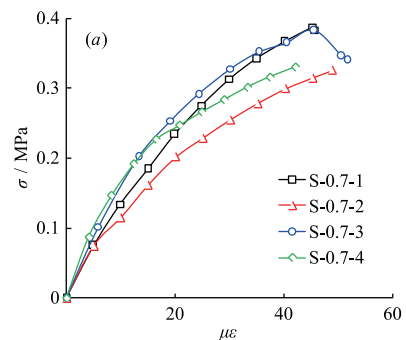
图 2 试块破坏特征
Fig. 2 Failure characteristics of samples

3 数据分析

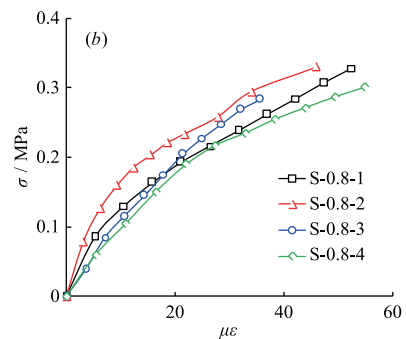
3.1 受拉应力-应变曲线

各试块在拉伸过程中的应力根据试验机荷载传感器所测量的力值 N 与试块截面面积 A 按公式 $\sigma = N/A$ 进行计算。应变由粘贴在试块四周的应变片进行测量，取所测应变的平均值作为试块的名义应变。各试块的轴心受拉应力-应变曲线如图 3 所示。由图可知：(1) 各试块在轴向受拉的过程中，均测出了应力-应变曲线的上升段。由于试验机刚度及加载条件所限，未能测出试块应力-应变曲线的下降段；(2) 由于试块制备及夹具安装存在一定的误差，同一类配合比的试块所测出的应

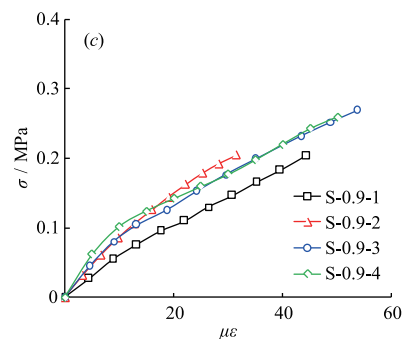
力-应变曲线虽具有相似的变化规律，但也呈现出一定的离散性；(3) 各试块的应力-应变曲线均呈非线性变化，在加载初期，曲线具有线性特征。随着加载的继续，特别是在加载后期，曲线的非线性特征越发明显；(4) 水灰比对磷石膏试块的受拉应力-应变曲线影响较大。当水灰比从 0.7 逐步增加至 0.9 时，曲线陡峭程度逐渐降低。其原因在于：当水灰比增高时，试块的孔隙率也会提高，进而导致有效截面面积降低，故试块抵御拉力的能力下降。



(a) S-0.7 试块



(b) S-0.8 试块



(c) S-0.9 试块

图 3 轴心受拉应力-应变曲线
Fig. 3 Axial tensile stress-strain curves

材料科学

3.2 抗拉强度

各试块的极限抗拉强度如图 4 所示, 图中 1st、2nd、3rd 及 4th 分别表示同一配合比中的第 1、2、3 及第 4 个棱柱体试块的轴心抗拉强度。从图中可以看出, 试块的极限抗拉强度随水灰比的增加而降低, 其原因在于: 当试块水灰比增加时, 试块的孔隙率将有所提升, 断面骨料连接的有效面积随之降低, 进而使得试块的抗拉强度有所降低。当试块的水灰比从 0.7 增加至 0.8 及 0.9 时, 平均抗压强度从 0.35 MPa 降低至 0.31 MPa 及 0.23 MPa, 分别降低了 11.4% 及 34.3%。可见, 水灰比对磷石膏轴心抗拉强度影响显著。

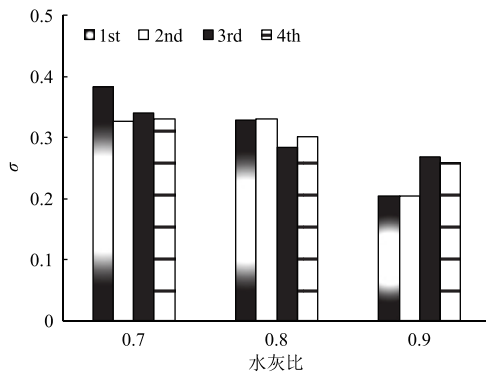


图 4 抗拉强度
Fig. 4 Tensile strength of samples

3.3 峰值拉应变

各试块的峰值拉应变如图 5 所示, 图中 1st、2nd、3rd 及 4th 分别表示同一配合比中的第 1、2、3 及第 4 个棱柱体试块的峰值拉应变。由图可见, 磷石膏的峰值拉应变普遍偏小, 水灰比为 0.7 的试块其峰值拉应变位于 $42.2 \mu\epsilon \sim 51.6 \mu\epsilon$ 区间; 水灰比为 0.8 的试块其峰值拉应变位于 $35.6 \mu\epsilon \sim 54.8 \mu\epsilon$ 区间; 而水灰比为 0.9 的试块其峰值拉应变则位于 $31.5 \mu\epsilon \sim 53.7 \mu\epsilon$ 区间。由此可见, 水灰比对磷石膏试块的峰值拉应变影响不大。在采用本研究配合比进行分析及工程应用时, 磷石膏的峰值拉应变值建议取为 $50 \mu\epsilon$ 。

3.4 抗拉强度与抗压强度比

各配合比试块的抗拉强度与抗压强度如图 6 所示, 当水灰比从 0.7 增加至 0.8 及 0.9 时, S-0.7、S-0.8、S-0.9 试块的抗拉强度与抗压强度

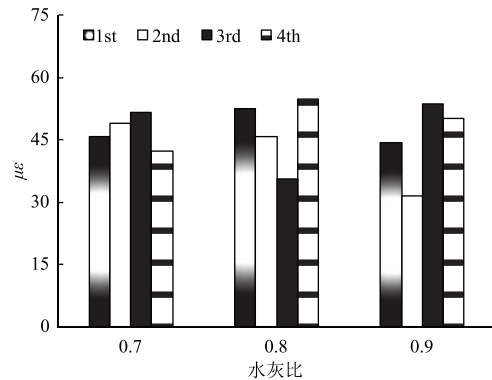


图 5 峰值拉应变
Fig. 5 Peak tensile strains of samples

比 (f_t / f_c) 分别为 1/21.9、1/18.7 及 1/22.3。由此可见, 水灰比对试块抗拉与抗压强度比影响不大。磷石膏的抗拉强度约为抗压强度的 1/20。

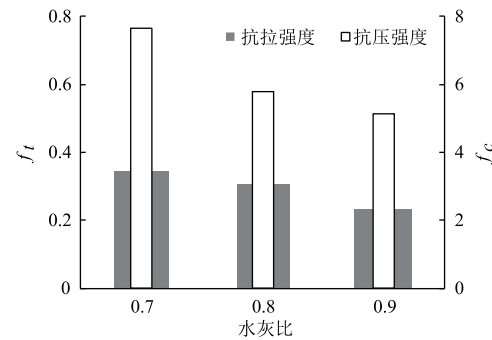


图 6 抗拉强度与抗压强度的比较
Fig. 6 Comparison of tensile strength and compressive strength

4 归一化曲线

4.1 归一化处理

以试块轴向应力与抗拉强度的比值 σ/f_t 作为归一化曲线的纵坐标; 以试块轴向应变与峰值拉应变的比值 ϵ/ϵ_0 作为归一化曲线的横坐标。其中, f_t 及 ϵ_0 分别为各试块的轴心抗拉强度及峰值拉应变。经归一化处理后, 试块 S-0.7、S-0.8 及 S-0.9 的归一化应力-应变曲线如图 7 (a)、(b)、(c) 所示。从图中可以看出, 不同配合比的试块其归一化曲线也有所不同。通过对归一化数据进行拟合, 应力-应变曲线表达式如下:

$$\frac{\sigma}{f_t} = a \left(\frac{\epsilon}{\epsilon_0} \right)^2 + b \left(\frac{\epsilon}{\epsilon_0} \right) \quad (1)$$

其中, 对于 S-0.7 试块, a 取 -0.8, b 取 1.8;

对于 S-0.8 试块, a 取 -0.7, b 取 1.7; 对于 S-0.9 试块, a 取 -0.4, b 取 1.4。

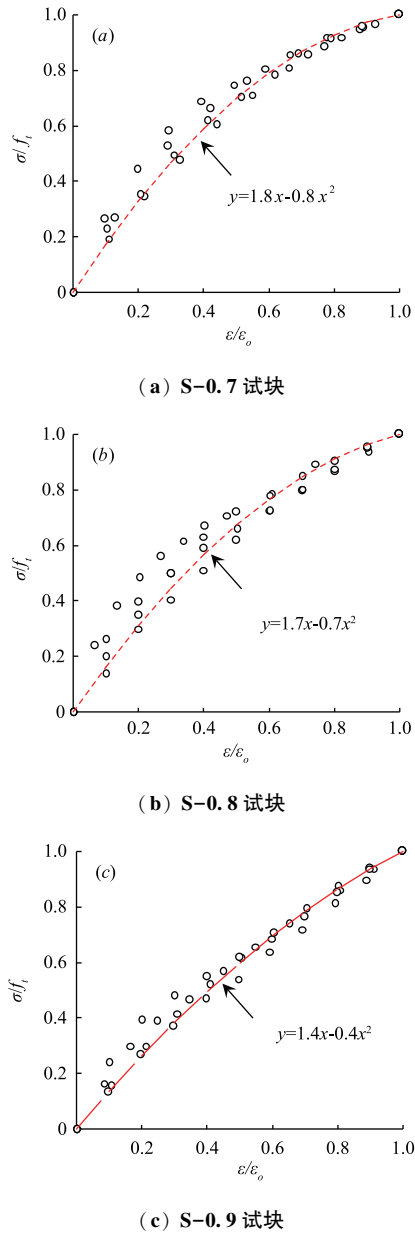


图 7 归一化应力-应变曲线
Fig. 7 Normalized stress-strain curves

4.2 模型验证

在归一化的应力-应变模型中, 初始零点与峰值点的应力、应变数值与试验数据一致。而零点与峰值点之间的曲线变化则通过拟合得到。为验证模型的准确性, 选取应变分别为 25%、50% 及 75% 峰值拉应变的曲线上 3 个点进行比较。3 点处抗拉强度试验值与模型计算值之比如图 8 所示。

从图中可以看出: (1) 归一化模型所计算数据与试验数据总体匹配良好, 反映出所拟合的模型具有较好的计算精度; (2) 归一化模型所计算的数据越靠近曲线峰值点, 数据越接近试验值。由此显示, 模型在预测曲线关键特征点方面具有较高的精度。

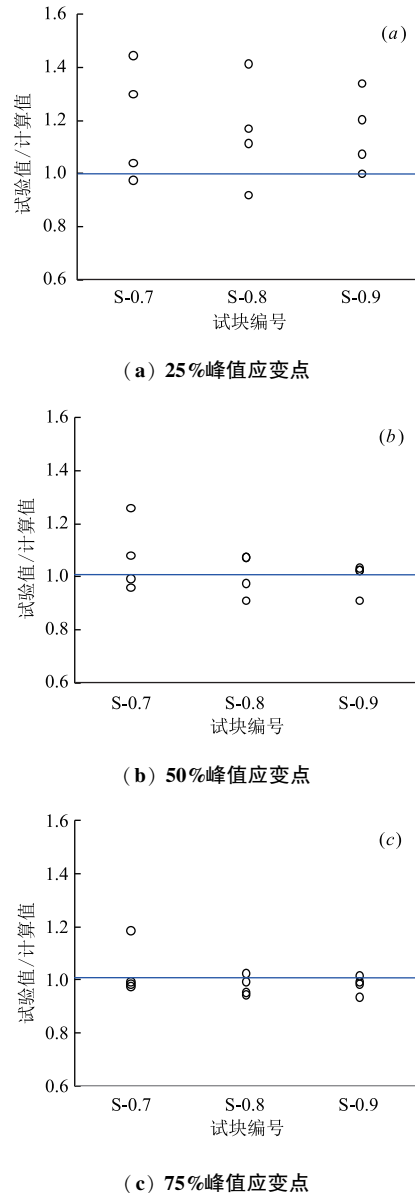


图 8 模型验证
Fig. 8 Validation of normalized model

5 结论

本文对纤维约束磷石膏的受拉应力-应变曲线进行研究, 分析了试块的破坏特征, 阐述了试块

材料科学

的破坏原因；对受拉应力-应变曲线、抗拉强度及峰值拉应变等进行了分析与总结，并采用归一化的处理方法建立了受拉应力-应变曲线的数学计算模型，主要研究结论如下：

(1) 所有试块在受拉破坏时均形成横向贯通裂缝，该裂缝位于距试块端部约 100 mm 处。专用夹具夹持作用所形成的剪切效应与轴向拉力的共同作用是导致该类裂缝形成的主要原因。

(2) 由于试验机刚度及加载条件所限，所有试块均只测出了应力-应变曲线的上升段。所有曲线均呈现出非线性特征，且水灰比对应力-应变曲线的线性影响较大，水灰比越低，曲线越陡峭。

(3) 水灰比对试块抗拉强度影响较大。当水灰比从 0.7 增加至 0.8 及 0.9 时，试块的平均抗压强度分别降低了 11.4% 及 34.3%。此外，水灰比对试块峰值拉应变影响较小，对于本文建议的配合比，峰值拉应变可取为 $50 \mu\epsilon$ 。

(4) 采用归一化的处理方法对应力-应变曲线进行处理，并拟合出了归一化应力-应变曲线的数学表达式。通过将模型计算数据与试验实测数据进行对比，验证了归一化模型的准确性，可为实际工程应用提供参考。

参 考 文 献

- [1] ZHOU L, CHEN B, HUANG Y. Stress-strain relationships of fiber-reinforced phosphogypsum under uniaxial compression [J]. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2022, 2022: 7221491.
- [2] 展争艳, 顾生芳, 展成业. 施用磷石膏对甘肃引黄灌区重度盐碱地改良效果研究 [J]. *环境保护与循环经济*, 2021, 41 (3): 61-64.
- [3] 张小瑞, 赵国彦, 李地元, 等. 磷石膏膏体充填材料强度优化配比试验研究 [J]. *矿冶工程*, 2015, 35 (4): 9-11.
- [4] 张立力, 华苏东, 诸华军, 等. 高镁镍渣-磷石膏基胶凝材料固化和改良盐渍土的性能 [J]. *材料导报*, 2020, 34 (9): 9034-9040.
- [5] 谢广友. 磷石膏制免烧砖技术开发与应用 [J]. *磷肥与复肥*, 2014, 29 (4): 62-66.
- [6] 冯洋, 杨林, 曹建新, 等. 磷石膏煅烧改性制备自流平砂浆的研究 [J]. *硅酸盐通报*, 2020, 39 (9): 2891-2897.
- [7] 郑育春. 磷石膏-水泥-聚苯颗粒保温板的制备与性能 [J]. *新型建筑材料*, 2019, 46 (4): 95-98.
- [8] MA B, JIN Z, SU Y, et al. Utilization of hemihydrate phosphogypsum for the preparation of porous sound absorbing material [J]. *Construction and Building Materials*, 2020, 234: 117346.
- [9] 周理, 黄勇, 陈波, 等. 基于石膏内置模的空心楼盖静力特性分析 [J]. *建筑科学*, 2015, 31 (9): 19-25.
- [10] 袁书成, 刘香玲, 梁危, 等. 磷石膏填充墙研究现状与应用进展 [J]. *无机盐工业*, 2021, 53 (4): 8-13.
- [11] 张华刚, 吴琴, 贾晓飞, 等. 现浇磷石膏抗压强度的试验研究 [J]. *湖南大学学报 (自然科学版)*, 2016, 43 (3): 127-134.
- [12] 周理, 胡松, 徐一峰, 等. 聚脲约束磷石膏柱体受压性能试验研究 [J]. *水利与建筑工程学报*, 2021, 19 (5): 74-82.
- [13] 周理, 尹超, 邹庆余, 等. 纤维增强磷石膏抗压抗折强度试验研究 [J]. *纤维复合材料*, 2021, 38 (4): 3-9+46.
- [14] 梁凡凡, 张华刚, 罗瑒, 等. 现浇磷石膏弹性模量和泊松比的初步试验研究 [J]. *贵州大学学报 (自然科学版)*, 2013, 30 (2): 81-85.
- [15] 吴琴, 张华刚, 贾晓飞, 等. 现浇磷石膏应力-应变曲线试验研究 [J]. *建筑结构学报*, 2015, 36 (5): 150-157.
- [16] 原海燕, 安明喆, 贾方方, 等. 钢纤维增强 RPC 受拉应力-应变曲线试验 [J]. *广西大学学报 (自然科学版)*, 2015, 40 (4): 921-927.
- [17] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 混凝土物理力学性能试验方法标准: GB/T 50081-2019 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2019.