DOI: 10.11883/1001-1455(2016)02-0279-06

聚酯纤维对透水沥青混凝土冲击压缩性能的影响*

吴金荣,马芹永
(安徽理工大学矿山地下工程教育部工程研究中心,安徽 淮南 232001)

摘要: 为研究聚酯纤维对透水沥青混凝土冲击压缩性能的影响,采用∅74 mm 钢质分离式霍普金森压杆装置对掺杂不同质量分数的聚酯纤维透水沥青混凝土进行冲击压缩实验。在静态和 4 个应变率下的实验结果表明,透水聚酯纤维沥青混凝土是应变率敏感性材料,具有较强应变率效应。透水聚酯纤维沥青混凝土具有较好的延展性,动态应力应变曲线分为 3 个阶段:弹性变形阶段、塑性变形阶段和破坏阶段。当应变率相同时,随着掺杂聚酯纤维质量分数的增大,透水沥青混凝土的冲击抗压强度呈现出先升高后降低的变化规律,掺杂聚酯纤维的质量分数为 0.40%时,冲击抗压强度达到最大。冲击抗压强度约为静态抗压强度的 8~13 倍。

关键词: 固体力学;冲击压缩性能;抗压强度;应变率效应;SHPB;聚酯纤维;透水沥青混凝土
中图分类号: O347.3 **国标学科代码**: 13015 **文献标志码**: A

随着交通运输事业的快速发展,沥青路面在充分发挥表面平整、行车舒适、噪音小、无扬尘等优点的同时,也暴露出一些问题。普通沥青路面是不透水的,雨雪天路面积水无法及时排除,使路面抗滑性能下降,交通事故频发,严重影响了行车安全。而采用透水沥青路面能有效解决上述问题。

目前,对透水沥青路面的研究主要集中在材料结构组成设计和静态性能方面。R. B. Mallick 等[1]对开级配沥青磨耗层(open graded friction course, OGFC)在原材料、配合比设计方法和面层厚度等方面进行了改进。P. Herrington 等[2]对肯塔堡飞散实验(马歇尔试件在洛杉矶实验机内旋转撞击规定次数后,散落混合料的质量分数)进行了改进,增加加速老化的过程,研究了透水沥青路面的耐久性问题。为了解决透水沥青路面强度不高的问题,B. Simon 等[3]将水泥掺加到透水沥青混合料中,使用效果较好,满足了强度和透水的双重功效。国内学者也进行了大量的实验,得到了一些有价值的研究成果[4-8]:不同改性沥青类型对透水沥青路面的性能有着不同的影响,应区别对待;采用苯乙烯-丁二烯-苯乙烯嵌段聚合物(styrene-butadiene-styrene,SBS)改性沥青掺加纤维来代替 TAFPACK-super(TPS)高粘度改性沥青,或采用环氧改性沥青混合料,均能满足透水沥青路面的各项指标要求;透水沥青混合料中可以掺加水泥、消石灰、生石灰等不同种类的填料,以取代部分矿粉,能够改善其水稳性。而透水沥青路面动态性能方面的研究很少。

本文中实验采用的透水沥青混凝土掺杂了不同质量分数聚酯纤维配制而成,并采用∅74 mm 钢质 SHPB 装置进行冲击压缩实验,得到掺杂不同质量分数聚酯纤维和应变率对透水沥青混凝土材料冲击压缩性能的影响及变化规律,可为透水沥青路面的推广应用提供理论依据。

1 实验材料与试件成形

实验采用细粒式 PAC-13 型透水沥青混凝土,通过不同筛孔口径 16.000、13.200、9.500、4.750、2.360、1.180、0.600、0.300、0.150 和 0.075 mm 的质量分数分别为 100.0%、95.0%、65.0%、15.0%、12.0%、12.0%、9.5%、7.5%、5.5%和 4.0%。填料为石灰岩磨细矿粉,掺杂的质量分数为 4%。沥青为 SBS 改性沥青,其针入度(25 ℃,100 g,5 s)为 4.81 mm,延度(25 ℃,5 cm/min)大于 100 cm,软化点为 81.5 ℃,25 ℃时的相对密度为 1.043。

* **收稿日期**: 2014-08-13; **修回日期**: 2014-11-10
基金项目: 安徽省高校省级自然科学研究项目(KJ2013A082)
第一作者: 吴金荣(1977—),女,博士,副教授,wujr2000@163.com。

根据规范要求,掺杂聚酯纤维的质量分数至少为 0.30%。实验时,掺杂聚酯纤维的质量分数分别为 0.30%、0.35%、0.40%、0.45%和 0.50%,由于聚酯纤维具有一定的吸油性,掺杂的质量分数越大,对应的沥青最佳用量越大,因此通过析漏实验和马歇尔实验[9]综合确定沥青的最佳用量分别为5.00%、5.05%、5.10%、5.15%和 5.20%。

试件为∅70 mm×35 mm 的圆柱体,符合 SHPB 实验中试件长径比为 0.5 的要求[10],由千斤顶配合反力架采用静压法成形。

2 实验设计

SHPB 技术被广泛用于材料动力学性能的研究[11],其工作原理是通过压缩气体达到一定的气压作用于撞击杆,使撞击杆撞击入射杆产生应力波,当应力波到达试件时,一部分被反射,另一部分通过试件传递给透射杆,通过粘贴在入射杆和透射杆上的应变片采集应力波信号,以此获得材料的动力学性能参数,如应变率、应变和应力等。

实验采用∅74 mm 钢质 SHPB 装置实施单轴冲击压缩实验。撞击杆、入射杆和透射杆的长度分别为 600、2 400 和 2 000 mm。由于透水沥青混凝土波阻抗相对较低,透射信号非常微弱,采用灵敏系数 110 的半导体应变片进行采集;入射信号采用普通箔式应变片进行采集。试件的两端涂抹凡士林作为耦合剂,减小惯性效应和摩擦效应。

在 SHPB 实验中,只要加载波在试件内部来回反射 2 次以上,就能满足试件内部的应力均匀性要求[12]。应力波在透水沥青混凝土试件中来回反射 2 次所需的入射脉冲前沿升时至少应为 47 μs,才能保证试件内部达到应力、应变的均匀状态。未整形前,入射脉冲前沿升时约为 50 μs,即便是很薄的试件,也不能达到应力均匀。采用凡士林对入射脉冲进行整形后,波形得到明显改善,入射脉冲前沿升时可达 100 μs,足够应力脉冲在试件内部来回反射 2 次,有利于试件在加载过程中的应力均匀。同时,波形平滑、震荡明显减少,达到峰值后变化也比较平缓,整形后典型的入射波、反射波和透射波如图 1 所示。

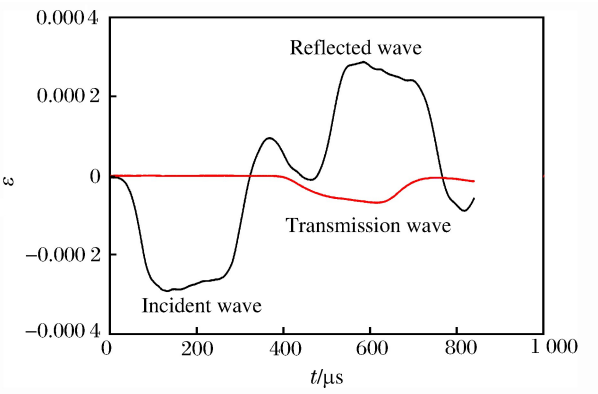

图 1 整形后典型波形

Fig. 1 Typical wave after shaping

3 SHPB 实验结果与讨论

3.1 SHPB 实验结果

冲击压缩实验前,进行了同尺寸透水沥青混凝土试件的静态单轴压缩实验,获得了试件的静态抗压强度。掺杂聚酯纤维的质量分数分别为 0.30%、0.35%、0.40%、0.45%、0.50%时,静态抗压强度分别为 3.84、4.30、4.52、3.35、3.21 MPa。通过多次试打确定平均应变率分别为 80、90、100 和 120 s^{-1}。实验数据采用二波法[13]进行处理,试件的应变率、应变和应力分别为:

$$\dot{\varepsilon}(t) = -\frac{2c}{l_s}\varepsilon_r(t) \tag{1}$$

$$\varepsilon(t) = -\frac{2c}{l_s}\int_0^t \varepsilon_r(t)\,\mathrm{d}t \tag{2}$$

$$\sigma(t) = \frac{A}{A_s}E\varepsilon_t(t) \tag{3}$$

式中:$\dot{\varepsilon}(t)$、$\varepsilon(t)$、$\sigma(t)$分别为试件的应变率、应变、应力;l_s、A_s 分别为试件长度、截面面积;c、A、E 分别为压杆中波速、截面面积、弹性模量。每个应变率下获得 2~3 个有效数据,实验结果如图 2 所示。

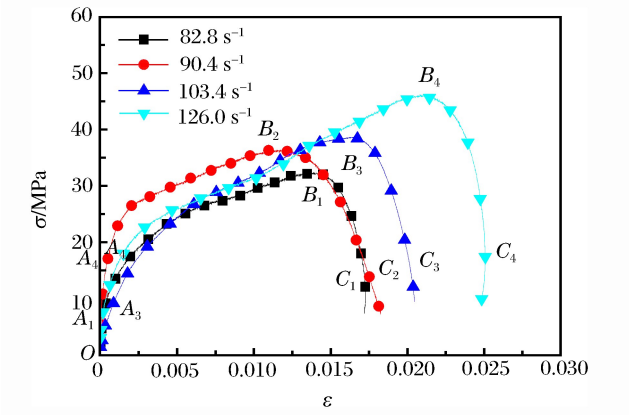

图 2(a)　掺杂质量分数 0.30%聚酯纤维的透水沥青混凝土动态响应曲线

Fig. 2(a)　Dynamic response of permeable asphalt concrete contained polyester fiber with mass fraction of 0.30%

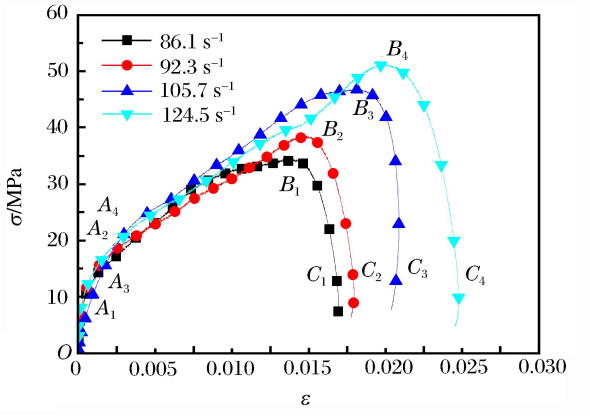

图 2(b)　掺杂质量分数 0.35%聚酯纤维的透水沥青混凝土动态响应曲线

Fig. 2(b)　Dynamic response of permeable asphalt concrete contained polyester fiber with mass fraction of 0.35%

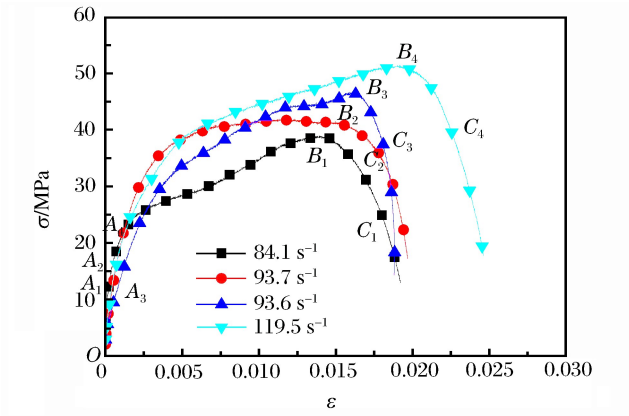

图 2(c)　掺杂质量分数 0.40%聚酯纤维的透水沥青混凝土动态响应曲线

Fig. 2(c)　Dynamic response of permeable asphalt concrete contained polyester fiber with mass fraction of 0.40%

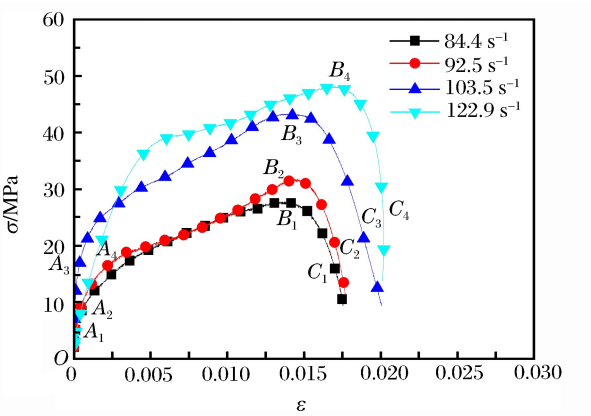

图 2(d)　掺杂质量分数 0.45%聚酯纤维的透水沥青混凝土动态响应曲线

Fig. 2(d)　Dynamic response of permeable asphalt concrete contained polyester fiber with mass fraction of 0.45%

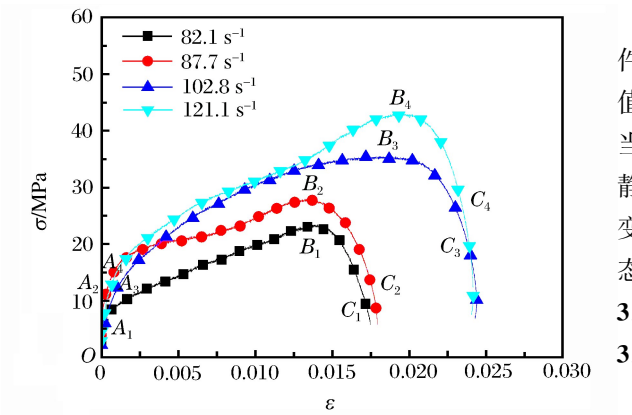

图 2(e)　掺杂质量分数 0.50%聚酯纤维的透水沥青混凝土动态响应曲线

Fig. 2(e)　Dynamic response of permeable asphalt concrete contained polyester fiber with mass fraction of 0.50%

由图 2 可知，冲击抗压强度是指沥青混凝土试件在承受外界冲击压缩荷载时所能达到的最大应力值，用来反映沥青混凝土抵抗冲击破坏的能力[14]。当掺杂聚酯纤维质量分数相同时，冲击抗压强度与静态抗压强度的比值随着应变率的增大而升高，应变率 80、90、100 和 120 s^{-1} 的峰值应力分别约是静态下的 8、9、11 和 13 倍。

3.2　SHPB 实验结果分析

3.2.1　聚酯纤维对动态应力应变曲线影响

由图 2 可以看出，透水沥青混凝土动态应力应变曲线分为 3 个阶段，即弹性变形阶段（见图 2 中的 OA_1、OA_2、OA_3、OA_4）、塑性变形阶段（即空隙压密阶段，见图 2 中的 A_1B_1、A_2B_2、A_3B_3、A_4B_4）和破坏阶段（见图 2 中的 B_1C_1、B_2C_2、B_3C_3、B_4C_4）。由于初期施加的冲击荷载较小，应力与应变近似呈线性

规律变化，处于弹性变形阶段。随着冲击荷载的不断增加，应力与应变不再服从线性规律，由弹性过渡到塑性。由于其具有 18%～25%的空隙率，在冲击荷载作用下，空隙被逐渐排除，试件逐渐被压密，表现出明显的延展性。当冲击荷载继续增加时，试件逐渐达到密实状态，应力达到极限值，随后动态应力应变曲线急转直下[15]。在同一应变率下，随着掺杂聚酯纤维质量分数的不断增大，透水沥青混凝土的弹性变形不断增大，塑性变形不断减小；当掺杂聚酯纤维的质量分数为 0.40%时，弹性变形达到最大，塑性变形最小；当掺杂聚酯纤维的质量分数超过 0.40%并继续增大时，弹性变形急剧减小，塑性变形增大。这种变化规律也表现在动态应力应变曲线上。

由图 2 可以看出，当掺杂聚酯纤维质量分数相同时，应变率由 80 s^{-1}逐渐增大至 120 s^{-1}时，透水沥青混凝土的冲击抗压强度逐渐提高。一方面，透水沥青混凝土具有较大的空隙率，空隙内部存在大量微裂纹。裂纹扩展需要的能量要比其产生的能量小很多[16]。在冲击荷载的短时作用下，材料没有足够的时间积聚能量，只能通过增加应力的途径来抵消外部能量。另一方面，试件尺寸较大，冲击荷载使试件内部，特别是中心处，已不是一维应力状态，惯性作用制约了试件侧向应变，而且应变率越高，制约作用越大，使试件近似处于围压作用[17]。因此，透水沥青混凝土的冲击抗压强度随着应变率的增大而提高。试件的破坏形态有压缩、裂缝、块裂和碎裂，如图 3 所示。

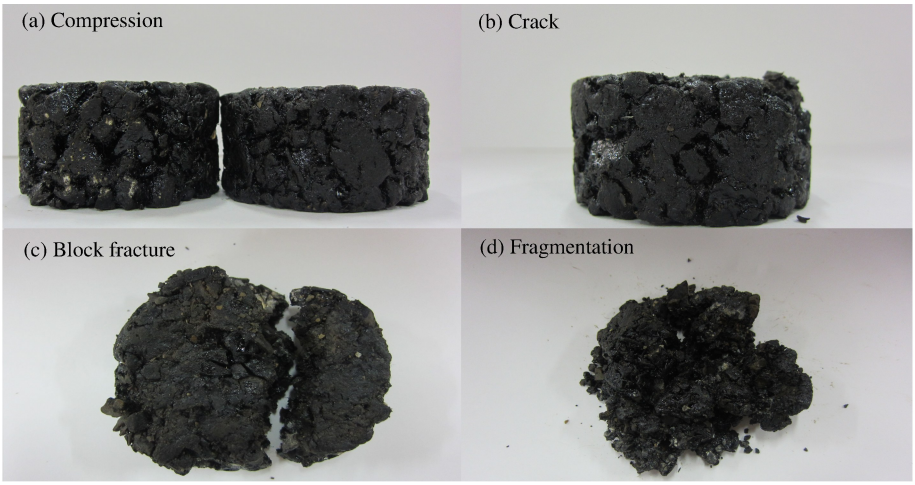

图 3 透水沥青混凝土破坏形态

Fig. 3 Failure mode of permeable asphalt concrete

3.2.2 聚酯纤维对冲击抗压强度影响

在同一应变率条件下，随着掺杂聚酯纤维质量分数的增大，透水沥青混凝土的冲击抗压强度呈现出先升高后降低的变化规律，说明聚酯纤维掺量存在合理值，如图 4 所示。产生这种现象主要是由于在透水沥青混凝土中掺加聚酯纤维，当掺杂聚酯纤维的质量分数不超过 0.40%时，聚酯纤维分散性较好，能够吸附沥青中的饱和烃和芳香烃，使沥青黏性增强，起到加筋和桥接的作用[18]，导致沥青与集料间的粘聚力增大，使冲击抗压强度得到提高。当掺杂聚酯纤维的质量分数超过 0.40%并继续增大时，由于掺加的聚酯纤维过多，无法均匀分散，产生结团现象，影响其加筋和桥接作用的发挥，使冲击抗压强度反而降低。0.40%为最合理的掺量，此时聚酯纤维的加筋和桥接作用最强，冲击抗压强度也最大。

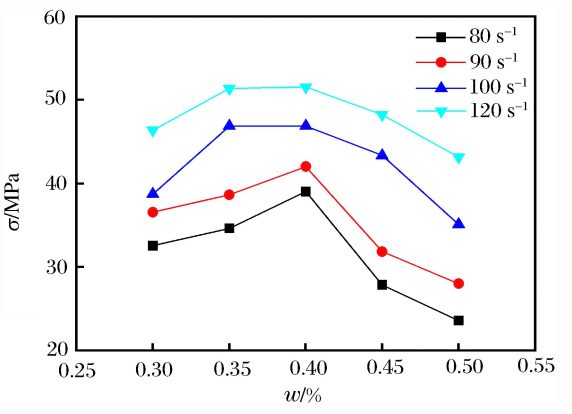

图 4 透水沥青混凝土冲击抗压强度与掺杂聚酯纤维质量分数的关系

Fig. 4 Relation between dynamic compressive strength and polyester fiber mass fraction

4 结　论

采用∅74 mm 钢质 SHPB 装置对透水沥青混凝土进行了掺杂不同质量分数聚酯纤维和不同应变率的冲击压缩实验，得到的主要结论有：

(1)透水聚酯纤维沥青混凝土是应变率敏感性材料，具有较好的延展性，动态应力应变曲线分为弹性、塑性和破坏 3 个阶段。

(2)当应变率相同时，随着掺杂聚酯纤维质量分数的增大，透水沥青混凝土的冲击抗压强度呈现出先升高后降低的变化规律，掺杂聚酯纤维的质量分数为 0.40%时，冲击抗压强度达到最大值。

(3)应变率 80、90、100 和 120 s^{-1}的冲击抗压强度分别约是静态抗压强度的 8、9、11 和 13 倍。

参考文献：

[1] Mallick R B, Kandhal P S, Cooley L A, et al. Design, construction and performanee of new-generation open-graded friction courses: 2000-01[R]. Watson: National Center for Asphalt Technology Report, 2001.

[2] Herrington P, Reilly S, Cook S. Porous asphalt durability test[M]. California: California Translt Association, 2005.

[3] Simon B, Baden M. Structural and design aspects of porous and permeable block pavement[J]. Journal of the Australlan Ceramic Society, 2007,43(1):74-81.

[4] 徐希娟，戴经梁. 改性沥青在排水性沥青路面中的应用[J]. 长安大学学报：自然科学版，2009,29(3):27-31.
Xu Xijuan, Dai Jingliang. Application of modified asphalt in the drainage asphalt pavement[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Eidition, 2009,29(3):27-31.

[5] 程成，马翔，刘松玉. 排水性沥青混合料路用性能改善措施[J]. 建筑材料学报，2013,16(1):164-169.
Cheng Cheng, Ma Xiang, Liu Songyu. Measures to improve performance of porous asphalt mixture[J]. Journal of Building Materials, 2013,16(1):164-169.

[6] 李红平，吴德军，杨晨光. 不同改性沥青排水路面(OGFC-13)路用性能的研究[J]. 公路，2009(6):151-154.
Li Hongping, Wu Dejun, Yang Chenguang. Research on road performance of drainage pavement (OGFC-13) with different modified asphalt[J]. Highway, 2009(6):151-154.

[7] 唐国奇，刘清泉，曹东伟. 排水性沥青混合料填料对比研究[J]. 公路交通科技，2006,23(1):9-11.
Tang Guoqi, Liu Qingquan, Cao Dongwei. Research on appropriate filler for drainage asphalt[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2006,23(1):9-11.

[8] 高丹盈，夏丹，汤寄予，等. 水泥消石灰对 OGFC 路用性能的影响[J]. 公路，2008(10):218-221.
Gao Danying, Xia Dan, Tang Jiyu, et al. Effect of cement and hydrated lime on road performance of OGFC[J]. Highway, 2008(10):218-221.

[9] 中华人民共和国交通部. 公路工程沥青及沥青混合料试验规程：JTG E20-2011[S]. 北京：人民交通出版社，2011.

[10] Pankow M, Attard C. Waas A M. Specimen size and shape effect in split Hopkinson pressure bar testing[J]. Journal of Strain Analysis for Engineering Design, 2009,44(8):689-698.

[11] 宋力，胡时胜. SHPB 实验中的端面凹陷修正[J]. 爆炸与冲击，2010,30(2):203-208.
Song Li, Hu Shisheng. Correction of end-face indentation in SHPB test[J]. Explosion and Shock Waves, 2010,30(2):203-208.

[12] 毛勇建，李玉龙. SHPB 试验中试件的轴向应力均匀性[J]. 爆炸与冲击，2008,28(5):448-454.
Mao Yongjian, Li Yulong. Axial stress uniformity in specimens of SHPB tests[J]. Explosion and Shock Waves, 2008,28(5):448-454.

[13] 宋力，胡时胜. SHPB 数据处理中的二波法与三波法[J]. 爆炸与冲击，2005,25(4):368-373.
Song Li, Hu Shisheng. Two-wave and three-wave method in SHPB data processing[J]. Explosion and Shock Waves, 2005,25(4):368-373.

[14] 曾梦澜，黄海龙，彭良清，等. 冲击荷载下橡胶改性沥青混凝土的动力学性质[J]. 湖南大学学报：自然科学版，2011,38(12):1-7.

Zeng Menglan, Huang Hailong, Peng Liangqing, et al. Dynamic properties of crumb rubber modified asphalt concrete under impact loading[J]. Journal of Hunan University: Natural Sciences, 2011,38(12):1-7.

[15] 吴金荣,马芹永.透水沥青混凝土单轴冲击压缩特性研究[J].振动与冲击,2015,34(4):195-199.
Wu Jinrong, Ma Qinyong. Study on uniaxial impact compressive characteristics of permeable asphalt concrete[J]. Journal of Vibration and Shock, 2015,34(4):195-199.

[16] 王道荣,胡时胜.骨料对混凝土材料冲击压缩行为的影响[J].实验力学,2002,17(1):23-27.
Wang Daorong, Hu Shisheng. Influence of aggregate on compressive behavior of concrete materials[J]. Experimental Mechanics, 2002,17(1):23-27.

[17] 曾梦澜,彭珊,黄海龙.纤维沥青混凝土动力性能试验研究[J].湖南大学学报:自然科学版,2010,37(7):1-6.
Zeng Menglan, Peng Shan, Huang Hailong. Experimental study of the dynamic properties of fiber reinforced asphalt concrete [J]. Journal of Hunan University: Natural Sciences, 2010,37(7):1-6.

[18] 郭乃胜,赵颖华,孙略伦.纤维掺量对聚酯纤维沥青混凝土韧性的影响[J].交通运输工程学报,2006,6(4):32-35.
Guo Naisheng, Zhao Yinghua, Sun Lüelun. Effect of fiber contents on toughness of polyester fiber asphalt concrete[J]. Journal of Traffic and Traffic and Transportation Engineering, 2006,6(4):32-35.

Influence of polyester fiber on impact compressive characteristics of permeable asphalt concrete

Wu Jinrong, Ma Qinyong

(*MOE Research Center of Mine Underground Engineering, Anhui University of Science and Technology, Huainan* 232001, *Anhui*, *China*)

Abstract: In order to investigate the influence of polyester fiber on impact characteristics of permeable asphalt concrete, ∅74 mm steel SHPB apparatus is adopted to conduct impact compressive test with various strain rates and different polyester fiber contents. The results of specimens under static condition and dynamic conditions with four strain rates show that the permeable polyester fiber asphalt concrete is a material sensitive to the change of the strain rate and exhibits a significant strain rate effect. It has good ductility and dynamic stress-strain curve that is characterized by three stages: Elastic deformation, plastic deformation and failure. When the strain rate remains the same, the impact compressive strength of permeable asphalt concrete first increases and then declines with the increase of the polyester fiber content. At this time it shows an optimum polyester fiber content of 0.40% and its impact compressive strength reaches its maximum. The impact compressive strength is about 8—13 times as large as the static compressive strength.

Key words: solid mechanics; impact compressive characteristics; compressive strength; strain rate effect; SHPB; polyester fiber; permeable asphalt concrete

(责任编辑 王易难)