

# 水泥稳定碎石材料干燥收缩研究综述

张 阳, 王傲鹏, 张靖霖, 马 涛, 陈思宇

(东南大学 交通学院, 南京 211189)

**摘 要:**为进一步研究水泥稳定碎石的干燥收缩行为,改善其在道路基层的抗开裂性能,针对水泥稳定碎石材料基层由于干燥收缩而引起沥青路面面层反射裂缝的问题,通过对现有资料与研究成果的总结,对水泥稳定碎石干燥收缩机理以及调控措施进行了综述。减少水泥用量,采用骨架密实级配类型,使用振动搅拌或者振动压实成型方式,添加橡胶、钢渣、纤维等改性剂可以有效减少水泥稳定碎石材料的干燥收缩,提高其收缩性能与路用性能。在此基础上分析了水泥稳定碎石的收缩机理、综合优化方法、干燥收缩测量评价方法以及收缩预估模型存在的问题,提出了水泥稳定碎石收缩性能研究的发展趋势与展望。

**关键词:**道路与铁道工程;干燥收缩;综述;水泥稳定碎石;收缩调控措施

**中图分类号:**U414 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5497(2023)02-0297-15

**DOI:**10.13229/j.cnki.jdxbgxb20220175

## Dry shrinkage in cement-stabilized macadam: a review

ZHANG Yang, WANG Ao-peng, ZHANG Jing-lin, MA Tao, CHEN Si-yu  
(School of Transportation, Southeast University, Nanjing 211189, China)

**Abstract:** The objective of this study is to analyze the drying shrinkage behavior of cement-stabilized macadam (CSM) and improve its anti-cracking performance. In this paper, previous studies conducted on the mechanism of shrinkage and cracking in CSM and shrinkage mitigation strategies are reviewed, and summarized. The drying shrinkage performance of CSM materials is mainly studied through shrinkage mechanism and shrinkage prevention and improvement measures. As a cement-based material, the existing research on the drying shrinkage mechanism of CSM mainly refers to the available dry shrinkage mechanism of cement concrete. Four models are always used to characterize the shrinkage at different stages according to the change of relative humidity (RH) inside the mixture: capillary tension, surface free energy, disjoining pressure and interlayer water movement. The drying shrinkage mitigation strategies of CSM have achieved a series of results in recent years. According to the different mechanisms CSM shrinkage performance improvement methods can be classified into gradation, cement content, CSM molding method, and additive modification. The results show that reducing the amount of cement, adopting the skeleton of dense gradation, employing vibration stirring or vibration compaction, and adding

**收稿日期:**2022-02-27.

**基金项目:**国家重点研发计划项目(2021YFB2600601, 2021YFB2600600);国家自然科学基金优秀青年科学基金项目(51922030).

**作者简介:**张阳(1989-),男,副研究员,博士.研究方向:道路基础设施韧性与耐久性.E-mail: yang-zhang@seu.edu.cn

**通信作者:**马涛(1981-),男,教授,博士.研究方向:功能性路面材料与道路智能化建设.E-mail: matao@seu.edu.cn

rubber, steel slag, fiber or other modifiers can effectively reduce the drying shrinkage of CSM and improve its shrinkage performance and road serviceability. Additionally, the shrinkage mechanism, comprehensive optimization method, drying shrinkage measurement and evaluation method and shrinkage prediction model of CSM are assessed. The development trend and prospect of the shrinkage performance of CSM are generated.

**Key words:** highway and railway engineering; drying shrinkage; review; cement-stabilized macadam; shrinkage mitigation strategies

## 0 引言

截至2020年末,我国公路总里程达到519.81万公里,比上年末增加18.56万公里,公路密度54.15公里/百平方公里,增加1.94公里/百平方公里。其中,二级及以上等级公路里程70.24万公里,占公路总里程比重为13.5%,高速公路里程16.10万公里,增加1.14万公里;高速公路车道里程72.31万公里,增加5.36万公里。国家高速公路里程11.30万公里,增加0.44万公里。可见,随着交通强国战略的制定与部署,我国公路建设依然如火如荼,高等级公路的建设更是重中之重。沥青路面作为一种平整性好,低噪声,施工养护简单方便的路面结构,在世界各地被广泛应用。在我国90%以上新建与拟建的高速公路采用沥青路面。半刚性基层沥青路面以其承载力高、造价低的特点,成为了我国高等级路面的主流结构类型。

半刚性基层作为道路结构的主要承重层,其良好的力学性能是实现“强基薄面”路面结构形式的基础。无机结合料稳定基层材料具有稳定性好、抗冻性强、结构本身自成板体等特点,但其耐磨性差,因此广泛用于修筑路面结构的基层和底基层。无机结合料稳定材料种类较多,其物理、力学性质各异,比较常用的有水泥稳定类、石灰稳定类和石灰粉煤灰稳定类材料。

水泥稳定碎石(CSM)具有强度高、稳定性好、刚性大、板体性好等半刚性基层的优点,而且原材料易获得,有利于机械化施工,工程造价低,可以满足重交通发展需求<sup>[1]</sup>。因此,水泥稳定碎石现在被广泛应用于高等级公路。但是,在强度形成及后期服役过程中,由于内部相对湿度和温度变化,在内部产生收缩应力,当收缩应力超过水稳碎石内部粘结力时,在路面基层中便会干燥收缩裂缝和温度收缩裂缝,进而延伸到面层形成反

射裂缝。水泥稳定碎石的收缩在道路中主要引起的是基层横向收缩开裂,进而为水分进入路面结构提供可能。比如,如果裂缝反射至面层,那么路表的水分就会向下侵入,冲刷基层顶面或者路基土,造成层间或路基的脱空,导致结构性病害。影响路面的稳定性与耐久性,使结构的整体性降低、使用寿命下降,甚至危及行车安全。

水泥稳定碎石干燥收缩的研究集中在干燥收缩微观机理与调控措施两个方面,对于干燥收缩预估模型和收缩测量方法的研究相对较少。水泥稳定碎石的干燥收缩微观机理是研究水泥稳定碎石收缩特性的基础,在干燥收缩的各阶段针对不同机理采取相应的调控措施是控制收缩的关键。水泥稳定碎石的干燥收缩防调控措施根据收缩机理主要体现在控制级配与配合比、混合料的成型方式和添加外掺剂。选择骨架嵌挤结构,在保证强度的基础上降低水泥用量,采用振动搅拌或旋转压实成型方式,充分碾压并且延长养生时间,添加具有“加筋”、“增韧”、“保水”作用的外掺剂等措施均可在一定程度上改善水泥稳定碎石的抗干燥收缩性能,但由于试验条件限制和其他不可控因素,所得结果尽管在总的趋势上相一致,仍存在差异性与不确定性,特别是针对一些当地特有材料的研究和一些极端天气下的研究,其差异性更加显著。同时,考虑以上各种因素综合作用来研究水泥稳定碎石抗收缩性能的研究较少,其改善效果还有待进一步研究。

提高沥青路面的耐久性建设“交通强国”国家战略的迫切需要,半刚性基层的稳定与耐久是面层耐久性得到保证的前提,而影响半刚性基层稳定的关键在于控制基层收缩裂缝的产生,尤其是水泥稳定碎石材料由于内部水分变化而导致的干燥收缩。我国幅员辽阔,为适应不同地区气候特点、原材料综合利用、交通环境以及更高性能路面的需求,对于水泥稳定碎石材料的干燥收缩研

究还在不断深入,众多道路工作者仍在提高水泥稳定碎石抗收缩性能上继续探索。

鉴于此,开展水泥稳定碎石的收缩机理、改善收缩性能的研究,对控制反射裂缝的产生与发展具有重要现实意义。国内外许多学者对水泥稳定碎石的干燥收缩进行了大量试验与理论研究,取得了一系列成果。本文基于国内外的研究成果,通过对现在资料的总结,综述了水泥稳定碎石干燥收缩的微观理论及调控方法,对比分析了已有研究中存在的问题,在此基础上对后续的研究方向与研究方法提出一些建议。

## 1 水泥稳定碎石干燥收缩机理

水泥基材料早期收缩主要有水泥水化引起的材料自收缩和水分蒸发引起的干燥收缩<sup>[2,3]</sup>,普通混凝土的自收缩为20~100,干燥收缩为200~1000,前者是后者的1/10<sup>[4]</sup>,而且在水泥稳定碎石中水泥含量更少,所以其自收缩可忽略不计,即水泥稳定碎石材料早期的收缩量主要取决于干燥收缩。无机结合料稳定类材料在早期强度形成过程中因内部含水量蒸发而发生体积收缩的现象叫干燥收缩,与之相关的模型主要包括:毛细孔张力模型、表面张力模型、拆散压力模型和层间水损失模型<sup>[5]</sup>。

### 1.1 毛细孔张力

毛细管张力理论通常使用孔隙结构、相对湿度、自应力、水合程度和界面结构来解释收缩<sup>[6]</sup>。随着时间的推移,混合料内部水分蒸发,基质中的游离水逐渐减少,内部相对湿度降低。由于外部水蒸汽和孔隙中饱和水压力之间的平衡被破坏,水泥浆中水分的流失会触发毛细孔中不同曲率半径的水-空气弯月面的形成<sup>[7]</sup>,空孔中的液-汽弯月面(见图1)引起静水拉应力,在刚性固体骨架

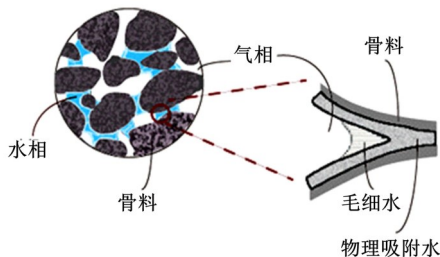


图1 液相、固相示意图

Fig. 1 Schematic representation of the moist concrete as a multiphase porous material

中引起各向同性拉应力,从而导致体积收缩<sup>[8]</sup>。

不过,毛细管张力理论无法解释在相对湿度(RH)低于40%时的持续收缩,以及纳米和凝胶孔中拉伸应力的增加,因为在这种尺度下无法在孔溶液中形成弯液面<sup>[9]</sup>。

### 1.2 表面张力

当相对湿度处于较低水平(低于40%)时,收缩和膨胀主要受水化硅酸钙(C-S-H)颗粒表面外层水膜的吸附和解吸引起的表面自由能变化的影响<sup>[10]</sup>。吸附水分子时表面张力减小,解吸时表面张力增加。随着干燥的进行,失去凝胶颗粒表面吸附的自由水导致体积不稳定<sup>[8]</sup>。这种现象增加了C-S-H固体表面之间接触的可能性,从而导致凝胶颗粒的固体表面能增加。凝胶颗粒之间产生了结合力,导致固体收缩以及C-S-H层间的不可逆内聚<sup>[11]</sup>。值得注意的是,大多数混凝土结构不会持续暴露在低于40%的相对湿度下,因此内部相对湿度很少达到如此低的水平<sup>[12]</sup>。

接触角(Contact angle)又称湿润接触角,在固、液、气三相接触达到平衡时,三相接触周边的任一点上,液气界面切线与固体表面间形成的并包含液体的夹角就是接触角,它是湿润程度的量度。通过测定水泥浆体内部毛细孔壁和毛细孔液的接触角,能够有效表征毛细孔液在毛细孔壁的黏附程度。若 $\theta < 90^\circ$ ,则固体是亲液的,即液体可湿润固体,其角越小,湿润性越好;若 $\theta > 90^\circ$ ,则固体是憎液的,即液体不湿润固体,容易在表面上移动,不能进入毛细孔。湿润过程与表面张力有关,对于界面而言,接触角越大,表面张力越大,浆体与界面越不易黏附<sup>[13]</sup>,进而产生体积变化引起收缩。表面张力与界面接触角的大小有关,混合料的配合比改变和添加外掺剂实际上也改变了接触角。

根据Laplace方程:

$$P_c = \frac{\sigma}{r} \cos \theta \quad (1)$$

式中: $P_c$ 为毛细孔张力; $\sigma$ 为液体表面张力; $r$ 为毛细孔曲率半径; $\theta$ 为接触角。

表面张力学说目前被广泛用作混凝土减缩剂的作用机理。加入减缩剂可以降低毛细孔负压从而减少混凝土收缩,一方面是溶液表面张力降低,另一方面是湿润程度的改变,即添加减缩剂后接触角变小。但是,在水泥稳定碎石中,很少使用化学减缩剂,在这方面的研究也相对较少。

### 1.3 拆散压力

在两个粒子之间的薄水层中,与相邻固体表面的相互作用会产生分离压力<sup>[14]</sup>。

Splittgerber 等<sup>[14]</sup>已经可视化了分离压力的作用,Splittgerber 的实验装置示意如图 2 所示。一块薄石英板的一端与抛光的石英块保持恒定距离,而另一端是自由的。在干燥状态下,自由端通过重力与石英块直接接触。从板的弯曲范德华引



图 2 Splittgerber 试验装置示意图

Fig. 2 Schematic diagram of test device by Splittgerber

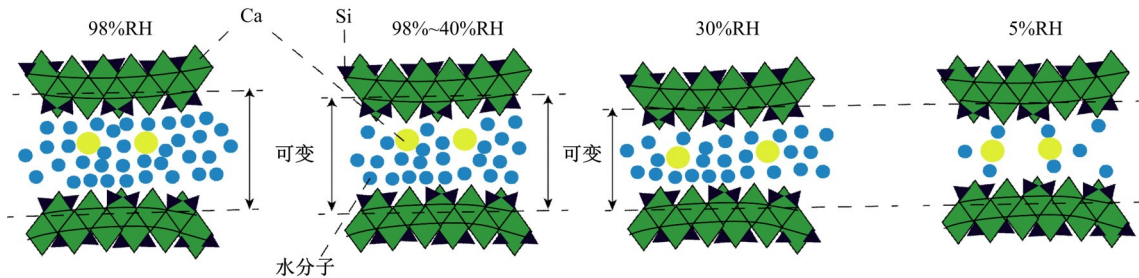


图 3 不同相对湿度下相邻颗粒之间距离表征

Fig. 3 Characterization of the distance between adjacent particles under different RH

### 1.4 层间水损失

极化的水分子被水化硅酸钙(C-S-H)的大表面积高度吸引,在界面形成单层水膜。随着干燥在一定的相对湿度范围内进行(见图 4),凝胶孔隙中部分水分子释放,使可移动的 C-S-H 片之间的距离发生变化,通过它可以限制一些凝胶孔隙水成为层间水<sup>[17]</sup>。这种层间水仅在非常低的 RH 下释放,因为它与固体 C-S-H 中富含硅酸盐的层紧密结合。当  $RH \leq 25\%$  时,层间水开始部分迁移,触发每个单独的 C-S-H 单层的收缩应变,从而缩小共享的层间空间<sup>[18]</sup>。对于宽度小于 1 nm 的层间空间,仅在  $RH < 15\%$  时才会发生层

力可以确定,当周围空气的相对湿度增加到 55% 以上时,薄石英板与支撑体被薄水层隔开。两个表面通过分离压力分开,而不是通过毛细压力保持在一起。石英板和支架之间的距离随着相对湿度 RH 的增加而增加。同理,相邻胶浆颗粒表面之间也会产生分离压力,在  $RH > 50\%$  的范围内,重叠 C-S-H 固体层处边界水膜的厚度增加会产生排斥力,将相邻的固体颗粒推开并平衡所有相互作用力<sup>[15,16]</sup>。当孔隙湿度降低时,约束区域内水的解吸导致分离压力降低。因此,固体颗粒通过范德华力在短距离内被拉到一起,从而带来收缩,如图 3 所示,随着相对湿度降低,相邻颗粒之间的距离越来越远。

间水水的迁移<sup>[19]</sup>。

从上述 4 种收缩机理可以看出,主导干燥收缩的因素随着混合料材料内部相对湿度的变化而变化。在较高相对湿度时,毛细孔张力起主要控制作用;当湿度进一步下降,拆散压力和表面张力开始影响收缩;随着相对湿度的进一步降低,层间水损失成为产生收缩的主要驱动因素,收缩过程可用图 5 表示。

除此之外,混凝土在常温下收缩测试值随龄期的发展变化大致可以分为 3 个阶段:早期(0~7 d)收缩增长快速,占总收缩的 61.3%~86.5%;中期(7~28 d)收缩缓慢增长,占总收缩的

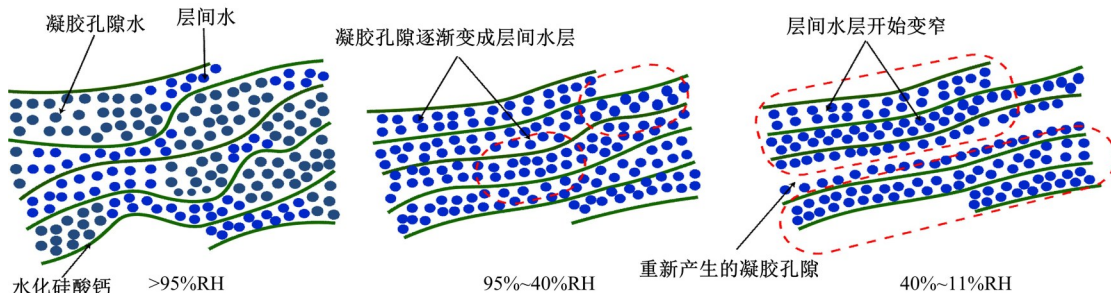


图 4 层间水损失演化过程

Fig. 4 Evolution process of interlayer water movement

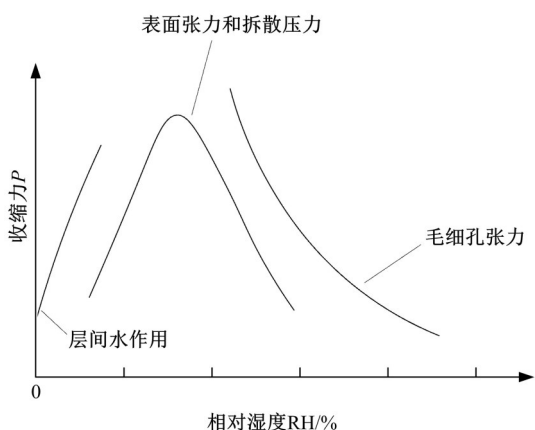


图5 干燥收缩过程

Fig. 5 Dry shrinkage process

89.4%~99.0%；后期(28 d以后)相对稳定,增长级缓<sup>[4]</sup>。根据混凝土的收缩发展规律以及目前所得研究结果来看,水泥稳定碎石的干燥收缩规律变化趋势与水泥混凝土相似,可以分为3个阶段:快速增长的前期、缓慢增长的中期与增长极缓的后期,如图6所示。

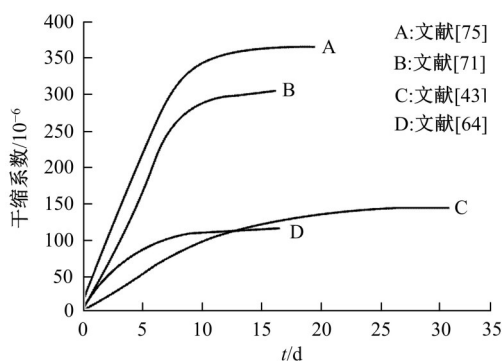


图6 干燥收缩随龄期的发展曲线

Fig. 6 Relationship between shrinkage coefficient and time

## 2 水泥稳定碎石干燥收缩的调控方法

由上述干燥收缩机理可知,水泥稳定碎石材料的早期干燥收缩几乎是不可避免的。水泥稳定碎石早期干燥收缩问题导致其在路面基层中的问题日益突出,为此研究者们提出了水泥稳定碎石干燥收缩的各类调控方法。依据调控原理措施的不同,主要可以分为级配与水泥含量、成型方式和添加外掺剂等。

### 2.1 控制级配与配合比

集料级配是影响水泥稳定碎石强度、干燥收缩和温度收缩性能、耐久性和施工性能的最主要

的内部因素,也是水泥稳定碎石混合料组成设计的核心内容。同一种材料,不同的级配类型有不同的干燥收缩性能。根据集料级配类型,混合料可分为骨架密实型、骨架空隙型与悬浮密实型3种。针对水泥稳定碎石的抗裂性能的级配设计,国内外学者已经做了大量研究。曾梦澜等<sup>[20]</sup>研究表明,在最佳水泥用量下为5.5%时,骨架密实型材料的干缩系数较之悬浮密实型材料减少25.5%；查旭东等<sup>[21]</sup>采用两级干捣试验方法提出骨架密实型级配设计,其干缩系数相对于规范级配平均小11.9%,表明设计的骨架密实型级配抗干燥收缩性能明显优于规范级配。粗骨料采用逐级填充法,细集料采用n法设计的骨架密实型水泥稳定碎石的抗干缩性能也有显著提升<sup>[22]</sup>。梁春雨等<sup>[23]</sup>、李明杰等<sup>[24]</sup>、蒋应军等<sup>[25]</sup>研究结果也证明骨架密实型水泥稳定碎石具有更好的抗干燥收缩性能；孙兆辉<sup>[26]</sup>发现在级配设计中,采用控制关键筛孔通过百分率计算理论所得的骨架密实型级配,比富勒公式所计算得到的级配干缩变形小。粗集料-砂浆界面粘结强度是影响水泥稳定碎石温缩裂性能最显著的影响因素<sup>[27]</sup>,因此,选用适宜的粗集料最大粒径,避免采用较细的级配,合理选取粗集料面积占比,同时适当减小水泥剂量可以增强抗收缩性能。在粗集料粒径选择时应注意控制在合适范围内,尽管随着粒径的增加,产生的裂缝长度会减小,但裂缝宽度同样会变大<sup>[28]</sup>。Liu等<sup>[29]</sup>通过平均插值法研究了5组不同级配类型的水泥稳定碎石的性能,研究表明细集料的增多则会导致干燥收缩系数增大,对抵抗收缩不利。同时,干缩性能还与集料本身性质有关,轻质骨料的抗干燥收缩性能要比普通骨料更好<sup>[30]</sup>。

对于水泥稳定碎石材料,不同龄期的干缩试验均呈现明显规律性,随着水泥剂量的增大,干缩系数增大<sup>[31]</sup>。水泥含量从3.5%增加到5.5%,悬浮密实级配和骨架密实级配的干缩系数分别增长56.4%和34.4%<sup>[20]</sup>。张嘎吱<sup>[32]</sup>研究认为,干燥收缩破坏主要发生在早期,为减少干缩,需要控制水泥剂量；Maruyama等<sup>[33]</sup>通过有限元方法进行数值模拟,发现混凝土的收缩受界面过渡区(ITZ)的影响,就骨料尺寸对混凝土收缩的影响而言,骨料-砂浆界面处ITZ中发生的收缩是主导因素,可以通过调整粒度分布以减少ITZ量来减少收缩。

## 2.2 控制成型、养生调控法

同种剂量水泥和同一种级配的混合料,在试验中用不同的成型方式也会有不同的性能,关键点是如何保证混合料的拌合均匀度。振动搅拌是目前公认的一种强化混合料搅拌过程的有效方法,搅拌的目的是使混合料达到规定的均匀度,振动改变了混合料的流变特性和结构形成过程,从而提高搅拌质量和效率。长安大学课题组对振动搅拌做了大量研究,并研发出基于机械动平衡技术的振动与强制搅拌一体化装置<sup>[34]</sup>;董武等<sup>[35]</sup>开展振动搅拌与常规搅拌的对比试验,认为搅拌方式和搅拌质量是影响水泥稳定碎石干缩性能的关键因素,振动搅拌的混合料养护成型后由于微观结构的改善,材料饱水含量降低,失水速率下降,其平均最大干缩应变变量比常规搅拌的少 20.4%,平均干缩系数少 18.7%,改善了混合料的干缩性能;蒋应军等<sup>[36]</sup>通过不同试件成型方式对比研究了水泥稳定碎石的路用性能,研究表明:振动成型的水泥稳定碎石具有良好的抗裂性能,其 7 d 无侧限抗压强度约是静压成型的 2.2 倍;李立寒等<sup>[37]</sup>研究发现,旋转成型试件粗集料形成的骨架结构具有更高的抗荷载能力,28 d 劈裂强度比静压成型试件高出 106%,且破碎程度低,粗细集料在成型过程中能达到更好的嵌挤状态,如图 7 所示,具有更好的抗干燥收缩性能;吕松涛等<sup>[38]</sup>研究了不同养生龄期下水泥稳定碎石的路用性能,其抗压回弹模量和弯拉强度在前期增长迅速,28 d 后增长速度逐渐减缓,90 d 后趋于稳定,通过延长水泥稳定碎石的养生时间可以有效地提高其抗收缩开裂性能。另一方面,在工程中只有充分碾压才能减少水泥稳定碎石的孔隙,保证骨架密实结构形成,从而达到提高抗裂性能的目的。

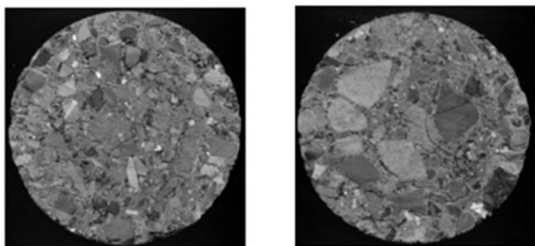


图 7 不同类型成型方式下的试件界面图

Fig. 7 Interface diagrams of specimens under different types of forming methods

## 2.3 添加外掺剂调控法

### 2.3.1 钢渣

钢渣因其压碎值高、抗磨耗等物理性能优良,

常被作为路面材料或路面材料的添加剂。曾梦澜等<sup>[39]</sup>通过对二灰钢渣碎石基层材料的研究,发现集料中掺加 50% 钢渣,可使材料的干缩系数最多减少 27%,提高抵抗基层因失水而产生开裂的能力;李飞等<sup>[40]</sup>研究表明,掺入钢渣集料的水泥稳定类基层材料与 100% 碎石集料相比,干缩系数最多减少 40%;Li 等<sup>[41]</sup>认为以钢渣替代碎石后,水泥稳定钢渣(CSS)的干缩系数明显比水泥稳定碎石(CSM)要低,抗干缩性能更好;郑武西<sup>[42]</sup>通过试验研究钢渣在水泥稳定碎石中的性能,发现掺入钢渣后减少了水泥稳定碎石的干燥收缩,特别是当钢渣掺入量达到 60% 时,其干缩系数改善值超过 50%;肖杰等<sup>[43]</sup>通过自制研发剂激活钢渣微粉 ASSP,研究不同掺量下的力学性能,发现 ASSP 混合料在满足强度要求的前提下,干缩系数可减少 50% 以上。值得注意的是,添加钢渣可以在一定程度上使水泥稳定碎石的干燥收缩有所缓解,但钢渣对温度变化较敏感,导致其温缩系数增大。

### 2.3.2 纤维

纤维作为一种增韧增塑的添加剂,可提高水泥基材料的延展性并减少脆性破坏和收缩开裂。目前针对不同种类纤维的改性性能,很多学者做了大量研究。Liu<sup>[44]</sup>研究表明,在添加聚酯纤维后,水泥稳定碎石的失水率随着纤维含量的增加先减小后增大,减小是因为当纤维含量较少时,纤维占空隙内部分体积,减少了内部水分流失,如图 8 所示;而随着纤维含量增加,在混合料内部形成纤维丝通道,水分子通过通道流失,故水损失增加。掺加纤维后,干缩系数随着纤维含量的增加减小,在 0.7% 达到 0,之后开始变成负值,因为当纤维含量较小时,根据纤维间距理论<sup>[45]</sup>可知,相邻纤维间距的减小可增强 CSM 对收缩的抵抗力,而当纤维含量过多时,混合料逐渐变成弹性,在去除静压成型后的压力后,出现轻微的体积回弹膨胀,与普通水泥稳定碎石相比,干缩系数降低最高可达 29.2%。贺亚飞<sup>[46]</sup>研究聚乙烯醇(PVA)纤维水泥稳定碎石的力学及抗裂性能,推断所使用 PVA 掺量不影响混合料的最佳含水率和最大干密度,通过  $k$  叠加法揭示了纤维的阻裂过程和阻裂程度,通过试验发现 PVA 纤维有效改善了水泥稳定碎石的抗裂性能,干燥收缩系数明显降低,最佳纤维掺入方案可使水泥稳定碎石的抗裂性能提

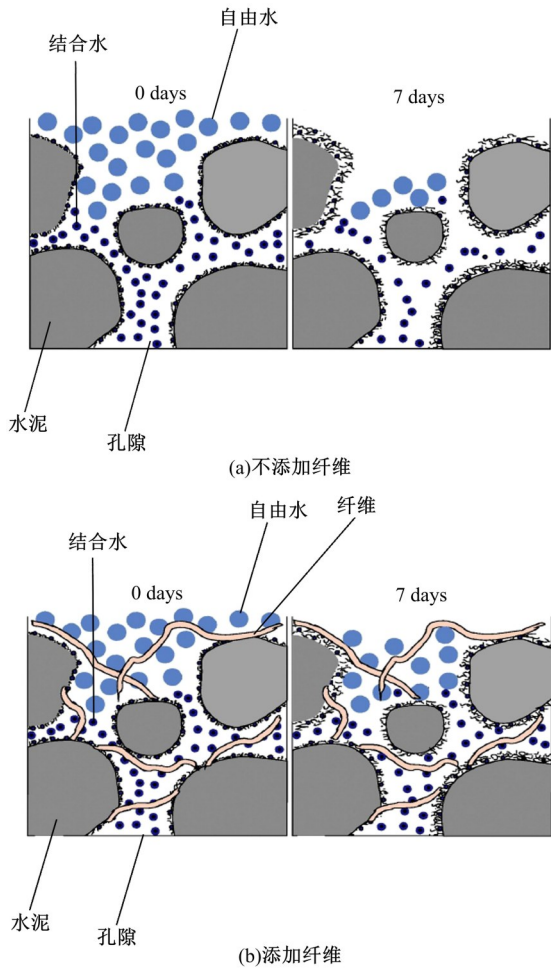


图 8 纤维对水稳碎石材料失水率的影响

Fig. 8 Influence of fiber on the water loss of CSM

高 44.4%；Zhao 等<sup>[47]</sup>探究了聚乙烯醇的长度、掺量的影响，研究表明，添加聚乙烯醇(PVA)的水泥稳定碎石可以显著提高其抗收缩性能，干缩系数随着纤维长度的增加先减小后增加，平均减小 20% 左右，最优长度为 24 mm；同时，对 PVA 阻裂机理进行分析，提出水泥稳定碎石的阻裂系数  $K_L$ ， $K_L$  越大，抗裂性能越好。谭国金等<sup>[48]</sup>研究也证明添加聚乙烯醇的水泥基材料具有良好的抗变形能力。

杨红辉等<sup>[49]</sup>研究表明，聚丙烯纤维的掺入使得水泥稳定碎石的平均干缩系数降低 16.7%，并且在纤维体积掺量小于 1% 范围内，随着聚丙烯纤维掺量的增大，水泥稳定碎石抗干燥收缩变形能力逐渐增强；Peng 等<sup>[50,51]</sup>研究表明，0.1% 的聚丙烯纤维掺量可使 28 d 龄期的水泥稳定碎石干缩系数降低 42%；李远厂<sup>[52]</sup>采用乳化沥青和聚丙烯纤维两种材料对水泥稳定碎石进行改性研究，发现聚丙烯纤维能有效提高乳化沥青水泥稳定碎

石的弯曲韧性，提高抗裂性能；徐建成等<sup>[53]</sup>通过室内试验和数值模拟相结合，验证了聚丙烯纤维的掺入对混合料的各项抗裂系数均有不同程度的改善，7 d 干缩系数降低约 20.2%；Grilli 等<sup>[54]</sup>研究认为聚丙烯纤维增强水泥稳定材料可以降低混合料的断裂倾向，生成小裂纹的扩散网络。而不是明显的宽裂纹。此外，有研究表明聚丙烯纤维越细、越长，其抗收缩性能越好<sup>[45]</sup>。白云<sup>[55]</sup>将玻璃纤维作为外掺剂研究水泥稳定碎石的抗裂性能，采用外掺法研究玻璃纤维长度和掺量对水稳材料性能的影响，发现玻璃纤维水泥稳定碎石具有更好的抗裂性能，并对玻璃纤维对水泥稳定碎石材料抗裂性能进行机理分析，其作用效果主要体现在抑制混合料的收缩变形和增强混合料阻裂能力，玻璃纤维起到“加筋”作用，增强混合料的整体性，18 mm 的玻璃纤维最多可使 7 d 干缩系数降低约 46.8%。杨明<sup>[56]</sup>研究了掺加玄武岩纤维水泥稳定碎石的力学性能，发现玄武岩纤维在体积掺量不超过 1% 范围内，其抗干缩效果明显提高，改善效果超过 50%；李淑、范文孝<sup>[57,58]</sup>得出同样的结果，玄武岩纤维的掺入可降低水泥稳定碎石的干缩系数，提高水泥稳定碎石的抗收缩性；暴英波<sup>[59]</sup>对玄武岩纤维水泥稳定碎石性能的研究表明，添加玄武岩纤维后的水泥稳定碎石，与普通水泥稳定碎石相比，干缩试验时质量损失率平均减少 0.21%，干缩位移减少 5.26%，28 d 后干缩系数减少 13.3%，并发现玄武岩纤维对早期干缩系数影响不大，28 d 抗干缩性能提升明显；Zheng 等<sup>[60]</sup>研究表明，当玄武岩纤维含量为 6 kg/cm<sup>3</sup> 时，掺入玄武岩纤维可显著提高水泥稳定碎石的抗干缩性能。不同种类纤维作为外掺剂以及作用效果汇总如表 1 所示。

### 2.3.3 橡胶

随着道路系统和汽车工业的发展，每年产生的废旧轮胎数量迅速增加。用废旧橡胶轮胎生产碎胶，混合成胶凝材料代替部分细骨料或粗骨料是一种新型材料改性方法。由于橡胶颗粒的弹性，可以提高胶结材料的韧性。目前为止，国内外很多学者在橡胶混凝土方向做了大量研究，当掺入橡胶颗粒后，混凝土的力学性能会削弱<sup>[61]</sup>，然而混凝土的变形、延性和韧性得到增强，断裂不再是脆性破坏而是延性破坏<sup>[62]</sup>。受橡胶混凝土的启发，橡胶颗粒也被用作水泥稳定碎石的掺加剂，

表 1 添加纤维调控方法对比

Table 1 Comparison of adding fiber regulation methods

纤维类型	纤维长度/mm	掺量	干缩条件	水泥含量/%	龄期/d	效果/%	文献
聚酯纤维	50	0%~1.5%	$T=20\text{ }^{\circ}\text{C}, \text{RH}=60\%$	4	25~40	5.9~27.2	[44]
	12					9.6	
	18	0.9 kg/m <sup>3</sup>	$T=20\text{ }^{\circ}\text{C}, \text{RH}=60\%$	3.6	100	17.2	[46]
	24					24.0	
	30					19.35	
聚乙烯醇纤维	12					8.38	
	18	0.6~1.2 kg/m <sup>3</sup>	$T=20\text{ }^{\circ}\text{C}, \text{RH}=60\%$	3.2~4	90	15.79	[47]
	24					22.49	
	30					17.96	
聚丙烯纤维	—	0.5%	$T=20\text{ }^{\circ}\text{C}, \text{RH}=60\%$	5.3	90	16.7	[49]
	10~20	0.1%	$T=40\text{ }^{\circ}\text{C}$	5	—	42	[51]
	19	1.0%	$T=20\text{ }^{\circ}\text{C}, \text{RH}=60\%$	5	7	20.2	[53]
玻璃纤维	6					17.3	
	12	0.15%	$T=20\text{ }^{\circ}\text{C}, \text{RH}=50\%$	4	7	31.5	[55]
	18					46.8	
玄武岩纤维	25	0.1%	自然条件下	4	25	51	[56]
	12	0.05%	$T=20\text{ }^{\circ}\text{C}, \text{RH}=60\%$	4	28	13.3	[59]

用来研究水泥稳定碎石的抗裂性能。

吕松涛等<sup>[63]</sup>通过研究掺加橡胶的水泥稳定碎石的力学性能,以韧性作为水泥稳定材料抗裂、抗变形能力的反映,在保证强度的前提下,以橡胶颗粒掺量 76% 为例,极限劈应变平均可达到传统水泥稳定碎石的 1.9 倍,极限弯拉应变平均可达传统水泥稳定碎石的 3.79 倍;Farhan 等<sup>[64]</sup>测试了添加废弃橡胶改性的水稳材料性能,认为改性后的混合料具有较好的抗干燥收缩能力;Sun 等<sup>[65]</sup>研究发现添加橡胶后的水泥稳定碎石干缩系数最大可降低约 28%,并进行了微观研究,如图 9 所示,橡胶颗粒附近的水泥水化受到阻碍,CSM 的微观结构形态因胶粒的疏水性而受到影响,水泥基体与橡胶颗粒之间存在明显的界面,说明水泥砂浆与胶粒之间的粘结力较差。界面处出现的微裂纹可能是 CSM 早期机械强度下降的原因。

此外,微裂纹可以为因水分流失而产生的干缩裂纹的形成和扩展提供一定的空隙空间,有利

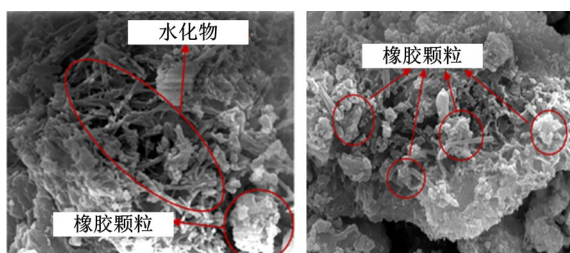


图 9 添加橡胶的水泥稳定碎石微观图像

Fig. 9 Microscopic image of CSM with rubber

于提高 CSM 的抗裂性。研究表明,微裂纹为干缩裂纹的扩展提供了空隙空间,因此加入胶粒有效地提高了水泥稳定碎石的抗体积收缩能力。较高的橡胶含量对收缩性能的改善有积极作用。其作用机理主要有两部分:①碎胶表面粗糙,具有疏水性,混合物的水泥水化受阻,水化不完全,水化产物少;②胶粉替代了部分细骨料并填充了 CSM 中的空隙,这会影响混合物的内部孔隙结构。孔隙结构的变化影响混合物的毛细孔压,阻碍毛细管水的蒸发,影响毛细管作用,从而减少体积收缩,防止初始收缩裂缝的形成。

#### 2.3.4 其他添加剂

除了上述比较常用的添加剂外,随着材料科学的不断发展,人们对环境保护的不断重视,一些微粉材料和废弃再生材料被用来改善水泥稳定碎石的收缩性能,如表 2 所示。曲美燕<sup>[66]</sup>利用纳米层状材料改性水泥稳定碎石来改善其抗裂性能,研究表明:纳米层状材料掺量为水泥的 10% 时,水泥稳定碎石的干缩应变与干缩系数最小,在养生龄期 7 d 时,干缩系数比普通水泥稳定碎石降低超过 20%;王程<sup>[67]</sup>对掺入建筑垃圾复合粉体材料的水泥稳定碎石收缩性能研究表明,复合粉体材料由于其良好的填充效应和火山灰效应不仅提高了水泥稳定碎石的密实度和强度,降低了混合料内部孔隙率的连通性,减少混合料内部收缩空间与水分蒸发量,水泥稳定碎石基层干燥收缩性能

表 2 其他添加剂对比

Table 2 Comparison of other additives

外掺剂种类	外掺剂含量/%	效果/%	文献
纳米层状材料	水泥的 10%	20	[66]
建筑垃圾复合粉体材料	2.0	40	[67]
粉煤灰	5~10	41.1	[68]
沥青乳液	2~3	21.4	[71]
废旧沥青混合料	25	16.5	[72]
X型凹凸棒石黏土	水泥的 5%	13.7	
Y型凹凸棒石黏土	水泥的 10%	7.4	[73]
Y型煅烧凹凸棒石黏土	水泥的 15%	20.5	
脱硫石膏	5.0	60	[74]
废弃食用油	—	15	[75]
城市垃圾焚烧飞灰	代替 25% 水泥	25.9	[76]

提高约 40%；徐鸥明<sup>[68,69]</sup>将粉煤灰作为添加剂，先是发现粉煤灰掺量为 5%~10% 时，水泥粉煤灰稳定碎石的干缩性能提高 41.1%，同时研究发现复掺粉煤灰与粒化高炉矿渣对水泥稳定碎石收缩特性改善效果较好；贾克聪<sup>[70]</sup>在水泥稳定碎石中加入乳化沥青，发现随着乳化沥青的增多，水泥稳定碎石干缩系数减小；Du<sup>[71]</sup>研究表明在水泥稳定碎石中加入 2%~3% 沥青乳液，其干缩系数比普通水泥稳定碎石降低 21.4%；王海朋<sup>[72]</sup>研究废旧沥青混合料对水泥稳定碎石性能的影响，表明水

泥稳定碎石中掺入 25% 的细废旧料，其干缩系数降低约 16.5%；曲美燕等<sup>[73]</sup>在水泥稳定基层中添加凹凸棒石黏土来改善其抗裂性能，发现与空白对照相比，掺加 X 型凹凸棒石黏土、Y 型凹凸棒石黏土和 Y 型煅烧凹凸棒石黏土的干缩系数较空白试验分别减少 13.7%、7.4% 和 20.5% 左右；陆青清<sup>[74]</sup>研究表明，脱硫石膏的添加可以降低水泥稳定材料的干缩，当脱硫石膏掺量为 5.0% 时，复合稳定碎石 28 d 的干缩系数比未掺加脱硫石膏的对照组减小约 60%；Li 等<sup>[75]</sup>将废弃食用油 (WCO) 添加到水泥稳定碎石中，发现添加 WCO 后的混合料 7 d 后的干缩系数比对照组低 15% 左右，表明其抗干缩效果要好；Yan 等<sup>[76]</sup>研究表明，用城市垃圾焚烧飞灰代替 25% 的水泥，可以明显改善干缩性能，干缩系数较空白组降低约 25.9%。

综上所述，根据不同机理，对水泥稳定碎石干燥收缩调控措施进行归纳总结可知，目前，对于改善级配与配合比、添加纤维来改善收缩性能单因素的研究已经相对成熟，其他外掺剂种类较多，但研究较少。各种干燥收缩调控措施的汇总如表 3 所示。

表 3 水泥稳定碎石干燥收缩调控措施对比

Table 3 Comparison of drying shrinkage mitigation strategies of CSM

调控方法	调控机理	所用材料或途径
改善级配	骨料对干燥收缩变形的约束作用	1. 采用骨架密实型级配 (逐级填充法、贝雷法等)； 2. 在保证强度满足要求的基础上，减少水泥用量； 3. 选择轻质骨料。
控制成型、养生	混合物料充分拌合，减少离析	1. 采用振动搅拌、振动击实等成型方式，使材料充分拌合、碾压； 2. 控制养生条件，延长养生龄期，避免早期破坏。
添加外掺剂	增韧作用、增塑、保水作用； 降低 CSM 的凝胶材料早期的化学收缩	1. 添加钢渣、纤维 (玄武岩纤维、合成纤维、玻璃纤维、矿纤维等)、橡胶等常用减缩改性剂； 2. 用粉煤灰、纳米层状材料等替代部分水泥。

### 3 水泥稳定碎石干燥收缩预估模型及测量方式

#### 3.1 水泥稳定碎石干燥收缩预估模型

干燥收缩对水泥稳定碎石开裂具有关键影响，建立合理精准的水泥稳定碎石收缩预估模型对水泥稳定碎石收缩开裂的预防处置具有重大意义。国内外已经对于混凝土收缩预估模型进行了大量的研究，并取得了一系列成果，比如 Bazant-Panula 模型<sup>[77]</sup>、Biot-Bishop 模型<sup>[78]</sup>、Coussy 模型<sup>[79]</sup>等，以及随着计算机与智能算法的发展，数

值模拟与数据预报也被用在混凝土收缩预测模型。但是，对于水泥稳定碎石的收缩预估模型并不多见，大多是在混凝土干缩模型的基础上进行修正。李侠等<sup>[80]</sup>采用三层 BP 神经网络对水泥稳定碎石和聚丙烯纤维水泥稳定碎石的累计干缩应变建立了预测模型，通过对干缩性能试验数据进行网络训练，得出 BP 网络模型训练效果较好，用 BP 网络模型可以预测水泥稳定碎石的累计干缩应变，预测结果的最大相对误差在 1% 以内，目标值与仿真值的线性相关系数为 0.985；Wang 等<sup>[81]</sup>等基于室内试验结果提出一种水泥稳定碎石收缩

模型,以水泥剂量、适度梯度等因素作为控制变量,验证了在特定环境下其预测结果具有较好的准确性,预测值与实测值相关度在0.98以上。

### 3.2 水泥稳定碎石干燥收缩测量方法

水泥稳定碎石干燥收缩的测量方法目前研究较少,干燥收缩性能多用失水率、干燥收缩应变和干燥收缩系数来表征。水泥稳定碎石的干燥收缩系数测定基本上是按照《公路工程无机结合料稳定材料试验规程》(JTGE51—2009)进行,采用接触式测试装置,即利用千分表测量试件因为收缩而引起的长度的变化(见图10)。该方法人工测量,易于操作,节省资源,结果直观,但不足点是试验结果受人为因素和试验环境影响较大,比如测试环境的选择常常因人而异,在室温控制、相对湿度和风速控制等会有偏差。

国内外有不少学者尝试研发新的测试装置来测试混凝土的收缩性能,非接触式测量方法得到越来越多的关注。非接触式测量方法是指测量仪器不与测头接触来测量试件的长度变化,像被动声能传感器测量法、激光非接触式测量方法、位移传感器测量方法<sup>[82]</sup>等。但对于水泥稳定碎石干燥收缩测试装置的研究目前还很少。

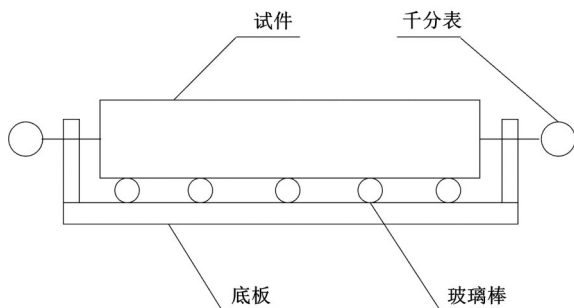


图10 干燥收缩装置示意图

Fig. 10 Schematic diagram of drying shrinkage device

## 4 水泥稳定碎石干燥收缩中存在问题及展望

### 4.1 水泥稳定碎石干燥收缩机理的进一步研究

韩宇栋等<sup>[5]</sup>指出,针对混凝土内部毛细孔开始变为非饱和态、内部相对湿度开始下降后,混凝土干燥收缩的机理,还没有统一的结论。当内部相对湿度较高时,毛细孔张力学说占据主导地位,但当内部相对湿度低于50%时,干燥收缩的主要驱动力目前并没有公认的统一观点。作为水泥基材料,水泥稳定碎石的收缩机理,与混凝土收缩机理相似。混凝土收缩机理的研究,主要是从化学、

物理、力学等方法研究入手,利用化学反应及其动力学、微观力学、微孔观察等手段。实际上,对于水泥稳定碎石收缩机理的研究并不多,大多是采用混凝土收缩机理。今后的研究如果能基于水泥稳定碎石,从微观结构与微观力学的角度考察探寻,才能更好地对水泥稳定碎石干燥收缩机理有更深入的认识。

### 4.2 干燥收缩调控方法的优化

在采用骨架密实型水泥稳定碎石预防其干燥收缩时,关于骨架密实型级配的评价方式目前尚未由统一的观点,关于混合料集料的骨架性的判别方法有待进一步研究。另外,水泥稳定碎石组成结构复杂,属于多相复合材料,每种成分由于自身物理力学特性不同,对于混合料收缩影响权重各不相同。目前,大多研究通常只是逐个分析单一组分变化对收缩变形的影响,多种组分同时变化下混合料干燥收缩行为的研究较少。之后的研究可以对级配、外掺剂、成型养生方式等多种因素综合考虑,更加符合工程实际。

### 4.3 干燥收缩预估模型与测量方法

目前对于水泥稳定碎石干燥收缩预估模型的研究不多,成果较少。水泥稳定碎石和混凝土都属于水泥基复合材料,组成结构类似,试验与理论研究方法上许多地方可以相互借鉴,参考混凝土的各种预测模型,可以研究一些混凝土收缩预测模型是否同样适应于水泥稳定碎石的收缩预测模型,或者可以利用混凝土的研究思路来进一步研究水泥稳定碎石的收缩模型,而不仅仅是套用。同时,现有混凝土收缩预测模型中影响因素众多,计算过程繁琐,不同模型考虑因素差异大,因此在水泥稳定碎石收缩预测模型建立时,应考虑参数的合理、简洁。

现阶段水泥稳定碎石干燥收缩测量方法采用接触式测量,误差相对来说比较大,读数不连续,精度难以保证,有待进一步改进。非接触式测量方法可以避免测量仪器与测头直接接触,测量数据直接通过传感器进行实时追踪,结合电脑程序自动分析数据变化情况,可以监测水泥基材料全过程的收缩变形性能。这种方法测量精度高,操作敏捷,可实现全过程自动化测量,自动获得变形曲线,为水泥稳定碎石干缩测量方法和装置的进一步研究提供了参考,为水泥稳定碎石干缩性能的研究方法开辟了新道路,具有一定的研究潜力。

## 5 结 论

(1)水泥稳定碎石干燥收缩性能与水泥混凝土干燥收缩性能类似,主要分为表面张力、毛细孔张力、拆散压力和层间水损失4个模型,但针对水泥稳定碎石本身的干燥收缩性能研究不多,今后可以针对这一点进行更深一步的研究。

(2)减少水泥用量、采用骨架密实型级配、采用振动搅拌以及添加外掺剂可有效减少水泥稳定碎石的干燥收缩,但仍存在一些问题有待解决,比如骨架密实型级配的判别方法、各种优化方法的综合作用效果。

(3)对于水泥稳定碎石干燥收缩预估模型的研究相对较少,多数研究借鉴了水泥混凝土干燥收缩预估模型,有关其他水泥混凝土干燥收缩预估模型对水泥稳定碎石材料的适用性、针对水泥稳定碎石本身的干燥收缩预估模型及其简化都可以作为未来的研究方向;水泥稳定碎石干燥收缩的试验仪器以及试验数据采集方法是研究水泥稳定碎石干缩性能不可避免的一个点,提高仪器的可操作性和精度是今后仪器改进的重点,非接触式测量方法具有很大的研究前景。

### 参考文献:

- [1] 蒋应军. 水泥稳定碎石基层收缩裂缝防治研究[D]. 西安:长安大学公路学院, 2001.  
Jiang Ying-jun. Study on the shrinkage crack prevention and cure problem on the stable crushed stones base[D]. Xi'an: School of Highway, Chang'an University, 2001.
- [2] Wu L, Farzadnia N, Shi C, et al. Autogenous shrinkage of high performance concrete: a review[J]. Construction and Building Materials, 2017, 149: 62-75.
- [3] 张君, 侯东伟, 高原. 混凝土自收缩与干燥收缩的统一内因[J]. 清华大学学报:自然科学版, 2010, 50(9): 1321-1324.  
Zhang Jun, Hou Dong-wei, Gao Yuan. The uniform internal cause of the self-shrinking and drying contraction of concrete[J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2010, 50(9): 1321-1324.
- [4] 陈宝春, 李聪, 黄伟, 等. 超高性能混凝土收缩综述[J]. 交通运输工程学报, 2018, 18(1): 13-28.  
Chen Bao-chun, Li Cong, Huang Wei, et al. Review of ultra-high performance concrete shrinkage[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2018, 18(1): 13-28.
- [5] 韩宇栋, 张君, 岳清瑞, 等. 现代混凝土收缩研究评述[J]. 混凝土, 2019(2): 1-12, 16.  
Han Yu-dong, Zhang Jun, Yue Qing-ru, et al. Review on shrinkage of modern concrete[J]. Concrete, 2019(2): 1-12, 16.
- [6] Ye H, Aleksandra R. A review and comparative study of existing shrinkage prediction models for portland and non-portland cementitious materials[J]. Advances in Materials Science and Engineering, 2016: 1-13.
- [7] Kovler K, Zhutovsky S. Overview and future trends of shrinkage research[J]. Materials and Structures, 2006, 39(9): 827-847.
- [8] Bella C D, Wyrzykowski M, Lura P. Evaluation of the ultimate drying shrinkage of cement-based mortars with poroelastic models[J]. Materials and Structures, 2017, 50(1): 52.
- [9] Idiart A. Coupled analysis of degradation processes in concrete specimens at the meso-level[D]. Barcelona: Universitat Politècnica de Catalunya, 2009.
- [10] Duckheim C, Setzer M J. Drying shrinkage mechanisms of hardened cement paste[C]//Creep, Shrinkage and Durability Mechanics of Concrete and Concrete Structures, Two Volume Set, London, 2008: 49-55.
- [11] Maruyama I, Nishioka Y, Igarashi G, et al. Microstructural and bulk property changes in hardened cement paste during the first drying process[J]. Cement & Concrete Research, 2014, 58: 20-34.
- [12] Andrade C, Sarría J, Alonso C. Relative humidity in the interior of concrete exposed to natural and artificial weathering[J]. Cement and Concrete Research, 1999, 29(8): 1249-1259.
- [13] 王振军. 水泥乳化沥青混凝土浆体—集料界面区结构与性能研究[D]. 陕西:长安大学公路学院, 2007.  
Wang Zhen-jun. Study on structure and properties of slurry aggregate interface of cement emulsified asphalt concrete[D]. Xi'an: School of Highway, Chang'an University, 2007.
- [14] Splittgerber H, Wittmann F. Einfluss adsorbierter wasserfilme auf die Van der Waals kraft zwischen quarzglasoberflächen[J]. Surface Science, 1974, 41(2): 504-514.
- [15] Maruyama I, Igarashi G, Nishioka Y. Bimodal behavior of C-S-H interpreted from short-term length change and water vapor sorption isotherms of hardened cement paste[J]. Cement & Concrete Research, 2015, 73: 158-168.

- [16] Rahimi-Aghdam S, Masoero E, Rasoolinejad M, et al. Century-long expansion of hydrating cement counteracting concrete shrinkage due to humidity drop from selfdesiccation or external drying[J]. *Materials and Structures*, 2019, 52(1): 1-21.
- [17] Maruyama I, Ohkubo T, Haji T, et al. Dynamic microstructural evolution of hardened cement paste during first drying monitored by  $^1\text{H}$  NMR relaxometry [J]. *Cement and Concrete Research*, 2019, 122: 107-117.
- [18] Hamlin M J, Aditya K, Gaurav S. A quantitative discrimination of the nano-pore-structure of cement paste during drying: new insights from water sorption isotherms[J]. *Cement & Concrete Research*, 2015, 76: 27-36.
- [19] Pinson M B, Masoero E, Bonnaud P A, et al. Hysteresis from multiscale porosity: modeling water sorption and shrinkage in cement paste[J]. *Physical Review Applied*, 2015, 3(6): 64009.
- [20] 曾梦澜, 罗迪, 吴超凡, 等. 不同级配类型水泥稳定碎石路面基层材料的抗裂性能[J]. *湖南大学学报: 自然科学版*, 2013, 40(10): 1-7.  
Zeng Meng-lan, Luo Di, Wu Chao-fan, et al. Anti-cracking properties of cement stabilized crushed stone pavement base materials of different aggregate structures[J]. *Journal of Hunan University(Nature Science)*, 2013, 40(10): 1-7.
- [21] 查旭东, 曹艳霞, 刘国才. 抗裂型水泥稳定碎石配合比设计及路用性能研究[J]. *长沙理工大学学报: 自然科学版*, 2013, 10(1): 1-6.  
Zha Xu-dong, Cao Yan-xia, Liu Guo-cai, et al. Research on mix design and pavement performances for anti-crack cement stabilized macadam[J]. *Journal of Changsha University of Science and Technology(Nature Science)*, 2013, 10(1): 1-6.
- [22] 彭波, 李龙刚, 尹光凯, 等. 低水泥剂量稳定碎石级配组成设计与性能研究[J]. *公路*, 2018, 63(5): 26-33.  
Peng Bo, Li Long-gang, Yin Guang-kai, et al. Gradation composition design and performance study of low dose cement stabilized macadam[J]. *Highway*, 2018, 63(5): 26-33.
- [23] 梁春雨, 郭有蒙, 张利东, 等. 季冻区多指标水泥稳定碎石性能评价及级配优选[J]. *吉林大学学报: 工学版*, 2020, 50(3): 998-1005.  
Liang Chun-yu, Guo You-meng, Zhang Li-dong, et al. Performance evaluation and gradation optimal selection of multi-index cement stabilized macadam in seasonal frozen area[J]. *Journal of Jilin University(Engineering and Technology Edition)*, 2020, 50(3): 998-1005.
- [24] 李明杰, 蒋应军, 戴经梁. 水泥稳定碎石缩裂机理及在级配设计中应用[J]. *武汉理工大学学报*, 2010, 32(3): 1-4, 8.  
Li Ming-jie, Jiang Ying-jun, Dai Jing-liang. Analysis and apply of anti-cracking mechanism of cement stabilization of crushed aggregate[J]. *Journal of Wuhan University of Technology*, 2010, 32(3): 1-4, 8.
- [25] 蒋应军, 陈忠达, 彭波, 等. 密实骨架结构水泥稳定碎石路面配合比设计方法及抗裂性能[J]. *长安大学学报: 自然科学版*, 2002(4): 9-12.  
Jiang Ying-jun, Chen Zhong-da, Peng Bo, et al. Mixture design method and anti-cracking performance of cement stabilized crushed rock pavement with dense skeleton type[J]. *Journal of Chang'an University(Nature Science Edition)*, 2002(4): 9-12.
- [26] 孙兆辉. 基于抗裂性能的水泥稳定碎石级配组成研究[J]. *公路*, 2006, 4(8): 34-40.  
Sun Zhao-hui. A study on gradation composition of cement stabilized macadam base on crack resistance performance[J]. *Highway*, 2006, 4(8): 34-40.
- [27] 李明, 李昶, 刘继华, 等. 粗集料及界面特性对水泥稳定碎石温缩抗裂性能影响性分析[J]. *公路*, 2019, 64(10): 1-7.  
Li Ming, Li Chang, Liu Ji-hua, et al. Effect of coarse aggregate and interfacial characteristics on crack resistance in temperature shrinkage of cement-stabilized macadam[J]. *Highway*, 2019, 64(10): 1-7.
- [28] Grassl P, Hong S W, Buenfeld N R. Influence of aggregate size and fraction on shrinkage induced micro-cracking of mortar and concrete[J/OL]. [2021-02-27]. <https://www.xueshufan.com/publication/1701151488>
- [29] Liu Z, Wei X, Wang D, et al. Performance of cement-stabilized macadam roads based on aggregate gradation interpolation tests[J]. *Mathematical Biosciences and Engineering*, 2019, 16(4): 2371-2390.
- [30] Fujiwara T. Effect of aggregate on drying shrinkage of concrete[J]. *Doboku Gakkai Ronbunshu*, 2008(1): 31-44.
- [31] 于新, 黄晓明. 低剂量水泥稳定碎石基层干缩温缩性能研究[J]. *公路交通科技*, 2007(7): 52-55.  
Yu Xin, Huang Xiao-ming. Study on the dry shrinkage performance of low-dose cement stabilized macadam base[J]. *Journal of Highway and Transportation Research and Development*, 2007(7): 52-55.
- [32] 张嘎吱. 考虑抗裂性的水泥稳定类材料配合比设计

- 方法研究[D]. 西安:长安大学公路学院, 2001.
- Zhang Ga-zi. Research on the design method of cement stabilized material mix ratio considering crack resistance[D]. Xi'an: School of Highway, Chang'an University, 2001.
- [33] Maruyama I, Sugie A. Numerical study on drying shrinkage of concrete affected by aggregate size[J]. Journal of Advanced Concrete Technology, 2014, 12(8): 279-288.
- [34] 赵利军, 蒋文志, 侯劲汝, 等. 搅拌方式对水泥稳定碎石混合料抗压强度的影响[J]. 中国公路学报, 2018, 31(1): 151-158.
- Zhao Li-jun, Jiang Wen-zhi, Hou Jin-ru, et al. Influence of mixing methods on performance of compressive strength for cement stabilized macadam mixture[J]. China Journal of Highway and Transport, 2018, 31(1): 151-158.
- [35] 董武, 谢诗元, 赵利军, 等. 振动对水泥稳定碎石搅拌过程和性能的影响[J]. 中国公路学报, 2019, 32(5): 181-190.
- Dong Wu, Xie Shi-yuan, Zhao Li-jun, et al. Influence of vibration on mixing process of cement stabilized macadam and its performance[J]. China Journal of Highway and Transport, 2019, 32(5): 181-190.
- [36] 蒋应军. 基于振动法设计的抗裂型水泥稳定碎石基层应用研究[J]. 公路, 2008, 4(12): 36-41.
- Jiang Ying-jun. Application research on anti-crack cement stabilized macadam base on vibration method design[J]. Highway, 2008, 4(12): 36-41.
- [37] 李立寒, 黄璞, 刘栋. 旋转与静压成型对水泥稳定碎石性能的影响[J]. 长安大学学报:自然科学版, 2016, 36(6): 17-25.
- Li Li-han, Huang Pu, Liu Dong. Impact on performance of cement stabilized macadam mixtures between gyratory compaction and static compaction methods[J]. Journal of Chang'an University(Nature Science Edition), 2016, 36(6): 17-25.
- [38] 吕松涛, 郑健龙, 仲文亮. 养生期水泥稳定碎石强度、模量及疲劳损伤特性[J]. 中国公路学报, 2015, 28(9): 9-15, 45.
- Lyu Song-tao, Zheng Jian-long, Zhong Wen-liang. Characteristics of strength, modulus and fatigue damage for cement stabilized macadam in curing period [J]. China Journal of Highway and Transport, 2015, 28(9): 9-15, 45.
- [39] 曾梦澜, 阮文, 蒙艺, 等. 二灰钢渣碎石路面基层层的设计与使用性能[J]. 湖南大学学报:自然科学版, 2012, 39(10): 1-6.
- Zeng Meng-lan, Ruan Wen, Meng Yi, et al. Design and performance of lime and fly-ash stabilized steel-slag and crushed-stone pavement base materials[J]. Journal of Hunan University(Nature Science), 2012, 39(10): 1-6.
- [40] 李飞, 陈勇鸿, 高伏良, 等. 掺钢渣无机结合料稳定路面基层材料干缩温缩试验研究[J]. 公路, 2012, 4(12): 186-191.
- Li Fei, Chen Yong-hong, Gao Fu-liang, et al. Experiment and study on dry and temperature induced shrinkage properties of inorganic binder stabilized pavement base material with steel slag[J]. Highway, 2012, 4(12): 186-191.
- [41] Li W, Lang L, Lin Z, et al. Characteristics of dry shrinkage and temperature shrinkage of cement-stabilized steel slag[J]. Construction and Building Materials, 2017, 134(1): 540-548.
- [42] 郑武西. 钢渣在水泥稳定碎石基层中的应用研究[D]. 西安:长安大学公路学院, 2018.
- Zheng Wu-xi. Application of steel slag in cement stabilized crushed stone base[D]. Xi'an: School of Highway, Chang'an University, 2018.
- [43] 肖杰, 龙晨杰, 何建刚, 等. 大掺量激活钢渣微粉-水泥稳定碎石性能及微观特性研究[J]. 中国公路学报, 2021, 34(10): 1-12.
- Xiao Jie, Long Chen-jie, He Jian-gang, et al. Study on performance and micro characteristics of cement stabilized macadam with large amount of activated steel slag powder[J]. China Journal of Highway and Transport, 2021, 34(10): 1-12.
- [44] Liu Z. Experimental research on the engineering characteristics of polyester fiber-reinforced cement-stabilized macadam[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2015, 27(10): 1-10.
- [45] Banthia N, Gupta R. Influence of polypropylene fiber geometry on plastic shrinkage cracking in concrete[J]. Cement & Concrete Research, 2006, 36(7): 1263-1267.
- [46] 贺亚飞. 掺聚乙烯醇(PVA)纤维水泥稳定碎石的力学及抗裂性能研究[D]. 重庆:重庆交通大学交通运输学院, 2016.
- He Ya-fei. Study on mechanical properties and cracking resistance of the cement-stabilized macadam mixed with polyvinyl alcohol(PVA) fiber[D]. Chongqing: College of Traffic&Transportation, Chongqing Jiaotong University, 2016.
- [47] Zhao Y, Yang X, Zhang Q, et al. Crack resistance and mechanical properties of polyvinyl alcohol fiber-

- reinforced cement-stabilized macadam base[J]. *Advances in Civil Engineering*, 2020(1): 1-15.
- [48] 谭国金, 朱德祺, 梁春雨, 等. 桥梁用聚丙烯纤维增强水泥基复合材料的力学性能[J]. *吉林大学学报: 工学版*, 2020, 50(4): 1396-1402.
- Tan Jin-guo, Zhu De-qi, Liang Chun-yu, et al. Mechanical properties of polypropylene fiber reinforced engineering cementitious composites for bridges[J]. *Journal of Jilin University(Engineering and Technology Edition)*, 2020, 50(4): 1396-1402.
- [49] 杨红辉, 王建勋, 郝培文, 等. 纤维在水泥稳定碎石基层中的应用[J]. *长安大学学报: 自然科学版*, 2006, 4(3): 14-16, 20.
- Yang Guo-jin, Wang Jian-xun, Hao Pei-wen, et al. Utilization of fiber in cement-stabilized aggregate mixture[J]. *Journal of Chang'an University(Nature Science Edition)*, 2006, 4(3): 14-16, 20.
- [50] Peng Z, Li Q. Experimental study on shrinkage properties of cement-stabilized macadam reinforced with polypropylene fiber[J]. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 2010, 29(12): 1851-1860.
- [51] Peng Z, Li Q. Effect of polypropylene fibre on mechanical and shrinkage properties of cement-stabilised macadam[J]. *International Journal of Pavement Engineering*, 2009, 10(6): 435-445.
- [52] 李远厂. 乳化沥青-柔性纤维改性水泥稳定碎石的路用性能研究[D]. 重庆: 重庆交通大学交通运输学院, 2015.
- Li Yuan-chang. Study on pavement performance of cement stabilized macadam with emulsified asphalt and flexible fiber[D]. Chongqing: College of Traffic & Transportation, Chongqing Jiaotong University, 2015.
- [53] 徐建成. 掺聚丙烯纤维的水泥稳定碎石在市政道路中的应用研究[D]. 扬州: 扬州大学建筑科学与工程学院, 2012.
- Xu Jian-cheng. The research on the cement-stabilized aggregate mixtures adding polypropylene fiber applied to municipal roads[D]. Yangzhou: College of Building Science and Engineering, Yangzhou University, 2012.
- [54] Grilli A, Bocci M, Tarantino A M. Experimental investigation on fibre-reinforced cement-treated materials using reclaimed asphalt[J]. *Construction and Building Materials*, 2013, 38(1): 491-496.
- [55] 白云. 玻璃纤维水泥稳定碎石路用性能研究[D]. 西安: 长安大学公路学院, 2014.
- Bai Yun. Glass fiber cement stabilized aggregate performance study[D]. Xi'an: School of Highway, Chang'an University, 2014.
- [56] 杨明. 掺玄武岩纤维水泥稳定碎石基层抗裂性能研究[D]. 哈尔滨: 东北林业大学交通运输学院, 2011.
- Yang Ming. Study of crack resistance on cement stabilized macadam base with mixed basalt fiber[D]. Harbin: School of Traffic and Transportation, Northeast Forestry University, 2011.
- [57] 李淑. 玄武岩纤维水泥稳定碎石路用性能试验研究[D]. 青岛: 中国海洋大学工程学院, 2014.
- Li Shu. Experiment study on pavement performance of basalt fiber cement stabilized macadam[D]. Qingdao: College of Engineering, Ocean University of China, 2014.
- [58] 范文孝. 玄武岩纤维增强路面材料性能试验研究[D]. 大连: 大连理工大学土木水利学院, 2011.
- Fan Wen-xiao. Experimental investigation on performance of basalt fiber-reinforced pavement materials [D]. Dalian: School of Civil Engineering and Water Resources, Dalian University of Technology, 2011.
- [59] 暴英波. 玄武岩纤维水泥稳定碎石性能研究[D]. 西安: 长安大学公路学院, 2017.
- Bao Ying-bo. Performance study of the cement stabilized macadam with basalt fiber[D]. Xi'an: School of Highway, Chang'an University, 2017.
- [60] Zheng Y, Zhang P, Cai Y, et al. Cracking resistance and mechanical properties of basalt fibers reinforced cement-stabilized macadam[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2019, 165(15): 312-334.
- [61] Topcu I B. The properties of rubberized concretes[J]. *Cement & Concrete Research*, 1995, 25(2): 304-310.
- [62] Grinys A, Sivilevicius H, Pupekis D, et al. Fracture of concrete containing crumb rubber[J]. *Statyba*, 2013, 19(3): 447-455.
- [63] 吕松涛, 王双双, 王盘盘, 等. 橡胶-水泥稳定碎石持强增韧特性研究[J]. *中国公路学报*, 2020, 33(11): 139-147.
- Lv Song-tao, Wang Shuang-shuang, Wang Pan-pan, et al. Strength and toughness of rubber-cement stabilized macadam[J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2020, 33(11): 139-147.
- [64] Farhan A H, Dawson A R, Thom N H, et al. Flexural characteristics of rubberized cement-stabilized crushed aggregate for pavement structure[J]. *Materials & Design*, 2015, 88(25): 897-905.
- [65] Sun X, Wu S, Yang J, et al. Mechanical properties and crack resistance of crumb rubber modified cement-stabilized macadam[J]. *Construction and Building Ma-*

- terials, 2020, 259: 119708.
- [66] 曲美燕. 掺纳米层状材料的水泥稳定碎石抗裂性能研究[D]. 南京: 东南大学化学化工学院, 2015.  
Qu Mei-yan. Research on anti-cracking performances of the cement stable macadam adding layered materials[D]. Nanjing: Chemistry and Chemical Engineering, Southeast University, 2015.
- [67] 王程. 建筑垃圾复合粉体材料在公路半刚性基层材料中的应用研究[D]. 西安: 长安大学公路学院, 2017.  
Wang Cheng. Research on construction waste composite powder materials in the application of highway semi-rigid base[D]. Xi'an: School of Highway, Chang'an University, 2017.
- [68] 徐鸥明, 王有贵, 陈俊宇, 等. 掺粉煤灰水泥稳定碎石收缩特性研究[J]. 重庆交通大学学报: 自然科学版, 2014, 33(4): 72-75.  
Xu Ou-ming, Wang You-gui, Chen Jun-yu, et al. Shrinkage properties of cement stabilized crushed stones mixed with fly-ash[J]. Journal of Chongqing Jiaotong University(Nature Science), 2014, 33(4): 72-75.
- [69] 徐鸥明, 王士珩, 白敏, 等. 粉煤灰与粒化高炉矿渣对水泥稳定碎石强度和收缩特性影响研究[J]. 广西大学学报: 自然科学版, 2019, 44(2): 509-515.  
Xu Ou-ming, Wang Shi-heng, Bai Min, et al. Influence of fly ash and granulated blast furnace slag on strength and shrinkage characteristics of cement stabilized crushed stone[J]. Journal of Guangxi University (Nature Science Edition), 2019, 44(2): 509-515.
- [70] 贾克聪. 乳化沥青对水泥稳定碎石强度特性及力学性能的影响[J]. 公路工程, 2015, 40(3): 213-217, 229.  
Jia Ke-cong. The affect of emulsified asphalt on strength characteristics and mechanical properties of cement stabilized macadam[J]. Highway Engineering, 2015, 40(3): 213-217, 229.
- [71] Du S. Mechanical properties and shrinkage characteristics of cement stabilized macadam with asphalt emulsion[J]. Construction & Building Materials, 2019, 203: 408-416.
- [72] 王海朋. 掺细废旧料水泥稳定碎石抗裂性研究[D]. 西安: 长安大学公路学院, 2011.  
Wang Hai-peng. Study on crack resistance property about cement stabilization crushed-stones mixed with particles of reclaimed asphalt pavement[D]. Xi'an: School of Highway, Chang'an University, 2011.
- [73] 曲美燕, 马全红, 许雪松. 凹凸棒石黏土对水泥稳定碎石性能的影响[J]. 东南大学学报: 自然科学版, 2015, 45(2): 399-403.  
Qu Mei-yan, Ma Quan-hong, Xu Xue-song. Influence of palygorskite clay on properties of cement-stabilized macadam[J]. Journal of Southeast University (Nature Science Edition), 2015, 45(2): 399-403.
- [74] 陆青清. 脱硫石膏水泥稳定碎石减缩与增强行为机制[J]. 吉林大学学报: 工学版, 2021, 51(1): 252-258.  
Lu Qing-qing. Strength enhancement and shrinkage reduction mechanism of desulfurized gypsum cement stabilized aggregates[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2021, 51(1): 252-258.
- [75] Li X, Lv X, Wang W, et al. Crack resistance of waste cooking oil modified cement stabilized macadam[J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 243(10): 118525.
- [76] Yan K, Gao F, Sun H, et al. Effects of municipal solid waste incineration fly ash on the characterization of cement-stabilized macadam[J]. Construction and Building Materials, 2019, 207(20): 181-189.
- [77] Baant Z P, Panula L. Practical prediction of time-dependent deformations of concrete[J]. Matériaux Et Construction, 1978, 11(5): 317-328.
- [78] Kass R E, Eden U T, Brown E N. Propagation of Uncertainty and the Bootstrap[M]. New York: Springer, 2014.
- [79] Coussy O, Damgla P, Lassabatere T, et al. The equivalent pore pressure and the swelling and shrinkage of cement-based materials[J]. Materials & Structures, 2004, 37(265): 15-20.
- [80] 李侠, 耿敏, 张永芳. 水泥稳定碎石干缩应变 BP 网络预测模型[J]. 低温建筑技术, 2011, 33(3): 80-82.  
Li Xia, Geng Min, Zhang Yong-fang. BP network prediction model for shrinkage strain of cement stabilized macadam[J]. Low Temperature Architecture Technology, 2011, 33(3): 80-82.
- [81] Wang Y, Ni F, Xuan W. Research on dry-shrinkage performance of cement-treated base materials[C] // Geohunan International Conference, Changsha, China, 2009: 81-86.
- [82] 李娟燕, 周娟. 水泥稳定碎石干缩研究进展简述[J]. 交通科技, 2017(6): 103-106, 112.  
Li Juan-yan, Zhou Juan. A brief review of research progression on shrinkage of cement-stabilized macadam[J]. Transportation Science and Technology, 2017 (6): 103-106, 112.