



DOI:10.12404/j.issn.1671-1815.2404931

引用格式:肖寒,唐勇,李浩,等.寒区低温环境水泥稳定碎石混合料宏观性能与微观空隙结构[J].科学技术与工程,2025,25(15):6501-6509.

Xiao Han, Tang Yong, Li Hao, et al. Macro properties and micro void structure of cement stabilized macadam mixture in cold regions[J]. Science Technology and Engineering, 2025, 25(15): 6501-6509.

寒区低温环境水泥稳定碎石混合料宏观性能与 微观空隙结构

肖寒¹, 唐勇¹, 李浩¹, 杨泽众¹, 樊德林¹, 牛豪爽^{2*}

(1. 中交一公局西南工程有限公司, 成都 610031; 2. 河南理工大学土木工程学院, 焦作 454000)

摘要 为了研究寒区低温养生温度对水泥稳定碎石混合料力学性能、疲劳特性与抗冻性能的劣化影响规律。采用 5、10、15 °C 模拟现场低温养生条件, 基于力学性能试验、三分点加载疲劳试验和冻融循环试验对比分析低温养生、20 °C 标准养生和 30 °C 养生条件下水泥稳定碎石混合料的无侧限抗压强度、弯拉强度、动态回弹模量及抗疲劳性能与抗冻耐久性性能差异, 研究了养生温度对冻融循环试验过程中水泥稳定碎石混合料微观空隙结构衰减规律的影响, 建立了水泥稳定碎石混合料微观空隙结构与力学性能和疲劳性能的相关性。结果表明, 相较于标准养生温度(20 °C), 5~10 °C 养生条件下, 水泥稳定碎石混合料的力学性能下降幅度可达 20%~40%, 疲劳寿命降低了 40%~50%, 低温养生对水泥稳定碎石混合料力学性能、疲劳特性和抗冻性能有显著劣化影响, 且养生温度越低, 水泥稳定碎石混合料力学性能和疲劳特性下降幅度越大; 提高养生温度有助于降低冻融循环后微观空隙直径衰减速率, 增加冻融循环试验过程中水泥稳定碎石混合料空隙结构的稳定和细化微观空隙结构, 从而增加了水泥稳定碎石混合料的力学性能、抗疲劳耐久性能与抗冻性。

关键词 道路工程; 水泥稳定碎石; 养生温度; 力学性能; 疲劳性能; 抗冻性能; 微观空隙结构

中图分类号 U 416.2;

文献标志码 A

Macro Properties and Micro Void Structure of Cement Stabilized Macadam Mixture in Cold Regions

XIAO Han¹, TANG Yong¹, LI Hao¹, YANG Ze-zhong¹, FAN De-lin¹, NIU Hao-shuang^{2*}

(1. China Communications First Public Bureau Southwest Engineering Co., Ltd., Chengdu 610031, China;

2. School of Civil Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454000, China)

[Abstract] In order to study the effect of low temperature on mechanical properties, fatigue properties and frost resistance of cement stabilized crushed stone mixture in cold area. Using 5 °C, 10 °C, 15 °C to simulate the field low temperature curing condition, based on the mechanical properties test, three-point loading fatigue test and freeze-thaw cycle test, the differences of unconfined compressive strength, flexural tensile strength, dynamic resilience modulus, fatigue resistance and anti-freezing durability of cement stabilized gravel mixture under low temperature curing condition, 20 °C standard curing condition and 30 °C curing condition were compared. The effect of curing temperature on the attenuation law of microvoid structure of cement-stabilized crushed stone mixture during freeze-thaw cycle test was studied. The results show that, compared with the standard curing temperature (20 °C), the mechanical properties of cement stabilized macadam mixture decrease by 20%~40% and the fatigue life decrease by 40%~50% under the condition of 5~10 °C. Low temperature curing has a significant deterioration effect on the mechanical properties, fatigue properties and anti-freezing properties of cement stabilized macadam mixture. The greater the decrease of mechanical properties and fatigue characteristics of cement stabilized crushed stone mixture. Increasing the curing temperature is helpful to reduce the decay rate of micro void diameter after freeze-thaw cycle, increase the stability of the void structure of cement stabilized gravel mixture and refine the micro void structure during the freeze-thaw cycle test, and thus increase the mechanical properties, fatigue durability and frost resistance of cement stabilized gravel mixture.

[Keywords] road engineering; cement stabilized macadam; curing temperature; mechanical properties; fatigue performance; frost resistance; microscopic void structure

收稿日期: 2024-07-02 修订日期: 2024-11-24

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(42372331)

第一作者: 肖寒(1988—)男, 汉族, 四川成都人, 硕士, 高级工程师。研究方向: 房建和市政施工技术。E-mail: 691222911@qq.com。

* 通信作者: 牛豪爽(1994—)男, 汉族, 河南焦作人, 博士(后), 讲师。研究方向: 路基路面材料。E-mail: 1015945931@qq.com。

目前水泥稳定粒料类材料广泛应用于中国各等级公路路面的基层和底基层^[1-3]。随着西部大开发的深入贯彻和实施,交通基础设施建设成为中国内蒙、西藏、青海等寒区发展的重心之一^[4-7]。中国寒区普遍面临着全年气候寒冷、最热月平均气温低、施工季节短等特殊的施工环境,以青海省格尔木市为例,该区气温大于 10 ℃ 的时间主要集中在 2—11 月,一年当中连续大于 10 ℃ 的最大天数约 30 d,为了给铺筑热拌沥青混凝土预留足够的施工作业时间,该区水泥稳定碎石基层不得不在相对较低的环境温度中摊铺和养生。研究表明,温度影响水泥水化进程,在高温、高湿养生环境有利于水泥稳定碎石强度的增长,而低温养生条件下水泥稳定碎石不仅强度增长慢,且低温对水泥稳定碎石终期强度的损伤亦不可逆;相同的应力水平下,养生温度越高则水泥稳定碎石的疲劳寿命越大,相应的半刚性力学性能与耐久性能越好。现场病害调查结果显示,温度低和频繁的温度变化是导致中国寒区半刚性基层沥青路面达不到实际设计年限就出现各种早期病害的主要影响因素之一。

现行规范、规程、细则较全面地考虑了气候环境对水泥稳定碎石混合料性能的影响,部颁基层施工技术细则标准(JTG F20—2015)要求:水泥稳定碎石混合料配合比设计阶段,应在标准养生温度 20 ℃ ± 2 ℃,相对湿度不小于 95% 条件下养生 6 d,然后将试件浸泡于 20 ℃ ± 2 ℃ 水中 1 d,以 7 d 无侧限抗压强度不小于相应交通荷载等级的限值为配合比设计和现场施工质量控制的核心指标,并要求施工期温度应在 5 ℃ 以上。工程实践证明,水泥稳定碎石结构层强度形成初期,现场养生温度越高,钻出完整芯样的间隔时间越短,且取芯孔壁越光滑,基层顶面实测回弹弯沉越小。试验研究方面,祁运佳^[8]研究了 -5、0、5 ℃ 养生温度对水泥稳定碎石混合料力学性能的影响规律,并基于电子扫描电镜探讨了低温养生对水泥稳定混合料强度的劣化机理,结果表明,养生温度越低,水泥稳定碎石混合料力学性能越差,水泥稳定碎石混合料内部微细观空隙数量越多、水泥水化产物对微细观孔隙的填充度越低。高建强^[9]研究了低温条件下水泥稳定碎石混合料的力学性能及施工工艺要求。焦耀亮^[10]研究了水泥和早强剂掺量对低温环境水泥稳定碎石混合料施工性能和力学性能的影响规律。

王一琪等^[11]模拟季节性冰冻地区融循环作用下水泥稳定碎石混合料抗冻性能衰减规律。马士宾等^[12]研究了低温早强水泥稳定碎石混合料的力学性能和抗冻性能,结果表明,掺加早强剂有助于改善低温环境水泥稳定碎石的力学性能与疲劳特性,养生温度越低,早强剂对水泥稳定碎石无侧限抗压强度和抗冻性改善越明显。杨明等^[13]、朱文强^[14]、王英涵^[15]研究了干湿循环、冻融和浸水作用下水泥稳定碎石混合料力学性能与疲劳耐久性能演化规律。盛燕萍等^[16]研究了不同温度下早强低收缩水泥稳定碎石抗裂特性。

综上所述,已有研究揭示了养生温度对水泥稳定碎石混合料力学性能的损伤规律,并提出了防治措施。但是目前道路工作者对于寒区低温环境水泥稳定碎石混合料疲劳特性、抗冻性劣化规律,尤其是低温养生条件下水泥稳定碎石混合料微细观空隙结构及劣化机理尚不清楚。基于此,针对中国寒区气候特点和水泥稳定碎石养生温度要求,室内模拟现场养生温度,基于力学性能试验、三分点加载疲劳试验和冻融循环试验对比分析低温养生、20 ℃ 标准养生和 30 ℃ 养生条件下水泥稳定碎石混合料耐久性能差异,建立低温养生条件下水泥稳定碎石混合料微细观空隙结构与力学性能和疲劳性能的相关性,研究成果为揭示低温养生条件下水泥稳定碎石混合料力学性能和疲劳性能衰减机理提供了试验支撑,有助于深化寒区水泥稳定碎石基层力学性能与耐久性能认识。

1 实验

1.1 原材料

(1) 水泥:采用 PO42.5 普通硅酸盐水泥,主要指标如表 1 所示。

(2) 集料:粗集料采用反击破碎加工的花岗岩碎石,细集料采用石灰岩机制砂,技术指标如表 2 所示。

表 2 集料技术性能

集料类型	试验指标	试验结果	技术要求
粗集料	压碎值/%	14.2	≤22
	针片状含量/%	11.2	≤18
	软石含量/%	1.4	≤3
细集料	塑性指数	12.7	≤17
	有机质含量/%	<0.1	<2
	硫酸盐含量/%	<0.1	≤0.25

表 1 水泥技术性能

Table 1 Technical specifications of cement

试验项目	烧失量/%	初凝时间/h	终凝时间/h	抗压强度/MPa		抗折强度/MPa	
				3 d	28 d	3 d	28 d
试验结果	2.11	3.5	8.5	18.7	43.1	4.5	7.1
技术要求	≤5.0	≥3.0	>6 且 <10	≥17	≥42.5	≥4.0	≥6.5

(3)水:采用实验室自来水,符合现行《生活饮用水卫生标准》(GB 5749)的要求。

1.2 矿料级配

借鉴中国寒区高速公路工程实践经验和相关研究成果,采用基层施工技术细则(JTG/T F20—2015)推荐的C-B-3型矿料级配,合成级配见表3。

1.3 试验方案

在规范要求的标准养生温度(20℃)和最低施工温度(5℃)基础上,结合共玉高速、拉林高速、青藏公路G109等工程实践经验,试验研究采用5、10、15℃模拟低温养生环境温度,20℃为标准养生温度,30℃模拟中高温养生环境,养生期间标准养生烘箱的温度误差为±2℃,相对湿度不小于95%。

借鉴中国寒区多条高速公路水泥稳定碎石配合比设计结果,试验研究固定水泥掺量为5%,首先研究养生温度对水泥稳定碎石力学性能的影响。其次,采用疲劳试验和冻融循环试验研究养生温度对水泥稳定碎石混合料疲劳性能和抗冻融耐久性性能的影响。最后,基于计算机断层扫描(computed tomography, CT)技术研究不同温度条件下水泥稳定碎石混合料内部微细观空隙结构,最终建立微细观空隙结构与宏观力学性能及疲劳特性之间的拟合关系。基于以上研究,为揭示寒区低温养生环境对水泥稳定碎石混合料力学性能、疲劳特性与耐久性性能的劣化影响规律提供借鉴。

1.4 试验方法

(1)力学性能试验:无侧限抗压强度试验参照试验规程(JTG 3441—2024)T0805试验方法,试件直径×高=φ100 mm×100 mm(图1),加载速率1 mm/min,养生龄期为7 d和90 d;弯拉强度试验参照试验规程(JTG 3441—2024)T0851试验方法,养生龄期为90 d;动态回弹模量试验参照公路沥青路面设计规范(JTG D50—2017)附录E,标准试件的养生龄期为90 d。

(2)疲劳试验:采用三分点控制应力加载模式,

件尺寸为长×高×宽=400 mm×100 mm×100 mm,疲劳试验施加的应力强度比为0.60、0.65、0.70、0.75,施加荷载为连续的Havesine波,加载频率为10 Hz。疲劳试验选用MTS485.10型疲劳试验机,试验前开启断裂保护功能,待试验加载过程中水泥稳定碎石混合料试件弯曲劲度模量下降至初始值的50%后试验设备自动输出疲劳荷载作用次数。



(a) 加载前试件



(b) 加载破坏后试件

图1 无侧限抗压强度试验

Fig. 1 Unconfined compressive strength test

表3 矿料级配

Table 3 Gradation

筛孔尺寸/mm	通过率/%				合成级配/%	规范要求/%
	20~30 mm	10~20 mm	5~10 mm	0~5 mm		
31.5	100	100	100	100	100.0	100
19	1.8	100	100	100	75.5	68~86
9.5	0	15.7	100	100	56.5	38~58
4.75		0	8.3	98.3	28.7	22~32
2.36			1.1	72.1	19.8	16~28
0.6			0	32.5	8.8	8~15
0.075				6.4	1.7	0~3
配比/%	25	22	26	27	—	—

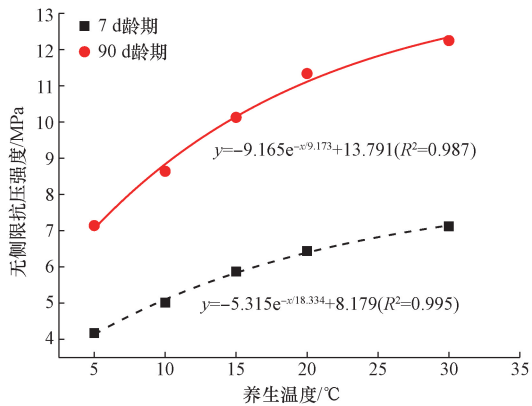
(3) 冻融循环试验:结合中国寒区气象资料与沥青路面设计规范(JTG D50—2017)附录 G,考虑试验仪器配置。冻融循环试验的融化温度采用 $5\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$,融化时间为 $48\text{ h} \pm 2\text{ h}$ 。1次冻融循环,冻结温度为 $-18\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$,冻结时间为 $16\text{ h} \pm 1\text{ h}$,融化温度采用 $5\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$,融化时间为 $48\text{ h} \pm 2\text{ h}$ 。每次冻融循环结束后测试时间的无侧限抗压强度,参考已有研究成果,总冻融循环次数为 20 次。

(4) 微细观空隙结构测试:试验采用的 Y. CT Precision 系列工业 CT 是基于对不同材质(密度等)的物体, X 射线入射强度和出射强度之间的特定关系进行成像的。水泥稳定碎石混合料内部空隙的密度和碎石、砂浆差异明显,对 X 射线的衰减系数影响较大,因此试验获取的 CT 图像较为理想。然后将 CT 原图像导入 VGStudio MAX 软件中进行三维重构,然后得到水泥稳定碎石混合料试件的三维空隙结构。

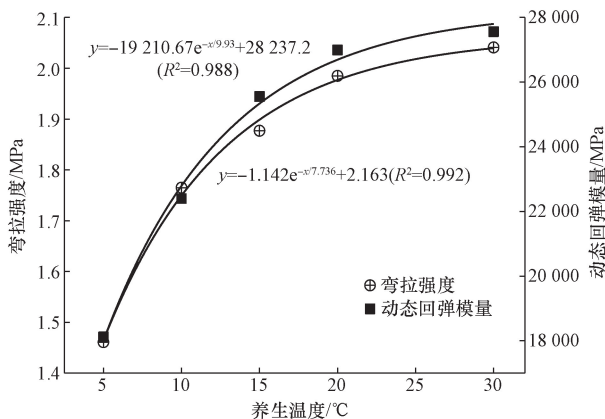
2 宏观性能

2.1 力学性能

力学性能试验结果如图 2 所示。



(a) 7 d 和 90 d 龄期无侧限抗压强度



(b) 弯拉强度与动态回弹模量

图 2 力学性能试验结果

Fig. 2 Mechanical properties test

由图 2 所示力学性能试验结果可知:

(1) 随着养生温度升高,水泥稳定碎石混合料的力学强度呈现指数函数关系增大,拟合优化度 R^2 近似等于 1.0。

(2) 相较于标准养生温度 ($20\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$), $5\sim 15\text{ }^{\circ}\text{C}$ 养生条件下水泥稳定碎石混合料的 7 d 龄期无侧限抗压强度降低了 $8.9\% \sim 35.2\%$, 90 d 无侧限抗压强度降低了 $10.7\% \sim 37.1\%$, $5, 10, 15\text{ }^{\circ}\text{C}$ 养生条件下弯拉强度降低了 $26.4\%、11.1\%、5.4\%$, 动态回弹模量降低了 $32.9\%、17.1\%、5.3\%$ 。对比 $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 高温养生和 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 标准养生条件,低温养生温度对水泥稳定碎石混合料力学性能有显著劣化影响,高温养生条件下有利于水泥稳定碎石形成更高的力学强度,养生温度越低水泥稳定碎石混合料力学性能下降越明显, $5\sim 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 养生条件下,水泥稳定碎石混合料的力学性能下降幅度可达 $20\% \sim 40\%$ 。

(3) 可以发现不同养生温度条件下水泥稳定碎石强度增长规律,即:随着养生温度增加,水泥稳定碎石混合料的力学性能逐渐提高。但是,力学性能的增长速率先快后慢,最终趋于稳定,养生温度由 $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 提高至 $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 后水泥稳定碎石混合料的力学性能可增大 $10\% \sim 20\%$,因此,建议中国寒区尽量将水泥稳定碎石混合料安排在温度较高的季节施工,有条件时,控制最低施工温度不低于 $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。在 $5\sim 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 施工温度条件下,应通过增加水泥剂量、优化级配等措施,来弥补低温养生对水泥稳定碎石力学性能的劣化影响。

(4) 沥青路面设计规范(JTG D50—2017)推荐水泥稳定碎石典型的弯拉强度、动态回弹模量为 $1.5\sim 2.0\text{ MPa}$ 、 $18\ 000\sim 28\ 000\text{ MPa}$,规定当结合料用量高、材料性能好、级配好时,力学性能取建议上限值。试验研究水泥剂量(5%)接近中国水泥稳定碎石常用水泥剂量上限,且 C-B-3 级配中粗集料骨架嵌挤效果明显,级配较好,花岗岩碎石品质良好。从 $5\sim 30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 养生条件下力学性能试验结果来看,低温养生条件下,水泥稳定碎石的 7 d 龄期无侧限抗压强度刚好满足施工技术细则(JTG /TF 20—2015)重载高速公路基层 7 d 龄期无侧限抗压强度不小于 4.0 MPa 的下限要求,对应的弯拉强度和动态回弹模量接近沥青路面设计规范典型力学参数下限值, $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 养生条件下弯拉强度和动态回弹模量接近沥青路面设计规范典型力学参数中值。弯拉强度和动态回弹模量取值决定了水泥稳定碎石结构层的层底拉应力和疲劳开裂寿命,是确定路面结构层厚度的重要力学参数,文中不同养生温度下的力学性能试验结果可为中国寒区水泥稳定碎石基层结构

设计提供试验数据支撑。

2.2 疲劳特性

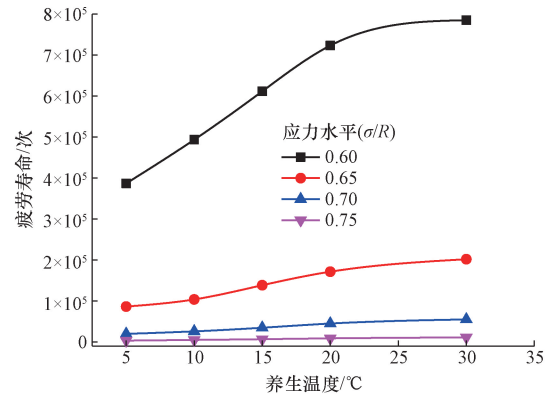
平行试件的疲劳寿命和疲劳寿命平均值结果汇总见表4。

由表4和图3所示疲劳试验结果可知:

(1)应力强度比相同,疲劳寿命随着养生温度增加呈两阶段增长趋势[图3(a)],即先快速增大后趋于平稳,疲劳寿命随养生温度增大而提高,但疲劳寿命增长率持续减小,这与力学性能随养生温度的变化趋势一致。

(2)水泥稳定碎石混合料的疲劳寿命随养生稳定降低而减小,相较于20℃标准养生温度,在5~10℃养生条件下,水泥稳定碎石混合料的疲劳寿命降幅为40%~50%,寒区低温环境温度严重劣化了水泥稳定碎石结构层的抗疲劳耐久性能。

(3)参考已有研究成果^[17-19],图3(b)建立了5~30℃养生条件下水泥稳定碎石混合料的疲劳方程,拟合结果显示,水泥稳定碎石混合料的疲劳寿命(N)对数(lgN)随疲劳试验应力强度比(σ/R , σ 为疲劳试验施加的弯拉荷载, R 为最大弯拉强度)增大呈线性关系减小,疲劳方程 $lgN = b(\sigma/R) + a$ (a 、 b 为疲劳试验回归参数)的拟合优化度 R^2 大于0.98,在5、10、15℃低温养生条件下,水泥稳定碎石混合料的疲劳方程斜率 b 依次为-13.582、-13.462、-13.231,疲劳方程截距依次为13.571、



(a) 不同养生温度疲劳寿命

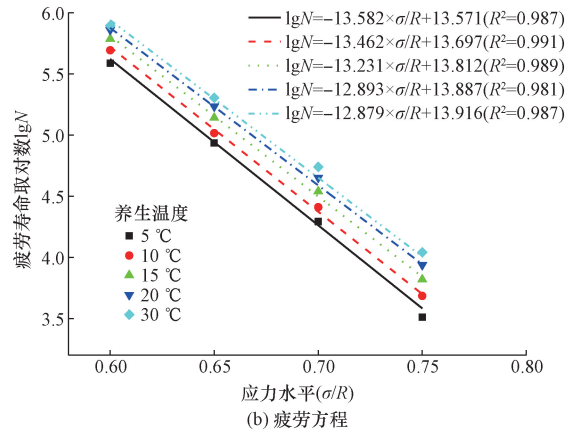


图3 疲劳试验结果

Fig. 3 Fatigue test results

表4 弯拉疲劳试验结果
Table 4 Fatigue test results

养生温度/%	应力水平	疲劳寿命/次				均值
		①	②	③	④	
5	0.60	442 623	399 535	366 696	338 744	442 623
	0.65	95 105	88 743	91 233	69 988	95 105
	0.70	18 824	24 997	15 944	18 765	18 824
	0.75	3 545	3 111	2 884	3 444	3 545
10	0.60	516 544	526 690	471 117	459 982	516 544
	0.65	109 334	119 833	94 443	91 245	109 334
	0.70	26 108	28 887	22 456	25 563	26 108
	0.75	4 827	5 110	4 887	4 555	4 827
15	0.60	583 765	612 244	569 875	680 983	583 765
	0.65	129 117	144 408	119 994	159 844	129 117
	0.70	35 822	32 983	39 873	29 833	35 822
	0.75	6 763	6 998	6 509	6 123	6 763
20	0.60	708 474	733 094	774 440	677 779	708 474
	0.65	150 964	178 744	188 983	166 763	150 964
	0.70	42 550	45 909	51 111	39 998	42 550
	0.75	8 678	8 873	8 733	8 387	8 678
30	0.60	771 057	816 119	789 444	764 499	771 057
	0.65	179 482	229 833	209 333	188 839	179 482
	0.70	65 910	60 983	48 894	55 984	65 910
	0.75	11 077	10 934	10 219	11 752	11 077

13.697、13.812,相较于标准养生温度(20℃),在5、10、15℃低温养生条件下疲劳方程斜率减小了5.3%、4.4%、2.6%,截距增大了2.3%、1.4%、0.5%。由此可见,在寒区低温养生环境,既缩短了疲劳寿命,同时也增强了疲劳寿命对荷载水平的敏感性,这一点,对比沥青路面设计规范(JTG D50—2017)规定的无机结合料稳定层疲劳破坏模型参数($a=13.24, b=-12.52$),也可以得到验证。文中拟合回归的疲劳方程参数,可为寒区水泥稳定碎石结构层疲劳特性分析提供数据支撑。

2.3 抗冻耐久性性能

针对中国寒区频繁的冻融循环环境,研究养生温度和冻融作用下水泥稳定碎石的无侧限抗压强度(unconfined compressive strength, UCS)和损伤度(damage degree, DD)衰减规律,结果如图4所示。

由图4所示抗冻耐久性试验结果可知:

(1)水泥稳定碎石混合料的UCS随冻融作用次数增加呈指数关系衰减,无侧限抗压强度损伤度呈指数函数关系逐渐累积,拟合优化度 $R^2 > 0.97$ 。可采用指数函数模型预测寒区冻融循环作用下水泥稳定碎石混合料的损伤特性。经历15次冻融循环

后,5组水泥稳定碎石混合料的无侧限抗压强度趋于稳定,无侧限抗压强度衰减趋势与文献[11]相吻合。

(2)在经历20次冻融循环后,5、10、15、20、30℃养生条件下水泥稳定碎石混合料的UCS分别下降至5.05、6.71、8.27、9.47、10.51 MPa, DD分别达到了29.3%、22.4%、18.4%、16.5%、14.3%。冻融循环20次后,水泥稳定碎石混合料在5、10、15℃低温养生条件下的无侧限抗压强度,仅为标准养生温度下的53.3%、70.7%、87.3%,同时无侧限抗压强度损伤度增大了0.78、0.36、0.12倍。表明寒区低温养生条件下水泥稳定碎石结构层初期强度小,且冻融循环作用下无侧限抗压强度衰减幅度大。强度形成期间养生温度低,导致水泥稳定碎石混合料抗冻耐久性性能显著降低,这是寒区水泥稳定碎石结构层早发性病害的诱因之一。

3 微细观空隙结构

3.1 空隙级配

参考文献[16-17, 20]研究成果,统计体积 V 介于 $0 \sim 100 \text{ mm}^3$ 区间内的微细观空隙级配,结果如表5所示。由表5可知:

(1)总体上,水泥稳定碎石混合料微细观空隙结构中体积 $V < 0.1 \text{ mm}^3$ 、 $V < 0.05 \text{ mm}^3$ 的空隙数量比例为56.8%~64.8%、65.4%~74.3%,空隙级配中 $V > 1 \text{ mm}^3$ 的空隙数量比例仅占15.2%~21.0%,体积 $V > 10 \text{ mm}^3$ 的空隙数量比例为4.4%~6.8%,体积 $V > 50 \text{ mm}^3$ 的空隙数量比例约为0.5%~1.0%。

(2)随着养生温度增加,空隙级配中 $0.05 \text{ m}^3 \leq V < 0.1 \text{ m}^3$ 和 $V < 0.05 \text{ mm}^3$ 的空隙数量增大, $V \geq 0.1 \text{ mm}^3$ 的空隙数量减小,表明提高养生温度对水泥稳定碎石混合料空隙级配有细化作用。

(3)养生温度对水泥稳定碎石混合料微细观空隙级配影响显著,提高养生温度有细化水泥稳定碎

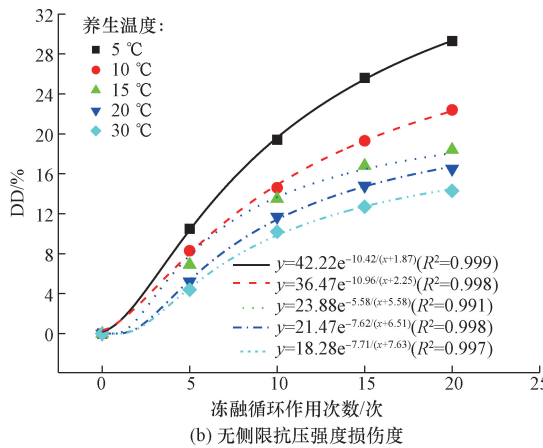
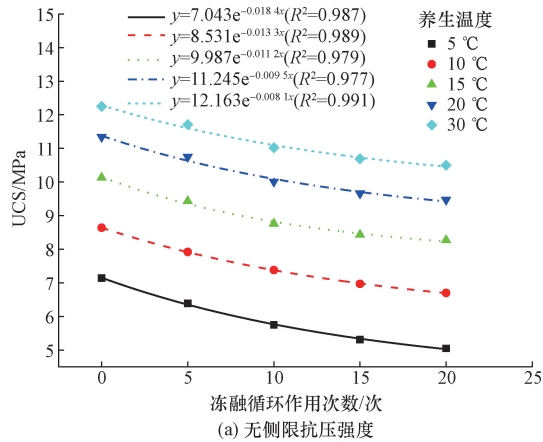


图4 抗冻耐久性试验结果

Fig. 4 Test results of frost resistance durability

表5 微细观空隙级配

Table 5 Microscopic void gradation

空隙体积 V/mm^3	水泥稳定碎石混合料空隙级配/%				
	5℃	10℃	15℃	20℃	30℃
$V \geq 100$	0.616	0.552	0.488	0.432	0.427
$50 \leq V < 100$	0.348	0.272	0.208	0.124	0.114
$30 \leq V < 50$	0.832	0.772	0.632	0.209	0.19
$20 \leq V < 30$	2.048	1.792	1.672	1.247	1.211
$10 \leq V < 20$	2.952	2.716	2.616	2.589	2.494
$5 \leq V < 10$	3.052	2.632	2.536	2.449	2.406
$2 \leq V < 5$	4.312	3.696	3.128	3.525	3.183
$1 \leq V < 2$	6.808	6.248	5.562	5.387	5.135
$0.5 \leq V < 1$	7.296	7.243	6.812	5.795	5.471
$0.1 \leq V < 0.5$	6.336	5.632	5.472	5.439	5.118
$0.05 \leq V < 0.1$	8.568	9.072	9.228	9.392	9.433
$V < 0.05$	56.832	59.373	61.646	63.412	64.818

石混合料微细观空隙结构的作用。其中,养生温度由 5、10、15、20、30 ℃ 养生条件下,水泥稳定碎石混合料微细观空隙级配中体积 $V < 0.1 \text{ mm}^3$ 的空隙占分别为 65.4%、68.4%、70.9%、72.8%、74.3%,体积大于 100 mm^3 的空隙占分别为 0.62%、0.55%、0.49%、0.43%、0.43%,表明降低养生温度导致水泥稳定碎石混合料内部出现有害空隙的概率增大。

3.2 微细观空隙直径期望值

借鉴文献[21-22]研究成果,假定微细观空隙均为球体,且独立分布的空隙体积在 $0 \sim 100 \text{ mm}^3$ 区间内为不间断的随机变量,已知空隙体积条件下,按照球体直径与体积的数学关系反算每个独立空隙的当量直径,按照数理统计学概率期望基本定义,计算经历微细观空隙直径期望值,相关公式为

$$d_i = \left(\frac{3V_i}{4\pi} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (1)$$

$$E(d) = \sum_{i=0}^n d_i p_i \quad (2)$$

式中: V_i 为 $0 \sim 100 \text{ mm}^3$ 范围内的某档空隙体积; d 为等体积球体当量直径; p_i 为直径为 d_i 的概率; $E(d)$ 为数学期望。计算结果如图 5 所示。由图 5 试验结果可知:

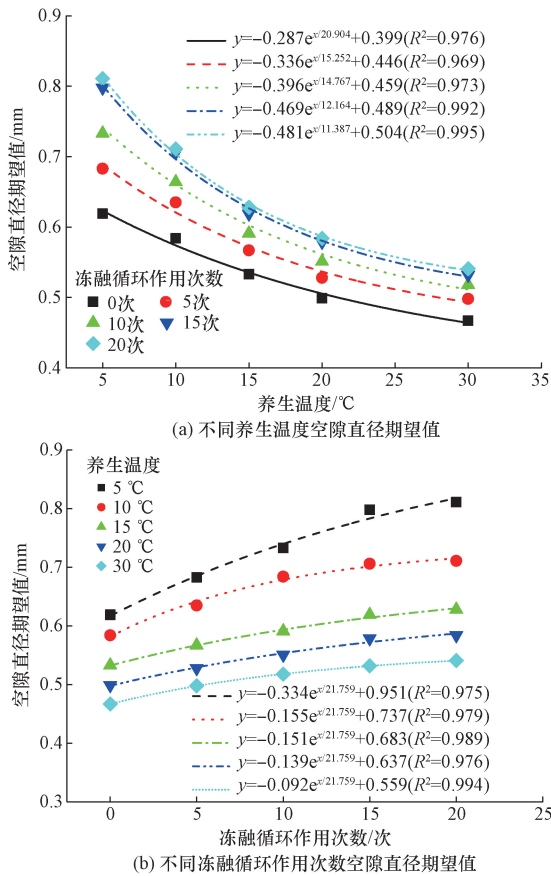


图 5 微细观空隙直径期望值

Fig. 5 Micro void diameter expected value

(1)同一冻融循环作用次数,水泥稳定碎石混合料的空隙直径期望值随着养生温度增加呈指数关系减小。冻融循环作用劣化了水泥稳定材料的微细观空隙结构,导致总空隙数量减小、空隙率增大、微细观空隙直径期望值增大,养生温度越低,冻融循环作用对水泥稳定碎石微细观空隙结构的劣化作用越明显。

(2)养生温度由 5 ℃ 提高至 30 ℃,经历 5、10、10、15、20 次冻融循环后,水泥稳定碎石混合料的微细观空隙直径期望值分别降低了 34.1%、33.3%、29.3%、27.1%、24.6%,提高养生期间的养生温度,能够降低冻融循环后微细观空隙直径衰减速率,增加冻融循环试验过程中水泥稳定碎石混合料空隙结构的稳定。

4 微细观空隙结构与宏观性能之间的关系

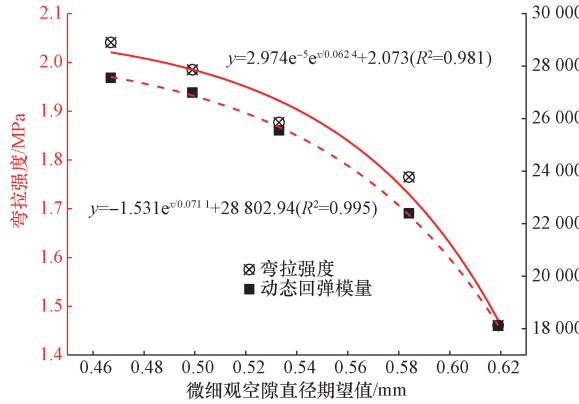
为了从细微观角度揭示养生温度对水泥稳定碎石混合料力学性能和疲劳特性的影响机理,建立水泥稳定碎石混合料微细观空隙直径期望值之间的拟合关系,如图 6、图 7 所示。

图 6 拟合结果表明,水泥稳定碎石混合料的力学性能随空隙直径期望值的增大呈指数函数关系减小。疲劳寿命随微细观空隙直径增大呈线性关系减小,力学性能及疲劳性能与微细观空隙直径期望值之间的拟合优化度 R^2 均大于 0.98。表明,微细观空隙直径期望值的减小,是提高养生温度养生水泥稳定碎石混合料力学性能和疲劳特性增强的原因之一。

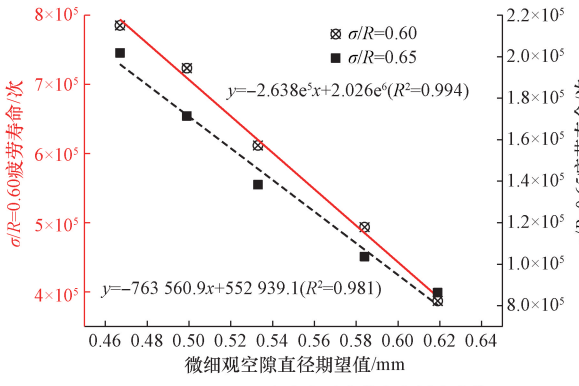
由图 7 拟合结果可知,养生温度相同[图 7(a)],经历 1~20 次冻融循环作用后,水泥稳定碎石混合料的无侧限抗压强度随微细观空隙直径期望值增大而线性关系减小;整体上,经历冻融循环作用后,水泥稳定碎石混合料的无侧限抗压强度随着微细观空隙直径期望值增大呈指数关系减小,拟合优化度 $R^2 > 0.97$ 。由此可知,在冻融循环作用改变了水泥稳定碎石内部微细观空隙结构,是冻融循环作用导致水泥稳定碎石混合料力学性能下降的原因之一,提高养生温度对水泥稳定碎石混合料微细观空隙结构的细化作用,从而增加了水泥稳定碎石混合料的力学性能、抗疲劳耐久性能与抗冻性。

5 结论

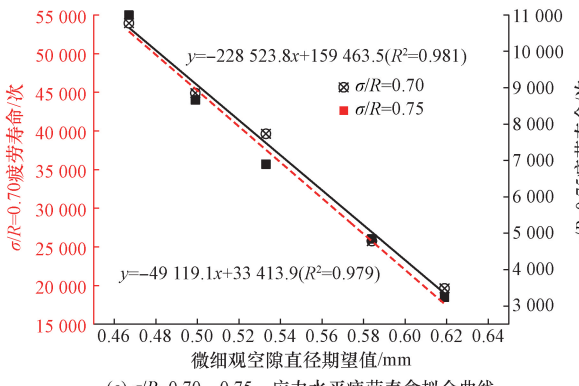
(1)随着养生温度增加,水泥稳定碎石混合料的力学性能呈指数关系增大。建议尽量将水泥稳定碎石混合料安排在 10 ℃ 以上季节施工,同时开展



(a) 弯拉强度、动态回弹模量与微细观空隙直径期望值之间的拟合曲线



(b) $\sigma/R=0.60, 0.65$, 应力水平疲劳寿命拟合曲线



(c) $\sigma/R=0.70, 0.75$, 应力水平疲劳寿命拟合曲线

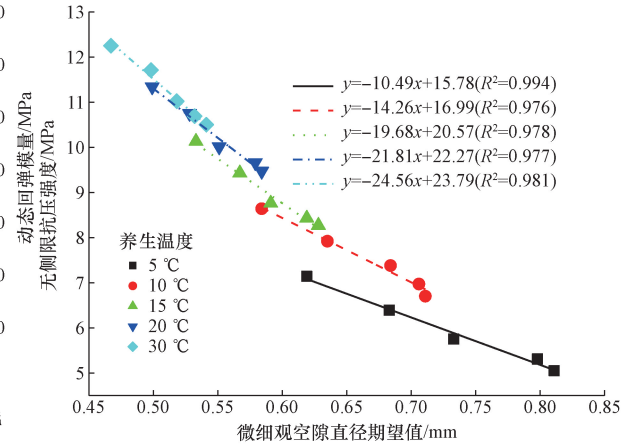
图6 冻融循环作用前微细观空隙结构与宏观性能之间的拟合关系

Fig. 6 The fitting relationship between micro void structure and macro properties before freeze-thaw cycles

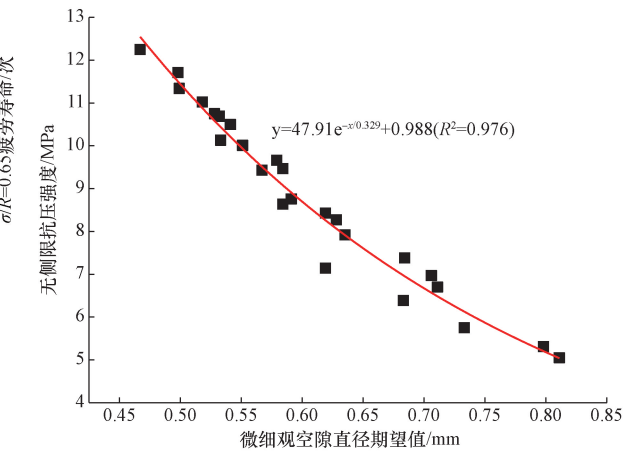
室内试验测试水泥稳定碎石混合料在低温养生温度条件下的力学性能参数,无测试条件时候,弯拉强度和动态回弹模量可取规范建议的力学参数下限值。

(2) 低温养生不仅降低了水泥稳定碎石混合料的抗疲劳性能和抗冻耐久性,也增大了水泥稳定碎石混合料疲劳寿命对应力强度比的敏感性。

(3) 养生温度对水泥稳定碎石混合料微细观空隙级配影响显著,提高养生温度有细化水泥稳定碎



(a) 不同养生温度无侧限抗压强度与微细观空隙直径期望值拟合曲线



(b) 不同冻融循环作用次数无侧限抗压强度与微细观空隙直径期望值拟合曲线

图7 冻融循环作用后微细观空隙结构与宏观性能之间的拟合关系

Fig. 7 The fitting relationship between micro void structure and macro properties after freeze-thaw cycles

石混合料微细观空隙结构的作用,提高养生温度能够降低冻融循环后微细观空隙直径衰减速率,增加冻融循环试验过程中水泥稳定碎石混合料空隙结构的稳定。

参考文献

[1] 姚江龙, 扈惠敏, 韩风. 可再分散乳胶粉对水泥稳定碎石材料性能影响的试验研究[J]. 科学技术与工程, 2023, 23(27): 11816-11827.
Yao Jianglong, Hu Huimin, Han Feng. Experimental study on the effect of redispersible latex powder on the properties of cement stabilized crushed stone material[J]. Science Technology and Engineering, 2023, 23(27): 11816-11827.

[2] 林焯, 潘彦邑, 梁军林, 等. 水泥稳定碎石材料水化过程的电化学阻抗谱[J]. 科学技术与工程, 2022, 22(26): 11652-11659.
Lin Ye, Pan Yanyi, Liang Junlin, et al. Electrochemical impedance spectroscopy of cement stabilized crushed stone material in the hydration process[J]. Science Technology and Engineering, 2022, 22(26): 11652-11659.

[3] 姚爱玲, 韩方元, 许敏, 等. 水泥稳定碎石基层混合料的膨胀

- 性分析[J]. 科学技术与工程, 2020, 20(12): 4902-4908.
- Yao Ailing, Han Fangyuan, Xu Min, et al. Swelling analysis of cement stabilized macadam mixture[J]. Science Technology and Engineering, 2020, 20(12): 4902-4908.
- [4] 王宏, 李刚, 王崇涛. 寒区低温环境下泡沫沥青冷再生混合料性能研究[J]. 冰川冻土, 2024, 46(5): 1652-1665.
- Wang Hong, Li Gang, Wang Chongtao. Study on properties of foamed asphalt cold recycled mixture under low temperature environment in cold regions[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2024, 46(5): 1652-1665.
- [5] 王宏. 沙漠戈壁地区水泥稳定碎石基层沥青路面拱胀调查与防治措施[J]. 公路, 2019, 64(3): 266-274.
- Wang Hong. Investigation of asphalt pavement blow-upon cement stabilized crushed stone base and preventive measures in Gobi desert[J]. Highway, 2019, 64(3): 266-274.
- [6] 司伟, 马彪, 仁乾龙珠, 等. 青藏高寒地区真实环境冻融作用的量化与统计[J]. 江苏大学学报(自然科学版), 2019, 40(2): 237-243.
- Si Wei, Ma Biao, Renqian Longzhu, et al. Quantification and statistics of site freeze-thaw cycles in Qinghai-Tibet plateau cold region[J]. Journal of Jiangsu University (Natural Science Edition), 2019, 40(2): 237-243.
- [7] 司伟, 胡永平, 马彪, 等. 青藏公路沿线真实环境冻融次数变化分析[J]. 中国科技论文, 2018, 13(19): 2161-2166.
- Si Wei, Hu Yongping, Ma Biao, et al. Variation of freeze-thaw cycles of the real environment along with the Qinghai-Tibet Highway[J]. China Science Paper, 2018, 13(19): 2161-2166.
- [8] 祁运佳. 低温施工对水泥稳定碎石力学性能影响研究[D]. 天津: 河北工业大学, 2019.
- Qi Yunjia. Influence of low temperature construction on mechanical properties of cement stabilized crushed stone[D]. Tianjin: Hebei University of Technology, 2019.
- [9] 高建强. 低温环境下水泥稳定碎石基层施工技术研究[D]. 天津: 河北工业大学, 2018.
- Gao Jianqiang. Research on construction technology of cement stabilized gravel base under low temperature environment[D]. Tianjin: Hebei University of Technology, 2018.
- [10] 焦耀亮. 低温环境下水泥稳定碎石基层施工技术及其混合料力学性能研究[J]. 交通世界, 2023(6): 121-123.
- Jiao Yaoliang. Study on construction technology and mechanical properties of cement stabilized gravel base under low temperature environment[J]. Transportation World, 2023(6): 121-123.
- [11] 王一琪, 谭忆秋, 王兴隆. 水泥稳定碎石冻融损伤疲劳特性研究[J]. 公路, 2017(4): 239-242.
- Wang Yiqi, Tan Yiqiu, Wang Xinglong. Research on freeze-thaw damage fatigue characteristics of cement stabilized gravel[J]. Highway, 2017(4): 239-242.
- [12] 马士宾, 高建强, 魏建慧, 等. 低温早强水泥稳定碎石材料无侧限抗压强度和抗冻性能研究[J]. 硅酸盐通报, 2019, 38(3): 756-761.
- Ma Shibin, Gao Jianqiang, Wei Jianhui, et al. Study on unconfined compressive strength and frost resistance of low temperature early strength cement stabilized macadam material[J]. Bulletin of Silicates, 2019, 38(3): 756-761.
- [13] 杨明, 蒋应军, 李明杰, 等. CTB-50 水泥稳定碎石抗冻性能研究[J]. 公路, 2023(1): 46-50.
- Yang Ming, Jiang Yingjun, Li Mingjie, et al. Research on frost resistance of CTB-50 cement stabilized macadam[J]. Highway, 2023(1): 46-50.
- [14] 朱文强. 冻融条件下水泥稳定碎石力学性能变化规律试验研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2015.
- Zhu Wenqiang. Experimental study on evolution under freeze-thaw conditions mechanical properties of cement stabilized macadam[D]. Harbin Institute of Technology, 2015.
- [15] 王英涵. 基于无损检测技术的水泥稳定碎石基层细观特征与冻融损伤特性研究[D]. 长春: 吉林大学, 2020.
- Wang Yinghan. Study on mesoscopic characteristics and freeze-thaw damage characteristics of cement-stabilized macadam base using non-destructive techniques[D]. Changchun: Jilin University, 2020.
- [16] 盛燕萍, 贾海川, 孙仕伟, 等. 不同温度下早强低收缩水泥稳定碎石特性的试验研究[J]. 硅酸盐通报, 2019, 38(10): 3215-3222.
- Sheng Yanping, Jia Haichuan, Sun Shiwei, et al. Experimental study on performance of early strength and low shrinkage cement stabilized macadam at different temperatures[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2019, 38(10): 3215-3222.
- [17] 王稷良, 郭文彬, 宋庆凯, 等. 激振搅拌对水泥稳定碎石与煤矸石抗压强度的影响[J]. 硅酸盐通报, 2024, 43(2): 757-765.
- Wang Jiliang, Guo Wenbin, Song Qingkai, et al. Effect of excitation stirring on compressive strength of cement stabilized crushed stone and coal gangue[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2024, 43(2): 757-765.
- [18] 熊延华, 屈会朋, 阳应荣, 等. 聚乙烯醇纤维水泥稳定碎石的疲劳性能研究[J]. 硅酸盐通报, 2022, 41(10): 3493-3500.
- Xiong Yanhua, Qu Huipeng, Yang Yingrong, et al. Fatigue properties of polyvinyl alcohol fiber cement stabilized crushed stone[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2022, 41(10): 3493-3500.
- [19] 俞靖洋, 梁乃兴, 童攀, 等. 聚乙烯醇纤维水泥稳定碎石基层疲劳寿命分析[J]. 硅酸盐通报, 2019, 38(8): 2408-2419.
- YU Jingyang, Liang Naixing, Tong Pan, et al. Fatigue life analysis of polyvinyl alcohol fiber modified cement stability macadam base pavement[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2019, 38(8): 2408-2419.
- [20] 王宏, 李刚. 盐冻循环作用下水泥稳定碎石混合料的宏观性能[J]. 公路交通科技, 2024, 41(10): 90-102.
- Wang Hong, Li Gang. Macro and micro properties of cement stabilized crushed stone mixture under salt frost coupling erosion[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2024, 41(10): 90-102.
- [21] 王宏, 刘锋. 不同成型方式泡沫沥青冷再生混合料微观结构性能研究[J]. 公路交通科技, 2016, 33(2): 19-27.
- Wang Hong, Liu Feng. Research of microstructure performance of foamed asphalt cold recycled mixture indifferent compaction methods[J]. Highway and Transportation Science and Technology, 2016, 33(2): 19-27.
- [22] 王宏. 不同水泥掺量乳化沥青冷再生混合料微观空隙分布特征[J]. 公路交通科技, 2016, 33(7): 27-34.
- Wang Hong. Meso-microscopic void distribution characteristics of emulsified asphalt cold recycled mixture with different cement contents[J]. Highway and Transportation Science and Technology, 2016, 33(7): 27-34.