

考虑剪切性能的泡沫沥青混合料配合比设计

董力铭¹, 乔向军², 赵麟昊¹, 高世柱¹, 李秀君¹

(1. 上海理工大学 环境与建筑学院, 上海 200093;

2. 包头市市政设计研究院, 包头 014030)

摘要: 在传统泡沫沥青冷再生混合料配合比设计的基础上, 基于摩尔-库伦强度理论, 提出考虑抗拉、抗水损和抗剪切性能的泡沫沥青用量综合指标, 优化了泡沫沥青冷再生混合料配合比设计方法。同时为解决车辙试验试件成型复杂、耗材多、耗时长等缺陷, 提出基于标准马歇尔试件的单轴贯入试验对混合料高温抗剪切性能进行评价, 为设计和检验高抗剪泡沫沥青冷再生混合料开展系统研究。结果表明: 以综合指标优化配合比设计, 泡沫沥青用量降低, 在保证混合料抗水损性能的基础上, 有效提高混合料高温抗剪切性能; 基于标准马歇尔试件的单轴贯入试验, 可有效评价混合料高温抗剪切性能, 贯入速率 1 mm/min、试验温度 60 °C 为最佳试验条件; 最大贯入荷载与动稳定度存在较好的线性相关, 以动稳定度规范限值推算出贯入荷载限值, 为该评价方法的应用提供限值参考。

关键词: 道路材料; 泡沫沥青冷再生; 配合比设计; 抗剪切性能; 泡沫沥青用量; 车辙试验; 单轴贯入试验

中图分类号: F 830

文献标志码: A

Optimization of mixture ratio design with foamed bitumen considering anti-shear performance

DONG Liming¹, QIAO Xiangjun², ZHAO Linhao¹, GAO Shizhu¹, LI Xiujun¹

(1. School of Environment and Architecture, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China;

2. Baotou Municipal Design Institute, Baotou 014030, China)

Abstract: On the basis of the existing design method for the cold recycling mixture with foamed bitumen, the comprehensive index considering the tensile performance, water stability and shear resistance was put forward to optimize the mixture ratio design. At the same time, in order to solve the defects of rut test specimen, such as complex forming, more consumables and time consuming, a uniaxial penetration test based on standard Marshall test specimen was proposed to evaluate the shear resistance of the mixture. In order to design a mixture for heavy duty highway, a systematic study was carried out. The results show that the dosage of foamed bitumen can be reduced by optimizing the mixture ratio design with comprehensive index. On the basis of ensuring the water stability of the mixture, the high temperature shear resistance of the mixture is effectively improved. The uniaxial

收稿日期: 2021-06-12

基金项目: 住房城乡建设部 2018 年科学技术项目 (2018-k9-062)

第一作者: 董力铭 (1995-), 男, 硕士研究生. 研究方向: 道路材料设计. E-mail: 565197645@qq.com

penetration test based on the standard Marshall specimen can be used to effectively evaluate the high temperature shear resistance of the mixture. The optimum experimental conditions include penetration rate of 1 mm/min and test temperature of 60℃. There is a good linear correlation between the maximum penetration load and the dynamic stability. Based on the limit value of the dynamic stability, the penetration load limit value satisfying the road performance requirements is calculated. This provides a reference for the application of the evaluation method.

Keywords: road materials; cold recycling of foamed bitumen; mixture ratio design; shear resistance; foamed asphalt content; rut test; uniaxial penetration test

泡沫沥青冷再生技术因其造价低、资源再利用等优势不断应用于道路维修养护工程，且随该技术发展，冷再生层应用范围逐渐由公路的基层向下面层变化。但近年来，随着气候变暖，持续高温气候时间变长，以及超载重载车辆增多，冷再生下面层承受较大剪应力，在剪力和高温作用下，路面常因泡沫沥青冷再生混合料高温抗剪切性能不足发生车辙病害。传统的泡沫沥青冷再生混合料配合比设计方法，主要通过增加水泥用量、优化混合料级配和控制泡沫沥青用量的方法提高混合料高温抗剪切性能，水泥掺量过高会严重影响混合料低温和疲劳性能，工程中常采用1.5%~2.0%^[1-5]。目前国内外优化级配的方法较多，主要通过控制体积参数使集料形成骨架密实型结构提高混合料高温抗剪切性能，如贝雷法、多级嵌挤密实级配设计法和抗剪型级配设计法等^[6-9]。2015年Chomicz-Kowalska等^[10]提出利用期望函数和优化相应变量来确定最佳泡沫沥青用量和水泥用量来提高泡沫沥青冷再生混合料的综合性能，2017年Kuna等^[11]提出以最优含水量、旋转压实功和集料温度为设计参数的配合比设计方法。但工程中通过掺入新集料的方式使矿料级配完全符合设计级配曲线难度较大；控制泡沫沥青用量是工程中易操作的措施，且泡沫沥青用量对混合料的抗拉强度、抗水损和抗剪切性能均有较大影响。随泡沫沥青用量增加，冷再生混合料抗拉和抗水损性能先提高后下降，抗剪切性能呈下降趋势。传统方法仅采用干湿劈裂试验确定泡沫沥青用量，只能保证混合料的抗拉和抗水损性能，不能提升高温抗剪切性能^[12-14]。

因此，为了提高泡沫沥青冷再生混合料高温抗剪切性能，本文基于摩尔-库伦强度理论，提出考虑剪切性能的泡沫沥青用量综合指标来优化配

合比设计；同时为解决车辙试验试件成型复杂、耗材多、耗时长等缺陷，提出基于标准马歇尔试件的单轴贯入试验检验混合料高温抗剪切性能。

1 设计指标及试验设计

1.1 确定泡沫沥青用量设计指标

a. 确定泡沫沥青用量的传统指标。

目前，国内外确定泡沫沥青用量方法可归纳为：以预估泡沫沥青用量为中值，按一定间隔拌和多组混合料，成型试件并养生，进行干湿劈裂强度试验，选择湿劈裂强度最大，且干劈裂强度和干湿劈裂强度比(ITSR)均满足要求的泡沫沥青用量为最佳泡沫沥青用量 ω_1 。对于传统设计指标，由干湿劈裂强度和ITSR确定泡沫沥青用量，仅保证混合料的抗拉和抗水损性能，未考虑抗剪切性能，难以从设计上保证混合料有较好的高温稳定性。

b. 确定泡沫沥青用量的抗剪指标。

根据摩尔-库伦强度理论，泡沫沥青冷再生混合料抗剪强度等于黏聚力与摩阻力之和，根据王开凤等^[15]的研究，当矿料级配和水泥用量确定时，抗剪强度主要受黏聚力影响，泡沫沥青用量对黏聚力影响程度远大于内摩擦角。因此，通过研究泡沫沥青用量对黏聚力的影响规律可间接表征其对抗剪强度的影响规律，可由最大黏聚力 c_{max} 表征混合料的最佳抗剪切性能，确定最佳泡沫沥青用量 ω_2 。已知通过三轴试验，可根据式(1)求出黏聚力 c 和内摩擦角 ϕ 。为简化计算，本文利用简易三轴力学模型^[16]计算混合料抗剪强度参数，将三轴试验简化为无侧限的单轴抗压试验和单轴抗拉试验，对于单轴抗压试验， $\sigma_3 = 0$ ， $\sigma_1 = \sigma_{ur}$ (无侧限抗压强度)；单轴抗拉试验， $-\sigma_3 = \sigma_{ur}$ (单轴抗拉

强度), $\sigma_1 = 0$ 。由于单轴拉伸试验不易实施,可采用间接拉伸试验替代,即选择劈裂强度 σ_t 代替单轴抗拉强度 σ_{ur} ,因此以 σ_{ur} 和 σ_t 为直径绘制两个摩尔应力圆,即可求得抗剪强度参数 c 和 ϕ 。其中参数 c 和 ϕ 的计算如式(2)和式(3)所示。

$$\sigma_1 = \frac{1 + \sin \phi}{1 - \sin \phi} \sigma_3 + 2c \frac{\cos \phi}{1 - \sin \phi} \tag{1}$$

$$c = \frac{\sigma_{ur} + \sigma_t}{4} \cos \phi \tag{2}$$

$$\phi = \arcsin \frac{\sigma_{ur} - \sigma_t}{\sigma_{ur} + \sigma_t} \tag{3}$$

式中: c 为混合料黏聚力,MPa; ϕ 为内摩擦角,°; σ_{ur} 为混合料抗压强度,由无侧限抗压强度表征,MPa; σ_t 为混合料抗拉强度,由劈裂强度表征,MPa。

1.2 基于马歇尔试件的单轴贯入试验设计

目前国内外常选用车辙试验和标准单轴贯入试验表征混合料高温抗剪切性能,但这两种试验方法均存在试件成型复杂、耗材多、耗时长等缺陷。为解决车辙试验和标准单轴贯入试验的缺陷,根据有关研究成果^[17-19],对于AC-20级配,当试件高度大于50 mm时,混合料的抗剪强度随试件高度变化已趋于稳定;试件中沿径向分布的各应力在试件高度50 mm处已基本为零;压头直径为最大公称粒径1.5倍时效果最佳;对于最大公称粒径为19 mm的泡沫沥青冷再生混合料,本文基于成型方便、操作简单的标准马歇尔试件进行单轴贯入试验,探索贯入荷载能否作为评价冷再生混合料高温抗剪切性能的指标。同时,为研究温度和车速对混合料高温抗剪切性能的影响,确定试验温度为20, 40, 60 ℃,贯入速率为1, 2, 5 mm/min。

参照规范^[20]成型和养护马歇尔试件,养护后的试件满足:直径(101.6±0.25)mm,高度(63.5±1.3)mm;将试件分别放置在20, 40, 60 ℃的环境中保温6 h,并将万能试验机实验舱内温度调至试验温度;将试件放在试验台底板中心,上升底座使试件与直径为28.5 mm的压头恰好接触,启动加载按钮,按设计贯入速率施加压力,直至试件破坏,记录最大贯入荷载。每组试验取4个试件的贯入荷载均值,当存在某测定值与均值之差大于标准差 k 倍时,应舍去,并补充试验,试件数目为4, 5和6时, k 值取1.46, 1.67和1.82。

2 配合比设计

2.1 沥青发泡特性试验

本文选取镇海AH-70沥青参照规范^[20]进行发泡试验,确定该沥青的最佳发泡条件,具体试验结果如表1所示。

表1 沥青最佳发泡条件
Tab.1 Optimum foaming conditions of asphalt

沥青	发泡温度/℃	用水量/%	气压/kPa	水压/kPa	膨胀率/倍	半衰期/s
镇海 AH-70	165	2.0	400	500	16	12

2.2 矿料级配设计

为设计适用于重载公路下面层的泡沫沥青冷再生混合料,提高混合料高温抗剪切性能,同时兼顾干缩和低温性能,本文统一选取水泥的用量为1.8%。

为提高混合料高温抗剪切性能,本文参照杜顺成^[21-22]提出的高抗剪密实型级配设计法设计矿料级配(命名级配Z),该级配粗集料和粉料含量较高,细集料含量较低,形成的粗集料骨架剪切模量较大,充分考虑混合料的剪切性能。同时验证确定泡沫沥青用量新方法和基于马歇尔试件单轴贯入试验的适用性,选取中粒式推荐级配范围中值^[23](命名级配S)作为参照。设计级配曲线如图1所示。为减少干扰因素对试验结果的影响,统一确定铣刨料、新料和水泥的比例分别为80:18.2:1.8。

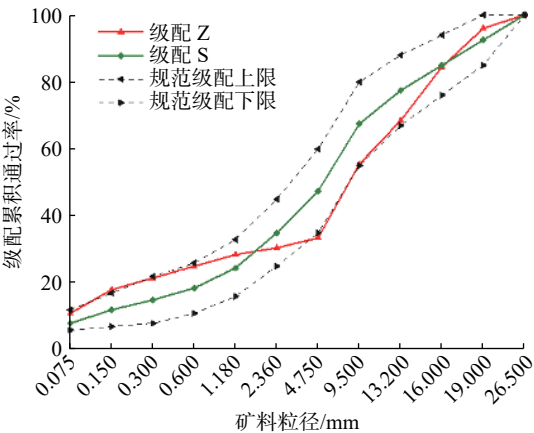


图1 设计级配曲线
Fig.1 Gradation design curve

2.3 拌和用水量和最大干密度

按照JTG E51中T0804规定的试验方法,对级配S和级配Z进行击实试验,试验结果如图2

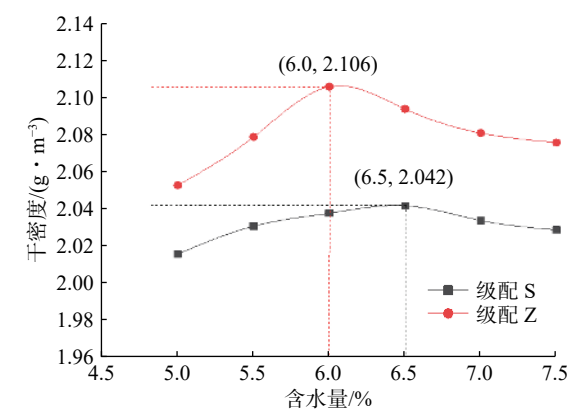


图 2 击实试验结果
Fig. 2 Compaction test results

所示。根据李秀君等^[24]的研究,本文取泡沫沥青冷再生混合料最佳含水量的 80% 为最佳拌和用水量。

2.4 泡沫沥青用量确定

a. 传统方法确定泡沫沥青用量

本文根据旧沥青含量和合成级配特点,参照规范^[20],拟定泡沫沥青用量为 1.6%、2.0%、2.4%、2.8% 和 3.2% 配制冷再生混合料,进行干湿劈裂试验,试验结果如图 3 所示。

由试验结果可知,对于级配 S,当泡沫沥青用量为 2.8% 时,混合料具有最大湿劈裂强度,且干湿劈裂强度和 ITSR 均较高,即按照传统方法确定级配 S 混合料最佳泡沫沥青用量为 2.8%;同理,级配 Z 混合料最佳泡沫沥青用量为 2.4%。对比级配 S 和级配 Z 发现,级配 S 混合料最佳泡沫沥青用量大于级配 Z,主要因为级配 S 细集料含量高,需更多的泡沫沥青与之形成沥青胶浆,但较多沥青胶浆的混合料温度敏感性高,在高温和重载作用下易发生剪切变形。对比两种级配混合料的干湿劈

裂强度,级配 Z 的干湿劈裂强度和干湿劈裂强度比均比级配 S 高。这主要是因为级配 Z 在设计时充分考虑骨架抗剪切性能和密实性,在外荷载作用下,嵌挤骨架充分发挥作用。同时,较好的密实性能防止水分进入混合料,降低荷载与水的耦合作用,提高混合料的抗剪切和抗水损性能。

b. 基于最大黏聚力确定泡沫沥青用量。

按泡沫沥青掺量为 1.6%、2.0%、2.4%、2.8% 和 3.2% 配制冷再生混合料,在 25 ℃ 下进行劈裂强度试验和无侧限抗压强度试验,结果如表 2 所示。由式(1)和式(2)计算级配 S 混合料和级配 Z 混合料的内摩擦角和黏聚力,结果如图 4 所示。

由图 4 可知,随泡沫沥青用量增加,级配 S 混合料和级配 Z 混合料的黏聚力均呈现先增大后减小,内摩擦角均为减小的趋势。这主要是因为当泡沫沥青用量较低时,随泡沫沥青用量增加,能与细集料形成较好的泡沫沥青胶浆,并以点焊的形式分散在混合料中,起到较好的填充和黏结作用,提高混合料的黏聚力。当泡沫沥青含量过高时,胶结料中存在较多的自由沥青,降低胶浆料的黏聚力。铣刨料和集料表面粗糙,而泡沫沥青在骨架间起到润滑作用,因此,骨料间的内摩擦角随泡沫沥青用量增加呈现单调减小的趋势。根据试验结果,以最大黏聚力为指标,确定级配 S 和级配 Z 的最佳泡沫沥青用量分别为 2.4% 和 2.0%。

c. 确定泡沫沥青用量的综合指标。

对比传统指标和最大黏聚力指标,传统指标确定的泡沫沥青用量偏大,最大黏聚力指标偏小。这是因为传统指标考虑混合料的抗水损性能,除部分泡沫沥青与细集料形成沥青胶浆,起

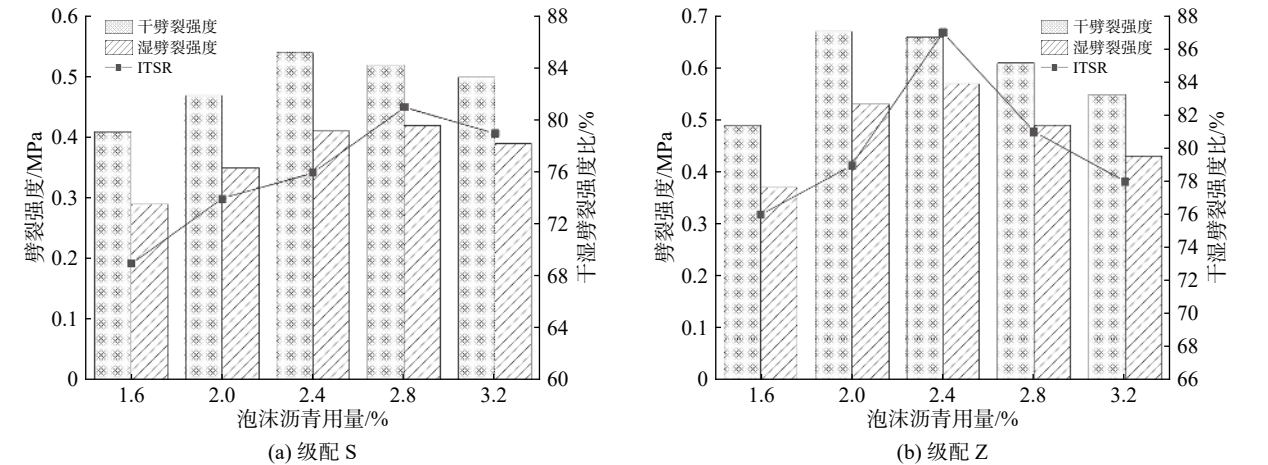


图 3 干湿劈裂试验结果
Fig.3 Dry-wet splitting test results

表 2 混合料劈裂强度和无侧限抗压强度 (25 ℃)

Tab.2 Splitting strength and unconfined compressive strength of mixture(25 ℃)

级配类型	项目	泡沫沥青掺量/ %				
		1.6	2.0	2.4	2.8	3.2
级配 S	劈裂强度/ MPa	0.41	0.47	0.54	0.52	0.50
	无侧限抗压强度/ MPa	1.51	1.62	1.69	1.57	1.50
级配 Z	劈裂强度/ MPa	0.49	0.67	0.66	0.61	0.55
	无侧限抗压强度/ MPa	1.89	2.31	2.18	1.99	1.79

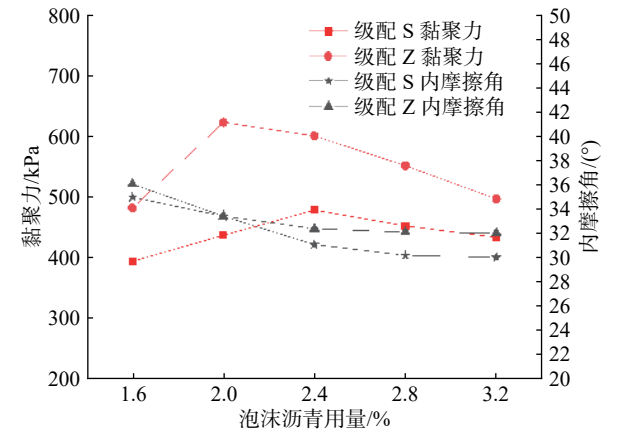


图 4 不同泡沫沥青用量下混合料黏聚力和内摩擦角
Fig. 4 Cohesion and internal friction angle of mixtures with different foamed asphalt dosages

到黏结作用外，多余的泡沫沥青以沥青团和自由沥青的形式填充到微小空隙中，阻止水分进入，提高抗水损性能，但过多的泡沫沥青会严重影响其高温抗剪切性能。而最大黏聚力指标主要考虑胶结料黏聚力，降低胶结料中自由沥青含量，提

高胶结料黏聚力，且未有多余沥青对微小空隙进行填充。因此，有利于提高混合料高温抗剪切性能，但试件空隙率增大，水分易渗入，产生水损害。在兼顾抗拉、抗水损和抗剪切性能的条件下，本文提出确定泡沫沥青用量的综合指标，即取泡沫沥青用量 ω_1 和 ω_2 的均值 $\bar{\omega}$ 为混合料最佳泡沫沥青用量，如式(4)所示。按照式(4)确定级配 S 和级配 Z 的最佳泡沫沥青用量分别为 2.6% 和 2.2%，介于传统指标和最大黏聚力指标之间，较传统指标，减小了泡沫沥青用量，降低工程成本。

$$\bar{\omega} = \frac{\omega_1 + \omega_2}{2}$$

(4)

3 混合料高温抗剪切性能和抗水损性能分析

3.1 基于马歇尔试件单轴贯入试验结果分析
为对比不同方法设计的混合料抗剪切性能，探索试验温度和贯入速率对混合料抗剪切性能的影响规律，本文将单轴贯入试验结果整理如图 5 所示。

由图 5 可知，级配 Z 的抗剪切性能优于级配 S，此外不同级配的冷再生混合料抗剪切性能均存在类似规律：当温度和贯入速率相同时，最大黏聚力指标最佳，综合指标次之，传统的指标最差，且最大黏聚力指标与综合指标差距较小；随温度升高，不同方法设计的混合料抗剪切性能均呈现先快后慢的下降趋势，且混合料抗剪切性能的差距变大，传统指标较最大黏聚力指标和综合

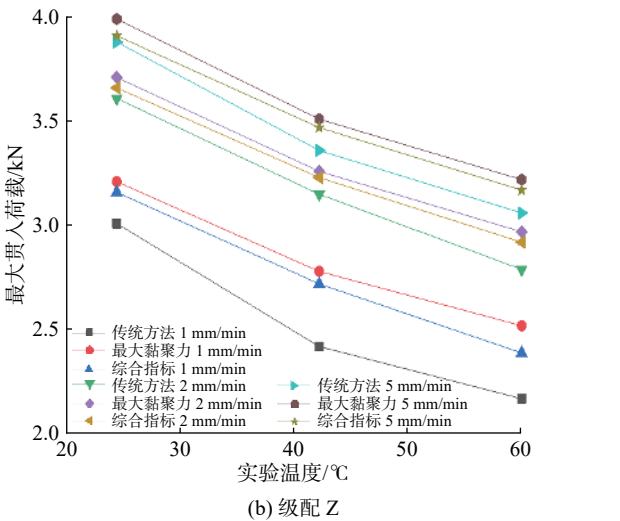
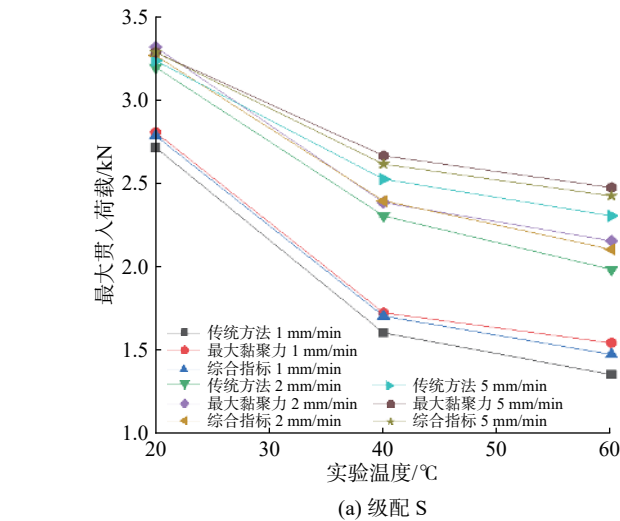


图 5 不同温度和贯入速度下的最大贯入荷载
Fig.5 Maximum penetration loads at different temperatures and penetration velocities

指标, 混合料抗剪切性能较差; 随贯入速率增加, 不同方法设计的混合料抗剪切性能均呈现上升趋势。分析原因, 主要因为随泡沫沥青用量增加, 混合料中存在较多的沥青团和自由沥青, 导致胶结料间的黏聚力减弱, 集料间的内摩阻力减小, 削弱抗剪切性能, 且削弱作用随泡沫沥青用量的增加而加剧。当温度小于 40 ℃ 时, 随温度升高, 胶结料中的沥青和自由沥青黏度急剧下降, 导致胶结料黏聚力急剧减小, 集料间的润滑作用加剧, 混合料抗剪切性能快速下降; 当温度大于 40 ℃ 时, 胶结料黏聚力已处于较低水平, 变化幅度小, 沥青在集料间的润滑作用也趋于稳定, 因此混合料抗剪切性能下降速率降低。泡沫沥青冷再生混合料是一种黏弹性材料, 由 Burgers 黏弹性模型^[25]可知, 变形速率的增加可显著提高混合料的强度特性, 在其他条件相同时, 静载或加载速率越小, 混合料力学强度越差。因此, 当贯入速度为 1 mm/min 时, 混合料抗剪切性能较差。在不同温度和贯入速率条件下, 通过对比不同方法设计的混合料贯入试验结果, 本文提出的综合指标优于传统指标, 能有效提高混合料抗剪切性能。

由以上研究可知, 基于马歇尔试件的单轴贯入荷载能明显区分不同级配和设计方法下混合料的抗剪切性能。当试验条件为贯入速率 1 mm/min, 温度 60 ℃ 时, 混合料的抗剪切性能区分度大, 可有效避免因试验操作因素影响结果, 因此, 该条件为最佳试验条件。

3.2 最大贯入荷载与动稳定度关系分析

通过前文研究结果, 基于马歇尔试件的单轴贯入试验能有效评价泡沫沥青冷再生混合料高温抗剪切性能, 且该方法成型试件方便, 耗材少, 耗时短。但规范^[23]仅对车辙试验动稳定度提出要求, 未对混合料抗剪切强度或贯入荷载的限值进行规定。因此, 只能横向对比不同混合料间的抗剪切性能, 不能用于评价混合料抗剪切性能是否满足路用性能要求。本文尝试建立马歇尔试件贯入荷载与动稳定度的关系, 以动稳定度限值为参考, 提出基于马歇尔试件的最大贯入荷载限值, 用以评价混合料高温抗剪切性能是否满足要求。

本文取不同方法设计的级配 S 和级配 Z 混合料最大贯入荷载 $F_{\max}$ (60 ℃、1 mm/min) 和动稳定度 DS (60 ℃), 同时为增加数据样本, 探索规律, 结合多级嵌挤密实级配法^[26]设计的冷再生混合料

动稳定度和最大贯入荷载, 研究贯入荷载与动稳定度的关系, 结果如图 6 所示。

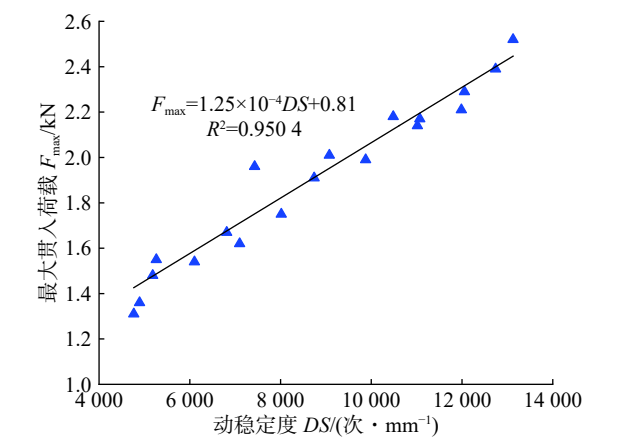


图 6 最大贯入荷载与动稳定度拟合关系

Fig.6 Fitting relation between maximum penetration load and dynamic stability

由图 6 可知, 基于马歇尔试件的最大贯入荷载与车辙试验的动稳定度存在较好的线性关系, 其相关系数 $R^2=0.9504>0.9$, 进一步证明基于马歇尔试件的单轴贯入试验能有效评价泡沫沥青冷再生混合料抗剪切性能。同时, 根据规范^[20]中对不同交通等级公路基层及下面层泡沫沥青冷再生混合料动稳定度的要求, 提出最大贯入荷载限值要求, 如表 3 所示。

表 3 基于马歇尔试件的最大贯入荷载限值要求

Tab.3 Maximum penetration load limit requirement based on Marshall specimen

项目	特重交通	重交通	中交通		轻交通	
			下面层	基层	下面层	基层
动稳定度/(次·mm ⁻¹)	5 000	5 000	5 000	4 000	4 000	3 000
最大贯入荷载/kN	1.45	1.45	1.45	1.33	1.33	1.21

由表 3 和图 5 可知, 对于级配 S, 传统指标设计的混合料高温抗剪切性能不满足中等以上交通条件下面层的要求, 只满足中等交通基层及轻交通下面层和基层要求。但若以综合指标或最大黏聚力为指标设计混合料, 其高温抗剪切性能则满足限值要求; 而级配 Z 不论选择传统指标还是综合指标设计混合料, 均能满足规范限制要求。由此进一步证明, 以综合指标确定泡沫沥青用量, 可有效提高混合料高温抗剪切性能。同时, 用于重载公路下面层的混合料级配应进行针对性设计, 仅满足规范规定的级配范围进行施工, 往往

不能满足现实条件对下面层混合料性能的要求。

3.3 抗水损性能分析

因本文提出的泡沫沥青用量综合指标对混合料抗水损性能有一定削弱,因此,本文选择 ITSR 对不同方法设计的混合料抗水损性能进行验证,结果如图 7 所示。

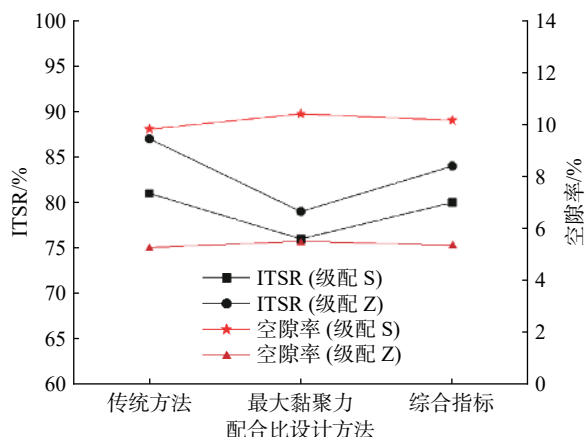


图 7 不同方法设计的混合料干湿劈裂强度比

Fig.7 Dry-wet splitting strength ratio of mixtures designed by different methods

由图 7 可知,不同方法设计的泡沫沥青冷再生混合料抗水损性能有较大差异,其中传统设计方法水稳定性最好,以最大黏聚力指标设计的混合料水稳定性较差,综合指标介于二者之间。主要因为传统指标确定的泡沫沥青用量较高,除部分泡沫沥青与胶结料形成沥青胶浆,以点焊的形式分布在混合料中起黏结作用外,另一部分泡沫沥青则以沥青团和自由沥青的形式填充到混合料空隙中,减小混合料空隙,有效防止水分进入空隙中形成动水压力;而最大黏聚力指标确定的泡沫沥青用量较少,主要用于形成沥青胶浆分散在混合料中起黏结作用,无多余沥青填充到空隙中,混合料空隙率较大,易发生水损害;而综合指标介于二者之间,同时考虑了抗水损性能和高温抗剪切性能。

对比级配 S 和级配 Z 混合料抗水损性能,不同设计方法对级配 Z 和级配 S 作用规律类似,以综合指标确定泡沫沥青用量的混合料抗水损性能受到一定削弱,但削弱幅度不大,满足规范对 ITSR 不小于 75% 的要求^[23]。级配 Z 抗水损性能整体上优于级配 S,因此,建议当以综合指标确定泡沫沥青用量时,可选择密实性较好的级配,提高泡沫沥青冷再生混合料抗水损性能。

4 结 论

本文通过对传统泡沫沥青冷再生混合料配合比设计方法和车辙试验进行分析,引入抗剪切设计指标和单轴贯入试验,为设计和检验高抗剪泡沫沥青冷再生混合料开展试验研究,得出以下主要结论:

a. 提出了泡沫沥青用量综合指标,综合考虑抗拉、抗水损和抗剪切性能,在混合料抗水损性能满足规范要求的同时,有效提高混合料高温抗剪切性能,且减少泡沫沥青用量,降低工程造价。

b. 提出了基于标准马歇尔试件的单轴贯入试验,有效评价混合料高温抗剪切性能,并且贯入速率 1 mm/min,试验温度 60 ℃ 为最佳试验条件;基于马歇尔试件的最大贯入荷载与动稳定度存在较好的线性相关,以动稳定度规范限值推算出贯入荷载限值要求,为该评价方法的应用提供限值参考。

c. 以综合指标优化配合比设计,建议选择密实性较高的矿料级配,可有效提高混合料高温抗剪切性能,同时保证混合料抗水损性能满足规范要求。

d. 下一阶段应针对优化后的配合比开展实际工程应用,并且进行长期性能的观测和调查,通过反馈数据信息对配合比设计方案进行改进。

参考文献:

- [1] 高超. 泡沫沥青冷再生混合料 MMLS3 试验轮辙曲线特征及影响机理 [J]. 中国公路学报, 2019, 32(1): 46-56.
- [2] 张航, 胡建新, 刘大洋. 泡沫沥青冷再生混合料高温稳定性研究 [J]. 公路交通技术, 2016, 32(6): 17-22.
- [3] 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.
- [4] 拾方治, 赫振华, 吕伟民, 等. 泡沫沥青混合料设计方法的试验研究 [J]. 公路交通科技, 2004, 21(10): 1-4.
- [5] 李秀君. 泡沫沥青冷再生混合料设计方法研究 [D]. 上海: 同济大学, 2010.
- [6] 韩雪. 高温多雨地区沥青路面修筑关键技术研究 [D]. 西安: 西安工业大学, 2018.
- [7] 杜顺成, 戴经梁. 基于散体力学理论的多级抗剪密级配设计方法 [J]. 中国公路学报, 2008, 21(1): 35-39.
- [8] 陈忠达, 袁万杰, 高春海. 多级嵌挤密实级配设计方法研究 [J]. 中国公路学报, 2006(1): 32-37.
- [9] NAMUTEBI M, BIRGISSON B, GUARIN A, et al.

Exploratory study on bitumen content determination for foamed bitumen mixes based on porosity and indirect tensile strength[J]. *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*, 2017, 4(2): 131–144.

[10] CHOMICZ-KOWALSKA A, MACIEJEWSKI K. Multivariate optimization of recycled road base cold mixtures with foamed bitumen[J]. *Procedia Engineering*, 2015, 108: 436–444.

[11] KUNA K, AIREY G, THOM N. Mix design considerations of foamed bitumen mixtures with reclaimed asphalt pavement material[J]. *International Journal of Pavement Engineering*, 2017, 18(10): 902–915.

[12] 刘玉国. 泡沫沥青及其冷再生混合料路用性能研究 [D]. 西安: 长安大学, 2015.

[13] 史永青. 沥青稳定类冷再生混合料抗剪特性研究 [J]. *公路交通技术*, 2016, 32(5): 36–40,45.

[14] 李秀君. 泡沫沥青冷再生混合料抗剪性能的试验研究 [J]. *建筑材料学报*, 2010, 13(1): 27–31,56.

[15] 王开凤, 曾鹏, 朱云升. 基于最大黏聚力性能的泡沫沥青冷再生混合料配合比设计方法 [J]. *中外公路*, 2018, 38(2): 192–196.

[16] 贾锦绣, 韩森, 徐鸥明. 沥青稳定碎石混合料的抗剪性能 [J]. *长安大学学报(自然科学版)*, 2009, 29(3): 23–26.

[17] 陈浩, 樊统江, 范芳芳. 单轴贯入试验试件高度对沥青混合料剪切强度的影响 [J]. *重庆交通大学学报(自然科学版)*, 2012, 31(3): 398–401.

[18] 毕玉峰, 孙立军. 沥青混合料抗剪试验方法研究 [J]. *同济大学学报(自然科学版)*, 2005, 33(8): 1036–1040.

[19] 颜可珍, 葛冬冬, 游凌云. 沥青混合料单轴贯入抗剪试验的细观分析 [J]. *湖南大学学报(自然科学版)*, 2015, 42(5): 113–119.

[20] 浙江省市场监督管理局. DB33/T 715—2018, 公路泡沫沥青冷再生路面设计与施工技术规范 [S]. 杭州: 浙江省市场监督管理局, 2018.

[21] 杜顺成, 刘丽萍, 戴经梁. 高抗剪能力粗集料级配设计方法 [J]. *中国公路学报*, 2010, 23(4): 27–32.

[22] 杜顺成, 戴经梁. 以剪切模量为控制指标的级配设计方法 [J]. *公路交通科技*, 2010, 27(5): 47–51.

[23] 中华人民共和国交通部. JTG F41—2008, 公路沥青路面再生技术规范 [S]. 北京: 中华人民共和国交通部, 2008.

[24] 李秀君, 拾方治, 张永平. 拌和用水量对泡沫沥青混合料性能的影响 [J]. *建筑材料学报*, 2008, 11(1): 64–69.

[25] 范亮平. 集料均匀性对沥青混合料力学性能影响的离散元模拟 [D]. 杭州: 浙江大学, 2014.

[26] 袁万杰. 多级嵌挤密实级配设计方法与路用性能研究 [D]. 西安: 长安大学, 2004.

(编辑: 丁红艺)