复合材料学报
Acta Materiae Compositae Sinica
Engineering Village

基于CT技术的冷再生混合料冻融环境下损伤分析

王石 赵宪锋 米弘泽

Damage analysis of cold recycled mixture under freeze-thaw environment based on CT technology

WANG Shi, ZHAO Xianfeng, MI Hongze

在线阅读 View online: https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20210601.004

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于CT图像的再生混凝土细观破坏裂纹分形特征

Fractal characteristics of meso-failure crack in recycled coarse aggregate concrete based on CT image

复合材料学报. 2020, 37(7): 1774-1784 https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20190917.002

泡沫沥青冷再生混合料成型方法

Research on the compaction methods of cold recycled mixture using foamed asphalt

复合材料学报. 2017, 34(9): 2038-2046 https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20161208.001

盐冻融循环条件下沥青高温流变性能及微观结构

High temperature rheological properties and microstructures of asphalt under salt freezing cycles

复合材料学报. 2017, 34(8): 1839-1846 https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20161008.002

冻融循环对CFRP-烧结粘土砖界面粘结性能影响

Effects of freeze-thaw cycles on interfacial bonding property of CFRP-sintered clay brick

复合材料学报. 2020, 37(9): 2294-2302 https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20200111.002

盐冻条件下水泥砂浆受风沙冲蚀磨损性能及损伤机制

Erosion-wear performance and mechanism of cement mortar subjected to freeze-thaw cycles in salts solution

复合材料学报. 2018, 35(1): 192-199 https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20170417.002

两种粘结料对泡沫沥青冷再生混合料性能的影响

Influences of two binder materials on performance of cold recycled mixtures stabilized with foamed asphalt

复合材料学报. 2017, 34(4): 915-921 https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20160713.001

扫码关注微信公众号，获得更多资讯信息

复合材料学报
Acta Materiae Compositae Sinica

第 39 卷 第 4 期 4 月 2022 年
Vol. 39 No. 4 Apr 2022

DOI：10.13801/j.cnki.fhclxb.20210601.004

基于 CT 技术的冷再生混合料冻融环境下损伤分析

分享本文

王石，赵宪锋*，米弘泽

（兰州交通大学 土木工程学院，兰州 730070）

摘 要：通过室内实验揭示冻融环境下水泥稳定冷再生混合料细观结构的损伤演化规律，并分析水泥和旧路面沥青材料 (RAP) 在不同的冻融循环时期对其损伤的影响。使用 CT 机对冻融循环后的试件进行扫描，获得二维断层扫描图像。利用图像处理技术对扫描断面进行分析，并以图像中 CT 均值的变化为基础引入损伤变量。研究结果表明：随着冻融循环次数 n 的增加，混合料断面的 CT 均值呈现出先增大后减小的变化规律；损伤变量则表现出先减小后增大的变化趋势，反映出了冻融环境下水泥稳定冷再生混合料从初始细观损伤到宏观破损的全过程，可分为 4 个阶段：即 $N \leqslant 1$、$1 < N \leqslant 3$、$3 < N \leqslant 7$和$7 < N \leqslant 9$，且在 N 小于 7 次时水泥含量对试件损伤有显著影响，水泥可提高混合料的粘结性及早期强度；大于 7 次时试件的损伤主要受到 RAP 掺量的影响，过高的 RAP 含量会加剧混合料的损伤。

关键词：再生材料；冻融循环；CT；细观损伤；旧沥青路面材料

中图分类号：U414；TB33 **文献标志码**： A **文章编号**： 1000-3851(2022)04-1692-09

Damage analysis of cold recycled mixture under freeze-thaw environment based on CT technology

WANG Shi , ZHAO Xianfeng* , MI Hongze

(School of Civil Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China)

Abstract: The development of meso-damage of cement stabilized cold recycled mixture under freeze-thaw environment was revealed by indoor test, and the effects of cement and recycled asphalt pavement material (RAP) on its damage in different freeze-thaw cycles were analyzed. The specimen after freeze-thaw cycle was scanned by CT machine, and the batch of 2D slice images were obtained. The cross section was analyzed by using the image processing technology, and the damage variable was introduced based on the change of the CT mean value in the image. The results show that with the increase of the number of freeze-thaw cycles, the average CT of mixture cross section increases at first and then decreases. On the other hand, the damage variable first decreases and then increases, which reflects the whole process of cement stable cold recycled mixture from initial meso damage to macroscopic damage in freeze-thaw environment, which can be divided into four stages, i.e. $N \leqslant 1$, $1 < N \leqslant 3$, $3 < N \leqslant 7$ and $7 < N \leqslant 9$. When the number of freeze-thaw cycles is less than 7, the cement content has a significant effect on the specimen damage, and the addition of cement can improve the adhesion and early strength of the mixture. When the number of freeze-thaw cycles is more than 7 times, the damage of the specimen is mainly affected by the content of RAP, and the excessive content of RAP will aggravate the damage of the mixture.

Keywords: recycled materials; freeze thaw cycle; CT; meso-damage; recycled asphalt pavement material

收稿日期：2021-04-20; **修回日期**：2021-05-19 ; **录用日期**：2021-05-27 ; **网络首发时间**：2021-06-02 11:14:06
网络首发地址：https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20210601.004
基金项目：国家自然科学基金青年基金 (11302091)
通信作者：赵宪锋, 博士, 副教授, 硕士生导师, 研究方向为工程结构力学、电磁固体力学、颗粒介质力学 E-mail: zhaoxf@mail.lzjtu.cn

引用格式：王石, 赵宪锋, 米弘泽. 基于 CT 技术的冷再生混合料冻融环境下损伤分析 [J]. 复合材料学报, 2022, 39(4): 1692-1700.
WANG Shi, ZHAO Xianfeng, MI Hongze. Damage analysis of cold recycled mixture under freeze-thaw environment based on CT technology[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2022, 39(4): 1692-1700(in Chinese).

水泥稳定冷再生混合料(Cement stabilized cold recycled mixture，CSCRM)是一种新型的复合材料，是由旧路面沥青材料(Recycled asphalt pavement，RAP)、新集料和水泥合成稳定后形成的混合料，在实际应用中有较高的经济效益，具备早期强度高、对铣刨旧料的适用性强、废旧材料利用率高、施工方便易被工程人员所接受等优点，实现了资源的循环再利用，体现了工程与生态环境的协调发展，因而在我国得到大量推广使用[1]。冷再生混合料是一种应用广泛的复合多尺度人工合成材料，其内部不可避免地会出现大量的微裂缝、空隙等初始缺陷。在冻融循环条件下，内部的裂纹易产生损伤，并随着冻融作用的增强而逐渐发展、贯通，最后引起结构破坏。因此，在冻融条件下混合料的宏观失稳和破坏与初始的微裂缝、微空隙等内部缺陷紧密相关[2]。

随着CT技术的急速发展，国内外学者开始广泛使用CT技术对冻融环境下混凝土材料和沥青混合料等工程复合材料进行细观实验研究。基于CT技术和数字化图像处理技术研究混凝土在冻融环境下的孔隙结构、分布的变化规律，分析冻融环境下混凝土细观结构的损伤演化规律及破损机制[3-10]。利用断面CT数的变化规律定量地分析冻融循环前后沥青混合料的细观损伤[11-17]。

目前，学者们对于CSCRM的研究大多集中在路用性能影响因素、外加材料的影响、成型养生方法、疲劳特性等方面[1-2,18-25]。王宏[1]利用足尺加速加载试验对比冷再生基层与水泥稳定碎石基层的耐久性，得出冷再生基层具有良好的水稳定性和抗疲劳耐久性能。基于马歇尔试验和CT技术，系统研究了不同水泥掺量下乳化沥青冷再生混合料的强度特性和空隙特征的变化规律，给出了空隙特征的数学模型表征[22]。薄雪峰[2]通过试验讨论了冻融循环作用对泡沫沥青冷再生混合料强度、疲劳和细观结构等性能的影响，指出混合料中微孔数量减少、大孔数量增多是导致力学强度和疲劳性能降低的主要原因之一。李国锋等[23]采用劈裂强度试验和CT试验，系统研究了6种级配泡沫沥青冷再生混合料不同冻融循环次数下的抗水损害能力的衰变情况，得到了混合料强度的衰减特性、空隙级配及最可几孔径的变化规律。李志刚等[24]分析了冻融循环对乳化沥青冷再生混合料空隙率、力学强度、黏聚力及抗剪性能的影响。杨野等[25]采用SEM研究了乳化沥青冷再生混合料在冻融循环作用下的宏微观损伤情况，给出了冻融循环作用使乳化沥青冷再生混合料空隙率增加、高温性能下降、复合胶浆损伤的结果。

对于冻融环境下CSCRM的细观破坏机制、影响因素、混合料的细观损伤与宏观力学性能关系的研究较少。随着CSCRM在路面结构的层位不断上移，特别是在季节性冻土地区，对混合料的抗冻性提出了更高的要求。探究冻融环境下水泥稳定冷再生的细观破坏机制、影响因素的研究尤为重要。本文基于CT技术和数字化图像处理技术，采用CT数分析方法，定量分析在冻融作用下CSCRM的破坏过程，探讨冻融作用下CSCRM的细观损伤机制、演化过程及水泥和RAP在不同冻融循环次数下对试件损伤的影响。期望从细观损伤发展的角度解释CSCRM在冻融环境下的宏观力学性能的变化规律，为CSCRM在我国季节性、多年冻土地区的推广应用提供借鉴。

1　实验材料及方法

1.1　水泥稳定冷再生混合料(CSCRM)设计

选取S217线榆中段沥青路面的旧沥青路面，依据JTG E42—2005[26]对旧路面沥青材料(RAP)采用水洗法筛分；细骨料采用粒径为0~5 mm碎石。材料基本性能见表1。水泥选用来自永登祁连山水泥有限公司的P.O42.5级普通硅酸盐水泥作为冷再生混合料粘结剂。根据JTG/T F20—2015[27]，在多次的试配和综合比较下，确定0~5 mm碎石与RAP的质量比分别为3∶7、5∶5、7∶3，骨料级配见表2；水泥外掺，配合比见表3。制备了3种不同配合比下的Φ150 mm×150 mm圆柱形混合料试件，7天无侧限抗压强度均值分别为2.4 MPa、2.5 MPa、2.3 MPa，满足JTG/T F20—2015[27]的相关要求。

1.2　试验方法

1.2.1　试验方案

(1)按3种配合比各制作7组混合料试件，每组3个试件，共计63个试件。图1为典型的2组试件及冷冻过程。其中，第1组试件用于CT实验，第2~7组试件用于冻融循环后的劈裂强度实验。每种配合比的第1组试件编号方式为CSCRM(*x*wt%RAP)-CTS*x*，CSCRM(*x*wt%RAP)表示混合料CSCRM中RAP的含量，CTS*x*表示用于CT实验的试样序号。第2~7组试件编号方式为CSCRM(*x*wt%RAP)-SPF*x*S*x*，CSCRM(*x*wt%RAP)含义同上，SPF*x*

表 1　试件材料参数

Table 1　Material property parameters of specimen

Item	Apparent density/(kg·m^{-3})	Voidage/%	Needle-like particle content/%	Mud content/%
RAP	2.653	47.3	16.4	0.3
0-5 mm aggregate	2.574	42.3	5.3	15.2

Note: RAP—Recycled asphalt pavement.

表 2　水泥稳定冷再生混合料 (CSCRM) 级配

Table 2　Gradation of cement stabilized cold recycled mixture (CSCRM)

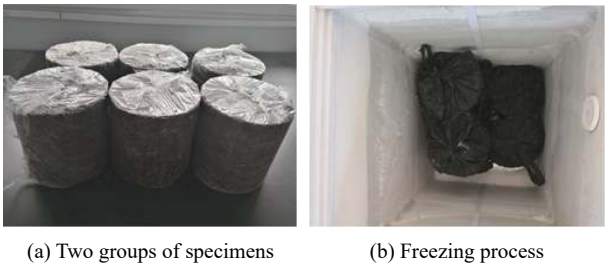
Specimen	Gradation of mixture/%							
	0.15/mm	0.60/mm	2.36/mm	4.75/mm	9.50/mm	19.0/mm	26.5/mm	31.5/mm
CSCRM(30wt%RAP)	11.1	37.5	53.9	71.5	84.2	96.7	99.8	100
CSCRM(50wt%RAP)	18.1	26.3	40.1	56.5	73.5	94.0	99.4	100
CSCRM(70wt%RAP)	5.0	16.9	26.5	40.7	62.1	91.9	99.2	100

表 3　CSCRM 配合比

Table 3　Mix ratio of CSCRM

Specimen	RAP test value/wt%	Aggregate/wt%	Cement/wt%	Water/wt%
CSCRM(30wt%RAP)	27.65	64.52	2.76	5.07
CSCRM(50wt%RAP)	46.17	46.17	2.76	4.90
CSCRM(70wt%RAP)	63.87	27.37	4.56	4.20

表示用于劈裂强度实验的试件冻融循环的次数，S*x* 表示试样序号。所有试件制作完成后标养 90 天。(2) 对编号试件进行冻融循环试验，循环次数分别为 0、1、3、5、7、9 次。(3) 对每种配合比的第 1 组试样在每次达到冻融循环次数后进行 CT 断面扫描实验。CT 实验完成后，立即将试样放入冰箱进行后续冻融循环。(4) 对每种配合比的第 2~7 组试样在达到冻融循环次数后立即做劈裂强度实验，以避免环境温度影响。(5) 分析各个 CT 扫描图像的 CT 数。(6) 分析劈裂强度实验结果。



(a) Two groups of specimens　　(b) Freezing process

图 1　冻融循环 CSCRM 试件

Fig. 1　Specimens of CSCRM before freeze-thaw cycle

1.2.2　试验过程

首先将试件浸在 25℃ 水中饱水 12 h，取出试件使用保鲜膜密封后装进黑色塑料袋中，放置于 (−20±2)℃ 的冰箱中冷冻 12 h。待试件在冰箱冷冻 12 h 结束后取出试件，并除去保鲜膜和塑料袋后放置在 30℃ 恒温水箱中进行水浴 12 h 至此完成 1 次冻融循环试验。按照此法将试件进行冻融循环至要求次数后结束。第 9 次冻融循环后的试件见图 2。

CSCRM(70wt%RAP)　CSCRM(50wt%RAP)　CSCRM(30wt%RAP)

图 2　冻融循环后破损的 CSCRM 试件

Fig. 2　Specimens of CSCRM damaged after freeze-thaw cycle

对不同冻融循环次数下的试件在冻融循环结束后立刻进行 CT 扫描实验，以避免环境温度的影响。CT 实验在中国科学院西北生态环境资源研究院进行，采用荷兰皇家飞利浦公司生产的 Philips Brilliance 16 螺旋 CT 机，实验参数见表 4。扫描方案：对每一个 Φ150 mm×150 mm 圆柱体试件沿横向断面进行扫描，间距为 3 mm，获得 50 幅二维 CT 横断面扫描图像。

冻融循环后试件的劈裂实验加载采用济南试

表 4　CT 机扫描参数

Table 4　Scanning parameters of CT machine

Voltage/kV	Electric current/mA	Layer thickness/mm	Reconstruction matrix	Magnification
120	185	3	1 024×1 024	1

验机厂生产的 PEM-50A 型微机控制电子式万能试验机，加载速率为 1 mm/min。夹具采用圆柱体混凝土抗劈裂夹具，技术参数见表 5。

表 5　劈裂夹具参数

Table 5　Parameters of splitting fixture

Maximum bracket block/mm	Width of left and right gear of bracket/mm	Length/mm
50×20	151, 101	305

2　试验结果与分析

2.1　CSCRM 的 CT 图像及细观结构演化

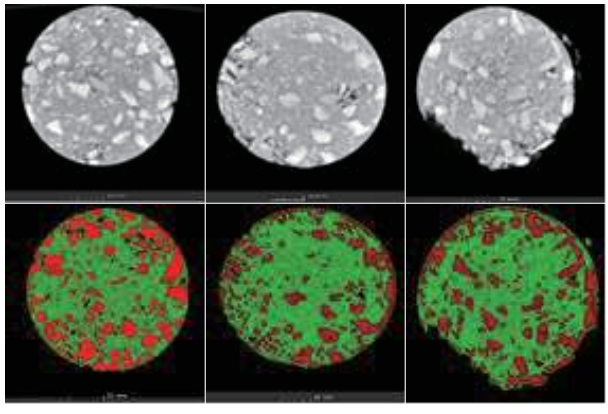
CSCRM 是一种多相复合材料，由于组分材料尺度不同，其在 CT 图像中的灰度不同。CT 数的大小与材料的密度有关，在相同的条件下，断面的 CT 数越大，表征混合料的密度越大。将水的 CT 数定义为 0 Hu，空气的 CT 数为 –1 024 Hu。CSCRM 材料的 CT 数 H 计算如下式：

$$H=\frac{\mu-\mu_{\mathrm{w}}}{\mu_{\mathrm{w}}}\times 1\,000 \tag{1}$$

其中：μ为 CSCRM 组分材料对 X 射线的吸收系数；μ_{w}为纯水对 X 射线的吸收系数。

为分析冻融循环作用对 CSCRM 试件细观结构的影响，任意选取一个试件某一断面的 CT 扫描结果，如图 3 所示。此处，试件配合比类别为 CSCRM(70wt%RAP)，试件编号为 CSCRM(70wt% RAP)-CTS3，横断面距离圆柱体底面 45 mm，冻融循环次数 N 分别为 0 次、5 次和 9 次，代表冻融前、冻融循环中期和冻融循环后期。可以看出，骨料的密度最大，在灰度图中表现为亮度较高的区域；砂浆的密度较小，在图中表现为较暗的区域；孔隙的密度最小，在图中表现为黑色的区域。本文采用等密度分割断面法对图像进行进一步处理，更加直观地表现出混合料内部结构的变化特征。将试件断面进行等密度分割，定义 0~800 Hu 区域为黑色，代表试件内部的孔洞区域；801~1 310 Hu 区域为黄色，代表骨料与水泥砂浆过渡区域；1 311~2 000 Hu 区域为绿色，代表水泥砂浆区域；2 001~2 976 Hu 区域为红色，代表试件骨料区域。

从图 3 还可以看出，在冻融循环次数为 0 时，



N=0　　*N*=5　　*N*=9

图 3　3 种冻融循环次数 N 下 CSCRM (70wt%RAP)-CTS3 试件距底面 45 mm 横断面等密度分割图像

Fig. 3　Isodensity segmentation images of CSCRM (70wt%RAP)-CTS3 specimen 45 mm from the bottom under the conditions for three freeze-thaw cycles N

黑色的空隙区域所占范围很小，绿色的水泥砂浆区域范围较大，红色的骨料区域被砂浆所包裹。冻融循环作用使得试件内部结构发生改变，试件空隙发展、贯通使黑色的空隙区域所占范围扩大；部分集料的脱落使红色骨料区域范围减小。

2.2　CSCRM 断面 CT 数

混合料 CT 图像中包含了大量细观裂纹信息，但是直观地观察 CT 图像很难快速准确地获取捕捉到所需要的信息，因此必须对图像进一步分析处理。首先给出 3 种配合比试样在不同冻融循环下同一高度断面的扫描图像，如图 4、图 5 和图 6 所示，试样编号分别为 CSCRM(30wt% RAP)-CTS1、CSCRM(50wt%RAP)-CTS1 和 CSCRM(70wt%RAP)-CTS1，横断面距离试样顶面距离为 12 mm。3 组图片均能明显地反映出混合料试件在冻融循环作用下内部空隙的发展过程及在冻融循环后期试件骨料的大面积脱落行为。

为了讨论不同配合比情况下 CSCRM 的损伤过程，降低 CSCRM 组成材料的非均匀性对结果的影响，采用 CT 数值分析法，利用 3 次 CT 均值处理方法定量地描述混合料的损伤过程。由于扫描断面较多 (1 个试样 50 个断面图像)，采用 Sante CT Viwer 软件首先计算混合料试件某一断面的

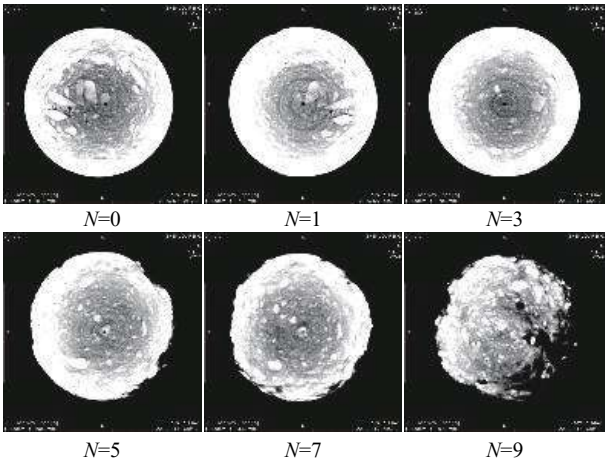


图 4　CSCRM(30wt%RAP)-CTS1 试样距顶面 12 mm 横断面不同冻融次数 N 下的 CT 图像

Fig. 4　CT images of CSCRM(30wt%RAP)-CTS1 specimen with different freeze-thaw times N in cross-section 12 mm from the top surface

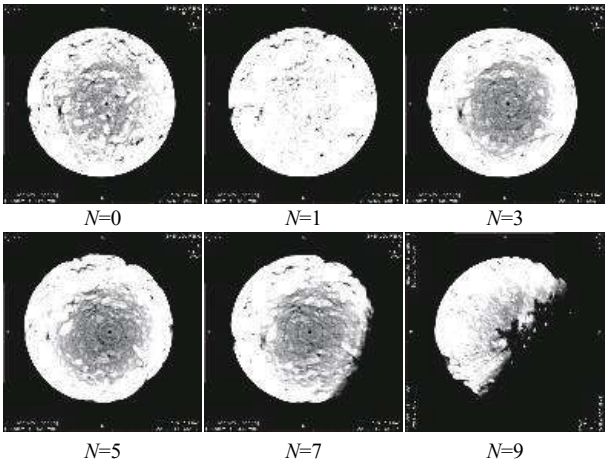


图 6　CSCRM(70wt%RAP)-CTS1 试样距顶面 12 mm 横断面不同冻融次数 N 下的 CT 图像

Fig. 6　CT images of CSCRM(70wt%RAP)-CTS1 specimen with different freeze-thaw times N in cross-section 12 mm from the top surface

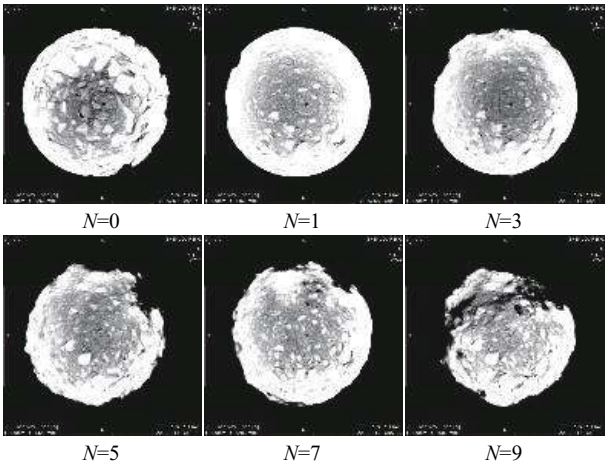


图 5　CSCRM(50wt%RAP)-CTS1 试样距顶面 12 mm 横断面不同冻融次数 N 下的 CT 图像

Fig. 5　CT images of CSCRM(50wt%RAP)-CTS1 specimen with different freeze-thaw times N in cross-section 12 mm from the top surface

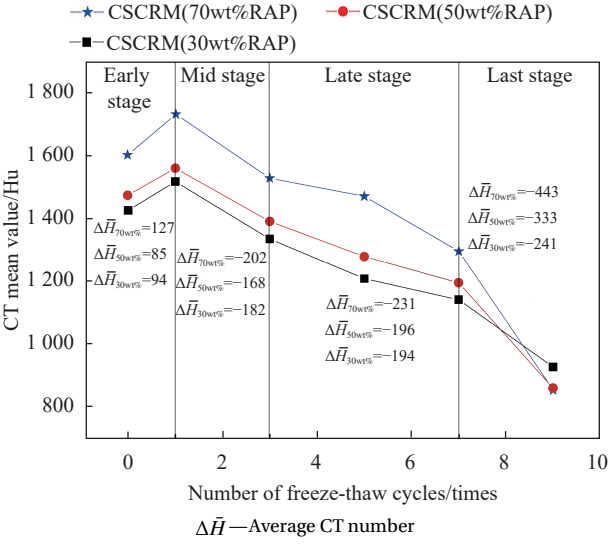


图 7　CSCRM 的 CT 数均值随冻融次数变化曲线

Fig. 7　Curves of the mean value of CT number with the number of freezing and thawing

CT 均值，再将 50 个断面的均值进行加权平均，得到 1 个试样的二次 CT 均值结果；最后将同一配合比 3 个试样的二次 CT 均值结果进行均值化处理，得到 3 次 CT 均值结果，作为该配合比在本次冻融循环后的 CT 均值。3 种配合比 CSCRM 在不同冻融循环作用下的 CT 均值结果见图 7。可以看出，不同混合料、不同的冻融次数下的 CSCRM 混合料 CT 均值变化经历了 4 个阶段。在冻融循环前期，经历 1 次冻融循环时，3 种配合比下的混合料随着冻融次数的增加，断面的 CT 均值均呈上升趋势。在冻融循环中期和后期，经历至 7 次冻融循环次数时，断面 CT 均值随着冻融次数的上升，断面 CT 均值呈现下降的趋势。在冻融循环的末期，冻融次数为 9 次时，断面 CT 均值大幅下降。在冻融循环 7 次之前 CSCRM(70wt%RAP) 的 CT 值最大，CSCRM(50wt%RAP) 次之，CSCRM(30wt%RAP) 最小。在冻融循环 7 次后 CSCRM(70wt%RAP) 的 CT 均值最小，CSCRM(50wt%RAP) 次之，CSCRM(30wt%RAP) 最大。在冻融循环 9 次时，CSCRM(70wt%RAP) 的 CT 均值下降了 34.16%，CSCRM(50wt%RAP) 下降了 27.84%，CSCRM(30wt%RAP) 下降了 23.01%。这主要是由于在冻融循环次数为 0 次时，由于 RAP 的密度大于砂石密度，含

RAP含量高的试件CT均值较大。在冻融循环前期，试件内部的部分水分被吸收进裂缝中导致试件的密度增加从而使CT均值增加。在进入冻融循环中期和后期时，由于试件制成时内部存在原始孔隙和缺陷，在冻融循环的条件下，内部水分会在固态和液态中相互转换，从而产生冻胀力，使内部的初始孔隙和裂纹逐渐发展，导致混合料试样的损伤不断加剧，混合料试件的密度也不断降低，断面CT数亦会随之降低，在此期间，RAP含量较低的试件CT值下降速度较缓，RAP含量对试件的CT值变化影响较大。冻融循环在进入末期后，试件的损伤发展程度加剧，表面水泥浆体和骨料渐渐剥落导致试件的密度大幅降低，引起CT数值的快速下降，在此期间含RAP含量高的CT值下降更快。由此可见，RAP含量对于试件的CT均值有较大的影响。

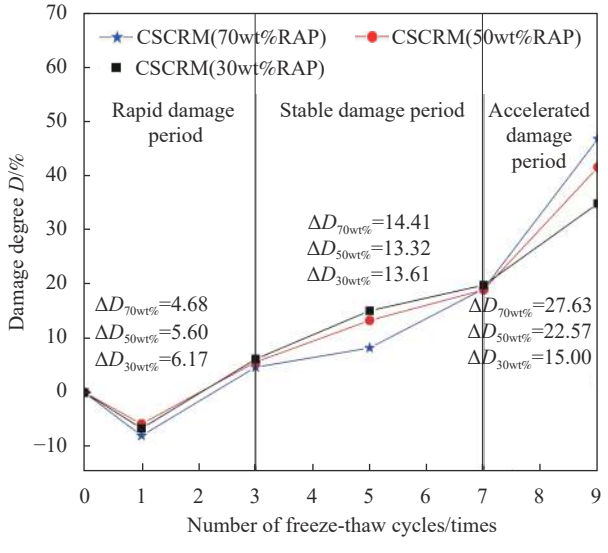
2.3　CSCRM的损伤演化

为了进一步研究冷再生混合料在冻融条件下的空隙对试件细观损伤的影响，基于损伤力学原理，引入损伤变量的概念，损伤变量D计算试件的损伤程度如下式所示：

$$D=\frac{H_0-H_n}{H_0}\times 100\% \tag{2}$$

其中：D为试样的损伤变量；H_0为试样在未发生冻融循环时的断面CT均值；H_n表示试件在n次冻融循环下的断面CT均值。

图8为CSCRM损伤度随冻融次数变化曲线。可以看出，在相同的冻融循环次数下3种配合比试件的损伤发展速度相差不大，CSCRM(70wt%RAP)混合料的损伤最大。3种不同配合比的试件在冻融循环前期，损伤的发展出现了负增长，损伤变量随着冻融次数的增加而降低。在冻融循环中期和后期，损伤变量随着冻融次数的增加而增加，在冻融末期损伤变量上升的趋势加快。在冻融循环一次到7次之间，CSCRM(70wt%RAP)的损伤发展最慢，CSCRM(50wt%RAP)次之，CSCRM(30wt%RAP)发展较快。在冻融循环7次之后，CSCRM(70wt%RAP)的损伤发展最快，CSCRM(50wt%RAP)次之，CSCRM(30wt%RAP)发展最慢。在冻融循环初期，由于孔隙水的作用使试件的密度增加，CT数增加，因此损伤降低。在冻融中期和后期，内部的孔隙和裂缝发展较慢，试件受损速度较慢致使损伤变量增加较慢。随着冻融循环次数的增加，在此期间试件的损伤程度较小，主要是水泥的水化产物形成的网状结构在RAP与砂石集料间穿插、生长，起到了“加筋”的作用。在此期间，CSCRM(30wt%RAP)和CSCRM(50wt%RAP)的损伤度基本相当(增长率分别为2.21、2.36)，但与CSCRM(70wt% RAP)试件的损伤度相差较大(增长率3.08)。说明了在此期间较大的RAP含量对试件的损伤发展影响较大。进入冻融循环末期，损伤加快，表明了试件内部的裂纹、孔隙开始发育，相互贯通；并且伴有试件表面的水泥浆体和骨料的剥落，这是一个损伤加剧的过程。在此过程中，试件的粗骨料开始脱落，随RAP含量增加，试件冻融损伤越严重。表明试件在冻融循环的条件下，内部的原始孔隙、裂纹等缺陷会伴随着冻融次数的增加而加剧破坏，同时试件表面的水泥浆体和骨料的剥落，从而导致强度显著下降，试件被破坏。



ΔD—Damage degree changes

图8　CSCRM损伤度随冻融次数变化曲线

Fig. 8　Change curves of damage degree of CSCRM with freeze-thaw cycles times

2.4　CSCRM的劈裂强度

表6为冻融循环后每组试件的劈裂强度均值，劈裂强度与损伤度的关系见图9。由于冻融循环初期试件内部水分进入缝隙导致试件出现负损伤，但试件的劈裂强度并不会出现负增长，为了使实验拟合结果更符合事实，本文拟合损伤度与劈裂强度关系曲线时忽略冻融循环1次时的结果。由图9可以看出，3种配合比情况下CSCRM的劈裂强度均随损伤度的增加呈负指数关系减小，并最终趋于稳定，如下式所示：

$$f_{ts} = f_{ts,n} + A_{ts}e^{-D/\kappa} \quad (3)$$

其中：f_{ts}表示劈裂强度变量；D表示损伤变量，$f_{ts,n}$为劈裂强度终值 ($n \geqslant 9$)；A_{ts}为劈裂强度衰减幅值，κ为衰减因子。冻融循环期间的劈裂强度从大到小排序为CSCRM(70wt%RAP)、CSCRM(30wt%RAP)、CSCRM(50wt%RAP)。在快速损伤期，试件的劈裂强度分别下降 12.8%、14.5%、15.1%，强度显著下降。在此期间，试件内部水分受冻融循环作用破坏了沥青和集料的粘结力，因此强度下降明显。在损伤稳定期，试件的损伤发展较缓，劈裂强度下降趋势放缓。在加速损伤期，损伤度约为 20%~40%，劈裂强度下降趋势趋于平缓，表明试件已经出现宏观破坏。在冻融循环作用下，3 种配合比CSCRM(70wt%RAP)、CSCRM(50wt%RAP)、CSCRM(30wt%RAP) 的劈裂强度的衰减因子分别为 6.486、7.225、7.354，表明 RAP 含量的增加降低了 CSCRM 的劈裂强度衰减速率，RAP 中沥青黏性的存在使混合料更好地保持了原有的劈裂抗拉性能。

表 6　3 种不同配合比 CSCRM 的冻融劈裂强度

Table 6　Freeze-thaw splitting strength of CSCRM with three different combinations under different cycles

Freeze-thaw time	Splitting strength/MPa		
	CSCRM (30wt%RAP)	CSCRM (50wt%RAP)	CSCRM (70wt%RAP)
0	0.62	0.53	0.71
1	0.58	0.49	0.66
3	0.53	0.45	0.62
5	0.50	0.42	0.58
7	0.48	0.40	0.55
9	0.47	0.39	0.53

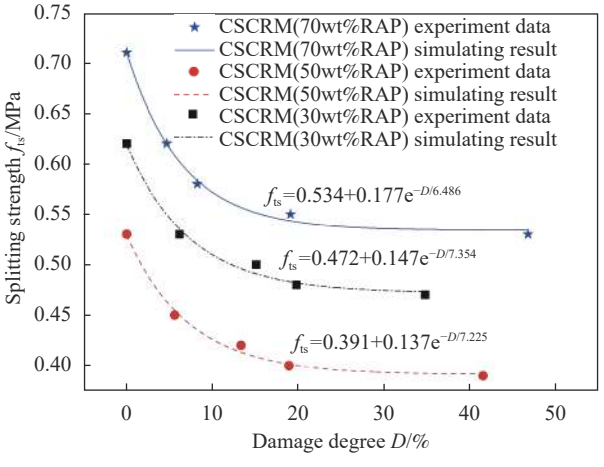


图 9　CSCRM 的损伤度与劈裂强度的关系

Fig. 9　Relationship between damage degree and splitting strength of CSCRM

3　结 论

利用 CT 技术对 3 种不同配合比的冷再生混合料在冻融环境下进行扫描，获得了一系列不同配合比、不同冻融次数下的水泥稳定冷再生复合材料的 CT 图像，得到以下结论：

(1) 在冻融循环前期，水分渗入试件闭合孔隙中，试件 CT 均值增加；在冻融循环中后期，孔隙水在固液态之间转换产生了膨胀力和渗透力，同时水分侵入在沥青与集料之间破坏沥青与集料之间的粘性，试件内部的空隙发展，CT 数逐渐降低；在冻融循环末期，试件内部的微裂隙相互贯通，试件集料脱落，CT 数大幅度降低；

(2) 在快速损伤期，试件损伤变量首先负增长，然后快速增长；在稳定损伤期，损伤变量随冻融循环次数的增加而增加；在加速损坏期，损伤变量急剧增加，试件发生宏观破坏；

(3) 在冻融循环中后期，水泥掺量越多，损伤发展越慢，水泥促进早期强度的提升；旧路面沥青材料 (RAP) 含量较少，损伤发展较慢，过多的 RAP 会使混合料的微裂缝增加，水泥对损伤发展有较大影响。在冻融循环末期：RAP 含量越多，损伤越大，混合料在此期间大面积结构崩解，RAP 含量对损伤发展和裂缝贯通产生显著影响。

(4) 在冻融循环期间，试件的损伤度与宏观力学性能密切相关。试件的劈裂强度随损伤度呈负指数关系降低并趋于平缓，RAP 含量越高，试件保持劈裂抗拉强度的能力越强。

致谢：本论文 CT 实验工作得到了中国科学院西北生态环境资源研究院郑剑锋博士的大力支持和帮助，在此表示感谢！

参考文献：

[1] 王宏. 全深式水泥稳定就地冷再生基层应用与耐久性能评价[J]. 公路, 2019, 64(6): 1-8.
WANG Hong. Application and durability evaluation of full-deep cement stabilized in-situ cold recycled mixture base[J]. Highway, 2019, 64(6): 1-8(in Chinese).

[2] 薄雪峰. 冻融循环对泡沫沥青冷再生混合料宏细观结构性能的影响[J]. 公路, 2018, 63(9): 47-58.
BO Xuefeng. Impact of freeze-thaw cycles on macro and micro structure and properties of foamed asphalt cold recycled asphalt mixtures[J]. Highway, 2018, 63(9): 47-58(in Chinese).

[3] GUO L, CARPINTERI A, SUN W, et al. Measurement and analysis of defects in high-performance concrete with three-dimensional micro-computer tomography[J]. Journal of Southeast University (English Edition)，2009，25(1)：83-88.

[4] SUZUKI T, OGATA H, TAKADA R, et al. Use of acoustic emission and X-ray computed tomography for damage evaluation of freeze-thawed concrete[J]. Construction and Building Materials，2010，24(12)：2347-2352.

[5] CHEN J, DENG X, LUO Y, et al. Investigation of microstructural damage in shotcrete under a freeze-thaw environment[J]. Construction and Building Materials，2015，83：275-282.

[6] PROMENTILLA M A B, SUGIYAMA T. X-ray microtomography of mortars exposed to freezing-thawing action[J]. Journal of Advanced Concrete Technology，2010，8(2)：97-111.

[7] SUZUKI T, NISHIMURA S, SHIMAMOTO Y, et al. Damage estimation of concrete canal due to freeze and thawed effects by acoustic emission and X-ray CT methods[J]. Construction and Building Materials, 2020, 245: 118343.

[8] 田威, 张鹏坤, 谢永利, 等. 冻融环境下基于CT技术混凝土孔隙结构的三维分布特征[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2016, 36(3)：49-55.
TIAN Wei, ZHANG Pengkun, XIE Yongli, et al. 3D distribution characteristics on concrete porous structure under freeze-thaw environment based on CT technique[J]. Journal of Chang'an University (Natural Science Edition)，2016，36(3)：49-55(in Chinese).

[9] 田威, 谢永利, 党发宁. 基于CT技术的混凝土冻融环境下细观损伤机理的试验研究[J]. 武汉大学学报(工学版), 2016, 49(3)：397-401.
TIAN Wei, XIE Yongli, DANG Faning. Experimental study of meso-damage mechanism of concrete under freezing-thawing environment based on CT technology[J]. Engineering Journal of Wuhan University，2016，49(3)：397-401(in Chinese).

[10] 田威, 韩女, 张鹏坤. 基于CT技术的混凝土孔隙结构冻融损伤试验[J]. 中南大学学报 (自然科学版), 2017, 48(11)：3069-3075.
TIAN Wei, HAN Nv, ZHANG Pengkun. Experiments on the freeze-thaw damage of concrete porous structure based on CT technique[J]. Journal of Central South University (Science and Technology)，2017，48(11)：3069-3075(in Chinese).

[11] 张倩, 李创军. 沥青混合料冻融劈裂微观结构损伤特性分析[J]. 公路交通科技, 2010, 27(2)：6-9.
ZHANG Qian, LI Chuangjun. Analysis of micro structural damage characteristics of freeze-thaw split asphalt mixtures[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development，2010，27(2)：6-9(in Chinese).

[12] 司伟, 马翥, 汪海年, 等. 沥青混合料在冻融循环作用下的弯拉特性[J]. 吉林大学学报(工学版), 2013, 43(4)：885-890.
SI Wei, MA Biao, WANG Hainian, et al. Flexural tensile characteristics of asphalt mixture under freeze-thaw cycles[J]. Journal of Jilin University(Engineering and Technology Edition)，2013，43(4)：885-890(in Chinese).

[13] 李兆生, 谭忆秋. 沥青混合料冻融损伤特性研究[J]. 中国科技论文, 2014, 9(11)：1279-1281.
LI Zhaosheng, TAN Yiqiu. Research on asphalt mixture freezing-thawing damage performance[J]. China Sciencepaper，2014，9(11)：1279-1281(in Chinese).

[14] 徐金枝, 郝培文, 王宏, 等. 两种粘结料对泡沫沥青冷再生混合料性能的影响[J]. 复合材料学报, 2017, 34(4)：687-693.
XU Jinzhi, HAO Peiwen, WANG hong, et al. Influences of two binder materials on performance of cold recycled mixtures stabilized with foamed asphalt[J]. Acta Materiae Compositae Sinica，2017，34(4)：687-693(in Chinese).

[15] 魏唐中, 洪锦祥, 林俊涛. 水泥与乳化沥青对冷再生强度的影响及作用机理[J]. 建筑材料学报, 2017, 20(2)：310-315.
WEI Tangzhong, HONG Jinxiang, LIN Juntao. Effect and action mechanism of cement and emulsified asphalt on the strength of cold regeneration[J]. Journal of Building Materials，2017，20(2)：310-315(in Chinese).

[16] 吴文亮, 卢家志, 涂志先. 基于X-ray CT和离散元法级配离析对沥青混合料骨架结构力学性能的影响[J]. 公路工程, 2020, 45(1)：55-61.
WU Wenliang, LU Jiazhi, TU Zhixian. Influence of gradation segregation on mechanical properties of asphalt mixture skeleton structure based on X-ray CT and discrete element method[J]. Highway Engineering，2020，45(1)：55-61(in Chinese).

[17] 彭蕾, 程英伟, 何晓鸣. 基于CT图像的AC-13C型沥青混合料冻融损坏细观结构分析[J]. 武汉轻工大学学报, 2019, 38(6)：39-43.
PENG Lei, CHENG Yingwei, HE Xiaoming. Microstructure analysis of freeze-thaw damage of AC-13C asphalt mixture based on CT image[J]. Journal of Wuhan Polytechnic University，2019，38(6)：39-43(in Chinese).

[18] 杜少文. 外加材料对乳化沥青再生水泥稳定碎石混合料性能的影响[J]. 建筑材料学报, 2013, 16(2)：360-364.
DU Shaowen. Effect of additive materials on pavement performance of asphalt emulsion recycled cement stabilized aggregate mixture[J]. Journal of Building Materials，2013，16(2)：360-364(in Chinese).

[19] 侯月琴, 纪小平, 刘陵庆. 水泥稳定再生集料的力学特性及影响因素研究[J]. 公路交通科技, 2016, 33(12)：56-61.
HOU Yueqin, JI Xiaoping, LIU Lingqing. Study on mechan-

ical property and influencing factors of cement stabilized recycled aggregate[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2016, 33(12): 56-61(in Chinese).

[20] 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, 62(4): 239-242.
WANG Yiqi, TAN Yiqiu, WANG Xinglong. Study on fatigue characteristics of freeze-thaw damage of cement stabilized macadam[J]. Highway, 2017, 62(4): 239-242(in Chinese).

[21] 李明欣, 张翼, 王选仓. 水泥掺量对再生混合料力学及干缩性能影响[J]. 河北农业大学学报, 2017, 40(4): 119-123.
LI Mingxin, ZHANG Yi, WANG Xuancang. Influence analysis of cement content on cement stabilized recycle asphalt mixtures for rural road[J]. Journal of Hebei Agricultural University, 2017, 40(4): 119-123(in Chinese).

[22] 王宏. 不同水泥掺量乳化沥青冷再生混合料细微观空隙分布特征[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]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2016, 33(7): 27-34(in Chinese).

[23] 李国锋, 郝培文, 蒋鹤, 等. 冻融循环对泡沫沥青再生混合料微观结构的影响[J]. 北京工业大学学报, 2017, 43(10): 1508-1513.
LI Guofeng, HAO Peiwen, JIANG He, et al. Impacts of freeze-thaw cycles on microscopic characteristics of recycled mixture using foamed asphalt[J]. Journal of Beijing University of Technology, 2017, 43(10): 1508-1513(in Chinese).

[24] 李志刚, 郝培文, 徐金枝. 冻融循环作用对乳化沥青冷再生混合料抗剪性能的影响[J]. 材料导报, 2016, 30(10): 121-125.
LI Zhigang, HAO Peiwen, XU Jinzhi. Study on impacts of freeze-thaw cycles on the shear performances of emulsified asphalt cold recycle mixture[J]. Materials Reports, 2016, 30(10): 121-125(in Chinese).

[25] 杨野, 徐剑, 杨彦海, 等. 冻融循环作用下乳化沥青冷再生混合料损伤分析[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2020, 36(5): 869-876.
YANG Ye, XU Jian, YANG Yanhai, et al. Damage analysis of cold recycled mixes using asphalt emulsion under freeze-thaw cycles[J]. Journal of Shenyang Jianzhu University (Natural Science), 2020, 36(5): 869-876(in Chinese).

[26] 中华人民共和国交通部(标准制定单位). 公路工程集料试验规程: JTG E42—2005[S]. 北京: 人民交通出版社, 2005.
Ministry of Transport of the People's Republic of China. Test methods of aggregate for highway engineering: JTG E42—2005[S]. Beijing: China Communications Press, 2005(in Chinese).

[27] 中华人民共和国交通部. 公路路面基层施工技术细则: JTG/T F20—2015[S]. 北京: 人民交通出版社, 2015.
Ministry of Transport of the People's Republic of China. Technical guidelines for construction of highway roadbases: JTG/T F20—2015[S]. Beijing: China Communications Press, 2015(in Chinese).