

doi:10.3963/j.issn.1001-487X.2024.03.018

EPS 混凝土的早龄期抗冲击性能*

周静¹, 王文飞², 胡南³

(1. 太原城市职业技术学院 城建系, 太原 030027; 2. 中交第一公路勘察设计研究院有限公司, 西安 710075;
3. 郑州大学 土木工程学院, 郑州 450001)

摘要: 对早龄期(12 h、24 h、36 h)的 EPS 混凝土进行了动态力学试验, 从动态抗压强度、峰值应变、极限应变和能耗密度等方面分析了冲击速度(4.5 ~ 6.5 m/s)和龄期(12 h、24 h、36 h)对 EPS 混凝土抗冲击性能的影响, 并与 28 d 龄期时 EPS 混凝土的性能进行了对比。结果表明: EPS 混凝土的动态抗压强度、峰值应变、极限应变和能耗密度均具有冲击速度强化效应。随着龄期的增大, EPS 混凝土的动态力学性能指标及其对冲击速度的敏感性不断增大。28 d 龄期时, EPS 混凝土的动态抗压强度、峰值应变、极限应变和能耗密度最大, 其对冲击速度的敏感性最强。EPS 混凝土早龄期具有良好的变形和吸能特性。36 h 龄期时, EPS 混凝土的峰值应变、极限应变和能耗密度分别可达到 28 d 龄期时的 66% ~ 82%、91% ~ 93% 和 72% ~ 78%。

关键词: EPS 混凝土; 抗冲击性能; 龄期; 变形特性; 吸能特性

中图分类号: TU528 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-487X(2024)03-0149-07

Impact Resistance of EPS Concrete at Early Ages

ZHOU Jing¹, WANG Wen-fei², HU Nan³

(1. Department of Urban Construction, Taiyuan City Vocational College, Taiyuan 030027, China;
2. CCCC First Highway Consultants Co., Ltd., Xi'an 710075, China;
3. School of Civil Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: Dynamic mechanical tests were carried out on EPS concrete at early ages (12 h, 24 h and 36 h). Whereafter, the influences of impact velocity (4.5 ~ 6.5 m/s) and age (12 h, 24 h and 36 h) on impact resistance of EPS concrete were analyzed in terms of dynamic compressive strength, peak strain, ultimate strain and energy dissipation density. Additionally, the properties of EPS concrete at early ages were compared with that at the age of 28 d. The results show that the dynamic compressive strength, peak strain, ultimate strain, and energy dissipation density of EPS concrete have an impact on the velocity-strengthening effect. With the increase of age, the dynamic mechanical property indicators of EPS concrete and its sensitivity to impact velocity increase. At the age of 28 d, the dynamic compressive strength, peak strain, ultimate strain and dissipation density of EPS concrete are the maximum, and its sensitivity to impact velocity is the strongest. EPS concrete has good deformation and energy absorption characteristics at the early age. At the age of 36 h, the peak strain, ultimate strain and energy dissipation density of EPS concrete can reach 66% ~ 82%, 91% ~ 93% and 72% ~ 78% of that at the age of 28 d, respectively.

Key words: EPS concrete; impact resistance; age; deformation characteristic; energy absorption characteristic

收稿日期 (Date of reception): 2023-07-17

网络首发日期 (Published online): 2023-10-10

作者简介: 周静 (1979-), 女, 硕士, 讲师, 主要从事道路桥梁工程方面的研究, (E-mail) zhoujingtycszjysxy@163.com。

基金项目: 山东省自然科学基金面上项目 (ZR2021ME004)

About the author: ZHOU Jing (1979-), female, master degree, mainly engaged in road and bridge engineering research, (E-mail) zhoujingtycszjysxy@163.com.

Fund Programs: Natural science Foundation of Shandong Province (ZR2021ME004)

地下工程常在经受施工扰动、地震、爆炸等冲击荷载后变形破坏,支护结构通过吸收冲击波能量可降低其破坏程度^[1]。因此采用变形吸能特性良好的材料作为支护结构可对地下工程起到很好的保护作用^[2]。已有很多学者对于支护结构吸能材料进行了研究,主要集中在泡沫混凝土^[3,4]、轻骨料混凝土材料等方面^[5,6],具有代表性的如 EPS(聚苯乙烯)混凝土^[7,8]。EPS 混凝土具有较好的能量耗散与吸收性能,该材料在冲击荷载下能够充分变形以减轻冲击波对建筑物的破坏,现广泛应用于军用防护工程、民用支护工程中。

国内外学者对冲击荷载下 EPS 混凝土的力学性能进行了大量研究。Hu 等研究了高应变率下 EPS 混凝土的力学性能^[9],发现随着 EPS 掺量的增大,混凝土的强度降低但韧性增强。Bai 等研究了冲击荷载下 EPS 混凝土的变形特性^[10],发现 EPS 可以提高混凝土的变形能力,且 EPS 掺量为 40% 时,提高效果最佳。Zhao 等研究了冲击荷载下 EPS 混凝土的吸能特性^[11],发现随着 EPS 掺量的增大,混凝土的比能量吸收先增大后减小。胡俊等研究了 EPS 混凝土细观动态损伤^[12],发现随着 EPS 掺量和 EPS-水泥浆体界面的增加,混凝土的变形能力不断增强。

上述研究多集中于 28 d 龄期时冲击荷载下 EPS 混凝土的力学性能方面,而对于早龄期 EPS 混

凝土抗冲击性能方面的研究还略有不足。国内外地下工程一般采用钻爆法开挖,实际施工过程中,支护结构混凝土常在未达到标准养护龄期时受到爆破施工的扰动^[13,14]。鉴于此,本文对 12 h、24 h、36 h 和 28 d 龄期的 EPS 混凝土进行了动态力学试验,研究了 EPS 混凝土的早龄期抗冲击性能。

1 试验

1.1 试件制备

试验材料包括水泥、粉煤灰、硅灰、砂、石、EPS 颗粒、水、减水剂、早强剂和速凝剂。水泥:秦岭牌 42.5R P·O 水泥。粉煤灰:韩城电厂 F 类(级粉煤灰)。硅灰:成都布氏机械设备有限公司生产的硅灰,比表面积为 $18 \text{ m}^2/\text{g}$ 。砂:灞河中砂,细度模数为 2.78,堆积密度为 $2630 \text{ kg}/\text{m}^3$ 。石:泾阳县石灰岩碎石,堆积密度为 $2700 \text{ kg}/\text{m}^3$ 。EPS 颗粒:高陵县泡沫厂生产的再生 EPS 颗粒,粒径为 $2 \sim 8 \text{ mm}$,堆积密度为 $25 \text{ kg}/\text{m}^3$ 。减水剂:广州建宝新型建材有限公司生产的 FDN 高效复合减水剂。早强剂与速凝剂:陕西骏仁新型建材有限公司生产的 JR-7 型早强剂和 JR 型速凝剂。制备尺寸为 $\phi 100 \text{ mm} \times 50 \text{ mm}$ 的混凝土试件,混凝土的配合比如表 1 所示。试件制备时, EPS 颗粒体积掺量为 40%。试件的制备流程如图 1 所示。

表 1 EPS 混凝土的配合比(单位: kg/m^3)

Table 1 Mix ratio of EPS concrete(unit: kg/m^3)

水泥	粉煤灰	硅灰	砂	石	EPS 颗粒	水	减水剂	早强剂	速凝剂
386	213.5	29.68	215	386	10	184	5.93	9.65	11.58

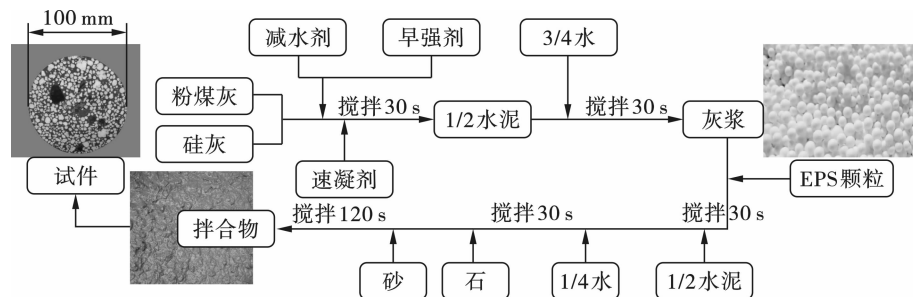


图 1 试件的制备流程

Fig. 1 Preparation process of specimen

1.2 动态力学试验

采用 $\phi 100 \text{ mm}$ SHPB 设备(如图 2 所示)对 12 h、24 h、36 h 和 28 d 龄期时的 EPS 混凝土进行了不同冲击速度(4.5 m/s、5.0 m/s、5.5 m/s、6.0 m/s、7.0 m/s)的动态力学试验。

对于混凝土类脆性材料的动态力学试验,试件

在达到峰值应变前,满足应力均匀性是保证试验结果可靠性的关键。波形整形技术可以延长入射波的上升沿,让试件有足够的时间达到应力均匀。试验时,采用 H62 黄铜片作为波形整形器对入射波进行整形。整形前后入射波的对比如图 3 所示。由图可知,未使用波形整形器时,入射波上升沿时间很短,

仅有 88.75 μs ,且存在高频振荡。试件还没达到应力均匀就已经破坏或接近破坏,试验结果很难反映混凝土真实的动态力学性能。使用波形整形器后,入射波呈现半正弦状,上升沿的时间可达 200 μs ~ 250 μs ,为试件达到应力均匀提供了充足的时间。此外,波形整形器还可以平滑波形,消除高频振荡,从而减少应力波在长距离传播中的弥散失真。

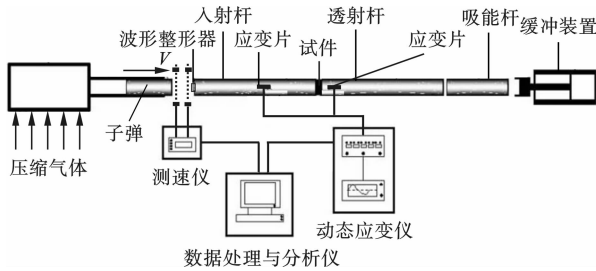


图 2 SHPB 设备示意图

Fig. 2 Schematic diagram of SHPB device

根据应力均匀假设(入射波 + 反射波 = 透射波)可直观地判断试件的应力均匀情况。整形后的波形图对比如图 4 所示。由图可知,使用波形整形器后,入射波和反射波的叠加与透射波非常吻合,试件基本达到应力均匀状态。由此可见,动态力学试验能够较好地满足应力均匀性要求,进而保证了试验的有效性与结果的可靠性。试验数据采用“三波法”处理,动态力学试验结果如表 2 所示。

表 2 动态力学试验结果

Table 2 Dynamic mechanical tests results

龄期	冲击速度/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	动态抗压 强度/MPa	峰值应变/ 10^{-3}	极限应变/ 10^{-3}	能耗密度/ ($\text{J} \cdot \text{cm}^{-3}$)
12 h	4.5	14.5	5.30	12.44	15.7
	5.0	15.7	5.70	15.19	16.7
	5.5	16.7	5.96	18.26	17.4
	6.0	17.2	6.14	19.99	18.0
	6.5	18.9	6.30	22.34	19.0
24 h	4.5	20.7	5.60	13.07	22.7
	5.0	23.3	6.10	16.54	24.7
	5.5	25.7	6.45	20.06	26.0
	6.0	27.8	6.65	22.39	28.8
	6.5	29.8	7.41	24.19	30.3
36 h	4.5	24.2	5.99	14.12	27.2
	5.0	30.3	6.44	17.90	33.3
	5.5	34.5	7.20	21.09	36.4
	6.0	36.5	7.89	23.65	39.5
	6.5	38.7	8.28	25.70	41.4
28 d	4.5	37.7	7.34	15.20	37.7
	5.0	43.6	7.95	19.41	42.6
	5.5	50.9	8.83	23.10	48.9
	6.0	54.6	10.47	25.61	51.6
	6.5	59.0	12.51	27.97	55.0

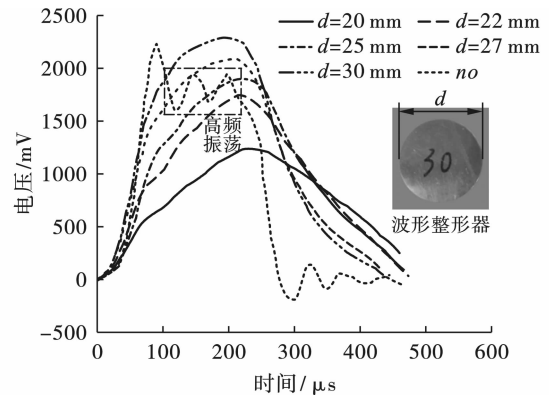


图 3 整形前后入射波的对比

Fig. 3 Comparison of incident waves before and after shaping

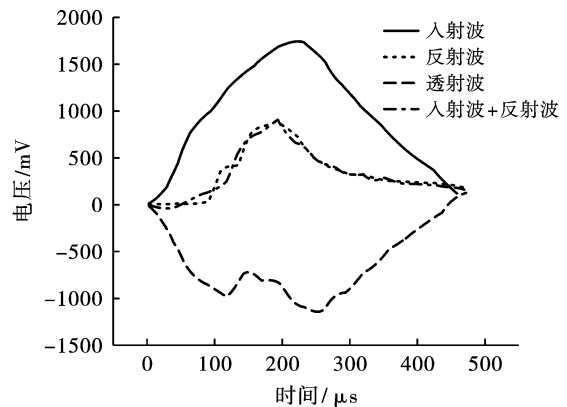


图 4 整形后的波形图

Fig. 4 Waveform after shaping

2 结果与讨论

2.1 动态抗压强度

动态抗压强度(f_{cd})为EPS混凝土动态应力-应变曲线上的峰值应力,表征EPS混凝土的强度特性。冲击荷载下EPS混凝土的动态抗压强度如图5所示。由图可知,不同龄期下EPS混凝土的动态抗压强度均具有冲击速度强化效应。相同龄期时,随着冲击速度的增大,EPS混凝土的动态抗压强度不断增大。冲击速度相同时,随着龄期的增大,EPS混凝土的动态抗压强度不断增大。且随着龄期的增大,EPS混凝土动态抗压强度的冲击速度强化效应越显著,即冲击速度增大幅度相同时,随着龄期的增大,EPS混凝土动态抗压强度的增大幅度逐渐增大。采用函数 $f_{cd} = A_1 + B_1 V$ 对数据拟合,拟合结果如式(1)所示。相关系数 R^2 均大于0.92,表明拟合效果良好。拟合直线的斜率 B_1 为动态抗压强度的冲击速度效应系数,反映了EPS混凝土动态抗压强度对冲击速度的敏感性。 B_1 越大,动态抗压强度对冲击速度的敏感性越强,则动态抗压强度的冲击速度强化效应越显著。随着龄期的增大,EPS混凝土的 B_1 不断增大,动态抗压强度对冲击速度的敏感性不断增强。12 h龄期时,EPS混凝土的 B_1 为2.06,24 h、36 h龄期时,EPS混凝土的 B_1 较12 h龄期时分别增大了120.39%、241.75%。36 h龄期时,EPS混凝土的 B_1 可达到28 d龄期时的65.67%。为了表征EPS混凝土早龄期时强度特性的发展程度,定义 $f_{cd}(t/28 d)$ 为早龄期时EPS混凝土的动态抗压强度与28 d龄期时动态抗压强度的比值。EPS混凝土的 $f_{cd}(t/28 d)$ 如图6所示。由图可知,随着龄期的增大,EPS的 $f_{cd}(t/28 d)$ 不断增大。EPS混凝土的 $f_{cd}(12 h/28 d)$ 为31%~38%, $f_{cd}(24 h/28 d)$ 、 $f_{cd}(36 h/28 d)$ 分别为50%~55%、64%~70%。24 h和36 h龄期时EPS混凝土的动态抗压强度均超过了28 d龄期时的一半。

$$\begin{aligned} 12 \text{ h} \quad f_{cd} &= 5.27 + 2.03V \quad R^2 = 0.967 \\ 24 \text{ h} \quad f_{cd} &= 0.49 + 4.54V \quad R^2 = 0.996 \\ 36 \text{ h} \quad f_{cd} &= -5.88 + 7.04V \quad R^2 = 0.922 \\ 12 \text{ h} \quad f_{cd} &= -9.8 + 10.72V \quad R^2 = 0.980 \end{aligned} \quad (1)$$

冲击荷载和准静态荷载下混凝土内部裂缝的演化方式有所不同。在准静态荷载下,宏观裂缝的萌生来源于过渡区,而后主要沿着骨料和水泥浆体的界面扩展,最终产生一条和多条主裂缝导致混凝土破坏。而冲击荷载下,荷载作用时间很短,混凝土变

形的速度非常快,裂缝没有足够的时间沿着最薄弱的界面扩展,而是沿着最短路径扩展。因此,冲击荷载下混凝土内部骨料会发生破坏,且冲击速度越大,混凝土的动态抗压强度越大。随着龄期的增大,混凝土内部结构逐渐密实,水泥浆体的强度增大,水泥浆体与骨料、EPS颗粒的粘结增强。因此随着龄期的增大,EPS混凝土的动态抗压强度不断增大。混凝土发生破坏吸收的能量大小与其内部结构密切相关。混凝土内部结构越密实,破坏时所吸收的能量越多。当冲击速度增加量相同时,龄期越大的混凝土其吸收能量的增加量越大,故其动态抗压强度增加量越大。所以EPS混凝土动态抗压强度对冲击速度的敏感性随龄期的增大而增强。见图6。

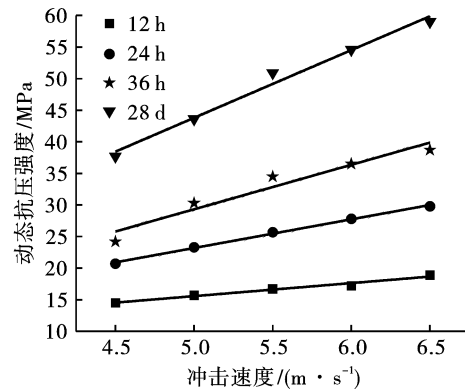


图5 EPS混凝土的动态抗压强度

Fig. 5 Dynamic compressive strength of EPS concrete

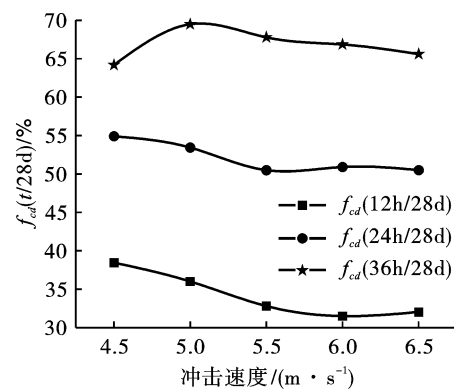


图6 EPS混凝土的 $f_{cd}(t/28 d)$

Fig. 6 The $f_{cd}(t/28 d)$ of EPS concrete

2.2 峰值应变

峰值应变(ε_p)为EPS混凝土动态应力-应变曲线上峰值应力所对应的应变,表征EPS混凝土失去承载能力时的变形。冲击荷载下EPS混凝土的峰值应变如图7所示。由图可知,不同龄期时EPS混凝土的峰值应变均具有冲击速度效应,即随着冲击速度(V)的增大,EPS混凝土的峰值应变不断增大。

冲击速度相同时,随着龄期的增大,EPS 混凝土的峰值应变也不断增大。采用函数 $\varepsilon_p = A_2 + B_2 V$ 对数据拟合,拟合结果如式(2)所示,拟合效果良好。拟合直线的斜率 B_2 为峰值应变的冲击速度效应系数。由式(2)可知,随着龄期的增大,EPS 混凝土峰值应变的冲击速度效应系数不断增大,峰值应变对冲击速度的敏感性逐渐增强。28 d 龄期时,EPS 混凝土峰值应变的冲击速度效应系数分别较 12 h、24 h、36 h 龄期时增大了 4.27 倍、2.08 倍、1.13 倍。为了表征 EPS 混凝土早龄期时峰值应变的发展程度,定义 $\varepsilon_p(t/28 d)$ 为早龄期时聚苯乙烯混凝土的峰值应变与 28 d 龄期时的比值。EPS 混凝土的 $\varepsilon_p(t/28 d)$ 如图 8 所示。由图可知,随着龄期的增大,EPS 混凝土的 $\varepsilon_p(t/28 d)$ 不断增大。EPS 混凝土的 $\varepsilon_p(12 h/28 d)$ 、 $\varepsilon_p(24 h/28 d)$ 、 $\varepsilon_p(36 h/28 d)$ 分别为 50% ~ 72%、59% ~ 76%、66% ~ 82%。由此可见,EPS 混凝土早龄期的峰值应变均超过 28 d 龄期时的一半。

$$\begin{aligned}
 12 \text{ h} \quad \varepsilon_p &= 3.196 + 0.488V \quad R^2 = 0.949 \\
 24 \text{ h} \quad \varepsilon_p &= 1.855 + 0.834V \quad R^2 = 0.950 \\
 36 \text{ h} \quad \varepsilon_p &= 0.527 + 1.206V \quad R^2 = 0.985 \\
 12 \text{ h} \quad \varepsilon_p &= -4.726 + 2.572V \quad R^2 = 0.928
 \end{aligned}
 \tag{2}$$

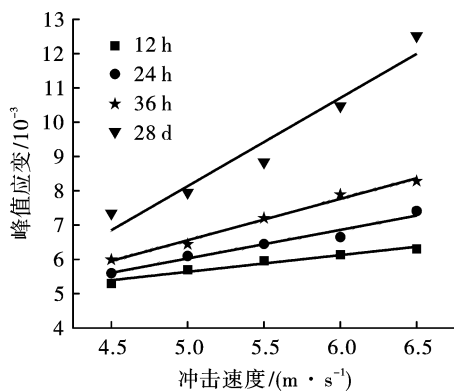


图 7 EPS 混凝土的峰值应变
Fig. 7 Peak strain of EPS concrete

2.3 极限应变

极限应变(ε_u)为 EPS 混凝土动态应力-应变曲线上的最大应变,是分析混凝土动态压缩变形特性的重要参数。冲击荷载下 EPS 混凝土的极限应变如图 9 所示。由图可知,龄期相同时,随着冲击速度(V)的增大,EPS 混凝土的极限应变不断增大。冲击速度相同时,随着龄期的增大,EPS 混凝土的极限应变也不断增大。采用函数 $\varepsilon_u = A_3 + B_3 V$ 对数据拟合,拟合结果如式(3)所示,拟合效果良好。拟合直

线的斜率 B_3 为极限应变的冲击速度效应系数。由式(3)可知。随着龄期的增大,EPS 混凝土极限应变的冲击速度效应系数不断增大,极限应变对冲击速度的敏感性不断增强。12 h、24 h、36 h 龄期时,EPS 混凝土极限应变的冲击速度效应系数分别为 28 d 龄期时的 77.50%、88.50%、91.08%。为了表征 EPS 混凝土早龄期时极限应变的发展程度,定义 $\varepsilon_u(t/28 d)$,其计算方法与 $\varepsilon_p(t/28 d)$ 一致。EPS 混凝土的 $\varepsilon_u(t/28 d)$ 如图 10 所示。由图可知,随着龄期的增大,EPS 混凝土的 $\varepsilon_u(t/28 d)$ 不断增大。EPS 混凝土的 $\varepsilon_u(12 h/28 d)$ 、 $\varepsilon_u(24 h/28 d)$ 、 $\varepsilon_u(36 h/28 d)$ 分别为 78% ~ 82%、85% ~ 87%、91% ~ 93%。由此可见,EPS 混凝土早龄期的极限应变发展程度较高,36 h 龄期时的极限应变已接近 28 d 龄期时的极限应变。

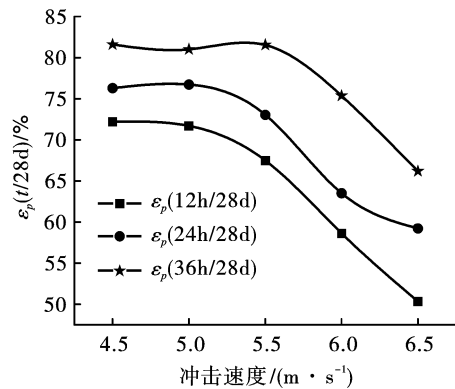


图 8 EPS 混凝土的 $\varepsilon_p(t/28 d)$
Fig. 8 The $\varepsilon_p(t/28 d)$ of EPS concrete

$$\begin{aligned}
 12 \text{ h} \quad \varepsilon_u &= -9.146 + 4.92V \quad R^2 = 0.989 \\
 24 \text{ h} \quad \varepsilon_u &= -11.649 + 5.618V \quad R^2 = 0.974 \\
 36 \text{ h} \quad \varepsilon_u &= -11.309 + 5.782V \quad R^2 = 0.981 \\
 12 \text{ h} \quad \varepsilon_u &= -12.656 + 6.348V \quad R^2 = 0.977
 \end{aligned}
 \tag{3}$$

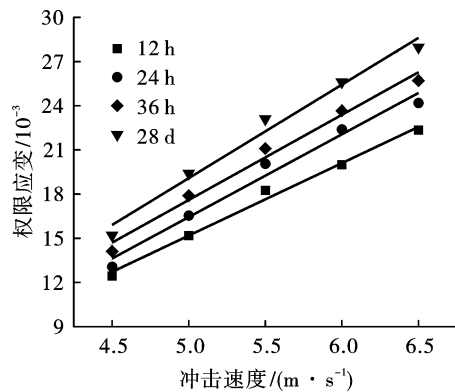
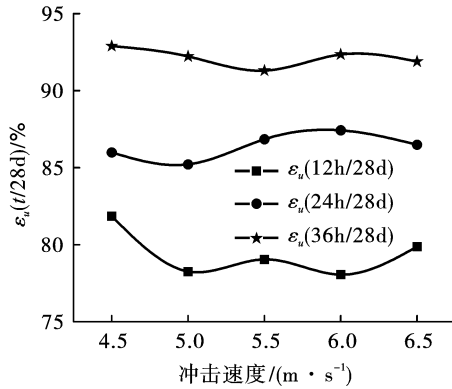


图 9 EPS 混凝土的极限应变
Fig. 9 Ultimate strain of EPS concrete

图 10 EPS 混凝土的 $\varepsilon_u(t/28d)$ Fig. 10 The $\varepsilon_u(t/28d)$ of EPS concrete

在冲击荷载下,混凝土裂缝沿最短路径扩展^[15]。且冲击速度越大,混凝土的裂缝数量越多(如图 11 所示)。所以随着冲击速度的增大,混凝土的变形不断增大。随着龄期的增大,混凝土内部结构逐渐密实,因而其变形能力和变形性能指标对冲击速度的敏感性逐渐增强。随着龄期的增大,EPS 颗粒与水泥浆体的粘结增强,EPS 颗粒的“吸能缓冲”作用逐渐发挥^[16]。所以 EPS 混凝土的 $\varepsilon_p(t/28d)$ 、 $\varepsilon_u(t/28d)$ 随龄期的增大而增大。尤其是对于极限应变,即使 EPS 混凝土已经破坏,但 EPS 颗粒未完全破碎,故其作用可继续发挥。因此 $\varepsilon_u(t/28d)$ 均大于 78%,甚至 $\varepsilon_u(36h/28d)$ 大于 90%。

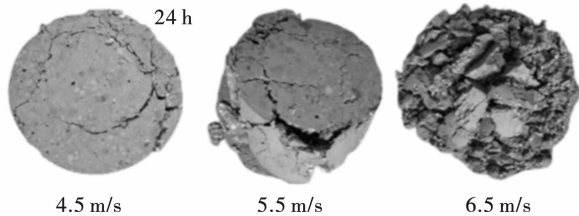


图 11 EPS 混凝土的破坏形态

Fig. 11 Failure pattern of EPS concrete

2.4 能耗密度

能耗密度 (Edd) 指单位体积 EPS 混凝土吸收能量的大小,由式(4)计算得到,反映了 EPS 混凝土的吸能特性。

$$Edd = \frac{A_e E_e C_e}{V_s} \int_0^t [\varepsilon_I^1(t) - \varepsilon_R^2(t) - \varepsilon_T^2(t)] dt \quad (4)$$

式中: A_e 、 C_e 、 E_e 分别表示杆的横截面积、波速和弹性模量; ε_I 、 ε_T 、 ε_R 分别表示入射、透射、反射的应变; V_s 表示试件的体积。冲击荷载下 EPS 混凝土的能耗密度如图 12 所示。由图可知, EPS 混凝土的能耗密度具有冲击速度强化效应。且冲击速度 (V) 相同时,随着龄期的增大, EPS 混凝土的能耗密度不

断增大。采用函数 $Edd = A_4 + B_4 V$ 对数据拟合,拟合结果如式(5)所示,拟合效果良好。拟合直线的斜率 B_4 为能耗密度的冲击速度效应系数。由式(5)可知,随着龄期的增大, EPS 混凝土能耗密度的冲击速度效应系数不断增大,能耗密度对冲击速度的敏感性不断增强。12 h、24 h、36 h 龄期时, EPS 混凝土能耗密度的冲击速度效应系数分别为 28 d 龄期时的 18.12%、44.27%、79.36%。为了表征 EPS 混凝土早龄期时能耗密度的发展程度,定义 $Edd(t/28d)$ 为早龄期时 EPS 混凝土的能耗密度与 28 d 龄期时能耗密度的比值。EPS 混凝土的 $Edd(t/28d)$ 如图 13 所示。由图可知,随着龄期的增大, EPS 混凝土的 $Edd(t/28d)$ 不断增大。EPS 混凝土的 $Edd(12h/28d)$ 、 $Edd(24h/28d)$ 、 $Edd(36h/28d)$ 分别为 34%~42%、53%~60%、72%~78%。由此可见, EPS 混凝土 36 h 龄期时的能耗密度发展程度较高。

$$12h \quad Edd = 8.67 + 1.58V \quad R^2 = 0.989$$

$$24h \quad Edd = 5.27 + 3.86V \quad R^2 = 0.985$$

$$36h \quad Edd = -2.5 + 6.92V \quad R^2 = 0.940$$

$$12h \quad Edd = -0.8 + 8.72V \quad R^2 = 0.970$$

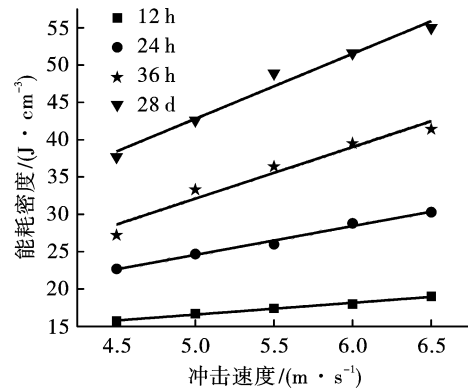


图 12 EPS 混凝土的能耗密度

Fig. 12 Edd of EPS concrete

混凝土的破坏是由于裂缝的产生和扩展导致,而裂缝的扩展需要一定的时间。冲击荷载下无法提供足够的时间进行裂缝扩展,因而裂缝扩展速度加快、数量增多。随着裂缝数量的增多,混凝土吸收的能量就增大。因此 EPS 混凝土的能耗密度随着冲击速度的增大而增大。EPS 颗粒的空腔结构决定了其具有良好的能量吸收特性。当 EPS 混凝土受到冲击荷载时, EPS 颗粒通过空腔结构的变形、坍塌、破裂、胞壁摩擦等各种形式耗散大量能量,从而有效提高 EPS 混凝土的吸能特性^[17]。随着龄期的增大,水泥持续水化, EPS 颗粒和水泥浆体的黏结强度增

大, EPS 颗粒的“吸能缓冲”作用逐渐发挥。因此,随着龄期的增大, EPS 混凝土的吸能特性及能耗密度对冲击速度的敏感性逐渐增大。

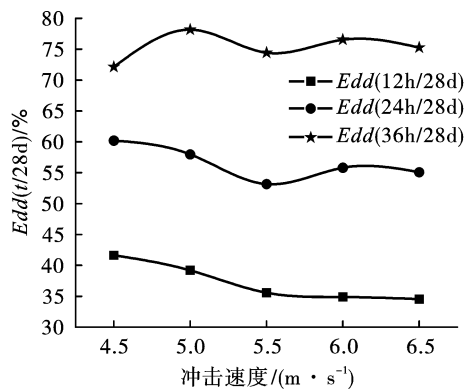


图13 EPS混凝土的 $Edd(t/28d)$

Fig. 13 The $Edd(t/28d)$ of EPS concrete

3 结论

研究了 EPS 混凝土的早龄期抗冲击性能,发现了早龄期的 EPS 混凝土具有良好的变形和吸能特性,研究结论有利于促进 EPS 混凝土在地下工程支护结构中的应用。主要结论如下:

(1) EPS 混凝土的动态抗压强度、峰值应变、极限应变和能耗密度均具有冲击速度强化效应。随着冲击速度的增大, EPS 混凝土的动态抗压强度、峰值应变、极限应变和能耗密度均不断增大。

(2) 随着龄期的增大, EPS 混凝土的动态抗压强度、峰值应变、极限应变和能耗密度均不断增大,动态抗压强度、峰值应变、极限应变和能耗密度对冲击速度的敏感性不断增强。

(3) EPS 混凝土早龄期具有良好的变形特性和吸能特性。36 h 龄期时, EPS 混凝土的峰值应变、极限应变和能耗密度分别可达到 28 d 龄期时的 66% ~ 82%、91% ~ 93% 和 72% ~ 78%。

参考文献 (References)

- [1] 周成嵩,杨鹏飞,张红东,等. 深埋隧道软岩大变形与支护结构受力监测分析[J]. 施工技术(中英文), 2022, 51(22): 120-125, 131.
- [1] ZHOU Cheng-song, YANG Peng-fei, ZHANG Hong-dong, et al. Monitoring and analysis of large deformation of soft rock and support structure in deep buried tunnel[J]. Construction Technology (Chinese and English), 2022, 51(22): 120-125, 131. (in Chinese)
- [2] 于泽明,陈艳,马嵘萍,等. 动/静荷载作用纤维-矿粉-聚苯乙烯混凝土吸能特征研究[J]. 材料导报, 2021, 35(S2): 669-677.
- [2] YU Ze-ming, CHEN Yan, MA Rong-ping, et al. Study on energy absorption characteristics of fiber-mineral-polystyrene concrete under dynamic/static load[J]. Materials Review, 2021, 35(S2): 669-677. (in Chinese)
- [3] 郝寅洪,孙浩,秦立达,等. 微集料增强粉煤灰泡沫混凝土配合比试验[J]. 功能材料, 2022, 53(10): 10229-10236.
- [3] HAO Yun-hong, SUN Hao, QIN Li-da, et al. Mixing ratio test of fly ash foamed concrete reinforced by micro-aggregate[J]. Journal of Functional Materials, 2022, 53(10): 10229-10236. (in Chinese)
- [4] LIU Chen-xu, WANG Chang-bai, XIAO Wei, et al. Study on the performance of calcined spent waterglass foundry sand in alkali-activated foam concrete[J]. Construction and Building Materials, 2023, 378: 131151.
- [5] 叶艳霞,王宗彬,谢夫林,等. 钢纤维增强高强轻骨料混凝土的力学性能[J]. 建筑材料学报, 2021, 24(1): 63-70.
- [5] YE Yan-xia, WANG Zong-bin, XIE Fu-lin, et al. Mechanical properties of steel fiber reinforced high-strength lightweight aggregate concrete[J]. Journal of Building Materials, 2021, 24(1): 63-70. (in Chinese)
- [6] LUCYNA D. Size effect in compressive strength tests of cored specimens of lightweight aggregate concrete[J]. Materials, 2020, 13(5): 1187.
- [7] 胡俊,丁克伟,韦璐. EPS 混凝土静态压缩和劈裂性能[J]. 建筑材料学报, 2015, 18(5): 737-741.
- [7] HU Jun, DING Ke-wei, WEI Lu. Static compression and splitting properties of EPS concrete[J]. Journal of Building Materials, 2015, 18(5): 737-741. (in Chinese)
- [8] 刘芬,黄录野,马荣鑫. EPS 填充混凝土随机细观模型损伤的数值模拟[J]. 计算机辅助工程, 2017, 26(3): 66-71.
- [8] LIU Fen, HUANG Lu-ye, MA Rong-xin. Numerical simulation of random mesoscopic damage of EPS filled concrete[J]. Computer-aided Engineering, 2017, 26(3): 66-71. (in Chinese)
- [9] HU Ze-bin, XU Jin-yu, ZHU Jie, et al. Research on the mechanical behavior of styropor concrete at high strain rates[J]. Advanced Materials Research, 2010, 168-170: 2086-2091.
- [10] BAI Er-lei, XU Jin-yu, GAO Zhi-gang. Study on deformation property of eps concrete under impact loading[J]. Applied Mechanics and Materials, 2011, 71-78: 809-814.

- and the Thirteenth Annual Conference of the Chinese Society of Tunneling and Underground Engineering, Southwest Research Institute of China Railway, 2004; 5. (in Chinese)
- [18] 陈庆凯, 夏亚伟, 刘占富, 等. 约束条件对乳化炸药殉爆距离影响的研究[J]. 矿业研究与开发, 2017, 37(1): 5.
- [18] CHEN Qing-kai, XIA Ya-wei, LIU Zhan-fu, et al. The effect of constraint conditions on the gap distance of emulsion explosive[J]. Mining Research and Development, 2017, 37(1): 5. (in Chinese)
- [19] 李启月, 曾海登, 赵新浩, 等. 炮孔约束下双槽聚能管对乳化炸药殉爆距离影响的研究[J]. 矿冶工程, 2020, 40(6): 1-4, 12.
- [19] LI Qi-yue, ZENG Hai-deng, ZHAO Xin-hao, et al. Influence of double groove energy gathering tubes on the detonation distance of emulsion explosives under constraint of blast hole[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2020, 40(6): 1-4, 12. (in Chinese)
- [20] 姜家明, 杨 翎, 马朝阳, 等. PVC 间隔装药光面爆破技术在掘进爆破中的应用[J]. 采矿技术, 2023, 23(2): 80-84.
- [20] JIANG Jia-ming, YANG Ling, MA Zhao-yang, et al. Application of PVC spacer charging surface blasting technology in tunneling blasting[J]. Mining Technology, 2023, 23(2): 80-84. (in Chinese)
- [21] 王利侠, 周 涛, 贺海民, 等. 聚能射流引爆屏蔽 B 炸药的数值模拟及试验[J]. 爆破器材, 2015, 44(5): 56-60.
- [21] WANG Li-xia, ZHOU Tao, HE Hai-min, et al. Numerical simulation and experimental investigation of initiation of shielded composition b impacted by shaped charge jet[J]. Explosive Materials, 2015, 44(5): 56-60. (in Chinese)
- [22] 梁 斌, 余春祥, 聂 源, 等. 不同口径聚能装药射流引爆带壳装药数值模拟[J]. 成都大学学报(自然科学版), 2021, 40(3): 310-317.
- [22] LIANG Bin, YU Chun-xiang, NIE Yuan, et al. Numerical simulation of different caliber shaped charge jet initiating different thickness shelled explosive[J]. Journal of Chengdu University (Natural Science Edition), 2021, 40(3): 310-317. (in Chinese)

(上接第 155 页)

- [11] ZHAO De-hui, XU Jin-yu, BAI Er-lei. Study on toughening effect in EPS concrete[J]. Applied Mechanics and Materials, 2011, 105-107: 1717-1722.
- [12] 胡 俊, 任建伟, 吴德义. 冲击荷载下 EPS 混凝土微观动态损伤分析[J]. 硅酸盐通报, 2018, 37(6): 1903-1907, 1913.
- [12] HU Jun, REN Jian-wei, WU De-yi. Microscopic dynamic damage analysis of EPS concrete under impact load[J]. Bulletin of Silicate, 2018, 37(6): 1903-1907, 1913. (in Chinese)
- [13] 李胜林, 凌天龙, 张会歌, 等. 早龄期混凝土动态力学性能实验研究[J]. 矿业科学学报, 2020, 5(5): 502-510.
- [13] LI Sheng-lin, LING Tian-long, ZHANG Hui-ge, et al. Experimental study on dynamic mechanical properties of concrete at early age[J]. Journal of Mining Science, 2020, 5(5): 502-510. (in Chinese)
- [14] 郭东明, 闫鹏洋, 凡龙飞, 等. 喷层混凝土-围岩组合体波动特性及动力特性研究[J]. 振动与冲击, 2018, 37(24): 85-91, 136.
- [14] GUO Dong-ming, YAN Peng-yang, FAN Long-fei, et al. Study on wave and dynamic characteristics of shotcrete and surrounding rock composite[J]. Journal of Vibration and Shock, 2018, 37(24): 85-91, 136. (in Chinese)
- [15] 王志航, 白二雷, 许金余, 等. 聚合物改性碳纤维增强混凝土的动态压缩力学性能[J]. 复合材料学报, 2023, 40(3): 1586-1597.
- [15] WANG Zhi-hang, BAI Er-lei, XU Jin-yu, et al. Dynamic compressive mechanical properties of polymer modified carbon fiber reinforced concrete[J]. Journal of Composite Materials, 2023, 40(3): 1586-1597. (in Chinese)
- [16] 丁国博, 许金余. 早强 EPS 混凝土动态压缩力学行为的 SHPB 试验研究[J]. 混凝土, 2011(1): 28-33.
- [16] DING Guo-bo, XU Jin-yu. Study on dynamic compressive mechanical behavior of early-strength EPS concrete by SHPB test[J]. Concrete, 2011(1): 28-33. (in Chinese)
- [17] 于周平, 杨伟军, 黄登科, 等. 纤维对聚苯颗粒混凝土力学性能影响的研究[J]. 混凝土, 2022(11): 68-72, 76.
- [17] YU Zhou-ping, YANG Wei-jun, HUANG Deng-ke, et al. Study on effect of fiber on mechanical properties of polystyrene granular concrete[J]. Concrete, 2022(11): 68-72, 76. (in Chinese)