

聚脲约束磷石膏柱体受压性能试验研究

周理^{1,3}, 胡松², 徐一峰¹, 邹庆余¹, 尹超¹

(1. 贵州大学 建筑与城市规划学院, 贵州 贵阳 550003; 2. 铜仁学院 农林工程与规划学院, 贵州 铜仁 554300;
3. 贵州中建空间工程科技有限公司, 贵州 贵阳 550001)

摘要: 为研究聚脲对磷石膏力学性能的影响,共设计制作了54个棱柱体试块,其中27个为普通磷石膏试块,27个为聚脲约束磷石膏试块。通过受压性能试验,分析了典型试块的破坏过程,总结了试块的破坏模式;并对各类试块的荷载-变形曲线、承载力、耗能能力等进行了详细地分析;建立了聚脲约束磷石膏的约束模型及破坏准则。研究结果表明:聚脲约束磷石膏在破坏模式上与磷石膏试块基本相同,均可分为压缩破坏、受拉破坏及压溃破坏三类。聚脲涂层的应用可有效地降低磷石膏在受压时的破损程度,改善了材料的变形性能。在试块纤维含量较小的情况下,聚脲的约束作用可显著提升磷石膏的承载力及耗能能力;但当试块的纤维含量较高时,磷石膏受压膨胀受到了纤维的有效制约,故外围聚脲涂层的约束作用得不到有效发挥,约束效果不明显。此外,基于Mander约束理论及Drucker-Prager准则分别建立了聚脲约束磷石膏的约束模型及破坏准则,可为工程应用提供参考。

关键词: 聚脲;磷石膏;约束效应;受压性能;试验研究

中图分类号: TU522

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2021)05-0074-09

Experimental Investigation on Compressive Behaviour of Phosphogypsum Column Confined by Polyurea

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

(1. College of Architecture and Urban Planning, Guizhou University, Guiyang, Guizhou 550003, China;

2. College of Agroforestry Engineering and Planning, Tongren University, Tongren, Guizhou 554300, China;

3. Guizhou Zhongjian Spatial Structure Engineering Technology Co., Ltd., Guiyang, Guizhou 550001, China)

Abstract: To analyze the effects of polyurea on the mechanical properties of phosphogypsum, 54 prism specimens were designed and manufactured, including 27 ordinary phosphogypsum prism specimens and 27 prism specimens confined by polyurea. Through the compression test, the failure processes of typical specimens were analyzed, and the failure modes were summarized. The load-deformation curves, bearing capacity and energy dissipation capacity of various specimens were analyzed in detail. Moreover, the constraint model and failure criterion of phosphogypsum confined by polyurea were established. The results show that the failure modes of phosphogypsum confined by polyurea are basically the same as those of phosphogypsum, which can be divided into compression failure, tensile failure and crushing failure. The application of polyurea coating can effectively reduce the damage of phosphogypsum under pressure and improve the deformation performance of the material. When the fiber content of the specimen is small, the constraint effect of the polyurea can significantly improve the bearing capacity and energy dissipation capacity of the phosphogypsum. However, when the fiber content of the specimen is high, the compression expansion of the specimen is effectively restricted by the fiber, so the constraint effect of the outer polyurea coating cannot be effectively exerted. In addition, based on Mander constraint theory and Drucker-Prager criterion, the constraint model and failure criterion of phosphogypsum confined by polyurea were established, which can provide reference for engineering application.

Keywords: polyurea; phosphogypsum; constraint effect; compressive behaviour; experimental investigation

收稿日期:2021-07-10

修稿日期:2021-08-09

基金项目:国家自然科学基金资助(52068007);贵州省基础 Research 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:周理(1983—),男(侗族),博士,高级工程师,主要从事绿色建材及组合结构研究工作。E-mail: Lzhou5@gzu.edu.cn

聚脲是近年来国内外刚刚兴起的一种新型环保材料,具有粘结力强、抗拉强度高、耐水性优、反应时间短、喷涂工艺简单等优点。正是由于材料的上述优点,聚脲在实际工程中得到了越来越广泛地应用,主要体现在以下三方面:(1)构筑物防水应用领域;(2)构筑物防爆应用领域;(3)结构及构件增强等方面。虽然聚脲材料在应用领域已取得了一定的进展,但对于该类材料的力学、物理性能研究目前仍显不足,特别是聚脲材料对构件的增强机理研究基本处于空白状态。

在国内外目前已有的研究中,Szafran等^[1]提出了利用聚脲来增强混凝土管道,试验结果显示,与普通混凝土管道相比,喷涂聚脲的管道破坏承载力提升了20.3%;并且在混凝土压碎后,管道仍然可以正常工作;Chen等^[2]利用聚脲来提升加气混凝土板的抗爆能力。通过爆炸试验,证明了聚脲提升加气混凝土板抗爆性能的有效性,并指出聚脲对板抗爆性能的提升程度要优于碳纤维布的增强效果;陈潇硕等^[3]利用聚脲加固地下管廊结构。通过实施9次爆炸试验,得出了在一定条件下聚脲加固的抗爆效果要优于碳纤维布的结论,并建议在地下管廊工程中优选聚脲进行加固;赵启明等^[4]提出利用聚脲钢板复合层提升钢筋混凝土板的抗爆性能,研究结果表明,在相同加固层厚度条件下聚脲钢板复合层的抗爆减振效果要优于纯聚脲加固层。此外,Song及Somarathna等^[5-7]对聚脲增强混凝土的抗压、抗弯及抗折强度进行了试验研究,结果均表明聚脲可有效地增强混凝土的力学性能。

近年来,为推动资源综合利用及环境保护,磷石膏在建筑工程中得到了广泛地推广运用。何玉鑫等^[8]利用磷石膏、矿渣、水泥混合制备磷石膏基胶凝材料,并以此制备免煅烧磷石膏砖,所制备的磷石膏砖具有较高抗压强度;Wu等^[9]将磷石膏应用于密肋墙体结构之中,让磷石膏与混凝土密柱共同工作,进而形成结构-节能一体化构件。研究结果显示,墙体的承载能力提升约2~3倍,并且具有良好的延性及耗能能力;周理等^[10-11]利用磷石膏制备内置模块,并将其作为空心楼盖的内置模板,研究显示磷石膏内置模块可较好地满足空心楼盖施工要求。董坚等^[12]利用磷石膏制作空心条板,通过改进生产工艺,使磷石膏空心条板的技术性能达到行业标准的相关要求,且某些指标比天然石膏制品更优。

然而,值得注意的是,在磷石膏制品大量应用的同时,也发现了诸多问题,如磷石膏制品材料强度低、脆性大、防潮性能差等。为改善磷石膏材料的力

学性能,国内学者提出了纤维增强^[13]、优化掺料^[14]等措施,取得了较好的效果;为提升磷石膏的防水防潮性能,提出了在磷石膏混合料中掺加憎水材料^[15]、沥青胶结^[16]等措施。上述措施在一定程度上改善了磷石膏的物理力学性能,但局限于改善磷石膏某单一指标。聚脲材料既具有良好的力学增强作用,又具有卓越的防水效果。故此,本文提出利用聚脲来改善磷石膏的物理力学性能。通过受压试验,研究聚脲约束磷石膏的力学变化规律,分析试件的破坏特征,并对其破坏机理进行探讨,研究成果以期与实际工程应用提供参考。

1 试验设计

1.1 试块设计

本试验所制作磷石膏试块的材料组成为 β 型磷石膏粉、水泥、生石灰、聚丙烯纤维及缓凝剂。其中,磷石膏粉中 $\text{CaSO}_4 \cdot 0.5\text{H}_2\text{O}$ 的含量为68.5%;水泥选用P.C 32.5级水泥;生石灰中CaO与MgO的含量超过75%;聚丙烯纤维的直径与长度分别为25 μm 和10 mm,其测试的抗拉强度约450 MPa;缓凝剂采用石膏专用缓凝剂,根据材料说明进行添加使用。当磷石膏试块制作完毕后,根据《建筑石膏-力学性能的测定》^[17](GB/T 17669.3—1999)的要求,将试块在 $40^\circ\text{C} \pm 4^\circ\text{C}$ 的条件下烘干,然后采用喷涂的方式将聚脲均匀地喷涂在磷石膏柱体的四周。经测定,聚脲层的平均厚度为0.52 mm,聚脲材料的抗拉强度为6.8 MPa。试验共设计9组配合比,每组配合比制作6个100 mm×100 mm×300 mm的棱柱体试件,其中3个不喷涂聚脲(编号用A表示),另外3个喷涂约0.5 mm厚的聚脲涂层(编号用PA表示)。各试件的配合比如表1所示。

1.2 试块制作过程

试块正式制作前,对各配合比的磷石膏试块进行试配,确保磷石膏浆体的流动性满足试块制作要求。正式制作时,首先将各掺料称量完毕,然后将水与纤维倒入搅拌桶预拌1 min,确保纤维分散;随后,将干料倒入搅拌桶中,搅拌约1 min。将搅拌后的浆体倒入模具,并用抹灰板将模具顶面的磷石膏抹平。待磷石膏初凝后,拆除模具,取出磷石膏试块。所有试块制作完毕后,将试块放置在通风干燥的环境中28 d,确保试块中大部分的自由水得以排出。正式试验前,将磷石膏试块在 $40^\circ\text{C} \pm 4^\circ\text{C}$ 的条件下烘干。对于不喷涂聚脲的A试块,烘干后直接进行测试;对于喷涂聚脲的PA试块,烘干后在试块表面喷涂一层聚脲,厚度约为0.5 mm;随后放置24 h至聚脲

层干燥。为便于观测试验现象,在聚脲层外侧再喷涂一层黄色涂料。随后,在试块上绘制网格线,准备进行测试。本试验试块制作过程如图 1 所示。

表 1 试块配合比

试件 编号	磷石膏 粉/kg	水泥 /kg	生石灰 /kg	纤维 /g	缓凝剂 /g	水固比	聚脲厚 度/mm
A1	9.0	0.5	0.5	10	10	0.8	—
A2	9.0	0.5	0.5	10	10	0.7	—
A3	9.0	0.5	0.5	10	10	0.6	—
A4	8.5	1.0	0.5	10	10	0.7	—
A5	9.5	0.0	0.5	10	10	0.7	—
A6	8.5	0.5	1.0	10	10	0.7	—
A7	9.5	0.5	0.0	10	10	0.7	—
A8	9.0	0.5	0.5	0	10	0.7	—
A9	9.0	0.5	0.5	20	10	0.7	—
PA1	9.0	0.5	0.5	10	10	0.8	0.51
PA2	9.0	0.5	0.5	10	10	0.7	0.53
PA3	9.0	0.5	0.5	10	10	0.6	0.52
PA4	8.5	1.0	0.5	10	10	0.7	0.51
PA5	9.5	0.0	0.5	10	10	0.7	0.52
PA6	8.5	0.5	1.0	10	10	0.7	0.54
PA7	9.5	0.5	0.0	10	10	0.7	0.50
PA8	9.0	0.5	0.5	0	10	0.7	0.52
PA9	9.0	0.5	0.5	20	10	0.7	0.49

1.3 试块测试

试块测试前,先用胶带约束棱柱体试块的上下

端,保证试块在其中部发生破坏。试验采用 10 t 万能试验机进行加载,选取位移控制加载模式,加载速率设定为 0.03 mm/s。正式加载前,对试块进行预加载,预加载值统一设定为 5 kN,以消除试块与设备之间的接触误差。加载过程中,记录关键特征点时的试块破坏情况,利用设备自带的位移传感器及荷载传感器记录试验全过程的相关数据。A 及 PA 试块的加载现场如图 2 所示。

2 试验现象

2.1 破坏过程

对于 A 类试块,以参考试块 A2 为例,在试块加载初期,没有观测到明显的裂缝;荷载-变形曲线基本上呈直线变化。当荷载加载至 28.7 kN 时(约为峰值荷载的 67%),试块中部出现一条水平裂缝,并且随着荷载的进一步增大,裂缝长度逐渐扩展。当荷载加载至峰值荷载点时,水平裂缝几乎贯穿整个截面。此后,荷载-变形曲线进入下降阶段,并在水平裂缝处出现数条垂直裂缝。最后竖向裂缝间的小柱体压酥,试块宣告破坏。导致试块发生这种破坏的原因在于:高水固比的磷石膏试块内部孔隙率较高,内部微孔在受压状态下首先坍塌,形成水平裂缝;当坍塌稳定后,柱体在压力作用下被分割成多个小柱体,形成竖向裂缝,这种破坏可以被定义为“压缩破坏”。对于低水固比的 A3 试件,当试块加载至



图 1 试块制作过程

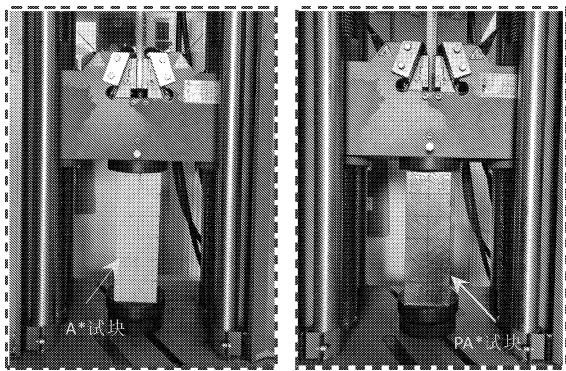


图 2 试块加载现场

43.8 kN 时(约为峰值荷载的 63%),在试块侧面出现第 1 条竖向裂缝,随着荷载的继续增加,裂缝长度逐渐扩展、宽度持续增加;当加载至峰值荷载点时,在试块侧面形成了 2 条完整的竖向通缝。随后,施加荷载值逐渐降低,在竖向裂缝之间的区域形成了数条水平裂缝,被裂缝分割的小柱体也因压屈而向外呈现出不同程度的凸起。这种试块由于水固比较低,故孔隙率较小。在试块受压时,试块膨胀所形成的拉力先于压力达到材料强度,因此首先观测到竖向裂缝,故可将这种破坏定义为“受拉破坏”。对于不掺加聚丙烯纤维的 A8 试块,当荷载加载至 24.1 kN 时(约为峰值荷载的 55%),在试块中部既出现了竖向裂缝,又形成了水平裂缝。此后,随着荷载值的不断增加,水平裂缝与竖向裂缝持续扩展。当加载接近峰值荷载左右时,试块发出轻微的脆响,随后荷载-变形曲线进入下降阶段,在试块边缘出现磷石膏压溃现象。这种破坏的原因在于:低纤维含量降低了试块的约束能力,试块中部在拉压复合应力作用下迅速达到材料强度,从而呈现出压溃特征,这种破坏可被定义为“压溃破坏”。

对于有聚脲约束的 PA 试块,PA2 与 A2 试块的配合比相同,在加载过程初期,没有观测到裂缝的产生。当加载至 45 kN 时(约为峰值荷载的 80%),在试块中上部出现了第 1 条有一定倾斜角度的水平裂缝,随着加载的继续进行,水平裂缝持续扩展;当加载接近峰值荷载时,水平裂缝基本贯穿整个试件截面。进入下降阶段后,竖向裂纹有所开展。总体而言,虽然 PA2 与 A2 试块的裂缝开展模式基本相同,但 PA2 试块的裂缝数量要相对更少。PA3 与 A3 试块的配合比相同,当加载至 78 kN 时(约为峰值荷载的 84%),才在试块的侧面中部出现第 1 条竖向裂缝;此后加载,裂缝数量及宽度均有所增长,但相比于 A3 试块,PA3 试块的裂缝数量及裂缝开展宽度

均要小得多,并且试块的水平裂缝开展不是很明显。PA8 与 A8 试块的配合比中均未掺加聚丙烯纤维,PA8 在加载至 43 kN 时(约为峰值荷载的 82%),在试块中部出现 1 条水平裂缝,随后水平裂缝随加载的进行而不断扩展,竖向裂缝从水平裂缝处向试块端部不断开展。当加载超过峰值荷载后,在水平裂缝与竖向裂缝的相交处,磷石膏呈现出压碎状态,但与 A8 试块相比,PA8 试块的破坏程度明显更弱。

2.2 破坏模式

无论是 A 类试块,还是 PA 类试块,试验过程中均观测到 3 种破坏模式,分别为压缩破坏、受拉破坏及压溃破坏。其中,A3 与 PA3 试块发生受拉破坏;A8 与 PA8 试块发生压溃破坏;其余试块均发生压缩破坏。从本质上来讲,影响试块破坏模式核心因素为水固比及纤维含量。当试块具有一定的纤维含量,且水固比较高时,试块内部微孔首先坍塌,形成水平裂缝。在微孔坍塌稳定后,方出现竖向裂缝,这类破坏即为压缩破坏。当试块水固比较低时,试块内部微孔较少;在压力作用下的膨胀效应致使试块首先出现竖向裂缝,这类破坏即为受拉破坏。当试块纤维含量较少,且水固比较高时,拉压应力同时作用,导致试块既出现水平裂缝,又出现竖向裂缝,致使局部区域压溃,这类破坏即为压溃破坏。部分试块破坏情况如图 3 所示。

3 试验数据分析

3.1 荷载-变形曲线

每一种配合比均测试了 3 个试块,采用平均值及误差带来表述各配合比试块的荷载-变形曲线。从图 4 中可以看出:(1) 磷石膏试块、聚脲约束磷石膏试块的荷载-变形曲线均可划分为 3 个阶段,即初始弹性阶段、弹塑性变形阶段及破坏阶段;(2) 聚脲的约束作用将有助于提升磷石膏试块的抗压强度,对于纤维含量较高的试块,提升作用则不是很明显;(3) 聚脲的约束作用将制约试块变形,当承载力达到峰值时,聚脲约束磷石膏试块的峰值变形要小于非约束磷石膏试块的峰值变形;(4) 聚脲约束磷石膏试块的初始刚度普遍大于磷石膏试块的初始刚度。

3.2 承载力对比

取每种配合比试块的轴压承载力平均值进行对比,图 5 显示了聚脲约束磷石膏试块与磷石膏试块的轴压承载力对比结果。由图可见,随着水灰比的降低,聚脲约束磷石膏试块及磷石膏试块的抗压强度均有所提高。与普通磷石膏试块相比,当水灰比

分别为 0.8、0.7 及 0.6 时,聚脲的约束作用将使得试块的抗压强度分别提升 32.6%、27.6% 及 37.0%,如图 5(a)所示。水泥含量变化对试块承载力的影响如图 5(b)所示,当水泥含量增加时,磷石膏试块的抗压强度先降低、后增加,这与 Zhang 等^[18]的研究发现一致。对于强度较弱的试块,聚脲的约束作用对强度提升效果最为明显。图 5(c)显示了生石灰含量对试块强度的影响。由图可见,当生石灰具有一定含量时,试块强度有所提高。但若大量增加石灰含

量,则会降低试块强度。聚脲的约束作用则会改善因掺料变化而引起的试块强度变异。图 5(d)给出了不同纤维含量试块的强度变化趋势。当磷石膏试块的纤维含量较小时,其强度变化不大,纤维的作用不显著。此时,聚脲对试块强度提升的效果是显著的。当纤维增加到一定程度时,磷石膏试块的强度则增加较大,纤维在试块受力过程中起到了良好的变形抑制作用。因此,聚脲的约束作用则发挥不出来,约束效果不明显。

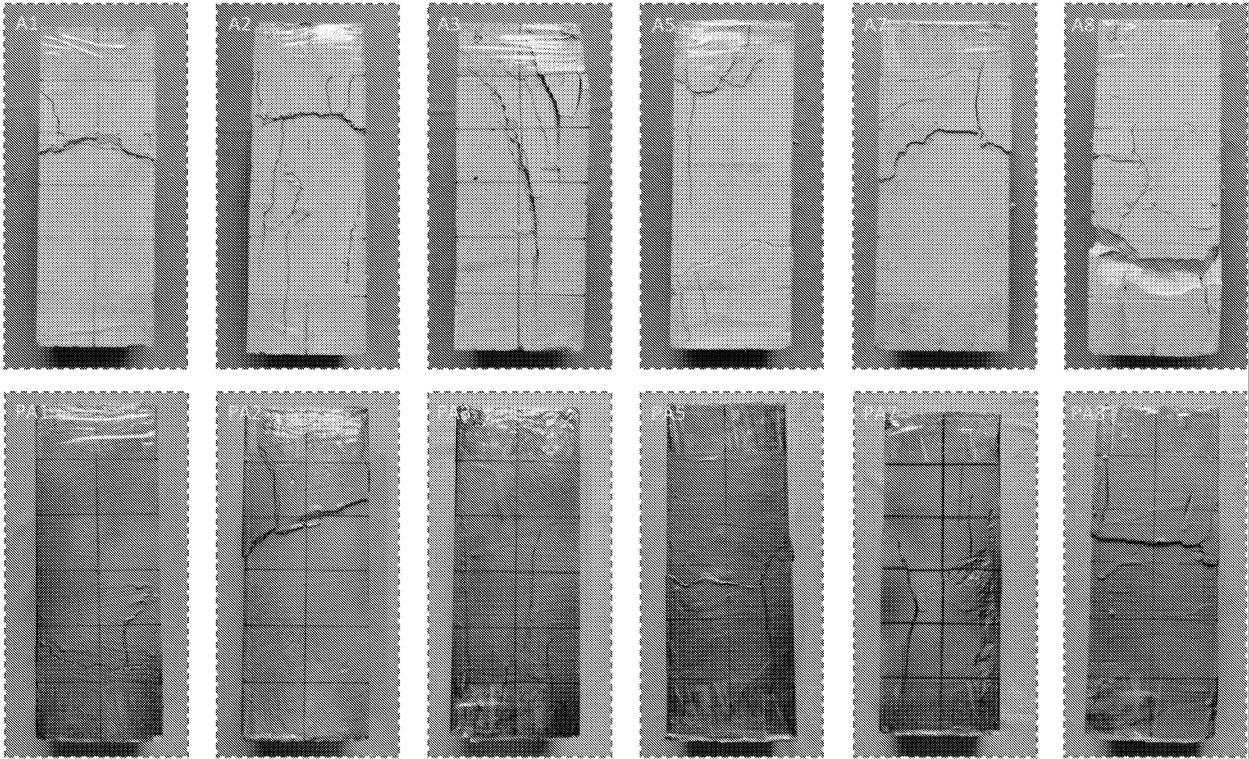


图 3 试块破坏情况

3.3 耗能分析

聚脲的核心作用之一是克服材料的脆弱,进而提升结构及构件的延性。因此,耗能能力是评价聚脲作用的重要指标。参考泡沫混凝土极限应变,将试块轴向变形值等于 0.01l 时的变形定义为试块的破坏变形^[19]。因此,破坏变形前的荷载-变形曲线与横坐标所围合区域的面积即可反映出试块的耗能情况,耗能计算示意如图 6 所示。

图 7 显示了各试块的耗能对比。从图 7(a)中可以看出:试块耗能随着水灰比的降低而增大,相比于普通磷石膏试块,聚脲约束磷石膏试块的耗能能力更强。当水灰比分别为 0.8、0.7 及 0.6 时,聚脲的约束作用将使得磷石膏试块的耗能能力分别提升 27.8%、27.8% 及 37.9%。图 7(b)显示了水泥含量对试块耗能性能的影响。由图可见,水泥含量不同

对试块耗能性能的影响不大。聚脲涂层可将磷石膏试块的轴压耗能能力提升约 8.0%~27.8%。此外,当水泥含量较多时,聚脲对试块耗能能力的提升效果相对较弱,其原因在于:水泥的硬化强度使得磷石膏受压时向外膨胀的趋势有所放缓。图 7(c)给出了生石灰含量变化对试块耗能的影响。从图中可以看出,当生石灰含量从 0% 增加至 5% 时,磷石膏试块、聚脲约束磷石膏试块的耗能能力均有一定程度的提升。当生石灰含量为 0 时,聚脲的约束作用将使得磷石膏试块的耗能能力提升约 11.3%;当生石灰含量为 5% 时,聚脲的约束作用则使得磷石膏试块的耗能能力提升约 27.8%;当生石灰含量增加到 10% 时,磷石膏试块的耗能能力反而下降,这主要是由于试块的强度降低所致。采用聚脲约束后,

可充分发挥聚脲的约束效应,故耗能能力提升较大。图 7(d)则显示了纤维含量对试块耗能能力的影响。当试块中纤维含量较少时,无论是磷石膏试块,还是聚脲约束磷石膏试块其耗能能力随纤维含量的改变都不是很大,主要原因是纤维的作用不明显。当纤

维增加至 0.2% 时,磷石膏试块的耗能能力提升很大,但聚脲的约束作用则不明显。这主要是纤维含量的增多增强了对试块横向变形的抑制能力,而外围的聚脲涂料需在试块横向膨胀后,方能发挥其约束作用。故聚脲对高纤维含量试块的耗能影响不大。

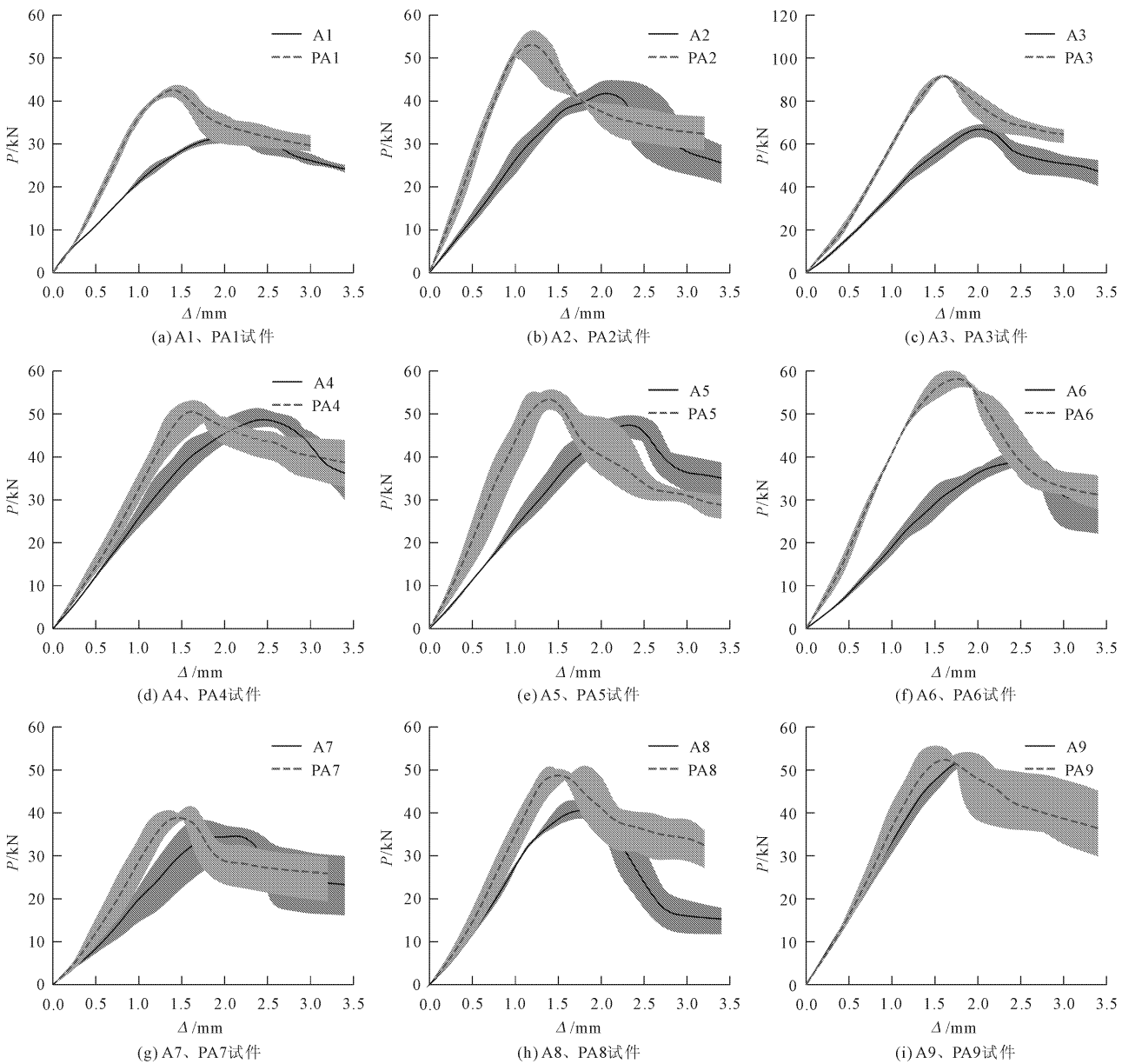


图 4 试块的荷载 - 变形曲线

4 约束模型与破坏准则

4.1 约束模型

聚脲约束磷石膏的力学机制与钢管混凝土结构类似,其本质是利用构件在受压时外围材料的约束作用,使得核心材料处于三轴受压状态,进而提升构件的承载能力^[20-21]。Mander 等^[22]在研究约束混凝

土时,建立了 f_{cc}/f_c 与 f_l/f_c 之间的关系。其中, f_{cc} 为约束后材料抗压强度, f_c 为未约束材料的抗压强度, f_l 为环向约束应力。迄今为止,Mander 模型已成为研究材料约束效应的重要参考。为此,本文借鉴该模型的表述形式来构建聚脲约束磷石膏模型。基于试验结果,聚脲约束磷石膏抗压强度 f_{cc} 及磷石膏抗压强度 f_c 的计算表达式为:

$$f_{cc} = P_{PA}/A \tag{1}$$

$$f_c = P_A / A \quad (2)$$

式中: P_{PA} 为聚脲约束磷石膏的峰值承载力; P_A 为磷

石膏的峰值承载力; A 为试块的截面面积。

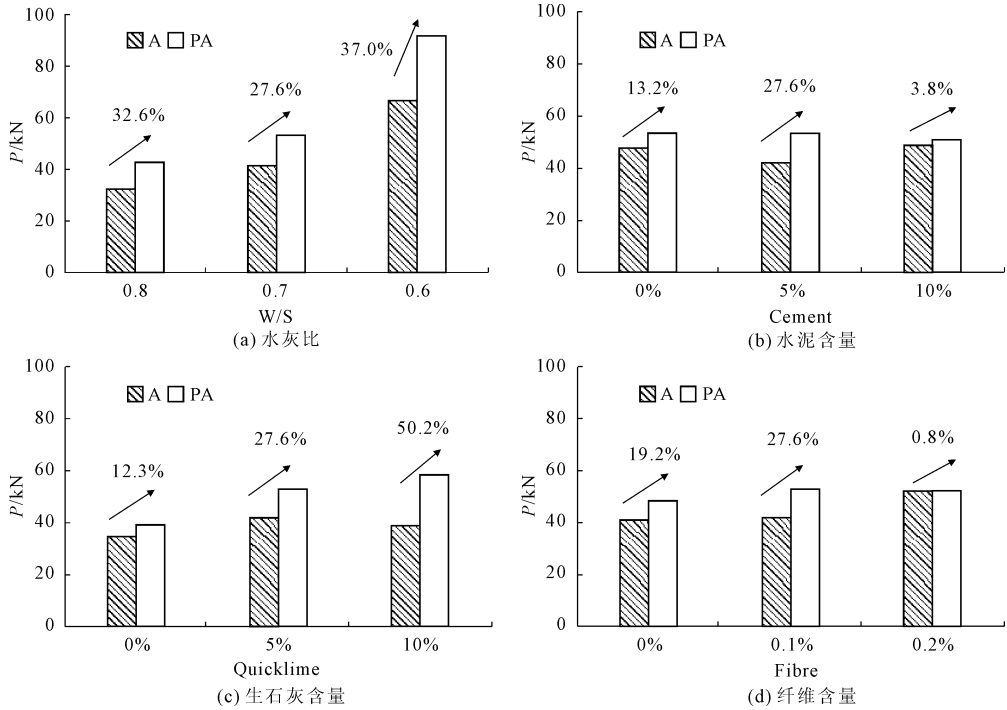


图 5 试块的承载力对比

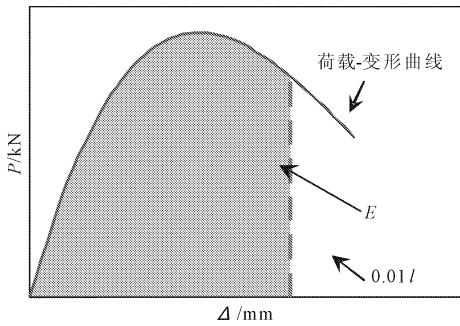


图 6 耗能计算示意

环向约束应力 f_l 可根据聚脲涂层与磷石膏之间的平衡条件进行计算, 受力示意如图 8 所示; 计算表达式为:

$$f_l \times b = 2N_l \quad (3)$$

$$N_l = f_p t_p \quad (4)$$

式中: b 为试块截面宽度; N_l 为单位高度聚脲层拉力; f_p 为聚脲的抗拉强度; t_p 为聚脲层厚度。

根据试验数据, 聚脲约束磷石膏柱体的 f_{cc}/f_c 与 f_l/f_c 之间关系如图 9 所示。

在本试验研究参数范围内, 根据图 9 中数据拟合结果, 聚脲约束磷石膏的约束模型可以表述为:

$$\frac{f_{cc}}{f_c} = 6.159 \frac{f_l}{f_c} + 1.141 \quad (5)$$

4.2 破坏准则

破坏准则将材料的破坏包络曲面用数学函数的方式进行描述, 作为判定材料是否达到破坏状态或极限强度的条件。陈向东等^[23] 对高强石膏进行了真三轴试验与分析, 研究发现 Drucker - Prager 准则与 Tresca 准则均适用于高强度石膏。本文聚脲约束磷石膏选用 Drucker - Prager 准则, 其表达式为:

$$\alpha I_1 + \sqrt{J_2} = K \quad (6)$$

$$I_1 = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3 \quad (7)$$

$$J_2 = \frac{1}{6} [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2] \quad (8)$$

式中: σ_1 为竖向主压应力; σ_2, σ_3 为侧向围压应力; I_1 为应力张量第一不变量; J_2 为应力偏张量第二不变量; α, K 为试验常数。

以试验数据为基础, 求解出应力张量第一不变量 I_1 及应力偏张量第二不变量 J_2 , 建立 I_1 与 J_2 的相互关系, 如图 10 所示。

从图 10 中的拟合结果可知, α 等于 -0.576 , K 等于 -0.117 , I_1 与 J_2 的数学关系为:

$$0.576 I_1 - \sqrt{J_2} = 0.117 \quad (9)$$

式(9) 即为聚脲约束磷石膏基于 Drucker - Prager 的破坏准则。

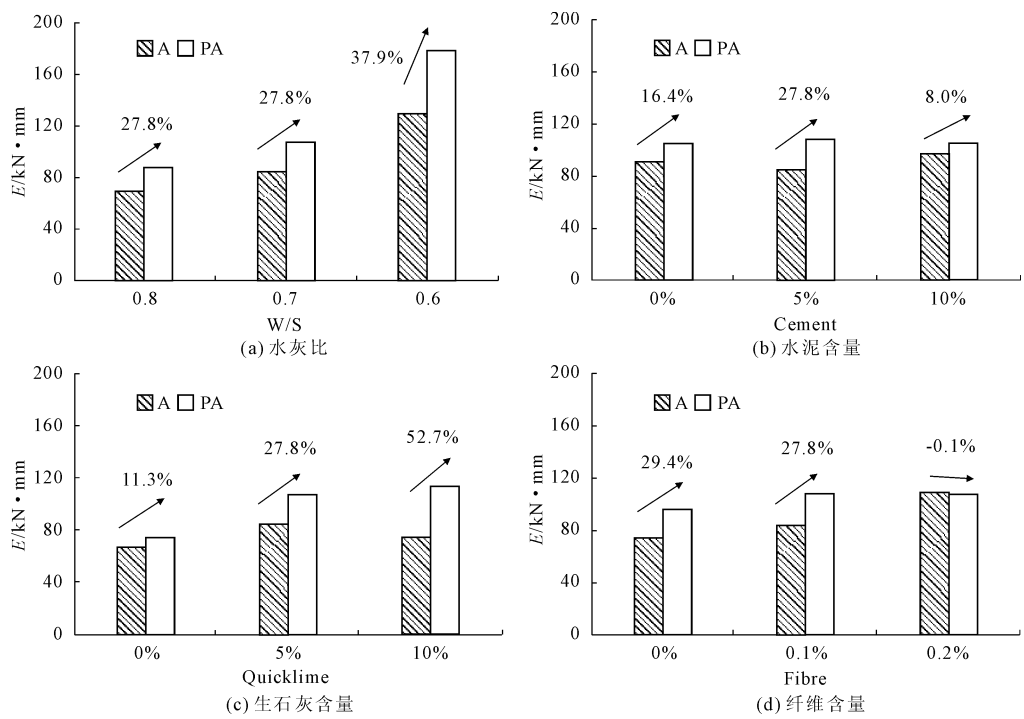


图 7 试块的耗能对比

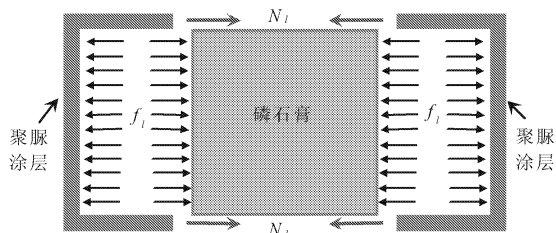


图 8 f_i 计算示意

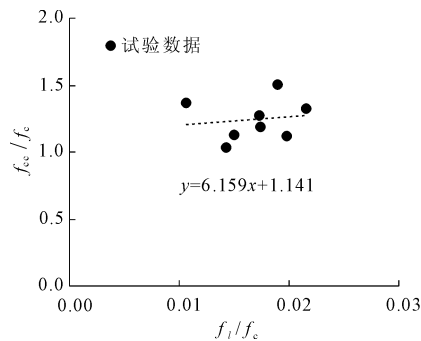


图 9 f_{ec}/f_c 与 f_i/f_c 关系

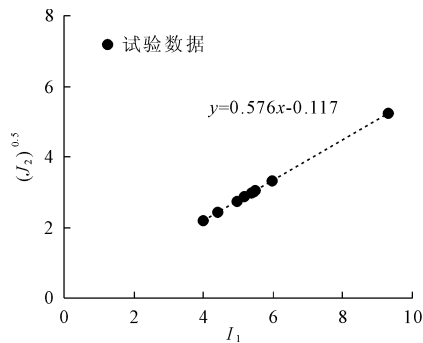


图 10 I_1 与 J_2 关系

(1) 水固比与纤维含量是影响试块破坏模式的核心因素。当纤维含量一定,且水固比较高时,试块发生压缩破坏;当水固比较低时,试块发生受拉破坏;当纤维含量较少,且水固比较高时,试块发生压溃破坏。

(2) 聚脲的约束作用未能改变磷石膏的破坏模式,但聚脲约束磷石膏试块在受压时的裂缝开展的数量、裂缝宽度及压溃程度都要小于未约束的磷石膏试块,故聚脲涂层可降低试块的破坏程度。

(3) 所有试块的荷载-变形曲线均可划分为初始弹性阶段、弹塑性变形阶段及破坏阶段,但聚脲约束磷石膏试块的峰值变形相对更小,其初始刚度要比磷石膏试块大得多。

(4) 承载力与耗能分析显示,当试块的纤维含量较小时,聚脲涂层对于提升磷石膏试块的承载力

5 结 论

本文对聚脲约束磷石膏的受压性能开展试验研究,探究了试块的破坏机理,总结了试块的破坏模式,分析了荷载-变形曲线、承载力、耗能等关键试验数据,并建立了聚脲约束磷石膏的约束模型及破坏准则,主要研究结论如下:

及耗能能力是有效的。但当纤维含量较高时,纤维将对受压试块的横向膨胀产生抑制作用,故聚脲涂层的约束作用将得不到充分发挥。

(5) 参考 Mander 约束理论,建立了聚脲约束磷石膏的约束模型;借鉴 Drucker - Prager 准则,以试验数据为基础,构建了聚脲约束磷石膏的破坏准则。

参考文献:

- [1] Szafran J, Matusiak A. Crushing strength of concrete rings with a polyurea reinforce system [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2020,101:103407.
- [2] Chen Y S, Wang B, Zhang B, et al. Polyurea coating for foamed concrete panel: an efficient way to resist explosion [J]. Defence Technology, 2020,16:136-149.
- [3] 陈潇硕,周健南,周寅智,等. 聚脲和 CFRP 布加固地下管廊结构抗爆对比试验[J]. 建筑技术, 2020, 51 (12):1511-1513.
- [4] 赵启明,石少卿,李 季,等. 聚脲钢板复合层加固钢筋混凝土板抗爆性能研究[J]. 兵器装备工程学报, 2020,41(8): 214-221.
- [5] Song J H, Lee E T, Eun H C. A study on the improvement of structural performance by glass fiber-reinforced polyurea (GFRPU) reinforcement [J]. Advances in Civil Engineering, 2019,2019:2818219.
- [6] Somarathna H M C C, Raman S N, Mohotti D, et al. Behavior of concrete specimens retrofitted with bio-based polyurethane coatings under dynamic loads [J]. Construction and Building Materials, 2021,270:121860.
- [7] Song J H, Lee E T, Eun H C. A study on the strengthening performance of concrete beam by fiber-reinforced polyurea (FRPU) reinforcement [J]. Advances in Civil Engineering, 2020,2020:6967845.
- [8] 何玉鑫,万建东,华苏东,等. 免煅烧磷石膏砖的制备和性能研究[J]. 材料导报,2012,26(S2):324-327.
- [9] Wu Q, Zhang H G, Chen H N, et al. Seismic behaviour of cast-in-situ phosphogypsum-reinforced concrete grid frame composite walls [J]. Advances in Civil Engineering, 2019,2019:1529137.
- [10] 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.
- [11] 周 理,黄 勇,陈 波,等. 石膏内置模空心楼盖的荷载敏感度分析[J]. 工程建设,2015,47(2):1-5,16.
- [12] 董 坚,马铭杰,张 化. 磷石膏生产石膏空心条板(砌块)可行性分析[J]. 山东建筑工程学院学报, 2000,15(1):81-85.
- [13] 吴 磊,赵志曼,田 睿,等. 短切聚丙烯纤维增强磷建筑石膏强度影响研究[J]. 非金属矿,2018,41(3):4-6.
- [14] 麻鹏飞,杨 文,程宝军,等. 碱激发磷石膏复合胶凝材料力学性能研究[J]. 混凝土与水泥制品, 2021 (8):83-87.
- [15] 朱大勇,王 君,金 旭,等. 耐水型磷石膏砌块的制备及其防水机理的研究[J]. 新型建筑材料,2017,44 (1):68-70,99.
- [16] 曹林涛,汤 文,韩尚宇. 沥青胶结磷石膏粉的防水性能及应用研究[J]. 湖南城市学院学报(自然科学版),2021,30(3):30-33.
- [17] 建筑石膏——力学性能的测定:GB/T 17669. 3—1999 [S]. 北京:中国标准出版社,1999.
- [18] Zhang L C, Zhang A L, Li K, et al. Research on the pretreatment and mechanical performance of undisturbed phosphogypsum[J]. Case Studies in Construction Materials, 2020,13:e00400.
- [19] 祝 捷,谢永祥. 泡沫混凝土强度及应变研究[J]. 混凝土,2010,4(9):124-126.
- [20] 刘建伟. 方钢管约束型钢超高强混凝土轴压短柱的力学性能[J]. 水利与建筑工程学报,2019,17(2):189-193.
- [21] 杨英欣,卢秋如,李 彪,等. 钢管超高性能混凝土短柱轴心受压应力-应变关系试验研究[J]. 水利与建筑工程学报, 2019,17(1):97-102.
- [22] Mander J B, Priestley M J N, Park R. Theoretical stress-strain model for confined concrete[J]. Journal of Structural Engineering ASCE, 1988, 114 (8): 1804-1826.
- [23] 陈向东,李国雄,刘 鼎,等. 真三轴条件下高强度石膏强度与变形特征研究[J]. 重庆科技学院学报(自然科学版),2018,20(6):80-84.