

# 水泥-聚苯乙烯轻质材料的制备及抗冲击性

朱洪波, 李 晨, 闫美珠, 吴梦雪

(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:** 采用半干料压缩成型工艺制备一种水泥-聚苯乙烯轻质材料, 通过压缩试验获得其应力-应变曲线, 采用高低两种冲击能量测试抗冲击性, 利用自制装置测试和计算其对冲击力、冲击能量的吸收比, 分析了水泥掺量以及纤维、乳胶粉对冲击力、冲击能量吸收比的影响。结果表明: 该水泥-聚苯乙烯材料具有与传统聚苯乙烯混凝土完全不同的破坏形式, 不发生脆性破坏, 具有较高的韧性, 在压缩作用下的应变可达到 0.6 以上; 随着水泥掺量增加, 材料对冲击力的吸收比先降低后升高, 加入纤维、乳胶粉可提高材料对冲击力的吸收比; 材料对冲击能量的吸收比先升高后降低, 加入纤维、乳胶粉可提高低水泥掺量下冲击能量的吸收比, 但降低了高水泥掺量下的吸收比。具体分析各种因素的影响规律和作用机理。

**关键词:** 水泥; 聚苯乙烯; 半干料压缩成型; 抗冲击性

**中图分类号:** TU528.2

**文献标志码:** A

## Preparing and Impact Resistance Properties of Lightweight Material with Cement and Expanded Polystyrene

ZHU Hongbo, LI Chen, YAN Meizhu, WU Mengxue

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

**Abstract:** A lightweight material with cement and expanded polystyrene (EPS) is prepared by compressing semi-dry materials molding. The stress-strain curve is achieved by compression test. The absorptions of impact force and impact energy during impaction are tested by a self-made device when two different impact energies are applied. Relationship between impact force absorption, impact energy absorption and cement dosage is analyzed. Effect of fiber and latex on absorption is discussed. The results figure out that this material has a different fracture from normal EPS concrete. Upon compression, the material will reach strain of 0.6 without brittle fracture which represents brilliant toughness. Impact force absorption decreases first and then increases

with the rising of cement dosage, while adding fiber and latex can lead to higher absorption. Impact force absorption increases first and then decreases with the rising of cement dosage, while adding fiber and latex can lead to higher absorption on low cement dosage but lower absorption on high cement dosage. The influence law and mechanism of various factors are analyzed in detail.

**Key words:** cement; expanded polystyrene; compress semi-dry materials molding; impact resistance properties

聚苯乙烯(EPS)混凝土自问世以来, 已受到国内外学者的广泛关注<sup>[1-5]</sup>. Bischoff<sup>[6]</sup>于1990年较早报道了EPS混凝土的吸能性能, 认为其可作为抗冲击材料. 丁国博等<sup>[7]</sup>利用分离式霍普金森压杆(SHPB)研究了EPS混凝土的冲击压缩性能与龄期的关系, 认为其抗冲击性能随养护龄期增加而提高. 胡俊等<sup>[8]</sup>研究了EPS混凝土的动态力学性能, 将其在低应变率下的力学性能变化分为3个阶段. 胡泽斌等<sup>[9]</sup>研究认为, 随着EPS掺量的增加, EPS混凝土的动态吸能性先升后降. 对于水泥基材料的抗冲击性能通常有两种衡量方式: 一种是衡量材料在动态压缩过程中自身破坏所吸收能量的多少, 一般采用SHPB法<sup>[7-9]</sup>; 另一种是衡量材料的冲击韧性, 一般用美国认证协会(ACI 544)推荐的落球法进行<sup>[10-11]</sup>. 这两种方法都是对材料在冲击过程中自身性能的研究, 而对材料在冲击过程中对所围护结构的保护能力——吸收冲击力、冲击能量多少的研究较少, 研究方法也较为繁琐<sup>[12]</sup>. 本文采用半干料压缩成型法制备水泥-聚苯乙烯材料, 将其粘贴在城市地下交通隧道的内壁, 可利用其多孔性起到吸收隧道内交通噪声的作用<sup>[13]</sup>, 并可利用其韧性来吸收交通事故引起的爆炸冲击力; 利用压力试验机研究了材料的应力-应变曲线, 证明了材料具有较好的韧性,

收稿日期: 2013-07-10

基金项目: 国家自然科学基金(51302189, 41002093); 上海市科委科研结合实际工程项目(0231203200)

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, 硕士生, 主要研究方向为水泥基建筑材料. E-mail: lichen\_0712@163.com

可作为抗冲击材料;利用落球法和自制装置,研究了材料对冲击力、冲击能量的吸收性能。

## 1 实验

### 1.1 原材料

水泥标号为 P·II 52.5, 江南小野田水泥有限公司生产, 符合(GB 175—1999)《硅酸盐水泥、普通硅酸盐水泥》标准。聚苯乙烯泡沫颗粒, 上海雷恩节能建材有限公司生产, 颗粒直径为 1~5 mm, 符合(JG 158—2004)《胶粉聚苯颗粒外墙外保温系统》标准。聚丙烯纤维, 平均长度 8 mm, 市售。可再分散乳胶粉, 德国瓦克公司生产, 型号 5010N。

### 1.2 成型方法

采用半干料压缩成型制备水泥-聚苯乙烯材料: 先将水泥、纤维、乳胶粉及水混合, 预拌为浆体, 再加入聚苯颗粒, 制成半干料。将半干料放入模具中, 振捣使其分布均匀。采用压板从模具上方将半干料按照体积比 0.75 进行压缩, 并在压力下保持体积恒定。30 min 后拆模, 并标准养护 28 d。

强度、干密度测试样采用 4 cm×4 cm×16 cm 三联模具成型; 宏观孔隙率、应力-应变曲线、抗冲击性试样采用直径 15.6 cm、高 6 cm 圆柱形模具成型。

### 1.3 测试方法

#### 1.3.1 抗折、抗压强度

按照(GB/T 17671—1999)《水泥胶砂强度检验方法(ISO 法)》进行。

#### 1.3.2 干密度

养护好的试样在 60 °C 烘箱中烘干 24 h 后测量体积和质量, 换算出干密度。

#### 1.3.3 宏观孔隙率

用浸水率计算, 将直径 15.6 cm、高 6 cm 圆柱试样的圆周和圆底面用塑料纸紧密贴合并用石蜡封闭, 然后浸水直至上表面的水溢出试块, 孔隙率通过所浸水体积(根据称重得到)与试样体积的比值来表示。

#### 1.3.4 应力-应变曲线

采用苏州龙盛公司生产的自动控制电子万能试验机进行压缩试验, 压缩速度控制为  $2.0 \text{ kN} \cdot \text{s}^{-1}$ , 由计算机自动采集得到压力-位移曲线, 并换算为应力-应变曲线。

#### 1.3.5 抗冲击性

采用自制测试装置测量抗冲击性能。将试块固定在托盘上, 托盘安装在 NS-YB05S 型高灵敏度重

力传感器(上海天沐自动化仪表有限公司生产, 量程 0~500 kg)上。钢球由空中固定高度下落, 冲击试样中心。通过 NS-YB05S 型数据高速采集器(采集密度 2 000 次·s<sup>-1</sup>)自动记录冲击过程中试块的受力值, 得到冲击力-时间曲线。

采用高、低两种冲击能量进行试验, 即分别采用 0.5 kg 的钢球从 0.75 m 高度落下, 和采用 1 kg 的钢球从 1.5 m 高度落下。通过计算, 得到试块对冲击力的吸收比和冲击能量的吸收比, 衡量试块的抗冲击性。

## 2 实验结果与分析

### 2.1 配合比与力学性能

试验配合比, 试样的密度, 宏观孔隙率及 28 d 抗折、抗压强度见表 1。其中编号分别用纯水泥样(C)、含纤维样(F)和含乳胶粉样(L)与水泥掺量组合表示。

从表 1 可以看出: 随着水泥用量的增加, 水泥-聚苯乙烯材料密度升高, 28 d 的抗折、抗压强度均呈升高趋势; 加入纤维后, 抗压强度略有提高, 抗折强度显著提高, 这体现了纤维良好的增韧效果; 加入乳胶粉后, 抗压强度显著提高, 抗折强度也有较明显的提高, 显示出乳胶粉具有一定的胶结作用与增韧作用; 宏观孔隙率随水泥掺量提高而降低, 水泥掺量由 200 g 提高到 233 g 时降低明显, 此后降低趋势较缓慢, 表明增加水泥掺量能够填充孔隙, 在低密度下填充作用更加显著; 掺加纤维和乳胶粉对密度、宏观孔隙率影响较小。上述结果表明: 提高水泥掺量能够降低材料宏观孔隙率、提高强度, 加入纤维和乳胶粉均可提高强度。

### 2.2 应力-应变曲线

普通混凝土为脆性材料, 其应力-应变曲线接近线性增加。而 EPS 混凝土含有弹性 EPS 颗粒, 其弹性模量小于普通混凝土, 破坏时的应变大于普通混凝土。通常, 传统 EPS 混凝土保持了普通混凝土的脆性性能, 在达到应力极限时仍发生脆性破坏<sup>[14]</sup>。

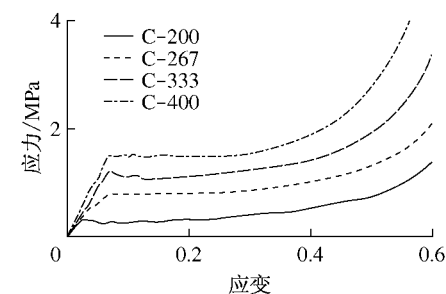
本文制备的水泥-聚苯乙烯材料, EPS 掺量高, 并且通过半干料压缩成型工艺获得较高的孔隙率, 其应力-应变曲线与传统的 EPS 混凝土有较大差别。材料的应力-应变曲线如图 1 所示。

从图 1a 看出: 水泥-聚苯乙烯材料的应力-应变曲线可分为 3 个阶段: 第 1 阶段中应力与应变呈近似线性关系, 显示脆性材料的特征; 第 2 阶段应力保

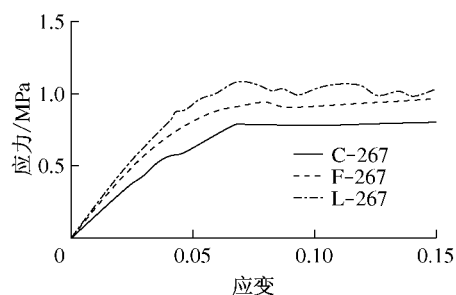
表 1 配合比与力学性能

Tab.1 Mix design and mechanical properties

试样	配合比						密度/ ( $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ )	孔隙率/ %	强度/MPa	
	水泥/g	水/g	水灰 质量比	聚苯颗粒/ $\text{cm}^3$	纤维/g	乳胶粉/g			抗压	抗折
C-200	200	70.0	0.35	1 000			0.323	19.6	0.60	0.45
C-233	233	81.6	0.35	1 000			0.380	9.8	0.71	0.53
C-267	267	93.5	0.35	1 000			0.452	9.0	0.85	0.67
C-300	300	102.0	0.34	1 000			0.516	8.2	1.10	0.75
C-333	333	109.9	0.33	1 000			0.562	7.6	1.41	0.85
C-367	367	117.4	0.32	1 000			0.618	6.0	1.59	0.91
C-400	400	124.0	0.31	1 000			0.675	5.6	1.87	0.97
F-200	200	70.0	0.35	1 000	2.67		0.334	19.4	0.59	0.66
F-233	233	81.6	0.35	1 000	2.67		0.387	9.9	0.70	0.95
F-267	267	93.5	0.35	1 000	2.67		0.462	9.0	0.96	1.25
F-300	300	102.0	0.34	1 000	2.67		0.534	8.3	1.31	1.35
F-333	333	109.9	0.33	1 000	2.67		0.569	7.4	1.24	1.98
F-367	367	117.4	0.32	1 000	2.67		0.632	5.9	1.62	2.07
F-400	400	124.0	0.31	1 000	2.67		0.683	5.2	1.97	2.30
L-200	200	70.0	0.35	1 000		8	0.340	19.3	0.71	0.59
L-233	233	81.6	0.35	1 000		8	0.392	9.7	0.95	0.67
L-267	267	93.5	0.35	1 000		8	0.468	9.1	1.07	0.84
L-300	300	102.0	0.34	1 000		8	0.532	8.0	1.62	0.93
L-333	333	109.9	0.33	1 000		8	0.582	7.3	1.85	0.99
L-367	367	117.4	0.32	1 000		8	0.634	5.8	2.30	1.04
L-400	400	124.0	0.31	1 000		8	0.689	5.3	2.90	1.18



a 纯水泥组不同水泥掺量



b 水泥掺量 267 g 时不同组别

图 1 材料应力-应变曲线

Fig.1 Stress-strain curve of the materials

持恒定,应变继续发展;第 3 阶段后又恢复应力与应变同步上升的趋势。分析认为:在第 1 阶段材料的强度主要来自于水泥石,当应力达到水泥石强度极限

时,水泥石发生脆性破坏,而聚苯颗粒仍依靠水泥胶结在一起,总体结构并未发生溃散;随着应力继续增加,材料中的孔隙和聚苯颗粒受到压缩,进入第 2 阶段;当达到压缩极限后,孔隙与聚苯颗粒被压实,应力随着应变急剧上升。

图 1b 为水泥掺量 267 g 时的应力-应变曲线,可以看出,加入纤维、乳胶粉后,第 1 阶段的破坏应力增大,这是因为第 1 阶段的破坏应力为水泥石发生破坏的强度,即表 1 中测出的材料的抗压强度。加入纤维、乳胶粉还使第 1,2 阶段之间的曲线由折线而趋于平滑曲线,这是因为纤维、乳胶粉具有一定的增韧作用,可以使水泥石脆性性能降低。

与普通混凝土和传统的 EPS 混凝土相比,水泥-聚苯乙烯材料在应力作用下不发生脆性破坏,而是发生较大的弹、塑性形变。材料在应变达到 0.6 时,材料仍被压缩变形的聚苯颗粒所形成的相互搭接网络所聚合在一起,未发生溃散(如图 2),表现出较高的韧性,该特性预示着该材料适合作为抗冲击材料。

### 2.3 材料对冲击力的吸收

试验中取冲击力-时间曲线的峰值作为冲击过程中材料承受的最大冲击力。先进行空载试验,即不放试块直接进行落球冲击,得到无试块时的冲击力

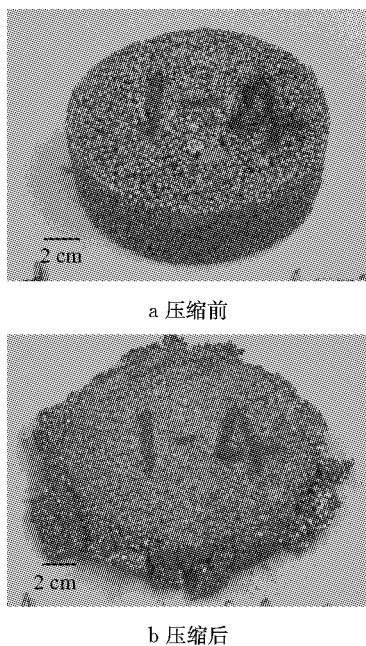


图 2 试样压缩前后的状态对比

Fig.2 Samples before and after compression

$F_0$ . 然后测试有试块时的冲击力  $F$ , 则材料对冲击力的吸收比  $\omega$  可以表示为

$$\omega = \frac{F - F_0}{F_0} \times 100\%$$

每个配合比进行 7 组实验, 并取中间 5 组的平均值. 在高、低两种冲击能量下, 材料对冲击力的吸收比如图 3 所示.

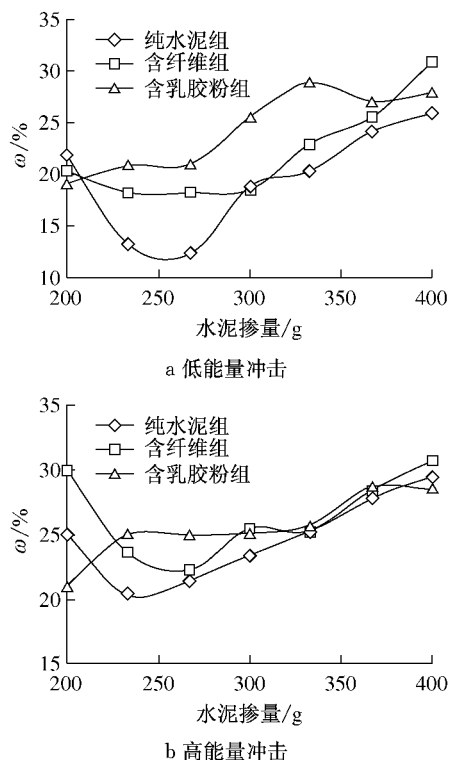


图 3 冲击力吸收比

Fig.3 Impact force absorption ratio

从图 3 中可以看出: 纯水泥组、含纤维组对冲击力的吸收比, 随水泥掺量的上升先降低后升高, 在水泥掺量为 233~267 g 之间达到最低值; 含乳胶粉组对冲击力的吸收比, 随水泥用量的提高而单调上升.

分析认为, 当水泥用量很低时, 材料中聚苯颗粒的比例较高, 水泥对聚苯颗粒的包裹性不强, 胶结性较弱, 材料强度较低. 此时, 材料结构较多依靠高分子聚苯颗粒支撑, 在冲击力的作用下, 聚苯颗粒可发生弹性形变以及一定的塑性形变, 延长冲击力作用时间, 具有较好的吸收冲击力的作用<sup>[15-17]</sup>. 因此, 材料具有较高的冲击力吸收比, 对冲击力的吸收主要来源于聚苯乙烯颗粒. 随着水泥用量的增加, 聚苯颗粒被水泥包裹的程度提高, 材料刚性增加, 强度提高, 聚苯颗粒难以发生形变, 对冲击力的吸收作用减弱, 对冲击力的吸收比逐渐降低.

随着水泥用量的进一步增加, 材料的强度提高, 水泥基体具有多孔材料的特征, 材料通过水泥基体的破坏来吸收冲击力<sup>[18-19]</sup>, 于是对冲击力的吸收比进一步提高.

对于含乳胶粉组, 材料的初始强度较高, 可以看到, L-200 的抗压强度为 0.71 MPa, 已大于或等于 C-233 及 F-233, 而纯水泥组和含纤维组对冲击力的吸收比在水泥用量 233 g 或 267 g 时即开始升高, 因此, 含乳胶粉组对冲击力的吸收比表现出单调上升.

从图 3 还可看出, 加入纤维、乳胶粉可以提高材料对冲击力的吸收作用. 分析认为, 材料破坏时, 纤维发生破坏并与水泥基体之间发生滑移, 延长了冲击力作用时间, 提高材料对冲击力的吸收作用. 加入乳胶粉可以提高材料的弹性, 使材料在相同应力下的弹性形变增大, 延长冲击力的作用时间, 从而提高对冲击力的吸收.

比较不同水泥掺量试样分别在高、低冲击能量下对冲击力的吸收比, 结果如图 4 所示.

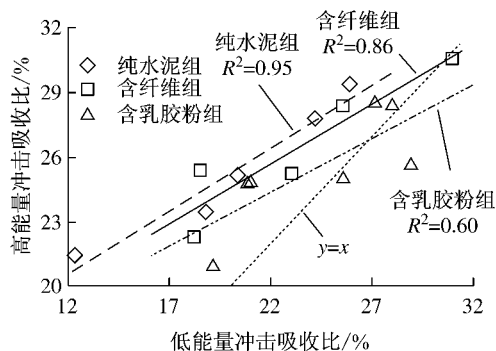


图 4 高、低冲击能量下冲击力吸收比

Fig.4 Impact force absorption on high/low energy

从图4可以看到,不同冲击能量下,试样对冲击能量的吸收比近似成线性关系.其中,纯水泥组的相关性较高,相关系数达到0.95;含纤维组与含乳胶粉组吸收比之间的相关性稍低.这说明,不同结构组成的该类材料对高低冲击力的吸收规律存在差异.图4中,大部分数据点分布于 $y=x$ 线上方,说明在高冲击能量下试样对冲击力的吸收比较低冲击能量下的吸收比高,这是因为高冲击能量下材料的破坏性更大,吸收冲击力的能力更强.

#### 2.4 材料对冲击能量的吸收

在冲击过程中,假设小球刚刚接触试块时速度为 $v_0$ ,离开试块时速度为 $v'$ ,冲击过程中试块吸收的能量 $\Delta E$ 可以表示为

$$\Delta E = \frac{1}{2}mv_0^2 - \frac{1}{2}mv'^2 - \Delta E'$$

式中: $m$ 为试块质量; $\Delta E'$ 为冲击过程中由于装置共振、摩擦等产生的能量耗散,其值约等于不放置试块时计算出的冲击能量吸收值.

$v_0$ 的值可由试块下落过程能量守恒计算,忽略空气阻力,可得

$$mgh = \frac{1}{2}mv_0^2$$

式中 $h$ 为试块下落高度. $v'$ 的值可由动量守恒定律计算

$$\Delta I = mv' + mv_0$$

式中, $\Delta I$ 为冲击过程中小球动量的变化值,可用小球受到的冲量来表示.而冲击过程中,试块发生位移极小,可认为处于受力平衡状态,因此小球受到的力即为重力传感器所测量到的冲击力-时间曲线上的力 $F$ .因此 $\Delta I$ 可表示为

$$\Delta I = \int F(t)dt$$

式中 $t$ 为时间.根据冲击力-时间曲线,即可计算出 $\Delta I$ .

而冲击总能量 $E$ ,可表示为

$$E = mgh$$

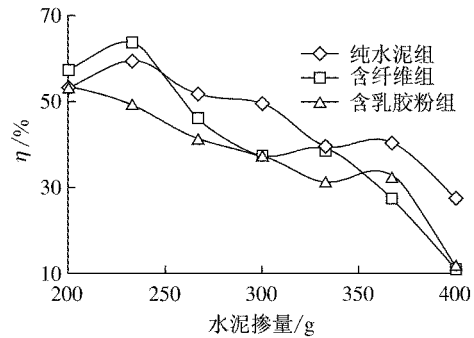
综上所述,计算出冲击过程中试块吸收的能量 $\Delta E$ ,则冲击过程中能量吸收比 $\eta$ 可表示为

$$\eta = \frac{\Delta E}{E} \times 100\%$$

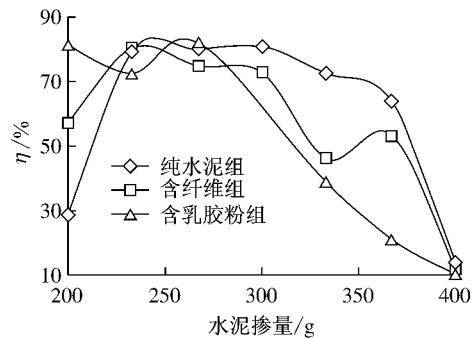
将每个试样所测出的7条冲击力-时间曲线,取最大冲击力处于中间值的曲线,作为能量吸收比计算所应用的曲线.根据以上算法,得到冲击能量吸收比 $\eta$ 曲线如图5所示.

从图5中可以看出,随着水泥掺量的增加,材料

对冲击能量的吸收比呈先增加后降低的趋势,低冲击能量下的吸收比在水泥掺量为233 g时达到最大值,高冲击能量下的吸收比在水泥掺量为233~300 g时达到最大值.



a 低能量冲击



b 高能量冲击

图5 冲击能量吸收比

Fig.5 Impact energy absorption ratio

分析认为,在水泥掺量很低时,材料可以看作由水泥将聚苯乙烯颗粒胶结而成的聚苯乙烯泡沫材料,这种材料具有良好的弹性.在冲击作用下,聚苯乙烯颗粒发生弹性形变与塑性形变.其中,弹性形变尽管能够吸收冲击力,但聚苯乙烯颗粒在钢球被反弹后又将这部分弹性能释放出去,因此材料对能量的吸收值较低.

随着水泥用量的提高,水泥基体的强度逐渐提高,将材料看作水泥基多孔材料.在冲击作用下,气孔内空气被绝热压缩,吸收一定能量,同时,孔壁发生塑性塌陷或脆性破坏,也能够吸收能量<sup>[20]</sup>.因此,材料对冲击能量的吸收逐渐增高并达到一个峰值.然而,随着水泥掺量的进一步增加,孔隙率减小,水泥基体强度提高,孔内空气绝热压缩吸热减少,同时水泥基体的刚性提高,破坏、塑性形变减少,弹性形变增加,因此,材料对冲击能量的吸收又再次减小.

对比图5a与5b,即对比高、低冲击强度下试样对能量的吸收比曲线,可以看出,高冲击能量下吸收

比的峰值对应水泥掺量比低冲击能量下的高。这是因为,高冲击能量能够使更高强度的水泥基体发生破坏与塑性形变,因此,能量吸收比峰值处的水泥掺量较高。

从图 5 还可以看出,加入纤维、乳胶粉后,低水泥掺量下冲击能量吸收比提高,而高水泥掺量下的冲击能量吸收比降低。加入纤维提高了材料的强度,使水泥基体更不易发生塑性破坏,因此曲线向左移动。而加入乳胶粉,在低水泥掺量下,提高了材料的强度,增加了材料破坏对能量的吸收;在高水泥掺量下,提高了材料的弹性,使材料更多地发生弹性形变,吸收能量值减小。

### 3 结论

(1) 采用半干料压缩成型工艺制备出水泥-聚苯乙烯轻质材料,随着水泥掺量的提高,其宏观孔隙率降低、密度升高、抗折和抗压强度提高;加入纤维、乳胶粉可不同程度地提高其抗折、抗压强度。

(2) 材料的应力-应变曲线与传统的 EPS 混凝土有较大差别,可分为 3 个阶段,在应力作用下,材料能够达到较大应变而不发生破坏,具有较好的韧性,适合作为冲击防护材料。

(3) 材料对冲击力的吸收比随水泥掺量的提高先降低后升高,这是因为,低水泥掺量材料可通过聚苯颗粒的弹、塑性形变来吸收冲击力,高水泥掺量材料则通过水泥基体破坏吸收冲击力;加入纤维、乳胶粉均能提高材料对冲击力的吸收比。

(4) 材料对冲击能量的吸收比随水泥掺量的提高而先升高后降低,这是因为,低水泥掺量材料的弹性形变不吸收冲击能量,而在高水泥掺量下,可通过水泥基体破坏对能量的消耗以及孔隙内的空气被压缩来吸收冲击能量,当水泥掺量过高时,水泥基体弹性形变增加,破坏、塑性形变减小,吸收能量减少;加入纤维、乳胶粉提高了低水泥掺量下的能量吸收比,但降低了高水泥掺量下的能量吸收比。

### 参考文献:

- [1] COOK D J. Expanded polystyrene beads as lightweight aggregate for concrete [J]. *Precast Concrete*, 1973, 4(12): 56.
- [2] CHEN Bing, LIU Juanyu. Properties of lightweight expanded polystyrene concrete reinforced with steel fiber [J]. *Cement and Concrete Research*, 2004, 34(7): 1259.
- [3] 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.
- [4] Babu D S, Babu K G, Wee T H. Effect of polystyrene aggregate size on strength and moisture migration characteristics of lightweight concrete [J]. *Cement and Concrete Composites*, 2006, 28(6): 520.
- [5] 赵晓艳,田稳苓,姜忻良,等. EVA 改性 EPS 混凝土微观结构及性能研究[J]. *建筑材料学报*, 2010, 13(2): 243.  
ZHAO Xiaoyan, TIAN Wenling, JIANG Xinliang, et al. Properties and microstructures of EPS lightweight concrete modified with EVA [J]. *Journal of Building Materials*, 2010, 13(2): 243.
- [6] Bischoff P H, Yamura K, Perry S H. Polystyrene aggregate concrete subjected to hard impact [J]. *Proceedings—Institution of Civil Engineers Part 2*, 1990, 89(6): 225.
- [7] 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.
- [8] 胡俊,巫绪涛,胡时胜. EPS 混凝土动态力学性能研究[J]. *振动与冲击*, 2011, 30(7): 205.  
HU Jun, WU Xutao, HU Shisheng. Dynamic mechanical behavior of EPS concrete [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2011, 30(7): 205.
- [9] 胡泽斌,许金韦,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 Jinwei, PENG Gaofeng, et al. Energy-absorption property of expanded polystyrene concrete under impact [J]. *Journal of the Chinese Ceramic Society*, 2010, 38(7): 1173.
- [10] Banthia N, Yan C, Saks K. Impact resistance of fiber reinforced concrete at subnormal temperatures[J]. *Cement and Concrete Composites*, 1998, 20(5): 393.
- [11] 王立成,王海涛,刘汉勇. 钢纤维轻骨料混凝土抗冲击性能试验研究与统计分析[J]. *大连理工大学学报*, 2010, 50(4): 557.  
WANG Licheng, WANG Haitao, LIU Hanyong. Experimental study and statistical evaluation for impact resistance of steel fiber reinforced lightweight aggregate concrete [J]. *Journal of Dalian University of Technology*, 2010, 50(4): 557.
- [12] Sjoblom P O, Hartness J T, Cordell T M. On low-velocity impact testing of composite materials [J]. *Journal of Composite Materials*, 1988, 22(1): 30.
- [13] 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.
- [14] 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.