

页岩循环冻融试验研究

朱志勇

(岳阳市公路桥梁基建总公司, 湖南 岳阳 414000)

摘要: 冻融作用导致岩石微结构及力学性质劣化, 是诱发岩体变形与破坏的主要原因之一。文中借助核磁共振技术、超声波检测、岩石压缩试验等手段, 分析页岩在冻融循环作用下的微观结构及力学劣化特性, 揭示受荷岩石冻融破坏机制。结果表明, 页岩弹性模量 E 和单轴抗压强度 R 表现出相同的冻融损伤效应, 均随冻融循环次数的增加呈指数衰减, 且纵波波速与单轴压强之间存在指数函数关系; 试样的核磁共振 T_2 谱分布、孔隙率均随冻融次数的增加呈上升趋势, 且表现为冻融初期(前 30 次)冻融劣化效果明显、冻融后期(后 20 次)趋于缓和, 并结合核磁共振图像动态揭示了页岩的冻融损伤劣化过程。

关键词: 公路; 页岩; 冻融次数; 核磁共振; 劣化特性; 压缩试验

中图分类号: U418.5

文献标志码: A

文章编号: 1671-2668(2017)05-0105-05

(泥)页岩广泛分布于中国华中、华北等寒区的三叠系、侏罗系地层中, 施工过程中常见的问题是寒区长期的冻融循环作用使岩体风化崩解和内部孔隙、裂缝扩展, 继而致使其宏观物理力学性质衰减劣化, 诱发岩体地裂缝、泥石流、滑坡等众多冻融灾害。有关冻融交替作用下岩体强度劣化及破坏机理的研究已取得丰硕成果; Yamabe T. 等以温度、冻融循环次数、不同围压及饱水程度为变量进行砂岩力学试验, 分析了饱水程度对岩石变形特征的影响及岩石力学强度衰减劣化规律; Nicholson H. 等对 10 种岩石进行冻融循环试验, 研究了岩性对冻融损伤劣化程度的影响; 母剑桥、周科平、刘成禹等以不同岩石为对象进行冻融力学试验, 分析了不同循环次数下岩石分化系数、冻融损伤值的变化规律, 揭示了分化岩石的损伤机制; 吴刚、方云等分别揭示了云冈石窟砂岩与河南大理岩的破坏机制, 归纳了岩石冻融作用下的主要物理力学性质及微观结构的变化; 张继周等通过 3 种岩石在蒸馏水与酸性两种水化环境下的冻融试验, 得出了岩石的损伤劣化机制及影响因素, 并对两种环境下损伤程度进行了比较和安全性评估; 张慧梅等通过对饱和红砂岩和页岩的冻融试验, 研究了岩性及冻融循环等对岩石损伤的影响, 并建立了冻融受荷岩石的损伤演化方程; 徐玉娟、王萍等基于扫描电镜及核磁共振等手段, 从细观结构角度分析了泥页岩、花岗岩冻融微观结构的变化特征。然而岩体边坡的变形与破坏是宏观、细观综合作用的结果, 目前在岩体冻融方面的研究在该方向涉及

较少, 且研究手段较单一。为此, 该文从微观结构和宏观物理力学角度, 借助核磁共振技术、超声波检测、岩石压缩试验等手段, 分析页岩在冻融循环作用下微结构及力学性质的劣化规律, 揭示受荷页岩的冻融破坏机制。

1 试验概况

1.1 试样

试样层理分布匀称、吸水性较强, 经 X 射线衍射试验分析得到该页岩主要由石英、黑锌锰矿与浊沸石等矿物组成, 经扫描电镜可见试样内部微观孔隙发育、随机分布不均(见图 1)。

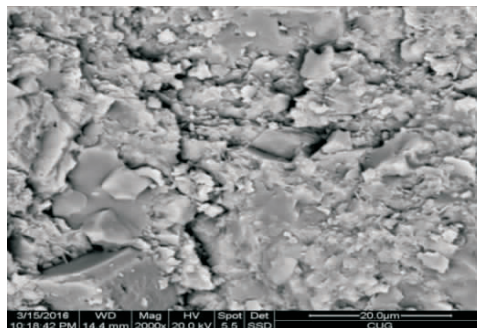


图 1 炭质页岩扫描电镜试验照片

1.2 试验过程及方法

(1) 将取自矿井工作面中的新鲜岩块按试验要求钻取圆柱体标准试样, 分成 5 组, 编号为 A、B、C、D、E, 根据岩石试验规程选用抽真空饱水的方法制备饱和试样(见表 1)。

表1 冻融试验岩样分组

冻融次数/次	岩样分组
0	A-1-1, A-1-2, A-1-3, A-1-4
10	B-2-1, B-2-2, B-2-3, B-2-4
20	C-3-1, C-3-2, C-3-3, C-3-4
30	D-4-1, D-4-2, D-4-3, D-4-4
50	E-5-1, E-5-2, E-5-3, E-5-4

(2) 将饱和页岩试样置于冻融试验机中进行冻融循环试验,温度维持 -20°C 冷冻12 h;再开启进水系统,水温为 20°C ,要求水面全部浸没试样20 mm以上12 h,完成一次冻融过程。根据寒区工程需求及岩样预冻效果确定冻融次数为50次。

(3) 单轴压缩试验。对已饱和冻融完成的岩样利用超声波检测仪进行波速测试,试验时使用耦合剂黄油将可自发自收的平面探头与试样两端头紧密耦合。再将已完成超声检测的岩样置于RMT岩石与砼力学试验机进行单轴压缩试验,加载方式均采用位移控制,速率为 0.005 mm/s 。

(4) 核磁共振试验。对不同冻融阶段的饱和试样,利用核磁共振成像分析仪对高径比为1:1的圆柱岩样进行核磁共振试验,试验温度为常温 20°C 。

2 试验结果及分析

2.1 单轴压缩试验

2.1.1 试验结果

力学性质的衰减是表征岩石冻融劣化程度的一个重要指标。通过冻融循环后的页岩单轴压缩试验及超声波检测分析,得到试样在各冻融阶段的单轴抗压强度、弹性模量、变形模量、泊松比与纵波波速等参数(见表2)。

由表2可知:1) 弹性模量 E 和单轴抗压强度 R_c 表现出相同的冻融损伤效应,均随冻融循环次数的增加而下降。饱水页岩抗压强度在冻融前30次降低显著,平均值由 50.49 MPa 减少到 37.42 MPa ,降低 25.88% ;30次冻融之后降低幅度趋于缓慢,下降幅度为 5.63% 。弹性模量 E 的劣化程度比单轴抗压强度 R_c 大,30次冻融循环后降低幅值达到 35.629% 。由图2、图3可见单轴抗压强度 R_c 、弹性模量 E 与冻融循环次数 n 大体呈式(1)、式(2)所示的指数趋势衰减关系。2) 页岩试样的单轴抗压强度 R_c 和纵波波速 v_p 具有一定的关联性, R_c 越高, v_p 越大,反之越小,大致呈指数增长趋势(见图4)。对经过20次冻融后试样的单轴抗压强度 R_c 与纵

表2 页岩饱和单轴压缩试验结果

冻融循环次数/次	试样编号	单轴抗压强度 R_c/MPa	变形模量/ GPa	弹性模量 E/GPa	泊松比	纵波波速 $v_p/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$
0	A-1-1	56.95	14.819	16.047	0.262	3 230
	A-1-2	48.93	10.973	12.676	0.263	3 125
	A-1-3	45.60	9.741	11.078	0.278	3 263
10	B-2-1	43.67	9.381	10.366	0.296	2 940
	B-2-2	45.84	10.528	12.452	0.303	2 805
	B-2-3	13.26	2.328	3.833	0.520	1 048
20	C-3-1	34.41	6.346	8.625	0.293	2 555
	C-3-2	39.76	8.384	8.925	0.304	2 358
	C-3-3	45.57	8.387	10.670	0.291	2 834
30	D-4-1	12.91	3.477	5.126	0.560	864
	D-4-2	37.26	6.651	9.435	0.313	2 205
	D-4-3	37.59	7.183	7.646	0.325	2 307
50	E-5-1	37.74	6.671	8.873	0.301	2 179
	E-5-2	35.95	6.925	7.152	0.311	2 089
	E-5-3	32.25	5.500	7.238	0.291	2 290

$$R_c = \exp(3.92 - 0.014n + 1.45n^2) \quad (1)$$

$$E = 7.02 + 6.32\exp(-0.04n) \quad (2)$$

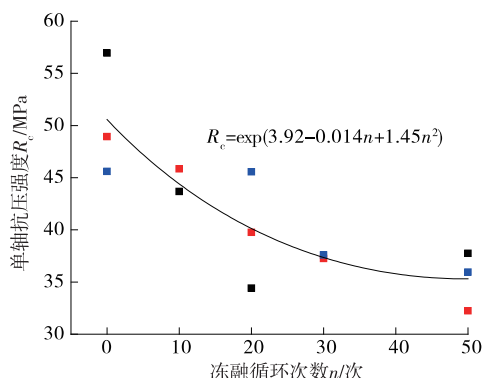


图2 炭质页岩单轴抗压强度与冻融循环次数的关系

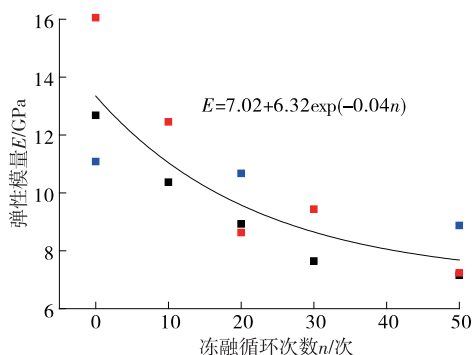


图3 炭质页岩弹性模量与冻融循环次数的关系

波波速 v_p 的关系进行非线性拟合,得式(3)。

$$R_c = 1.13\exp(v_p/1111.23) + 28.05 \quad (3)$$

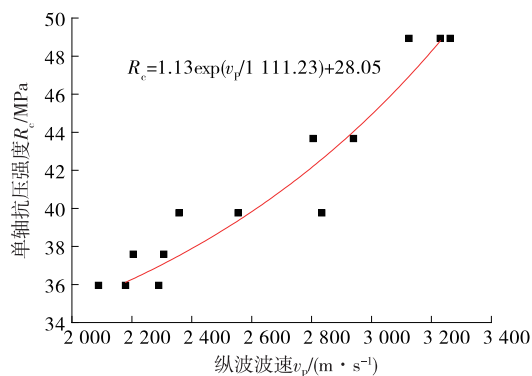


图4 炭质页岩单轴抗压强度与纵波波速的关系

2.1.2 应力—应变曲线

经过50次冻融作用后页岩试样的应力—应变曲线见图5。

由图5可知:单个阶段内页岩试样在单轴压缩试验中会经历微裂隙和孔隙的压密、弹性变形至微破坏发展、岩样塑性屈服和岩样破坏4个阶段。经过0、10、20、30、50次冻融作用后,随冻融次数的增

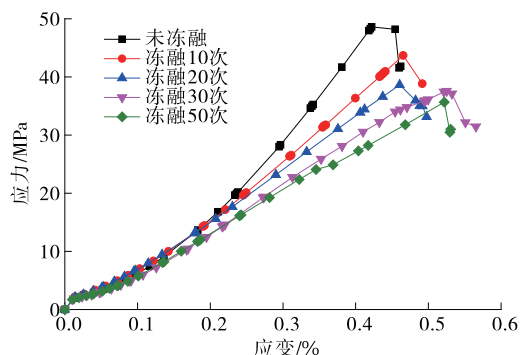


图5 不同冻融次数页岩单轴压缩应力—应变曲线

加,页岩的微裂隙和孔隙压密阶段增大,峰值应变也渐趋变大,饱水试样从初始状态(未冻融)至50次冻融循环后,炭质页岩的压密阶段由初始的0.084%增长到0.212%,峰值应变由初始的0.445%增长到0.519%。这是因为岩样饱水过程中水分软化孔隙结构,循环冻融过程中冰体的冻胀力作用加速新生微孔隙萌生,导致炭质页岩压密阶段增大、峰值应变也渐趋变大。

2.2 核磁共振试验

2.2.1 核磁共振 T_2 谱分布

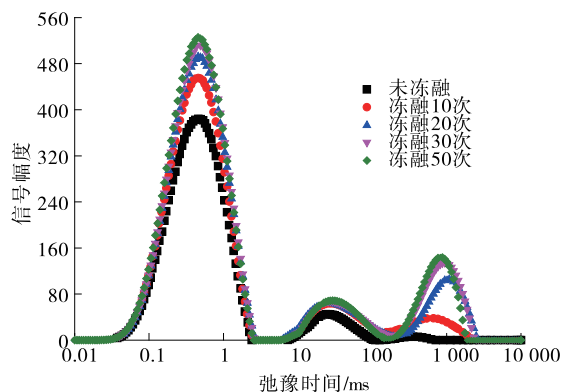
根据王萍等对核磁共振技术中弛豫机制的介绍,岩石孔隙中的流体弛豫机制包括表面流体的弛豫机制、分子自扩散弛豫机制和自由流体的弛豫机制,对于多孔岩体中的流体,后面2种弛豫机制可忽略。因此,横向弛豫过程 T_2 可表示为:

$$\frac{1}{T_2} = \rho_2 \left(\frac{S}{V} \right)_{\text{pore}} \quad (4)$$

式中: ρ_2 为颗粒表面 T_2 的弛豫强度; S 、 V 分别为孔隙材料的表面积和流体体积。

不同冻融次数下页岩试样 NM-1、NM-3 的核磁共振 T_2 谱分布分别见图6、图7。

峰面积的占比与对应孔径的量相关。由图6、

图6 试样 NM-1 核磁共振 T_2 谱分布曲线

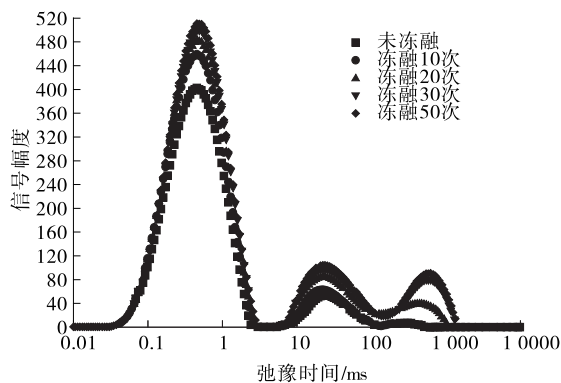
图7 试样 NM-3 核磁共振 T_2 谱分布曲线

图7可知:初始状态(未冻融)下试样 NM-1 与 NM-3 的 T_2 谱分布都出现明显的 2 个峰图,其对应的弛豫时间较小,则试样比表面 S/V 值较大,质子与颗粒碰撞次数较频繁,表明孔隙分布以小、中尺寸孔隙为主。从整体冻融过程来看,随着冻融循环次数的增加,峰图由原来的 2 个变为 3 个,试样的波峰峰

值均呈逐渐上升趋势,主要表现在大、中尺寸孔隙核磁共振信号量增加明显。其中 NM-1 在第 30 次冻融后大、小孔隙信号强度增加幅度达到最大,之后 T_2 分布曲线近乎重合,孔隙变化上升至稳定发展阶段;NM-3 在 20 次冻融左右信号变化幅度达到最大。综合分析,在 50 次冻融交替作用下,冻融初期(前 30 次)孔隙水运移软化孔隙结构速度较快,使内部新生孔隙持续萌生,原生微小尺寸孔隙分裂成大尺寸孔隙或裂隙,冻融劣化效果明显;冻融后期(后 20 次)孔隙率变化趋于缓和。

2.2.2 岩石孔隙率

孔隙率是核磁共振技术检测材料孔隙的空间参数之一。通过适当的刻度核磁共振 T_2 分布曲线积分和可计算得到岩芯孔隙率。4 个页岩岩芯在 50 次冻融循环过程中的核磁共振孔隙率见表 3、图 8,其中孔隙变化率是指岩芯冻融循环后的孔隙率与初始状态(未冻融)下孔隙率的比值。

表3 各冻融阶段的页岩孔隙率及孔隙变化率

岩样编号	不同冻融次数(次)下的孔隙率/%					不同冻融次数(次)下的孔隙变化率/%			
	0	10	20	30	50	10	20	30	50
NM-1	1.54	1.93	2.27	2.41	2.48	25.32	47.41	56.49	61.03
NM-2	1.76	2.04	2.46	2.62	2.71	15.91	39.77	48.86	53.97
NM-3	1.62	1.89	2.32	2.48	2.56	16.67	43.21	53.08	58.02
NM-4	1.51	1.85	2.18	2.34	2.43	22.51	44.37	54.96	60.92

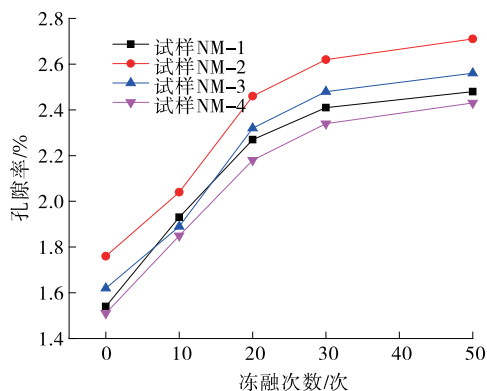


图8 不同冻融循环条件下的岩芯孔隙率

由表 3 和图 8 可知:1) 随着冻融次数的增加,页岩试样的孔隙率呈现上升趋势,但整体孔隙变化率增大幅度各不相同,这与页岩为不规则多孔介质材料、个体差异大的特点相关。50 次冻融后,试样 NM-1 的孔隙率为 2.48%,孔隙变化率最大,达到 61.03%;试样 NM-2 的孔隙率为 2.71%,变化率

最小,为 53.97%。表明冻融作用试样致密性对岩石劣化程度规律的表现不明显。2) 初始状态至 30 次冻融时试样孔隙变化率依次为 56.49%、48.86%、53.08%、54.96%,30~50 次冻融后孔隙变化率依次为 4.54%、5.11%、4.94%、5.96%,冻融前期孔隙变化率较大,冻融劣化程度较大。

2.2.3 核磁共振成像分析

根据核磁共振仪接收到的电磁波衰减信号强弱的不同描绘岩石材料结构图像(核磁共振成像图),直观展现整块圆柱体纵向截面上流体的区域、含量,得到岩样孔隙分布、裂隙拓展情况。核磁共振图像可动态揭示页岩冻融损伤的劣化过程,其亮度与试样中含水量呈正相关,白色亮斑区面积越大,则岩样孔隙越大。图 9、图 10 分别为试样 NM-2、NM-4 冻融后核磁共振成像图。

由图 9、图 10 可知:初始状态(未冻融循环)时,核磁共振信号不强,整体图像偏暗,仅试样两端端部

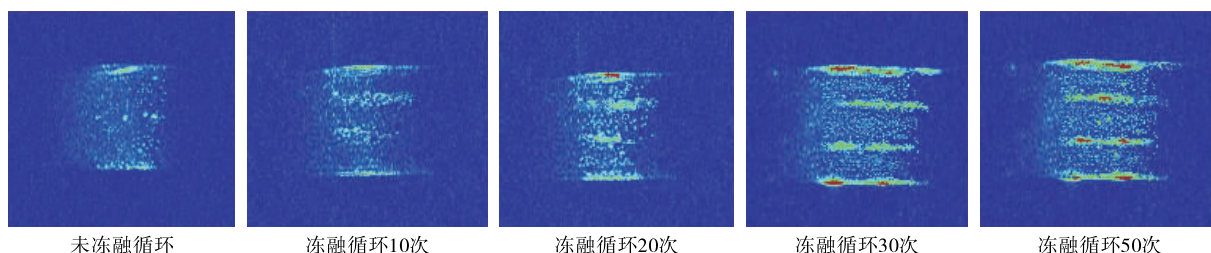


图 9 试样 NM-2 冻融后核磁共振成像图

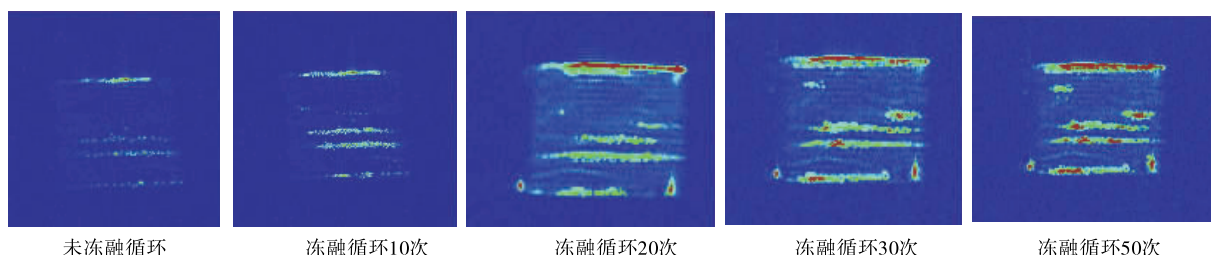


图 10 试样 NM-4 冻融后核磁共振成像图

出现小面积亮区,表明试样的完整性较好,未见大尺寸孔隙分布;经过 10 次冻融循环后,矩形截面中部亮点区域增大,亮度稍有增加,试样遇水软化开始形成新生小尺寸孔隙;20 次冻融后,图像亮度在端部增大明显,亮、暗匀称,大尺寸孔隙增加,可见孔隙形状及大小;30 次冻融循环后,试样的顶端与中部均出现大尺寸孔隙,且亮区向试样横向延伸,图像亮、暗匀称度较差,各尺寸孔隙分布不均匀;50 次冻融循环后,亮区扩大缓慢,亮度继续加深,端面的大尺寸孔隙亮区连通,肉眼可见微小裂缝,表明冻融作用对岩样的表层损伤劣化较大、内部损伤程度较小。综合分析,页岩吸水后极易软化、孔隙收缩开裂,尤其在反复冻融条件下冰体的冻胀力加速试样孔隙收缩、膨胀,促使其物理性质散布越发不均匀,导致岩体力学性质劣化。

3 结论

(1) 页岩的弹性模量 E 和单轴抗压强度 R 。表现出相同的冻融损伤效应,均随冻融循环次数的增加呈指数衰减趋势,且纵波波速与单轴抗压强度之间存在指数函数关系,经非线性拟合可建立单轴力学参数与冻融次数的关系表达式。

(2) 各冻融阶段后页岩单轴压缩应力—应变曲线都经历微裂隙和孔隙压密、弹性变形至微破坏发展、岩样塑性屈服、岩样破坏 4 个阶段;随着冻融循环次数的增加,微裂隙和孔隙压密阶段、峰值应变均渐趋增大。

(3) 页岩 T_2 谱分布峰图表明孔隙分布以小、中尺寸孔隙为主,试样的 T_2 谱分布及孔隙率均随冻融次数增加呈上升趋势,且表现为冻融初期(前 30 次)冻融劣化效果明显,冻融后期(后 20 次)趋于缓和;结合核磁共振图像可动态揭示页岩的冻融损伤劣化过程。

参考文献:

- [1] Yamabe T, Neaupane K M. Determination of some thermo-mechanical properties of sirahama sandstone under subzero temperature condition[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2001, 38(7).
- [2] Nicholson Dawn T, Nicholson Frank H. Physical deterioration of sedimentary rocks subjected to experimental freeze-thaw weathering[J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2000, 25(12).
- [3] 母剑桥, 裴向军, 黄勇, 等. 冻融岩体力学特性实验研究[J]. 工程地质学报, 2013, 21(1).
- [4] 周科平, 许玉娟, 李杰林, 等. 冻融循环对风化花岗岩物理特性影响的实验研究[J]. 煤炭学报, 2012, 31(增刊 1).
- [5] 刘成禹, 何满潮, 王树仁, 等. 花岗岩低温冻融损伤特性的实验研究[J]. 湖南科技大学学报: 自然科学版, 2005, 20(1).
- [6] 方云, 乔梁, 陈星, 等. 云冈石窟砂岩循环冻融试验研究[J]. 岩土力学, 2014, 35(9).
- [7] 吴刚, 何国梁, 张磊, 等. 大理岩循环冻融试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(增刊 1).

(下转第 113 页)

K179+112 两路段共 52.812 km 进行整修,主要以行车道的面层处治为主,挖除行车道损坏的旧沥青面层,重新铺筑同等厚度沥青面层。至 2016 年,该高速公路其他部分路段也出现平整度较差、轻微车辙等损害,经现场检查,决定对 K81+237—K82+435 段采用纤维微表处混合料进行维修。所用材料及配合比与上述室内试验相同。

4.2 施工要点

(1) 施工准备。做好纤维微表处配合比设计,并于施工前对其进行现场验证,确保破乳时间与和易性。

(2) 界面处理。摊铺前仔细检查铺装界面状况,对沥青面层病害按设计要求进行处治,并进行彻底清扫,确保微表处与沥青面层界面干净、稳定。

(3) 微表处摊铺。摊铺前确认各材料用量,摊铺时确保材料供给的连续性。为防止乳化沥青在摊铺机内破乳,拌和过程维持一定的稳定性,并在粘层乳化沥青破乳后即刻摊铺。摊铺分段一次性完成。

(4) 注意事项。为确保乳化沥青的破乳温度,在气温高于 10℃ 时进行纤维微表处施工。路面铺筑后进行严格交通管制直至满足通行要求。

4.3 施工监测与评价

该路段微表处施工时温度为 17~23℃。开放通车 6 个月后对其进行性能检测,结果见表 11。

表 11 纤维微表处路面性能检测结果

检测项目	检测结果
平整度/mm	2
摩擦系数	70
车辙深度/mm	5
构造深度/mm	0.83
渗水系数	62
外观	路面平整,无裂缝

由表 11 可知:该路段采用纤维微表处混合料维修后,路面的摩擦系数、构造深度和防水系数均较

高,且经过高温多雨后未出现车辙与裂缝现象。说明采用纤维微表处混合料进行路面维修,可提高路面的平整度、构造深度与摩擦系数,增强路面的抗车辙能力。

5 结论

(1) 纤维微表处混合料中纤维最佳掺量为 0.1%,最佳油石比为 7.2%。

(2) 在最佳油石比 7.2% 下,纤维微表处混合料的飞散损失率仅 4.47%,具有良好的抗松散性能;动稳定度为 2 698 次/mm,具有良好的高温稳定性。

(3) 采用纤维微表处混合料进行路面维修,路面的平整度得到显著提高,构造深度与摩擦系数也得到提高,抗车辙能力得到增强。

参考文献:

- [1] 鲁圣弟,扈惠敏,王昌引.沥青路面微表处路用性能研究与应用效果评价[J].合肥工业大学学报:自然科学版,2011,34(4).
- [2] 张争奇,陶晶.微表处技术在高速公路沥青路面养护中的应用[J].中外公路,2006,26(3).
- [3] 蔡旭,王端宜,陈小庭.改性乳化沥青对微表处混合料性能的影响[J].公路,2011(12).
- [4] 黎侃,李新伟,王端宜.聚丙烯单丝纤维微表处路用性能研究[J].公路交通科技,2013,30(8).
- [5] 侯曙光,侯强.纤维微表处混合料性能试验[J].南京工业大学学报:自然科学版,2013,35(3).
- [6] 凌天清,李耀楠,董强,等.橡胶颗粒对微表处性能的影响及其降噪效果[J].交通运输工程学报,2011,11(5).
- [7] 居浩,黄晓明.微表处混合料性能影响因素研究[J].公路,2007(7).
- [8] JTG E20—2011,公路工程沥青及沥青混合料试验规程[S].
- [9] JTG F40—2006,微表处和稀浆封层技术指南[S].
- [10] JTG F40—2004,公路沥青路面施工技术规范[S].

收稿日期:2017-04-11

(上接第 109 页)

- [8] 张继周,缪林昌,杨振峰.冻融条件下岩石损伤劣化机制和力学特性研究[J].岩石力学与工程学报,2008,27(8).
- [9] 张慧梅,杨更社.岩石冻融力学实验及损伤扩展特性[J].中国矿业大学学报,2011,40(1).
- [10] 杨峰,宁正福,胡昌蓬,等.页岩储层微观孔隙结构特

征[J].石油学报,2013,34(2).

- [11] 许玉娟,周科平,李杰林,等.冻融岩石核磁共振检测及冻融损伤机制分析[J].岩土力学,2012,33(10).
- [12] 王萍,屈展.基于核磁共振的脆硬性泥页岩水化损伤演化研究[J].岩土力学,2015,36(3).

收稿日期:2017-06-13