

DOI:10.16356/j.1005-2615.2023.01.017

机场跑道改性沥青混凝土抗冲击性能

张冰洋, 解建光, 张芷英, 唐琳, 吕妍文, 祁国涛

(南京航空航天大学民航学院, 南京 211106)

摘要: 为研究中高应变率下 NRP 和掺高粘剂的 SBS 两种改性剂对 AC-13 型沥青混凝土动力性能的影响, 采用直径 74 mm SHPB 装置进行了 4 个气压下的冲击压缩试验, 获得了不同种类改性沥青混凝土的破坏形态及应力-应变曲线。研究表明: 沥青混凝土动态应力-应变曲线分为弹性变形、塑性强化和塑性破坏 3 个阶段, 破坏形态分为裂缝、破损、块裂和碎裂 4 种; 两种改性剂均能改善沥青混凝土的抗冲击性能, 并且对峰值应力和冲击韧性的应变率敏感性有一定影响, 在不同应变率范围内两种改性剂对冲击韧性增强作用不同, NRP 对峰值应力增强作用优于掺高粘剂的 SBS; 应变率超过 130/s 时, 沥青混凝土出现弹性模量退化现象, NRP 对弹性模量有提高作用。

关键词: 沥青混凝土; SHPB; 冲击荷载; 改性剂; 峰值应力; 冲击韧性; 应变率

中图分类号: U414 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-2615(2023)01-0139-07

Impact Resistance of Modified Asphalt Concrete for Airport Runway

ZHANG Bingyang, XIE Jianguang, ZHANG Zhiying, TANG Lin, LYU Yanwen, QI Guotao

(College of Civil Aviation, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing 211106, China)

Abstract: In order to study the effect of two modifiers of NRP and SBS mixed with high viscosity agents on the dynamic performance of AC-13 asphalt concrete at medium and high strain rates, the paper used SHPB device to carry out impact compression tests. The failure modes and stress-strain curves of different modified asphalt concretes are obtained. Research shows that the dynamic stress-strain curve of asphalt concrete is divided into three stages: elastic deformation, plastic strengthening and plastic failure, and the failure modes are divided into four types: crack, damage, block crack and fragmentation; both modifiers can improve asphalt concrete. The impact resistance of NRP has a certain impact on the peak stress and strain rate sensitivity of impact toughness. In different strain rate ranges, the two modifiers have different impact toughness enhancement effects. NRP has better peak stress enhancement effect than doped high viscosity. When the strain rate exceeds 130/s, the elastic modulus of asphalt concrete will degenerate, and NRP can improve the elastic modulus.

Key words: asphalt concrete; SHPB; impact load; modifier; peak stress; impact toughness; strain rate

沥青混凝土作为典型的“黏-塑-弹”性材料, 通常应用于公路及机场道面。在实际使用中, 沥青混凝土会受到冲击荷载作用, 如轮胎碰撞、地震、军事破坏等, 尤其是在机场跑道中, 会频繁受到飞机起降造成的冲击作用, 此类荷载具有作用时间短、应变率高、荷载峰值大、破坏剧烈等特点, 因此对应用

于机场跑道的沥青混凝土性能提出了更高的要求, 亟待推出抗冲击能力较强的沥青混凝土材料。

在较高应变率载荷作用下, 沥青混凝土的性能与准静态的性能存在较大差异。目前, 多采用分离式霍普金森压杆装置 (SHPB) 研究沥青混凝土动力性能。刘海^[1]利用 SHPB 装置研究了不同沥青

基金项目: 南京航空航天大学研究生开放基金(kfj20200730)。

收稿日期: 2021-05-22; **修订日期:** 2021-11-24

通信作者: 解建光, 男, 教授, 博士生导师, E-mail: xiejg@nuaa.edu.cn。

引用格式: 张冰洋, 解建光, 张芷英, 等. 机场跑道改性沥青混凝土抗冲击性能[J]. 南京航空航天大学学报, 2023, 55(1): 139-145. ZHANG Bingyang, XIE Jianguang, ZHANG Zhiying, et al. Impact resistance of modified asphalt concrete for airport runway[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2023, 55(1): 139-145.

混凝土材料在不同气压和温度条件下的力学特性; Tekalur等^[2]采用 SHPB装置及其改进装置对沥青混凝土进行高应变率下的抗压、抗拉、断裂性能试验分析; Zhang等^[3]采用改进的 SHPB装置研究了围压对沥青混凝土动态强度、动态弹性模量和动态泊松比的影响。

针对不同外加剂对沥青混凝土动力性能的影响,也有学者进行了研究。彭珊^[4]运用 SHPB试验装置,分别对普通、改性沥青混凝土和纤维沥青混凝土进行冲击压缩试验,得出了不同纤维对沥青混凝土动力抗压强度及韧性指标的影响。吴金荣等^[5]研究了聚酯纤维对透水沥青混凝土冲击压缩性能的影响。项笑炎等^[6]利用大直径 SHPB装置研究了应变率和温度对橡胶改性沥青混凝土动态力学性能的影响,认为:沥青混凝土高应变率下强度退化明显,力学性能具有时温等效性。黄海龙^[7]研究了橡胶对沥青混凝土材料抵抗动态冲击荷载的改善作用,认为:冲击荷载作用下,掺加橡胶可以明显增强沥青混凝土的塑性、强度与韧性。

机场跑道沥青混凝土冲击性能研究还处于起步阶段,现有研究主要集中于冲击荷载作用下峰值应力和冲击韧性两方面。因此,论文采用 74 mm SHPB装置研究 AC-13 沥青混凝土在冲击荷载作用下的力学响应、应力-应变曲线特点、破坏规律以及 NRP 和掺高粘剂的 SBS 两种改性剂对沥青混凝土抗冲击性能的影响,为沥青混凝土在中高应变率下力学性能的研究和在机场跑道的工程应用提供参考。

1 SHPB装置及测试原理简介

常见的分离式霍普金森压杆装置包括3个主要部分,即加载发射装置、杆组件和数据获取与记录系统。本文采用的试验装置为南京航空航天大学土木工程实验中心的 SHPB装置,其示意图如图1所示。

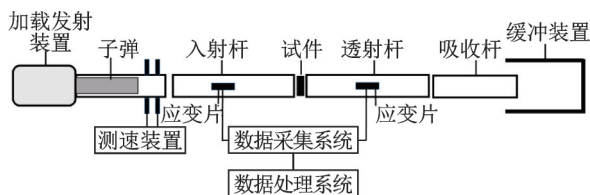


图1 SHPB装置示意图

Fig.1 Sketch of SHPB device

SHPB装置试验主要涉及的分析方法为弹性一维应力波理论,通过应变片测量杆件中的入射波、反射波及透射脉冲,然后根据一维应力波理论

计算得出试件应力-应变关系。根据式(1~3)可以得出试件的应力-应变曲线。

$$\sigma = \frac{AE}{A_0} \epsilon_t \quad (1)$$

$$\epsilon = -\frac{2c_0}{l_0} \int_0^t \epsilon_r d\tau \quad (2)$$

$$\dot{\epsilon} = -\frac{2c_0}{l_0} \epsilon_r \quad (3)$$

式中: σ 、 ϵ 和 $\dot{\epsilon}$ 分别为试件的应力、应变和应变率, ϵ_r 、 ϵ_t 为反射波和透射波传播时对应的杆中应变, A 、 E 分别为杆的横截面积和弹性模量, l_0 和 A_0 分别为试样的长度和横截面积, c_0 为压杆中的弹性波速。

2 材料及样品制备

试验中粗集料为玄武岩,细集料为玄武岩机制砂,填料为石灰岩磨细所得矿粉,胶结材料为70#基质沥青,通过马歇尔试验确定试件的最佳油石比为5.1%,基本性能均符合《民用机场沥青道面设计规范》^[8]中相关规定;AC-13 沥青混凝土级配如表1所示。

表1 AC-13级配

Table 1 AC-13 grade

筛孔直径/mm	16	13.2	9.5	4.75	2.36	1.18	0.6	0.3	0.15	0.075
通过率/%	100	95.7	72.9	45	31.5	23.5	16.2	10.5	7.8	5.4

试验共制备3种试件,AC-13(简称AC)、SBS改性AC-13(简称S-AC)、NRP改性AC-13(简称N-AC),分组见表2。

表2 试件分组

Table 2 Specimen group

组别	改性剂种类	改性剂掺量/%	油石比/%
AC			5.1
S-AC	SBS+高粘剂	5+11.8	5.1
N-AC	NRP	19.6	5.1

注:改性剂掺量为改性剂占沥青用量百分比。

使用 SHPB装置直径为 74 mm,考虑当试件长径比为 1/2 时,装置摩擦效应和惯性效应最小,因此确定试件尺寸为:高度 35 mm,直径 70 mm。成型过程根据《公路工程沥青及沥青混凝土试验规程》^[9]规定,采用静压法成型,成型后试件如图2所示。



图2 成型后沥青混凝土试件试样

Fig.2 Asphalt concrete specimen sample after forming

3 试验结果及分析

该试验采用 SHPB 装置进行 4 种气压下的冲

击试验,经过多次试打确定冲击气压分别为 0.12、0.14、0.16 和 0.18 MPa,试验温度为室温 15℃。每个气压下进行 3 次平行试验,对实测数据进行平均处理得到应力-应变曲线,试验结果见表 3。

3.1 沥青混凝土破坏形态分析

从表 3 可知,沥青混凝土试件具有明显的应变率效应;应变率不仅对材料的冲击强度等参数有影响,对其破坏现象也有着显著影响。本文所得不同沥青混凝土破坏形态大致相似,仅列出一组试件的破坏形态进行分析,如图 3 所示。

表 3 SHPB 实验数据表

Table 3 SHPB experimental data

编号	冲击气压/MPa	应变率/ s^{-1}	冲击强度/MPa	冲击韧性	弹性模量/MPa	峰值应变/ 10^{-3}
AC	0.12	95.6	28.71	0.474	2 594	6.43
	0.14	112.3	32.48	0.585	3 695	6.77
	0.16	133.3	34.99	0.649	3 961	7.88
	0.18	149.4	35.72	0.719	2 998	10.11
S-AC	0.12	79.8	29.8	0.477	2 645	6.64
	0.14	104.3	33.31	0.616	2 956	8.64
	0.16	129.1	36.25	0.713	3 326	8.93
	0.18	148.5	37.34	0.822	3 292	9.53
N-AC	0.12	83.8	32.38	0.447	3 772	6.36
	0.14	110	35.5	0.599	4 009	6.51
	0.16	121.8	37.45	0.690	4 196	7.24
	0.18	136.2	38.72	0.767	4 093	7.93

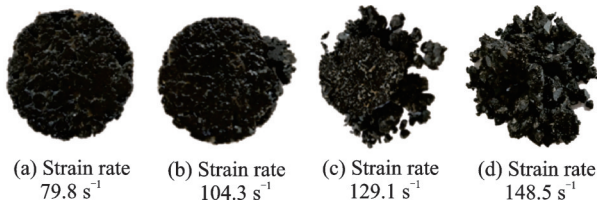


图3 AC-13在不同应变率下的破坏形态

Fig.3 Failure modes of AC-13 under different strain rates

从图 3 可以看出,随着冲击气压的增大,试件表现为裂缝、破损、块裂和碎裂 4 种破坏形态,破碎面积不断增大,损坏程度加剧,具体表现为:

(1)裂缝。此时应变率较低,试件保持完整性,但能够观察到试件表面产生的裂缝和变形,骨料-沥青界面处的高应力集中和弱界面粘结,使得原有的微裂纹在荷载作用下聚结并发展成宏观裂纹;由于沥青具有粘塑性,沥青混凝土表面引起裂缝的拉伸应力小于形成贯穿裂缝应力阈值,所以试件仍保持外观完整性,如图 3(a)所示。

(2)破损。试件变形进一步加剧,表面布满明显裂缝,边缘处产生少量破损碎块,破坏面较为粗糙,中心受试件内部粗骨料影响,并未产生贯通裂缝,在轴压作用下,侧边沥青混凝土对中心区形成了约束作用,因此侧边沥青混凝土首先出现破损,如图 3(b)所示。

(3)块裂。应变率进一步增大,边缘处严重破

损,形成多个破裂面,试件表面裂缝和碎块脱落数量均明显增加,出现留芯现象,裂纹沿试件芯部贯穿,瞬间产生的高冲击应力,使裂缝发展来不及绕过粗骨料,因此破碎处可见集料开裂及集料-沥青分离现象,如图 3(c)所示。

(4)碎裂。当应变率达到一定程度,试件完全破碎,呈现粉碎性破坏,芯部几乎消失,碎块体积变小、数量增加,在将试件劈裂成块状后,轴向冲击荷载进一步将其压成更小的碎块,如图 3(d)所示。

沥青混凝土在冲击荷载作用下,其裂缝产生及发展受应变率影响。试件破坏的本质为拉应力破坏,应变率较小时破损处主要为集料-沥青界面粘结处开裂,并可观察到有少量骨料破碎面;完全破碎时,破碎面处出现较多骨料断裂面,骨料破碎量明显增加。

3.2 沥青混凝土应力-应变曲线

图 4 展示了 AC、S-AC 和 N-AC 3 种沥青混凝土试件在不同应变率下的应力-应变曲线,本文中应变率范围为 79~149 s^{-1} 。

可以看出,3 种材料在不同冲击荷载作用下的应力-应变曲线形状基本相同,这表明沥青混凝土试件在各种变形过程中的力学和能量特性方面具有较好的冲击稳定性,曲线具体可分为 3 个阶段:弹性变形阶段、塑性强化阶段和塑性破坏阶段。

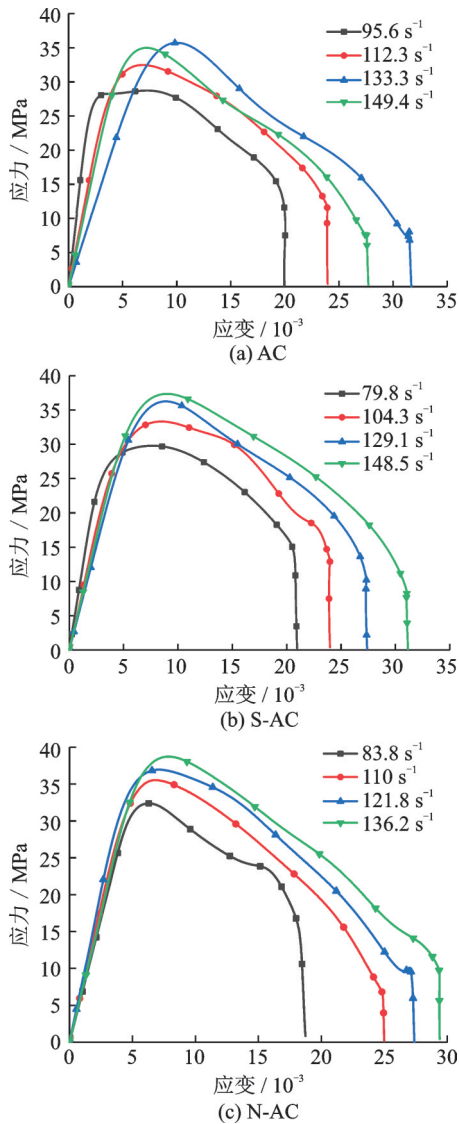


图4 AC-13动态应力-应变曲线
Fig.4 AC-13 dynamic stress-strain curves

(1)弹性阶段。在达到试件最大冲击强度的75%前,试件处于弹性变形阶段,应变与应力呈线性关系,随着应变率的增大,其斜率越来越大。

(2)塑性强化阶段。随着冲击作用的增强,试件内部原始缝隙和新裂缝都在不断扩展和形成,试件内部产生不可逆性损伤,应力随应变增大呈现短暂上升,这是由于材料内部微孔洞和微裂纹可能经历了压密过程,使得试件抗压能力出现一定程度提高。

(3)塑性破坏阶段。试件达到峰值应力后,试件通过更大程度的变形和裂缝、破裂面的发展来耗散能量,通过变形吸收能量的同时应力也在不断下降,当变形和破裂面发展到一定程度时,试件破坏。

由于沥青混凝土为典型的“黏-塑-弹”性材料,具有较好的延性和韧性,在应力-应变曲线下阶段,曲线呈“凸”形,且随着应变率增大,下降段愈加趋于平缓,主要原因为:在应变率较低时,沥青混

凝土试件破坏程度低,冲击作用后变形恢复,而在应变率较高时,沥青混凝土试件破坏严重,变形不断变大^[10]。

3.3 沥青混凝土冲击强度

峰值应力指冲压过程中的最大应力值,具有明显的应变率增强效应^[11]。有研究表明,在混凝土中掺加外加剂会对其冲击强度产生一定影响^[12-13]。本文所得沥青混凝土峰值应力与应变率的关系如图5所示。

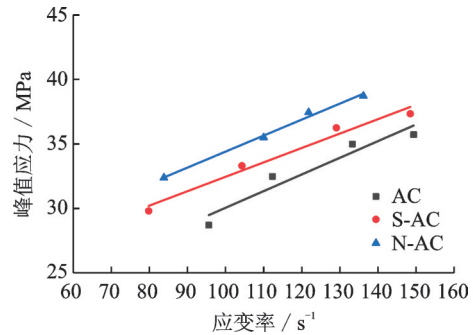


图5 峰值应力-应变率关系曲线
Fig.5 Peak stress-strain rate curves

试验结果显示,各种试件的峰值应力具有显著的应变率增强效应。一般情况下,混凝土类材料中存在许多微裂纹和空隙。在静载荷下,有足够的时间使微裂纹发展成宏观裂纹,并导致试件的最终失效。而冲击载荷持续时间很短,特别是在高应变率下,因此,内部微裂纹来不及生长和扩展,这意味着施加在试件上的高冲击载荷和短作用时间将减少试块的变形所吸收的能量,只能以增加试件内部应力的方式平衡外部输入能量。同时,根据动量定理($Ft=mv$),高应变率意味着高入射速度和短作用时间,即 m 保持不变, v 增大, t 减小,则 F 必然增大。因此,试块的内应力必须增加以吸收外部输入的能量,并最终提高沥青混凝土的峰值应力。

沥青混凝土的峰值应力与应变率近似成一次函数关系,如式(4)所示。拟合结果见表4,相关系数均在0.92以上,两者具有较强的相关性。

$$\sigma = a\dot{\epsilon} + b \tag{4}$$

式中: $\dot{\epsilon}$ 代表应变率; σ 代表峰值应力; a 、 b 为系数。

图5中曲线的斜率代表峰值应力随应变率变化的快慢程度,斜率越大代表试件冲击韧性随应变

表4 峰值应力与应变率拟合关系参数
Table 4 Peak stress and strain rate fitting relationship parameters

编号	a	b	相关系数 R^2
AC	0.129 1	17.136	0.926 2
S-AC	0.111 7	21.288	0.974 3
N-AC	0.123 9	22.016	0.992 6

率的增速越快,应变率敏感性越高。根据表 4 可知,峰值应力的应变率敏感性关系为 AC>N-AC>S-AC,这说明掺加改性剂后沥青混凝土峰值应力的应变率敏感性有所下降。

相同应变率条件下,AC、S-AC、N-AC 三者的峰值应力关系为 N-AC>S-AC>AC,NRP 和掺加高粘剂的 SBS 两种改性剂均能够提高沥青混凝土的峰值应力,NRP 对峰值应力的提高作用更为显著。相较于普通 AC 试件,在应变率为 100、110、120 和 130 s⁻¹ 条件下,S-AC 试件峰值应力分别提高了 8%、7.1%、6.3% 和 5.6%,N-AC 试件峰值应力分别提高了 14.5%、13.7%、13% 和 12.4%。

3.4 沥青混凝土弹性模量

弹性模量定义为应力-应变曲线上升阶段峰值应力 40% 处与峰值应力连线的斜率。弹性模量为^[14]

$$E = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon} = \frac{\sigma_{0.4} - \sigma_0}{\varepsilon_{0.4} - \varepsilon_0} \quad (5)$$

式中: σ_0 为峰值应力, ε_0 为峰值应变, $\sigma_{0.4}$ 为峰值应力的 40%, $\varepsilon_{0.4}$ 为对应 $\sigma_{0.4}$ 处的应变。弹性模量与应变率的关系如图 6 所示。

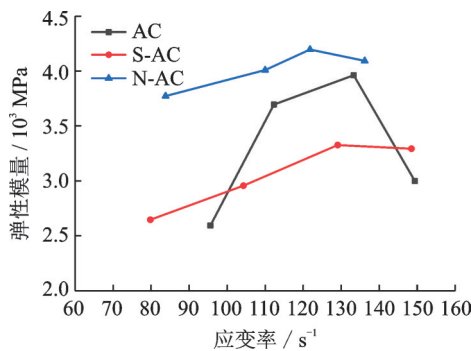


图 6 弹性模量-应变率关系曲线

Fig.6 Elastic modulus-strain rate curves

根据实验结果可以得出,相同应变率下 N-AC 试件的弹性模量均大于 AC 试件;而在 101.1~144 s⁻¹ 应变率范围内,S-AC 试件的弹性模量小于 AC。

当应变率在 79~130 s⁻¹ 之间时,3 种试件弹性模量随应变率的增加而增大,但在应变率超过 130 s⁻¹ 后,弹性模量略微下降,AC 试件下降最为明显。

这种现象可能与沥青混凝土试件内部有大量微孔洞和微裂缝有关,在 72~130 s⁻¹ 应变率范围内,随着应变率增大,试件内部微裂纹发展减少、微孔洞受压缩而减少,试件产生“硬化”现象;当应变率超过 130 s⁻¹,应变率对材料的影响达到极限,内部孔洞和裂缝还未发生变化,材料已经发生破坏,导致弹性模量在一定应变率处出现最大值^[15],本

文 3 种沥青混凝土中应变率约为 130 s⁻¹。

3.5 沥青混凝土冲击韧性

冲击韧性是最重要的冲击特性之一,代表试件在冲击过程中所吸收的能量^[16],冲击韧性不仅受材料强度的影响,还与材料的变形能力密切相关。本文以试件应力-应变曲线下方的面积作为韧性指标。沥青混凝土冲击韧性与应变率的关系如图 7 所示。

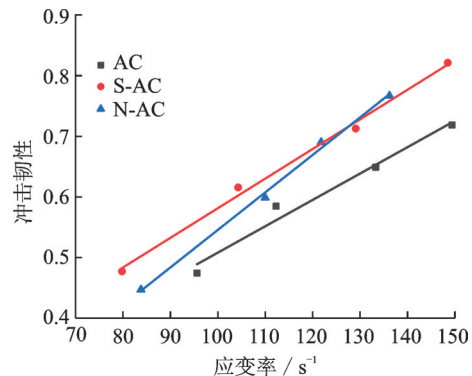


图 7 冲击韧性-应变率关系曲线

Fig.7 Impact toughness-strain rate relationship curves

试验结果显示,各种试件的冲击韧性具有显著的应变率效应。拟合结果显示,沥青混凝土的冲击韧性与应变率大致成一次函数关系,如式(6)所示。拟合结果见表 5,相关系数均在 0.97 以上,两者具有较强的相关性。

$$\eta = c\dot{\varepsilon} + d \quad (6)$$

式中: η 表示冲击韧性; c 、 d 为系数。

表 5 冲击韧性与应变率拟合关系参数

Table 5 Parameters of fitting relationship between impact toughness and strain rate

编号	c	d	相关系数 R ²
AC	0.004 4	0.072 5	0.975 8
S-AC	0.004 9	0.092 2	0.994 7
N-AC	0.006 2	-0.074 0	0.996 8

由表 5 可知,冲击韧性的应变率敏感性关系为 N-AC>S-AC>AC,说明掺加改性剂后沥青混凝土的冲击韧性表现出更显著的应变率增强效应。

使用 NRP 及掺加高粘剂的 SBS 两种改性剂均能够提高沥青混凝土的冲击韧性,在 95.6~129.1 s⁻¹ 应变率范围内,三者冲击韧性关系为 S-AC>N-AC>AC,在 129.1~136.2 s⁻¹ 应变率范围内,N-AC>S-AC>AC。相较于普通 AC 试件,在应变率为 100、110、120 和 130 s⁻¹ 条件下,S-AC 试件冲击韧性分别提高了 13.6%、13.4%、13.3% 和 13.1%,N-AC 试件冲击韧性分别提高了 6.5%、9.3%、11.6% 和 13.5%。

3.6 沥青混凝土峰值应变

峰值应变指应力峰值处所对应的应变^[17],是衡量材料在荷载作用下变形能力的指标之一。目前,大量学者对于混凝土材料的峰值应变与应变率的关系进行了研究,其峰值应变是否具有应变率效应尚存在争议。但很少有学者对沥青混凝土峰值应变与应变率关系进行研究。论文得出的峰值应变与应变率关系如图8所示。

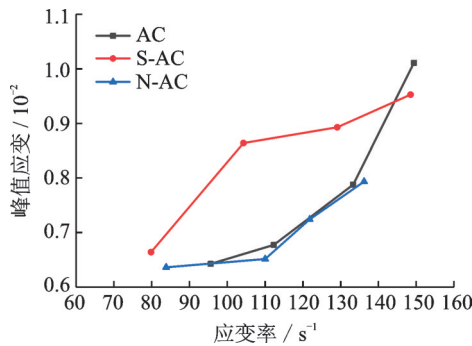


图8 峰值应变-应变率关系曲线

Fig.8 Peak strain-strain rate relationship curves

随应变率的增加,沥青混凝土的峰值应变具有较为明显的应变率增强效应。随应变率增大,N-AC、AC试件峰值应变增量呈增大趋势,S-AC试件峰值应变增量减缓;在相同应变率作用下,相较于AC试件,N-AC试件峰值应变略微减小;在79~145 s⁻¹应变率范围内,S-AC试件峰值应变明显增大,这表明,在此应变率范围内掺高粘剂的SBS通过增加强度和增大形变两种方式来提高冲击韧性。

4 结 论

本文考虑机场跑道沥青混凝土频繁受到冲击荷载作用的服役特点,采用SHPB装置对使用不同种类改性剂的AC-13型沥青混凝土,进行了不同应变率下的冲击试验,根据试验结果,主要结论如下:

(1)冲击作用下,沥青混凝土的破坏形态可分为裂缝、破损、块裂和碎裂,使用改性剂对沥青混凝土破坏形态没有显著影响;应力应变曲线具体可分为弹性变形阶段、塑性强化阶段和塑性破坏阶段3个阶段。

(2)沥青混凝土的峰值应力和冲击韧性均与应变率呈现线性关系,两种改性剂对峰值应力和冲击韧性均有提高作用,同时改性剂对沥青混凝土的应变率敏感性有一定影响。

(3)冲击荷载下,沥青混凝土弹性模量随应变率的增加而增大,当应变率超过特定值时,弹性模

量出现下降,在本文中此值为130 s⁻¹;NRP改性剂对沥青混凝土弹性模量有提高作用。

参考文献:

- [1] 刘海. 沥青混凝土本构模型及实验研究[D]. 长沙:国防科学技术大学, 2007.
LIU Hai. Research on constitutive model and experiment of asphalt concrete[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2007.
- [2] TEKALUR S A, SHUKLA A, SADD M, et al. Mechanical characterization of a bituminous mix under quasi-static and high-strain rate loading[J]. Construction & Building Materials, 2009, 23(5): 1795-1802.
- [3] ZHANG H, LI F, GAO Y W. Study on the dynamic performance of asphalt concrete under passive confined pressure[J]. Applied Mechanics and Materials, 2012, 226-228: 1755-1759.
- [4] 彭珊. 冲击荷载作用下纤维沥青混凝土动力性能试验研究[D]. 长沙:湖南大学, 2010.
PENG Shan. Experimental study on dynamic properties of fiber reinforced asphalt concrete under impact loading[D]. Changsha: Hunan University, 2010.
- [5] 吴金荣, 马芹永. 聚酯纤维对透水沥青混凝土冲击压缩性能的影响[J]. 爆炸与冲击, 2016, 36(2): 279-284.
WU Jinrong, MA Qinyong. Influence of polyester fiber on impact compressive characteristics of permeable asphalt concrete[J]. Explosion and Shock Waves, 2016, 36(2): 279-284.
- [6] 项笑炎, 张春晓, 何翔, 等. 大变形时温度和应变率对沥青混凝土动态力学性能的影响[J]. 武汉理工大学学报, 2012, 34(11): 72-77.
XIANG Xiaoyan, ZHANG Chunxiao, HE Xiang, et al. Effects of temperature and strain rate on dynamic mechanical properties of asphalt concrete with finite deformation[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2012, 34(11): 72-77.
- [7] 黄海龙. 冲击荷载作用下橡胶沥青混凝土动态力学性能研究[D]. 长沙:湖南大学, 2011.
HUANG Hailong. Dynamic properties of rubberized asphalt concrete under impact loading[D]. Changsha: Hunan University, 2011.
- [8] 中国民用航空局. 民用机场沥青道面设计规范: MH/T5010—2017[S]. 北京:中国民航出版社, 2017.
Civil Aviation Administration of China. Design code for asphalt pavement of civil airport: MH/T5010—2017[S]. Beijing: China Civil Aviation Publishing House, 2017.
- [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.

- Ministry of Transport of the People's Republic of China. Standard test methods of bitumen and bituminous mixtures for highway engineering: JTG/E20—2011 [S]. Beijing: China Communications Press, 2011.
- [10] MA L, LI Z, LIU J, et al. Mechanical properties of coral concrete subjected to uniaxial dynamic compression [J]. Construction and Building Materials, 2019, 199: 244-255.
- [11] KMK A, SL A, JYC B. Effect of maximum coarse aggregate size on dynamic compressive strength of high-strength concrete [J]. International Journal of Impact Engineering, 2019, 125: 107-116.
- [12] PHAM T M, CHEN W, KHAN A M, et al. Dynamic compressive properties of lightweight rubberized concrete [J]. Construction and Building Materials, 2019, 238: 1-14.
- [13] YANG R, XU Y, CHEN P, et al. Experimental study on dynamic mechanics and energy evolution of rubber concrete under cyclic impact loading and dynamic splitting tension [J]. Construction and Building Materials, 2020, 262: 120071.
- [14] ZHANG J S, DUAN X L, YANG Z Y. SHPB test and microstructure analysis on ready-mixed concrete in uniaxial load and passive confining pressure states [J]. Shock and Vibration, 2019, 2019(2): 1-16.
- [15] 帅晓蕾. 冲击荷载作用下混凝土动力性能试验研究及有限元分析 [D]. 长沙: 湖南大学, 2013.
- SHUAI Xiaolei. Mechanical properties experimental study and finite element analysis of concrete under the impact load [D]. Changsha: Hunan University, 2013.
- [16] CHEN Lianjun, ZHANG Xixin, LIU Guoming. Analysis of dynamic mechanical properties of sprayed fiber-reinforced concrete based on the energy conversion principle [J]. Construction and Building Materials, 2020, 254: 119167.
- [17] LI N, LONG G, FU Q, et al. Effects of freeze and cyclic load on impact resistance of filling layer self-compacting concrete (FLSCC) [J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2019, 23(7): 2908-2918.

(编辑:夏道家)