

水性聚合物稳定碎石失水及强度变化规律研究

任瑞波*, 董鸣亮, 赵品晖, 周浩, 李志刚

(山东建筑大学 交通工程学院, 山东 济南 250101)

摘要: 水性聚合物稳定碎石的失水干燥影响其力学性能。文章采用旋转压实法成型水性聚合物稳定碎石试件, 分别通过失水干燥、劈裂强度试验研究养护温度和时间对其失水和强度变化的影响规律, 给出了其失水过程的划分阶段, 并运用乳液干燥理论解释了各阶段的物理意义。结果表明: 新型水性聚合物稳定碎石失水过程经历快速失水、缓慢失水和稳定失水 3 个阶段; 随养护时间增加, 水性聚合物稳定碎石的累计失水率逐渐增长, 而失水速率逐渐降低; 养护温度影响水性聚合物稳定碎石达到完全失水状态所需养护时间, 但不影响完全失水状态下的强度; 劈裂强度随养护时间的增加而增强, 水性聚合物稳定碎石失水完成后, 劈裂强度也不再增强。

关键词: 道路与铁道工程; 水性聚合物稳定碎石; 失水规律; 劈裂强度

中图分类号: U414

文献标识码: A

文章编号: 1673-7644(2021)05-0069-07

Research on the law of water loss and strength variation of water based polymer stabilized crushed stone

REN Ruibo*, DONG Mingliang, ZHAO Pinhui, ZHOU Hao, LI Zhigang

(School of Transportation Engineering, Shandong Jianzhu University, Jinan 250101, China)

Abstract: The dehydration drying of water based polymer stabilized crushed stone affects its mechanical properties. Forming water-based polymer stabilized macadam specimen by rotary compaction method. The effects of curing temperature and curing time on the water loss and strength of water based polymer stabilized crushed stone were studied by dehydration drying test and splitting strength test. The stages of water loss of polymer stabilized crushed stones were given. And their corresponding physical significance were explained by emulsion drying theory. The results show that the water loss process of the new water based polymer stabilized crushed stone can be divided into three stages: rapid water loss stage, slow water loss stage and stable water loss stage. With the increase of curing time, the cumulative water loss rate of water based polymer stabilized crushed stone increases gradually, while the water loss rate decreases gradually. The curing temperature affects the curing time for the water based polymer stabilized crushed stone to reach the state of complete water loss, but does not affect the strength under the state of complete water loss. The splitting strength increases with the increase of curing time, and does not increase after the completion of water loss.

Key words: highway and railway engineering; water based polymer stabilized crushed stone; water loss law; splitting strength

收稿日期: 2021-02-10

基金项目: 国家自然科学基金项目(1301007, 51278288)

作者简介: 任瑞波(1967—), 男, 教授, 博士, 主要从事沥青及沥青混合料等方面的研究。E-mail: rrbgq@sdjzu.edu.cn [*通讯作者]

0 引言

在我国公路建设过程中,“强基薄面”的设计思路一直贯穿其中。半刚性基层具有刚度大、强度高、稳定性好,以及成本较低等优点,因此半刚性基层沥青路面结构是我国目前主要采用的路面结构形式^[1-3]。但以水泥稳定碎石为主的半刚性基层在干湿、冻融循环以及车辆荷载的反复作用下易产生裂缝,基层裂缝向上延伸,导致沥青面层出现反射裂缝,其成为半刚性基层路面结构最主要的病害^[1,4]。为了从根本上解决半刚性基层的反射裂缝问题,柔性基层沥青路面开始应用于道路建设中^[5-7]。相较于半刚性基层路面结构,柔性基层具有良好的应力分散能力,能够有效地减缓反射裂缝的产生,因此柔性基层沥青路面的使用寿命一般可达到 35 年以上^[8]。由于柔性基层沥青路面在使用年限内能够保持路面整体结构完整,在后期的养护维修中只需要更新或更换功能性面层,避免了沥青路面整体结构层在短期内进行大修,是目前较为理想的路面结构形式^[9-11]。

现阶段主要采用级配碎石或沥青稳定碎石作为柔性基层。其中,级配碎石的弹性模量较低且易产生塑性变形,容易导致沥青路面的疲劳开裂^[12];而以沥青作胶结料的柔性基层造价较高,限制了其在国内大范围的推广使用。为解决以上问题,国外开发了由高强度抗老化树脂和多种特殊压力敏感性树脂聚合而成的路用水基聚合物(Solution Road Soilfix, SRX),其能代替传统胶结材料应用于柔性基层^[13]。国内也引进 SRX 铺筑了试验路,并开展了关于 SRX 稳定碎石强度性能、水稳定性、收缩性能、抗疲劳性能等方面的研究,能满足应用于道路基层的要求^[14-16]。虽然现有的研究表明 SRX 具有较好的性能,并展现出良好的应用前景,但是因其价格较高,长期使用性能尚不明确,在国内大规模推广应用的报道较少。

为加快水性聚合物稳定碎石技术应用的本土化,课题组自主研发了一种新型水性聚合物(代号 XTP-01)。该聚合物具有较好的粘结性能,能够作为胶结料稳定级配碎石用于柔性基层,且成本不足 SRX 的一半,具有很好的经济性。通常情况下, XTP 聚合物以大分子颗粒形式分散于水相中,形成具有流动性的聚合物乳液。乳液状态下的 XTP 聚合物不具有粘结性能,为恢复其粘结性能,需要将乳液中

的水分蒸发掉,使 XTP 聚合物形成聚合物膜并裹附在级配碎石的表面^[17-20]。由此可知,与无机结合料稳定碎石强度形成机理不同,在 XTP 聚合物乳液与级配碎石拌合后,必须经过失水养护, XTP 聚合物稳定碎石才能形成强度。研究其失水养护规律及强度变化规律对 XTP 聚合物稳定碎石技术的应用有重要的意义。因此,文章采用旋转压实成型 XTP 聚合物稳定碎石试件,通过失水干燥试验,研究了 XTP 聚合物稳定碎石的失水养护规律,并根据乳化干燥理论,揭示了 XTP 聚合物稳定碎石各个失水阶段的物理意义,量化了温度对失水时间的影响,同时还研究了 XTP 聚合物稳定碎石强度变化规律。

1 材料与方法

1.1 原材料

1.1.1 水性高分子聚合物乳液

试验选用课题组自主研发的 XTP 水性高分子聚合物乳液(如图 1 所示)。该乳液具有粘结力强、耐水、耐热及耐老化的特点,其技术指标见表 1。

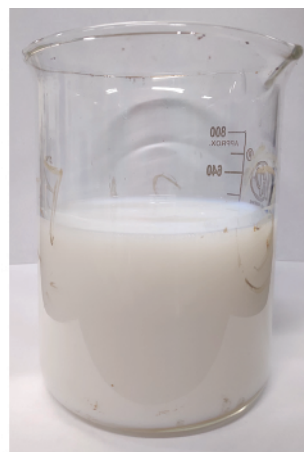


图 1 XTP 水性聚合物图

表 1 水性聚合物乳液技术指标表

项目	指标
外观颜色	乳白色
固含量/%	55±1
黏度/(mPa·s)	1 000~5 000
pH 值(25℃)	7.0~9.0
玻璃化转变温度/℃	-22
成膜性	成膜平整、连续
机械稳定性	无凝胶、分层、破乳

1.1.2 集料

集料为山东地区的石灰岩,来自济南市历城区港沟拌合站。设计级配的组成选用 0~5、5~10、10~

20 和 20~30 mm 共 4 档集料。集料的各项技术性能指标见表 2, 均能满足相关规范要求。

表 2 石灰岩集料的技术指标表

材料规格 /mm	表观密度 /($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	压碎值 /%	针片状含量 /%	砂当量 /%
10~30	2.733	14.1	9.4	
10~20	2.728	12.6	10.6	
5~10	2.735		10.2	
0~5	2.714			74

1.2 配合比设计

1.2.1 混合料级配设计

对所选的 4 档集料进行筛分, 参照 JTG/T F20—2015《公路路面基层施工技术细则》^[21] 中规定的级配碎石或级配砾石的颗粒组成范围, 设计 3 种混合料级配, 合成的级配曲线如图 2 所示。

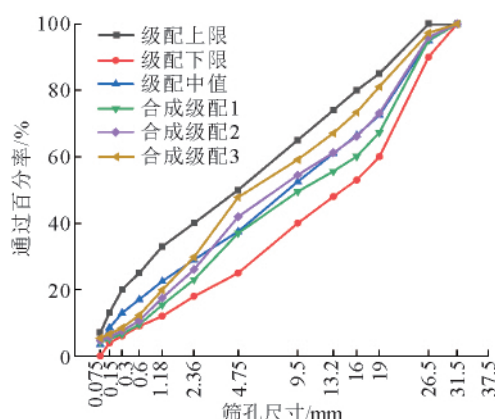


图 2 水性聚合物稳定碎石级配曲线图

1.2.2 击实试验

在混合料级配设计后, 需通过击实试验, 确定 3 种级配的 XTP 聚合物稳定碎石的最佳含水量及最大干密度。依据 JTG E51—2009《公路工程无机结合料稳定材料试验规程》^[22] 中击实试验 (T 0804—1994) 的方法进行, 试验中加水量不包括 XTP 聚合

物乳液中的水分。通过试验, 级配 1 的聚合物稳定碎石脱模后无法成型, 故排除级配 1。级配 2 和 3 的聚合物稳定碎石的最佳含水量分别为 4.4% 和 4.5%, 最大干密度分别为 2.37 和 2.32 g/cm^3 。

1.2.3 CBR 试验

加州承载比 (California Bearing Ratio, CBR) 值能够表征材料抗局部剪切力的能力, 是柔性路面设计中基层材料选择的一个重要指标。材料的 CBR 值越大, 表明其局部承载能力越强。参照土的 CBR 击实试验, 每种级配类型的聚合物稳定碎石制备 3 个试样, 均在 50 $^{\circ}\text{C}$ 的温度下养护 6 d。养护完成后泡水 4 d, 再进行 CBR 试验, 得到级配 2 和级配 3 的聚合物稳定碎石的 CBR 值分别为 212.2% 和 174.6%, 故确定级配 2 为最佳级配。

1.2.4 确定 XTP 聚合物乳液掺量

根据最佳级配, 在级配碎石中添加不同掺量的 XTP 聚合物乳液, 并测定 XTP 聚合物稳定碎石的劈裂强度, 得到 XTP 聚合物乳液掺量为 0.5%、1% 和 2% 的水性聚合物稳定碎石的劈裂强度分别为 0.447、0.521 和 0.529 MPa。基于经济性和试验效果的考虑, 最终确定 XTP 聚合物乳液按级配碎石质量的 1% 掺加。

1.3 XTP 聚合物稳定碎石的制备

目前我国没有聚合物稳定碎石制备的相关规范, XTP 聚合物稳定碎石的制备参照无机结合料稳定碎石的制备方法进行, 分为拌合和压实成型两个过程。传统的静压成型法及重型击实法在成型过程中无法控制试件高度, 不能保证试件的均匀性, 而旋转压实法可以通过选择压实次数或者压实高度模式, 准确控制成型试件的尺寸, 并且旋转压实的过程更接近材料的实际压实状态^[23-24], 故采用旋转压实法成型 $\Phi 150 \text{ mm} \times 150 \text{ mm}$ 的圆柱形 XTP 水性聚合物稳定碎石试件, 其总制备流程图如图 3 所示。

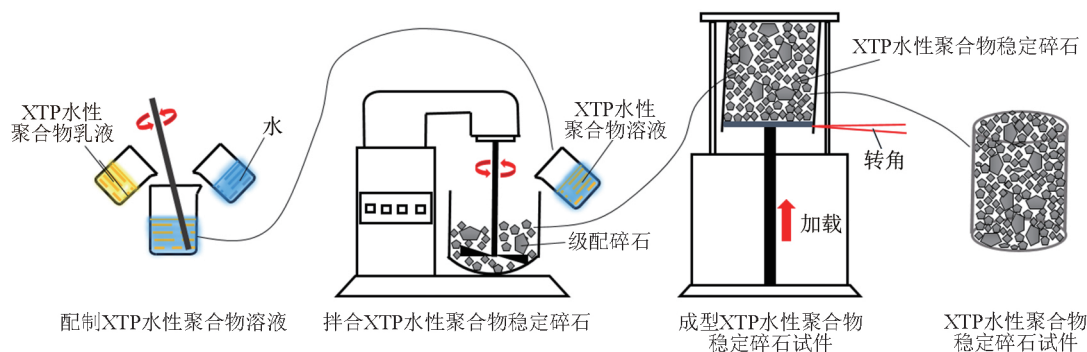


图 3 XTP 聚合物稳定碎石的制备过程图

1.3.1 拌合方式

制作一个 XTP 聚合物稳定碎石试件所需 XTP 聚合物乳液、水和级配碎石材料的质量分别为 66、263 和 6 600 g。

(1) 准确量取制备一个聚合物稳定碎石试件所需的水和 XTP 聚合物乳液,将两者混合后充分搅拌均匀。(2) 将级配碎石加入拌合机中,干拌 90 s。(3) 将 XTP 聚合物乳液加入级配碎石中,再拌合 180 s。整个拌合过程均在常温下进行,无需加热。

1.3.2 成型方式

采用美国 Superpave 设计方法中旋转压实成型方法制作压实度为 98% 的圆柱形 XTP 聚合物稳定碎石试件。旋转压实机为美国松木仪器公司(PINE Instrument Company)生产的旋转压实仪,将拌合得到的稳定碎石平均分为 5 份依次装入试模中,每装一层用捣棒捣实。前期对试件进行试压成型,根据压实曲线确定压实参数。旋转压实参数设定为:压实模式选择高度模式控制,压实高度为 150 mm,旋转压实次数为 150 次。

1.4 试件养护方式

压实完成后仪器自动脱模,由于刚成型的 XTP 聚合物稳定碎石试件强度很低,需将试件与底模一同取出,并称量试件和底模的质量。将试件与底模一起放入干燥箱中进行失水养护,根据需要设定干燥箱温度,当试件完全失水时,即完成失水养护。

1.5 失水干燥试验

通过重量法测定 XTP 聚合物稳定碎石试件中水分的蒸发量,考察不同养护温度对 XTP 聚合物稳定碎石失水规律的影响,分别在 15、25、50、60、70、80、90 °C 的养护条件下进行了 7 组试验。从开始失水至完全失水的过程中,每隔规定的时间,用精度为 0.1 g 的天平称量试件的质量,每组失水试验重复 3 次,制作 7 组试件,共 21 个样品,最终结果取 3 次试验结果的平均值。

为直观地描述试件的失水过程,定义累计失水率及失水速率的概念,统计试件的失水变化情况。

将失水开始时至某时刻的失水量与失水开始时至试件完全失水时的总失水量之比定义为试件在某时刻的累计失水率,由式(1)表示为

$$\omega_i = \frac{m_0 - m_i}{m_0 - m_z} \times 100, \quad (1)$$

式中 ω_i 为第 i 时刻的累计失水率,%; m_0 为失水开始时试件质量, g; m_i 为失水过程中第 i 时刻试件质量, g; m_z 为完全失水时试件质量, g。

将某时间段内开始时刻与结束时刻累计失水率的差值与该时间段之比定义为该时间段的失水速率,由式(2)表示为

$$v = \frac{\omega_i - \omega_{i-1}}{t_i - t_{i-1}}, \quad (2)$$

式中 v 为某时间段的失水速率, %/h; ω_{i-1} 为第 $i-1$ 时刻的累计失水率,%; t_{i-1} 、 t_i 分别为第 $i-1$ 时刻和第 i 时刻的失水养护时间, h。

1.6 强度试验

为更好地评价 XTP 聚合物稳定碎石抵抗开裂的能力,选用劈裂强度作为强度指标。根据目前国内评价水性聚合物稳定碎石性能的相关试验规范,强度试验参照 JTG E51—2009^[22] 中无机结合料稳定材料间接抗拉强度试验方法(T 0806—1994)进行。采用 LD127S 型路面材料强度试验仪,加载速率为 1 mm/min,每组进行 3 次平行试验,试验结果取其平均值。

2 结果与分析

2.1 失水规律分析

2.1.1 累计失水率和失水速率与养护时间的关系

XTP 聚合物稳定碎石在不同养护温度下累计失水率和失水速率与养护时间的关系如图 4 所示。在 90 °C 的养护条件下,从失水开始到失水 8 h 后, XTP 聚合物稳定碎石累计失水率约达到 80%。随着 XTP 聚合物稳定碎石继续失水,累计失水率随养护时间的增长速率变缓,当累计失水 16 h 后,累计失水率约达到 95%。此后累计失水率随养护时间的增长更加缓慢,并逐渐趋于渐近值。同时发现, XTP 聚合物稳定碎石在 50 和 15 °C 养护条件下累计失水率随时间的增长规律与 90 °C 养护条件下的类似,都是在前期增长较快,随着失水过程进行,后期逐渐减慢并趋于定值。

为进一步研究 XTP 聚合物稳定碎石失水过程中失水的规律,观察了失水速率的变化。由图 4 可知,以 90 °C 养护条件为例, XTP 聚合物稳定碎石的初始失水速率最快,在 0~8 h 内,失水速率迅速降低,随着养护时间的增长,失水速率也逐渐降低,但降低的幅度小于 0~8 h 内的降低幅度,最后的失水过程中,失水速率也趋于渐近值。XTP 聚合物稳定碎石在 50 和 15 °C 养护条件下的失水速率也具有类似的变化规律。

综上所述,不同养护温度下 XTP 聚合物稳定碎

石具有类似的失水行为,累计失水率随养护时间的增长而增长,而失水速率随着养护时间的增长而降低,

初始失水率最快,随着养护过程的进行失水速率的降低幅度逐渐减小,失水过程呈现“先快后慢”的趋势。

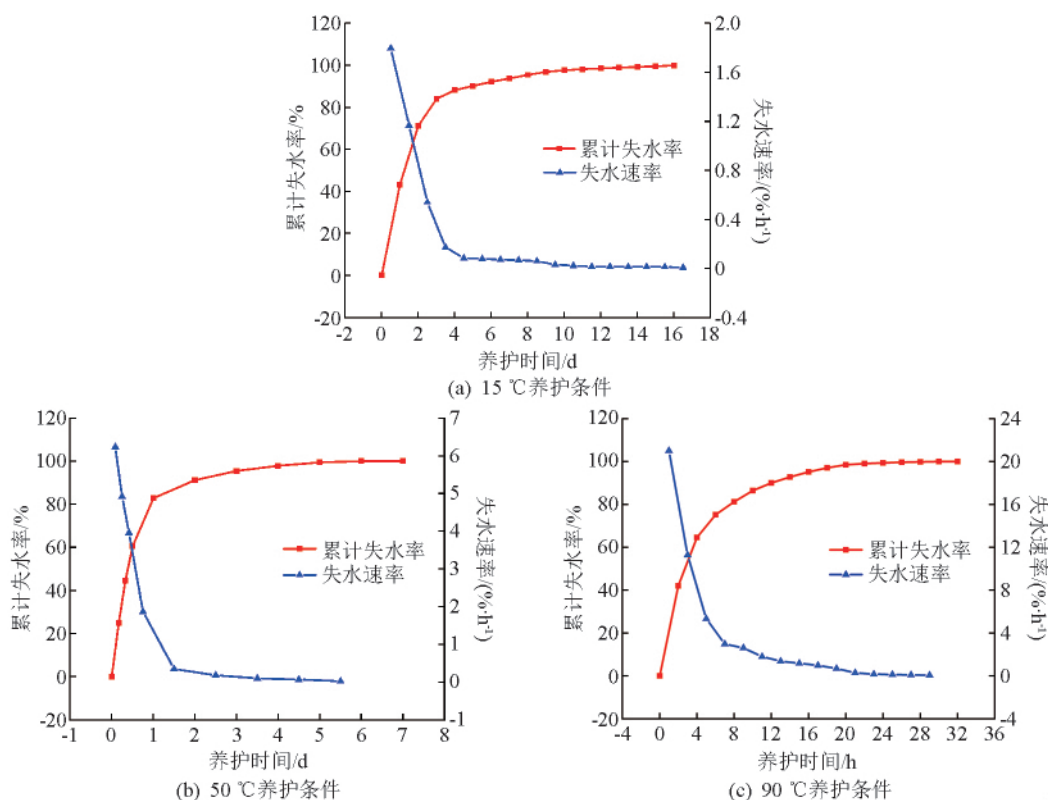


图4 不同温度累计失水率和失水速率与养护时间的关系曲线图

2.1.2 XTP 聚合物稳定碎石失水特性表征

在失水养护过程中,XTP 聚合物稳定碎石中的水分散失取决于 XTP 聚合物乳液中的水分散失,因此 XTP 聚合物稳定碎石的失水过程对应 XTP 聚合物乳液在碎石表面的蒸发成膜过程。假设 XTP 聚合物在乳液中分布均匀,且乳液在干燥过程中保持均匀,分析 XTP 聚合物稳定碎石的失水过程后发现,其失水过程在如图 5 所示的 3 个阶段连续转变。

快速失水阶段: XTP 聚合物乳液呈现为半稀释状态的乳液,库仑力和变形力提供的排斥力使聚合物颗粒间有足够大的空隙,水分在空隙中快速挥发,XTP 聚合物稳定碎石具有较高的失水速率,同时其失水过程是一个“由表及里”的过程,失水速率的降幅较快。此阶段失水完成后,XTP 聚合物稳定碎石的累积失水率约能达到 80%。

缓慢失水阶段: XTP 聚合物稳定碎石经过第一阶段的失水后,XTP 聚合物颗粒间的空隙逐渐变小,同时聚合物颗粒变形,从而扩大了颗粒间相互作用的接触区,颗粒间形成毛细管。毛细管作用促使 XTP 聚合物颗粒趋向于规整排列,聚合物乳液中的水/空气之间的接触面积逐渐变小,导致失水速率逐

渐减小,此阶段完成后,XTP 聚合物稳定碎石的累积失水率达到约 95%。

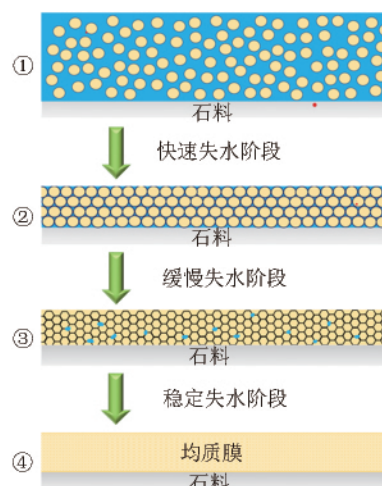


图5 XTP 聚合物稳定碎石 3 阶段失水过程示意图

稳定失水阶段: 此阶段对应 XTP 聚合物颗粒渗出时的致密区域,从而使碎石表面基本形成一层聚合物薄膜。聚合物薄膜中存在极少量的水,可挥发的水通过聚合物分子间的毛细管散失,或通过聚合物分子间的挤压变形散发出去。此阶段 XTP 聚合物稳定碎石中水分散失困难,失水速率也逐渐趋于

稳定,直至完成水分散失。

2.2 养护温度与养护时间的关系

在其他养护条件相同的情况下,讨论了养护温度对 XTP 聚合物稳定碎石养护时间的影响,图 6 列出了不同养护温度下 XTP 聚合物稳定碎石完全失水时所用的养护时间。由图 6 可知,养护温度从 15 ℃ 提高到 90 ℃,试件中水分完全散失所需的养护时间逐渐缩短,对比养护温度从 15 ℃ 提高到 25 ℃ 和从 80 ℃ 提高到 90 ℃,XTP 聚合物稳定碎石的养护时间分别缩短了 5 和 0.75 d,说明养护温度对 XTP 聚合物稳定碎石的失水过程有很大影响,因此在较高的养护温度下缩短 XTP 聚合物稳定碎石的养护时间是合理的,在较低温度下提高养护温度对缩短 XTP 聚合物稳定碎石的养护时间更有效。同时,为定量地表征养护时间随养护温度的变化关系,采用指数型函数对其进行拟合,养护时间与养护温度之间的拟合曲线如图 6 所示,其中 $R^2=0.9979$,拟合精度较高。

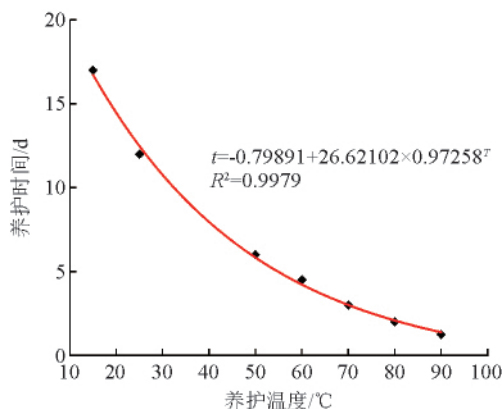


图 6 养护时间与养护温度关系曲线图

2.3 强度形成规律

2.3.1 温度对劈裂强度的影响

不同养护温度下的 XTP 聚合物稳定碎石完全失水后的劈裂强度如图 7 所示。

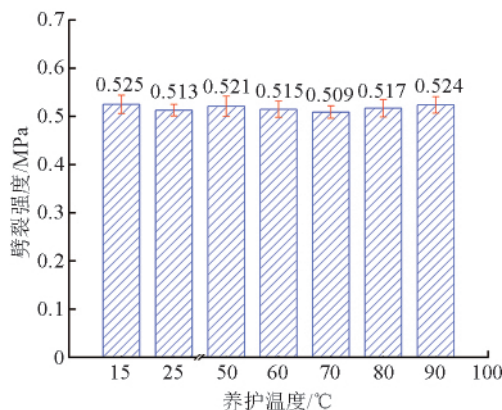


图 7 不同养护温度下试件劈裂强度柱状图

XTP 聚合物稳定碎石试件在不同养护温度下完全失水后能达到的劈裂强度几乎相同,误差可能来源于试验误差,说明在不同温度下养护 XTP 聚合物稳定碎石不影响其完全失水后的劈裂强度。

2.3.2 强度随养护时间的变化

图 8 为 50 ℃ 养护温度下的 XTP 聚合物稳定碎石试件劈裂强度与养护时间的关系曲线。XTP 聚合物稳定碎石的劈裂强度随养护时间的增加而增长。试件失水 1 d 后,劈裂强度达到 0.207 MPa,约为完全失水后劈裂强度的 40%,此阶段 XTP 聚合物稳定碎石试件主要发生一个“由表及里”的失水过程,虽然总体失水量较大,但主要集中在试件外部,内部含水率仍然较高,试件的强度主要来自于级配碎石间的嵌锁力,强度较低。随着养护时间的增加,试件内部也继续失水,XTP 聚合物逐渐成膜并裹附在碎石表面,强度也逐渐增加,在养护 4 d 结束后,试件的劈裂强度能够达到最终完全失水时劈裂强度的 95%。养护后期,XTP 聚合物稳定碎石试件内的含水量已经很少,失水变得困难,强度也增长困难,最终,试件中的水分全部散失后,强度也不再增长。

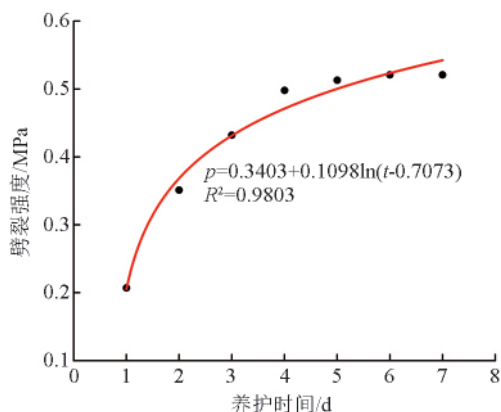


图 8 50 ℃ 下劈裂强度与养护时间关系曲线图

3 结论

文章研究了水性聚合物稳定碎石的失水规律及失水过程中的强度变化规律,考察了养护温度、养护时间对失水过程的影响,综合分析后主要得到以下结论:

(1) 不同养护温度下的 XTP 聚合物稳定碎石具有相似的失水规律,累计失水率随养护时间延长而增长,而失水速率随着养护时间增长而降低,且降幅逐渐减小。XTP 聚合物稳定碎石的失水过程都经历快速失水、缓慢失水及稳定失水阶段,并基于乳

液干燥成膜理论解释了3个失水阶段的物理意义。

(2) 养护温度影响 XTP 聚合物稳定碎石的失水过程,通过提高养护温度能够缩短 XTP 聚合物稳定碎石达到完全失水状态所需的养护时间,同时定量表征了养护时间与养护温度之间的关系。

(3) 改变养护温度不影响 XTP 聚合物稳定碎石在完全失水时的劈裂强度,但 XTP 聚合物稳定碎石的劈裂强度随养护时间增加而增强。在 50 ℃ 养护条件下养护 4 d 后,聚合物稳定碎石的劈裂强度能够达到完全失水后劈裂强度的 95%,养护后期失水困难,强度也增长缓慢并逐渐趋于渐近值,当达到完全失水状态时,强度也不再增长。

参考文献:

- [1] 叶向前,邹晓翎,何虹霖,等.半刚性基层沥青路面低温开裂成因研究综述[J].中外公路,2020,40(4):62-67.
- [2] 黄晓明.路基路面工程[M].4版.北京:人民交通出版社股份有限公司,2014.
- [3] 康悦.沥青稳定碎石柔性基层路用性能评价指标[D].西安:长安大学,2007.
- [4] 杜洪新. SOILFIX 高分子聚合物稳定柔性基层试验研究[D].北京:北京建筑工程学院,2012.
- [5] 申结结,郑传峰,胡孝阳,等.半刚性基层与柔性基层沥青路面结构对比分析[J].公路,2019,64(1):9-12.
- [6] 宋健民,白鹏飞,管晓晴.半刚性基层沥青路面反射裂缝建模分析[J].公路工程,2017,42(3):40-44,51.
- [7] 李丽民,何兆益,张贤才,等.抗车辙柔性基层沥青混合料的力学性能[J].材料科学与工程学报,2014,32(5):755-759,764.
- [8] 王松根,房建果,王林,等.大碎石沥青混合料柔性基层在路面补强中的应用研究[J].中国公路学报,2004,17(3):10-15.
- [9] 闫正,姜中波,朱彬.柔性基层路面裂缝对结构层材料模量的敏感性分析[J].佳木斯大学学报(自然科学版),2019,37(3):367-370.
- [10] 张劲雷. ATB-25 柔性基层在高速公路改扩建工程中的应用[J].山西建筑,2016,42(36):163-165.
- [11] 曹琪.重载下柔性基层沥青路面的结构力学分析[D].合肥:安徽建筑大学,2017.
- [12] 赵永成.高抗剪强度级配碎石基层沥青路面加速加载试验研究[J].公路交通科技(应用技术版),2017,13(2):113-116.
- [13] 赵伟,蒋应军,陈浙江,等.水基聚合物 SRX 稳定碎石路用性能[J].建筑材料学报,2017,20(4):598-603.
- [14] 袁素平,李旭颖,王金良. SRX 水基-聚合物稳定道路基层的施工应用[J].公路交通科技(应用技术版),2012,8(7):33-37.
- [15] 陈浙江,余永飞,李世潮.有机聚合物 SRX 稳定碎石基层水稳定性研究[J].黑龙江交通科技,2017,40(9):1-2.
- [16] 姚鑫航.基于聚合物稳定碎石基层路面抗反射裂缝技术研究[D].北京:北京建筑大学,2020.
- [17] 陈鑫.聚合物乳液的干燥过程及颗粒形态控制研究[D].上海:华东理工大学,2013.
- [18] 林芳.苯丙乳液成膜过程与涂膜性能研究[D].广州:华南理工大学,2016.
- [19] 倪维良,王留方,朱亚君,等.乳化型水性固化剂的固化行为与成膜机理探讨[J].涂料工业,2012,42(2):30-35.
- [20] 叶丹滢.丙烯酸酯核壳乳液成膜机理及涂膜性能的研究[D].北京:北京化工大学,2009.
- [21] 中华人民共和国交通运输部.公路路面基层施工技术细则:JTG/T F20—2015[S].北京:人民交通出版社股份有限公司,2015:18-19.
- [22] 中华人民共和国交通运输部.公路工程无机结合料稳定材料试验规程:JTG E51—2009[S].北京:人民交通出版社,2009:18-19.
- [23] 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.
- [24] 王龙,解晓光.水泥稳定碎石振动与静压成型物理力学指标关系[J].哈尔滨工业大学学报,2012,44(10):70-74.

(学科责编:赵成龙)

特约稿件

道路与铁道工程学科——任瑞波教授

任瑞波,二级教授,博士生导师,交通工程学院院长,享受国务院政府特殊津贴专家,山东省教学名师,山东省研究生优秀指导教师,济南市专业技术拔尖人才,山东省高校十大师德标兵,山东省先进教育工作者;兼任山东省市政行业协会副理事长、山东轨道交通学会副理事长、高速公路养护技术和干旱荒漠区公路工程重点实验室学术委员会学术带头人。

论文依托国家自然科学基金项目“基于废旧橡塑高分子合金的稳定型改性沥青研究”和“基于组学技术的基质沥青老化基因鉴定及老化机理研究”,基于路面材料界面热力学理论、黏弹力学性能分析和破坏机理分析,创新研发了高性能水性高分子聚合物稳定碎石材料,并揭示了其养护规律和强度形成规律。