

文章编号:1674-2974(2016)09-0120-09

基于低温性能的橡胶颗粒环氧沥青混合料研究^{*}

薛永超, 钱振东[†], 夏荣辉

(东南大学 智能运输系统研究中心, 江苏 南京 210096)

摘要:为了分析橡胶颗粒对环氧沥青混合料低温性能的改善作用,在选择形状特征及硬度合适的橡胶颗粒的前提下,基于抗弯拉强度、最大弯拉应变、弯曲劲度模量、脆化点温度及应变能密度对不同橡胶颗粒体积掺量下的环氧沥青混合料的低温性能进行研究,并通过室内试验对不同橡胶颗粒体积掺量下的环氧沥青混合料的水稳定性及高温性能进行验证。结果表明:橡胶颗粒的细长扁平颗粒含量越小、邵尔 A 型硬度越大,橡胶颗粒环氧沥青混合料的压实效果及抗松散性越好;体积掺量合适的橡胶颗粒对环氧沥青混合料的抗弯拉强度、水稳定性及高温性能影响不大,但能显著提高其低温变形能力,降低其脆化点温度,改善其低温性能;在 $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,5%橡胶颗粒体积掺量下的环氧沥青混合料相对未掺加橡胶颗粒的环氧沥青混合料,应变能密度提高了108.0%。

关键词:环氧沥青混合料;橡胶颗粒;抗弯拉强度;脆化点温度;应变能密度

中图分类号:U416.217

文献标识码:A

Research on Rubber Particles Epoxy Asphalt Mixture Based on Low Temperature Performance

XUE Yong-chao, QIAN Zhen-dong[†], XIA Rong-hui

(Intelligent Transportation System Research Center, Southeast Univ, Nanjing, Jiangsu 210096, China)

Abstract: In order to analyze the improvement effects of rubber particles on low temperature performance of epoxy asphalt mixture, the low temperature performance of the epoxy asphalt mixture with different rubber particles volume content was studied choosing the rubber particles with appropriate shape feature and hardness, based on the flexural strength, flexural strain, flexural stiffness modulus, temperature of brittle point and strain energy density. The moisture susceptibility and high temperature performance of epoxy asphalt mixture with different rubber particles volume content were then validated by laboratory tests. The results show that the less the flat and elongated particle contents of rubber particles are, the greater the Shore A hardness of rubber particles is, the better the compaction effect and raveling resistance of rubber particles epoxy asphalt mixture are. The influence of rubber particles on flexural strength, moisture susceptibility and high temperature performance of epoxy asphalt mixture is not significant. However, the rubber particles with appropriate content can significantly increase the low temperature deformability of epoxy asphalt mixture, which can reduce the temperature of brittle point for epoxy asphalt mixture, and

^{*} 收稿日期:2015-10-27

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51178114), National Natural Science Foundation of China(51178114)

作者简介:薛永超(1990-),男,江苏高邮人,东南大学博士生

[†] 通讯联系人, E-mail: qianzd@seu.edu.cn

improve the low temperature performance of epoxy asphalt mixture. Compared with the epoxy asphalt mixture without rubber particles, the strain energy density of the epoxy asphalt mixture with rubber particles volume content of 5% is increased to 108.0% at $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Key words: epoxy asphalt mixture; rubber particles; flexural strength; temperature of brittle point; strain energy density

环氧沥青混合料是钢桥面铺装的典型材料之一,具有优异的高温性能、疲劳性能、水稳定性及密水性^[1-2],在我国有着很大的应用前景^[3].但是环氧沥青混合料作为一种热固性材料,在发生固化反应的时候,不仅强度及硬度会大幅提高,柔韧性也会有所下降,导致抗裂性不足,尤其是低温变形能力,因此在较低的温度及较大的交通荷载下,低温开裂一直是环氧沥青混合料钢桥面铺装的主要病害形式^[2,4].针对环氧沥青混合料低温性能的不足,目前的研究主要侧重于混合料开裂后的修复,或者利用改性添加剂改善环氧沥青结合料的低温性能,而从混合料的集料出发,通过提高混合料的整体变形能力进而改善混合料的低温性能的研究尚不多见.

废旧轮胎作为一种固体废弃物,每年的产量庞大,若弃之不管,会给我国的环境带来极大的压力,同时也会造成资源的巨大浪费.目前,将废旧轮胎破碎成橡胶颗粒作为集料加入到沥青混合料或者水泥混凝土中,是废旧轮胎运用于道路工程的一种常用方式^[5-7].橡胶颗粒化学稳定性好,在较宽的温度范围内具有良好的柔韧性、弹性及变形能力,可以显著改善沥青混合料的降噪能力^[8]、除冰能力^[9]及低温性能^[10],同时,工艺简单、经济性好,并且可以避免处理过程中对环境的二次污染^[11-12].

本文在总结现有研究成果的基础上,选择形状

特征及硬度合适的橡胶颗粒,将其作为一种集料,替代热固性材料—环氧沥青混合料的部分玄武岩集料,组合设计出一种橡胶颗粒环氧沥青混合料,并通过室内试验研究橡胶颗粒环氧沥青混合料在不同橡胶颗粒体积掺量下的低温性能、水稳定性及高温性能,以期在不降低其他路用性能的前提下改善环氧沥青混合料的低温性能,减少或者避免环氧沥青混合料钢桥面铺装的裂缝病害.

1 橡胶颗粒环氧沥青混合料组合设计

1.1 原材料

试验研究采用的橡胶颗粒环氧沥青混合料由环氧沥青结合料、玄武岩集料、矿质填料及橡胶颗粒以一定的比例混合而成.其中,环氧沥青结合料为钢桥面用 2910 型国产环氧沥青结合料,玄武岩集料的公称最大粒径为 9.5 mm,矿质填料为粘附性较好、材质较轻且加工方便的石灰石矿粉,各项原材料主要性能的技术要求及试验结果见表 1;橡胶颗粒的密度为 1.29 g/cm^3 ,粒径为 1.18~2.36 mm,有 4 种邵尔 A 型硬度:48°,54°,57°和 64°,每种邵尔 A 型硬度的橡胶颗粒又有 5 类细长扁平颗粒含量:0%,5%,10%,15%和 20%;橡胶颗粒环氧沥青混合料的矿料级配见表 2.

表 1 原材料的技术要求及试验结果
Tab. 1 Technical requirements and test results of raw materials

原材料	性能指标	试验结果	技术要求	试验方法
环氧沥青结合料	粘度增加至 $1\text{ Pa}\cdot\text{s}$ 的时间 / min	56	≥ 50	ASTM D 4402
	拉伸强度 ($23\text{ }^{\circ}\text{C}$) / MPa	2.91	≥ 1.5	ASTM D 638
	断裂延伸率 ($23\text{ }^{\circ}\text{C}$) / %	236	≥ 200	ASTM D 638
玄武岩集料	压碎值 / %	8.9	≤ 12	JTG E42-2005 T0316
	抗压强度 / MPa	143	≥ 120	JTG E41-2005 T0221
	细长颗粒含量 / %	2.7	≤ 5	JTG E42-2005 T0312
矿质填料	亲水系数	0.63	≤ 1	JTG E42-2005 T0353
	含水量 / %	0.17	≤ 1	JTG E42-2005 T0343
	塑形指数 / %	3.2	≤ 4	JTG E42-2005 T0354

表2 橡胶颗粒环氧沥青混合料的矿料级配
Tab. 2 Aggregate gradation of rubber particles epoxy asphalt mixture

筛孔尺寸/mm	13.2	9.5	4.75	2.36	1.18	0.6	0.3	0.15	0.075	
上限	100	100	85	70	55	40	32	23	14	
通过百分率/%	下限	100	95	65	50	39	28	21	14	7
设计值	100	97.6	76.5	60.8	46.8	34.3	24.0	16.7	10.5	

采用体积计算法(被替换的玄武岩集料的粒径及体积与参加的橡胶颗粒相等)参加橡胶颗粒:首先根据橡胶颗粒(粒径为 1.18~2.36 mm)的设计体积掺量百分比(与集料总体积的比值)与集料总体积得到需要参加的橡胶颗粒与被替换的玄武岩集料的体积,结合橡胶颗粒的密度与粒径为 1.18~2.36 mm 的玄武岩集料的密度(2.941 g/cm³),分别计算出橡胶颗粒的参加质量与粒径为 1.18~2.36 mm 的玄武岩集料的替换质量;其次,根据玄武岩集料的替换质量取出粒径为 1.18~2.36 mm 的部分玄武岩集料;最后根据橡胶颗粒的参加质量参加橡胶颗粒,得到参加有橡胶颗粒的矿料,使用此矿料进行橡胶颗粒环氧沥青混合料的试验研究。

1.2 橡胶颗粒的参数选择

橡胶颗粒作为混合料的一种集料,其形状特征及硬度等参数对混合料的压实特性和松散特性有着很大的影响^[13-14]. 橡胶颗粒的形状通常有立方体状及细长扁平状两种形态,硬度也有很大区别,本文首先通过橡胶颗粒环氧沥青混合料马歇尔试件的空隙率及飞散损失研究其压实特性及松散特性,以确定合适的橡胶颗粒参数。

选择细长扁平颗粒含量及邵尔 A 型硬度不同的橡胶颗粒,均以 7.5% 的体积掺量采用体积计算法参加橡胶颗粒,进行马歇尔试验确定各自的最佳油石比,在各自的最佳油石比下各成型 8 个马歇尔试件,4 个试件通过沥青混合料密度试验得出空隙率,4 个试件通过沥青混合料肯塔堡飞散试验得出飞散损失,试验结果的平均值见图 1。

由图 1 可以看出,不同邵尔 A 型硬度下,橡胶颗粒环氧沥青混合料的空隙率及飞散损失均随着橡胶颗粒的细长扁平颗粒含量的增加而增大,这说明橡胶颗粒中的细长扁平颗粒会降低环氧沥青混合料的压实效果及抗松散性. 这是由于橡胶颗粒的形状越接近立方体,其棱角就越多,经压实成型后,橡胶颗粒与玄武岩集料之间就可以形成良好的齿合嵌锁,混合料的结构就越稳定,反之,如果橡胶颗粒中细长扁平颗粒较多,即使在外力作用下强行压实成

型,在外力消失之后,由于齿合嵌锁作用较弱,橡胶颗粒的弹性会造成集料之间的滑动,在导致混合料的空隙率增大的同时,破坏了混合料内部结构的稳定。

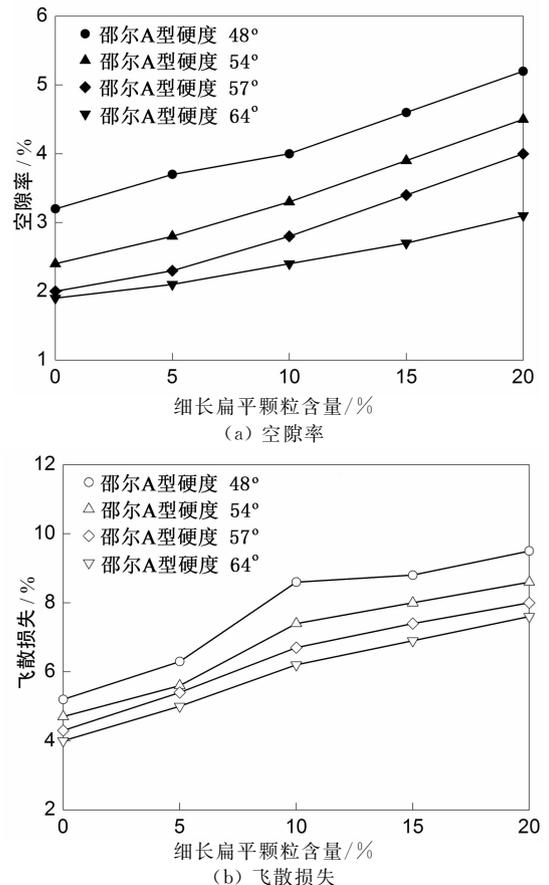


图 1 不同细长扁平颗粒含量

及邵尔 A 型硬度的试验结果

Fig. 1 Test results under different flat and elongated particle contents and Shore A hardness

另一方面,不同细长扁平颗粒含量下,橡胶颗粒环氧沥青混合料的空隙率及飞散损失均随着橡胶颗粒的邵尔 A 型硬度的增加而减小,这说明橡胶颗粒的邵尔 A 型硬度越大,橡胶颗粒环氧沥青混合料的压实效果及抗松散性越好. 邵尔 A 型硬度是橡胶颗粒最常用的一个强度评价指标,反映了橡胶颗粒在外力作用下的抗变形能力,在混合料中,橡胶颗粒的邵尔 A 型硬度越大,橡胶颗粒与玄武岩集料及沥青之间形成的网络结构越稳定,混合料的回弹变形就

越小,足够的邵尔 A 型硬度可以保证混合料的空隙率及抗松散能力。

空隙率是环氧沥青混合料组成设计的重要控制指标,环氧沥青混合料的高密水性等特性要求其空隙率小于等于 3%^[15],由邵尔 A 型硬度为 48°的橡胶颗粒构成的橡胶颗粒环氧沥青混合料的空隙率均大于 3%,因此邵尔 A 型硬度为 48°的橡胶颗粒不能作为橡胶颗粒环氧沥青混合料的组成部分,同时其他硬度下,细长扁平颗粒较多的橡胶颗粒也不能作为橡胶颗粒环氧沥青混合料的组成部分。

综合可得,橡胶颗粒的细长扁平颗粒含量越小、邵尔 A 型硬度越大,橡胶颗粒环氧沥青混合料的压

实效果及抗松散性越好,因此,选择细长扁平颗粒含量为 0%且邵尔 A 型硬度为 64°的橡胶颗粒作为后续橡胶颗粒体积掺量设计、低温性能、水稳定性及高温性能研究的试验材料。

1.3 橡胶颗粒的体积掺量设计

橡胶颗粒的体积掺量选择为 2.5%,5.0%,7.5%,10.0%和 12.5%,同时增加不掺加橡胶颗粒的环氧沥青混合料作为对比,通过马歇尔试验确定各个体积掺量下的最佳油石比,并在各自的最佳油石比下补充浸水马歇尔试验及肯塔堡浸水飞散试验,最佳油石比等试验结果见表 3。

表 3 试验结果
Tab. 3 Test Results

橡胶颗粒的 体积掺量 /%	最佳油 石比 /%	毛体积相对 密度 /(g·cm ⁻³)	空隙率 /%	沥青 饱和度 /%	流值 /(0.1 mm)	稳定度 (35 min) /kN	稳定度 (48 h) /kN	残留 稳定度 /%	飞散损失 (浸水) /%
0	6.5	2.592	1.6	89.6	42.8	75.6	71.1	94.0	2.14
2.5	6.7	2.578	1.6	89.0	43.2	74.3	69.7	93.8	2.65
5.0	6.8	2.562	1.7	88.1	43.8	72.1	67.4	93.5	3.34
7.5	7.0	2.544	1.9	86.9	45.1	68.7	64.0	93.2	4.12
10.0	7.2	2.523	2.4	85.3	49.6	58.2	53.8	92.4	5.64
12.5	7.5	2.499	3.2	83.1	54.3	43.1	39.4	91.4	7.89

从表 3 可以看出,随着橡胶颗粒体积掺量的增加,橡胶颗粒环氧沥青混合料的最佳油石比、空隙率及浸水飞散损失也逐渐增加,油石比的增加是由于橡胶颗粒对环氧沥青结合料的吸收能力大于玄武岩集料,空隙率及浸水飞散损失的增加则是由于橡胶颗粒的回弹作用,马歇尔试件成型后,回弹的橡胶颗粒在一定程度上会撑开橡胶颗粒环氧沥青混合料的嵌锁结构,导致空隙率增大、抗松散能力变差;另一方面,橡胶颗粒环氧沥青混合料的马歇尔稳定度及残留稳定度则随着橡胶颗粒体积掺量的增加而减小,而且减小的幅度越来越大,但是当体积掺量小于等于 5%时,橡胶颗粒环氧沥青混合料的马歇尔稳定度及残留稳定度均变化很小;同时,由于橡胶颗粒的密度小于玄武岩集料,橡胶颗粒环氧沥青混合料的毛体积相对密度随着橡胶颗粒体积掺量的增加而减小。

当体积掺量为 12.5%时,橡胶颗粒环氧沥青混合料的空隙率超过了 3%的控制指标^[15],因此在后续橡胶颗粒环氧沥青混合料的性能研究中,排除此体积掺量。

2 橡胶颗粒环氧沥青混合料的低温性能研究

2.1 小梁弯曲试验

为了评价橡胶颗粒对环氧沥青混合料低温性能的影响,对橡胶颗粒环氧沥青混合料进行不同温度下的小梁弯曲试验,试验参照 JTG E20—2011(T0715—2011)规程进行,小梁的尺寸为 250 mm×30 mm×35 mm,跨径为 200 mm,加载速率为 50 mm/min,试验温度分别为 10℃,5℃,0℃,-5℃,-10℃和-15℃。每个试验温度下,不同的橡胶颗粒体积掺量的橡胶颗粒环氧沥青混合料小梁试件做 4 个,试验结果取均值,如图 2 所示。

由图 2(a)可以看出,当橡胶颗粒的体积掺量小于 5%时,相对于未掺加橡胶颗粒的环氧沥青混合料,10℃与 5℃下的橡胶颗粒环氧沥青混合料的抗弯拉强度几乎没有变化,温度低于 5℃下的抗弯拉强度则有略微的增加,说明橡胶颗粒对环氧沥青混合料的抗弯拉强度影响较小,尤其是常温抗弯拉强度;当橡胶颗粒的体积掺量大于 5%时,抗弯拉强度开始下降,这是由于过多的橡胶颗粒减少了起骨架

支撑的集料的用量,橡胶颗粒直接承受外力作用,橡胶颗粒环氧沥青混合料的整体强度降低.

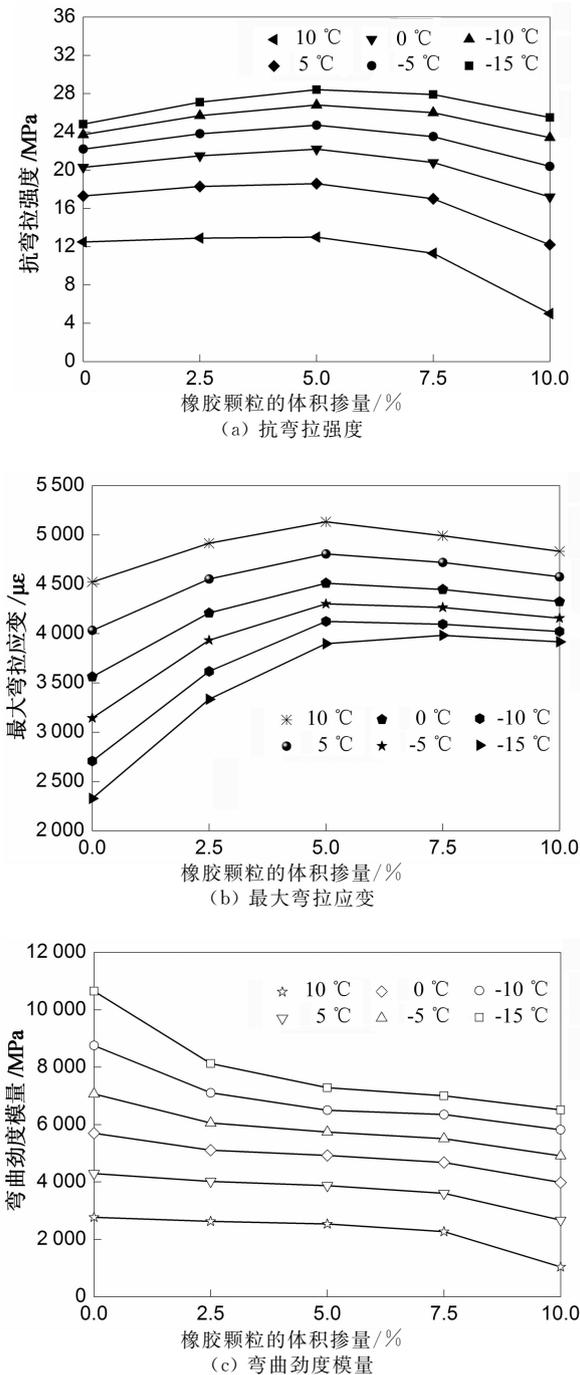


图2 小梁弯曲试验结果

Fig. 2 Results of flexural beam tests

图2(b)中橡胶颗粒环氧沥青混合料的最大弯拉应变随着橡胶颗粒体积掺量的增加而先增大后减小,当温度大于等于 -10°C 时,5%的橡胶颗粒体积掺量的最大弯拉应变最大;当温度为 -15°C 时,7.5%橡胶颗粒体积掺量的最大弯拉应变最大,相对

于未掺加橡胶颗粒的环氧沥青混合料提高了71%,说明体积掺量合适的橡胶颗粒可以显著改善环氧沥青混合料的柔韧性,提高环氧沥青混合料低温变形能力.

从图2(c)可以看出,不同的试验温度下,橡胶颗粒环氧沥青混合料的弯曲刚度模量均随着橡胶颗粒体积掺量的增加而减小,且在低温时减小的幅度远远大于常温,说明橡胶颗粒对改善环氧沥青混合料的低温脆性有很大的作用.在试验过程中,也可以发现橡胶颗粒环氧沥青混合料小梁的破坏与未掺加橡胶颗粒的环氧沥青混合料不一样,不是瞬间发生的,而是可以明显看到裂缝逐渐扩散与蔓延的过程.

同时,将橡胶颗粒对环氧沥青混合料低温性能的影响与橡胶粉对环氧沥青混合料的影响及橡胶颗粒对普通沥青混合料的影响进行比较,对比分析橡胶颗粒对环氧沥青混合料低温性能的影响程度.小梁弯曲试验采用的橡胶粉为大货车子午胎胶粉0.38 mm(40目),密度为 1.26 g/cm^3 ,试验采用的普通沥青混合料为常用的AC-13密级配沥青混合料,试验温度为 -15°C ,橡胶粉与橡胶颗粒的体积掺量均为5%,并补充未掺加橡胶颗粒的普通沥青混合料小梁弯曲试验,3种沥青混合料的试验结果见表4.

从表4中可以看出,在抗弯拉强度、最大弯拉应变及弯曲刚度模量三个指标上,相对于普通沥青混合料,橡胶颗粒对环氧沥青混合料的改善较大;橡胶粉对环氧沥青混合料抗弯拉强度的提高大于橡胶颗粒,而对环氧沥青混合料最大弯拉应变的提高却小于橡胶颗粒,说明在改善环氧沥青混合料低温变形能力上,橡胶颗粒的效果更明显.

2.2 脆化点温度分析

从沥青混合料的弯曲应力-应变曲线可以将混合料的破坏状况分为柔性破坏、脆性破坏及柔性向脆性过渡的破坏状况.柔性破坏的典型特点就是应力应变关系呈多次抛物线,混合料出现破坏是以试件开始出现微裂缝为基准;脆性破坏的特征就是应力应变关系近似线性变化,混合料出现破坏是以脆性断裂为基准.在一定的加载速率下,混合料出现从柔性向脆性过渡的破坏状况所对应的温度称为脆化点温度,脆化点温度可以用来评价沥青混合料的低温性能^[16].图3是橡胶颗粒体积掺量为5%时,从小梁弯曲试验得到的橡胶颗粒环氧沥青混合料在不同温度下的应力-应变曲线.

表 4 3 种沥青混合料的试验结果
Tab. 4 Test results of three kinds of asphalt mixture

沥青混合料种类	体积掺量 /%	抗弯拉强度 /MPa	变化量(相对于 0%的体积掺量)/%	最大弯拉应变 / $\mu\epsilon$	变化量(相对于 0%的体积掺量)/%	弯曲劲度模量 /MPa	变化量(相对于 0%的体积掺量)/%
橡胶颗粒环氧沥青混合料	0	24.8	—	2 328	—	10 653	—
	5	28.4	+14.5	3 897	+67.4	7 288	-31.6
橡胶颗粒普通沥青混合料	0	8.3	—	3 418	—	2 428	—
	5	7.8	-6.0	4 039	+18.2	1 931	-20.5
橡胶粉环氧沥青混合料	0	24.8	—	2 328	—	10 653	—
	5	30.6	+23.4	3 159	+35.7	9 687	-9.1

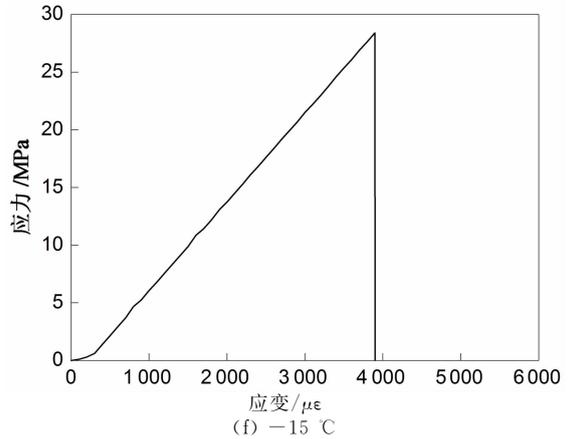
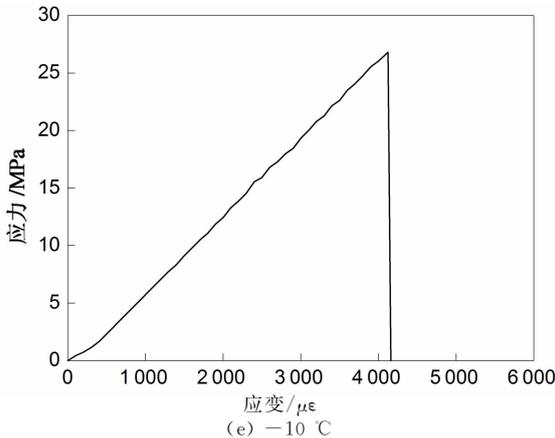
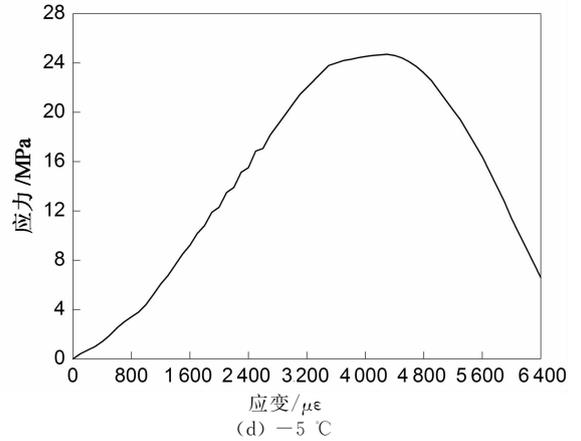
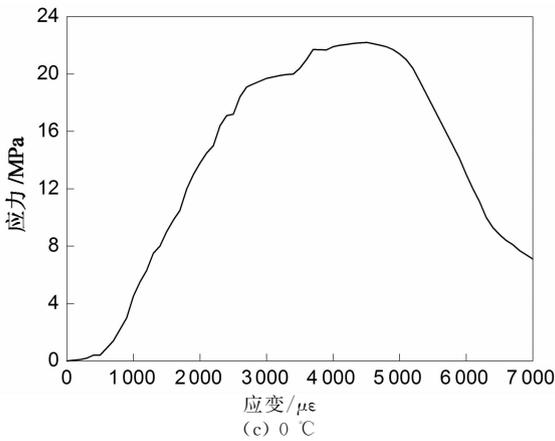
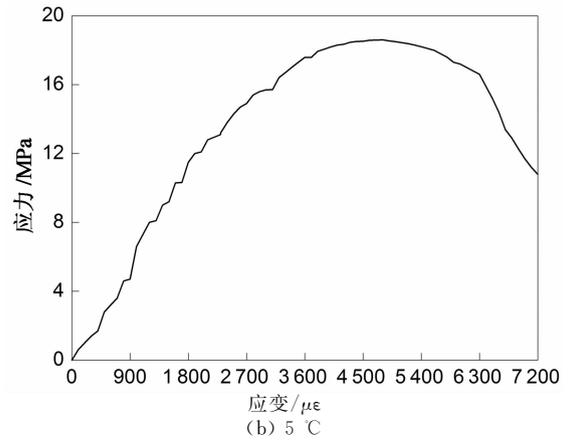
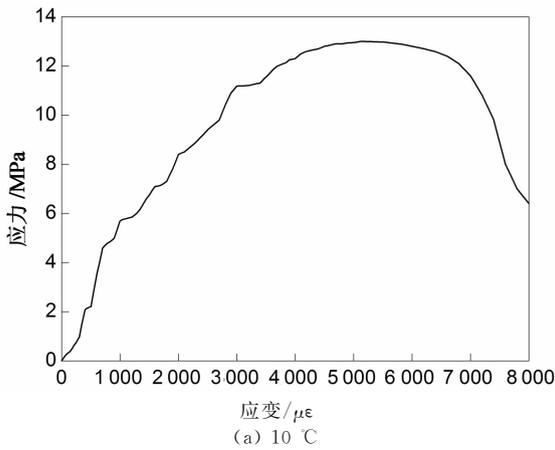


图 3 应力-应变曲线
Fig. 3 Stress-strain curves

从图3可以看出,温度为10℃,5℃和0℃时,橡胶颗粒环氧沥青混合料的应力应变关系呈多次抛物线,破坏状况为柔性破坏;温度为-10℃和-15℃时,橡胶颗粒环氧沥青混合料的应力应变关系为线性变化,破坏状况为脆性破坏;温度为-5℃时,橡胶颗粒环氧沥青混合料的应力应变关系近似多次抛物线,但部分应变范围内,应力与应变又呈线性变化,属于柔性向脆性过渡的破坏状况.因此保守可取0~-5℃及-5~-10℃的中点温度作为脆化点温度的上下限,即脆化点温度在-2.5~-7.5℃之间.用同样的方法计算其他橡胶颗粒体积掺量下橡胶颗粒环氧沥青混合料的脆化点温度范围,见表5.

表5 脆化点温度范围

Tab.5 Temperature range of brittle point

橡胶颗粒的 体积掺量/%	0	2.5	5.0	7.5	10.0
上限/℃	2.5	-2.5	-2.5	-2.5	2.5
下限/℃	-2.5	-7.5	-7.5	-7.5	-2.5

从表5中可以看出,相对于未掺加橡胶颗粒的环氧沥青混合料,2.5%~7.5%橡胶颗粒体积掺量下的橡胶颗粒环氧沥青混合料的脆化点温度范围较低,说明体积掺量合适的橡胶颗粒可以使环氧沥青混合料在更低的温度下才发生脆性破坏.

2.3 应变能密度分析

根据脆化点温度只能大概地得出橡胶颗粒对环氧沥青混合料的影响,不能精确地判断最合适的橡胶颗粒体积掺量,而单一地根据抗弯拉强度或最大弯拉应变来评价混合料的低温性能,往往会出现矛盾的结果,比如图2中的-15℃试验温度下,5%橡胶颗粒体积掺量的橡胶颗粒环氧沥青混合料的抗弯拉强度大于7.5%橡胶颗粒体积掺量,而5%橡胶颗粒体积掺量的橡胶颗粒环氧沥青混合料的最大弯拉应变却小于7.5%橡胶颗粒体积掺量,难以判断哪个橡胶颗粒体积掺量下的橡胶颗粒环氧沥青混合料的低温性能更优.弯曲破坏应变能密度是混合料破坏时消耗的能量,即外力对混合料做的功,作为混合料抗弯拉强度及最大弯拉应变这两个指标的综合,应变能密度越大,也就表明混合料的低温性能越好^[17],因此本文引进应变能密度来评价橡胶颗粒环氧沥青混合料的低温性能,应变能密度按式(1)计算.

$$W_p = \int_0^{\epsilon_p} \sigma(\epsilon) d\epsilon \quad (1)$$

式中: W_p 为应变能密度; ϵ 为小梁弯曲试验中的应变; $\sigma(\epsilon)$ 为应变 ϵ 时的应力; ϵ_p 为弯曲破坏时的应变.采用多次多项式对不同温度及不同橡胶颗粒体积掺量的橡胶颗粒环氧沥青混合料的应力-应变曲线进行拟合,回归积分得到应变能密度,计算结果见图4.

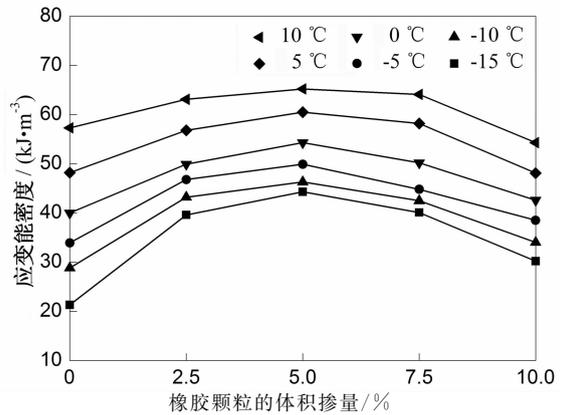


图4 应变能密度

Fig.4 Strain energy density

从图4中可以看出,不同的试验温度下,在橡胶颗粒的体积掺量达到5.0%之前,应变能密度均随着橡胶颗粒体积掺量的增加而增大,说明体积掺量合适的橡胶颗粒可以提高环氧沥青混合料的应变能密度,这是因为低模量、高变形的橡胶颗粒与相对较硬的环氧沥青混合料形成一个稳定的共混体系,在受到外力时,会在橡胶颗粒的中心发展出银纹,橡胶颗粒受到银纹的拉伸会吸收和消耗大量的能量,提高了环氧沥青混合料弯曲破坏的应变能密度,且在外力消失时,橡胶颗粒又能依靠自身的回弹能力终止银纹的继续发展,提高环氧沥青混合料的抗开裂能力.但是,当橡胶颗粒的体积掺量超过5%时,橡胶颗粒环氧沥青混合料的应变能密度又随着橡胶颗粒体积掺量的增加而减小,说明过多的橡胶颗粒会减少环氧沥青混合料的应变能密度,这是因为过多的橡胶颗粒会导致环氧沥青混合料的整体抗弯拉强度下降.

另一方面,相对于未掺加橡胶颗粒的环氧沥青混合料,橡胶颗粒体积掺量为5%的橡胶颗粒环氧沥青混合料在10℃,5℃,0℃,-5℃,-10℃和-15℃的温度下,其应变能密度分别提高了13.8%,25.5%,35.8%,47.2%,60.8%和108.0%,说明

橡胶颗粒对环氧沥青混合料在低温下的应变能密度提高更明显,可以显著改善环氧沥青混合料的低温性能。

3 橡胶颗粒环氧沥青混合料的水稳定性及高温性能研究

橡胶颗粒在提高环氧沥青混合料低温性能的同时,是否降低了其他方面的路用性能,这对橡胶颗粒在环氧沥青混合料中的应用至关重要。本文通过冻融劈裂试验及车辙试验分别对橡胶颗粒环氧沥青混合料在不同橡胶颗粒体积掺量下的水稳定性及高温性能进行研究。

冻融劈裂试验及车辙试验分别参照 JTG E20—2011(T0729—2000) 规程及 JTG E20—2011(T0719—2011) 规程进行,得到橡胶颗粒环氧沥青混合料的冻融劈裂抗拉强度比(TSR)及动稳定度(DS),不同的橡胶颗粒体积掺量均做4次平行试验,试验结果取平均值,见图5。

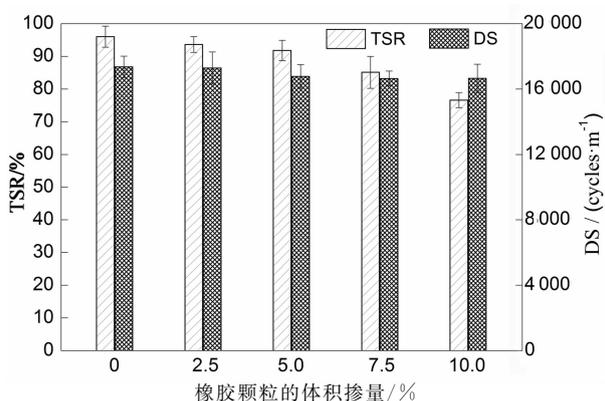


图5 冻融劈裂与车辙试验结果

Fig. 5 Results of freeze-thaw split tests and wheel-tracking test

从图5中可以看出,橡胶颗粒环氧沥青混合料的冻融劈裂抗拉强度比随着橡胶颗粒体积掺量的增加而减小,但当体积掺量小于5%时,减小的幅度很小,5%橡胶颗粒体积掺量之内的橡胶颗粒环氧沥青混合料的冻融劈裂抗拉强度比均在90%以上;另一方面,橡胶颗粒环氧沥青混合料的动稳定度随着橡胶颗粒体积掺量的增加基本保持不变,这是由于环氧沥青混合料本身是一种热固性材料,固化后具有优异的动稳定度,高温下也不会软化,橡胶颗粒的掺加对其影响很小。

4 结论

1) 橡胶颗粒的细长扁平颗粒含量越小、邵尔A型硬度越大,橡胶颗粒环氧沥青混合料的压实效果及抗松散性越好。

2) 橡胶颗粒对环氧沥青混合料的抗弯拉强度影响不大,对其最大弯拉应变提高较大,体积掺量合适的橡胶颗粒可以显著改善环氧沥青混合料的柔韧性,提高环氧沥青混合料的低温变形能力,并能降低环氧沥青混合料的脆化点温度,使其在更低的温度下才发生脆性破坏。

3) 橡胶颗粒可以增大环氧沥青混合料的应变能密度,在温度较低时效果更加明显,在-15℃温度时,5%橡胶颗粒体积掺量下的环氧沥青混合料相对未掺加橡胶颗粒的环氧沥青混合料,应变能密度提高了108.0%,橡胶颗粒可以显著地改善环氧沥青混合料的低温性能。

4) 在5%的橡胶颗粒体积掺量内,环氧沥青混合料的水稳定性及高温性能基本不受影响。

参考文献

- [1] HUANG Wei, QIAN Zhen-dong, CHEN Gang, *et al.* Epoxy asphalt concrete paving on the deck of long-span steel bridges [J]. Chinese Science Bulletin, 2003, 48(21): 2391—2394.
- [2] XUE Yong-chao, QIAN Zhen-dong. Development and performance evaluation of epoxy asphalt concrete modified with mineral fiber [J]. Construction and Building Materials, 2016, 102: 378—383.
- [3] BOCCI E, GRAZIANI A, CANESTRARI F. Mechanical 3D characterization of epoxy asphalt concrete for pavement layers of orthotropic steel decks [J]. Construction and Building Materials, 2015, 79: 145—152.
- [4] 王江洋, 钱振东. 环氧沥青混凝土裂纹发展的三维可视化离散元模拟 [J]. 湖南大学学报: 自然科学版, 2014, 41(6): 112—119.
WANG Jiang-yang, QIAN Zhen-dong. Three-dimensional visualization discrete element modeling of the crack development of epoxy asphalt concrete [J]. Journal of Hunan University: Natural Sciences, 2014, 41(6): 112—119. (In Chinese)
- [5] 曹卫东, 周海生, 吕伟民. 废橡胶颗粒改性沥青混合料的设计与性能 [J]. 建筑材料学报, 2005, 8(5): 562—566.
CAO Wei-dong, ZHOU Hai-sheng, LV Wei-min. Research on the design and properties of crumb rubber modified asphalt mix (CRUMAM) [J]. Journal of Building Materials, 2005, 8(5): 562—566. (In Chinese)

- [6] KHALOO A R, DEHESTANI M, RAHMATABADI P. Mechanical properties of concrete containing a high volume of tire-rubber particles[J]. *Waste Management*, 2008, 28(12): 2472—2482.
- [7] 周纯秀, 谭忆秋. 橡胶颗粒沥青混合料除冰雪性能的影响因素[J]. *建筑材料学报*, 2009, 12(6): 672—675.
ZHOU Chun-xiu, TAN Yi-qiu. Study of de-icing performance of crumb rubber granular asphalt mixture [J]. *Journal of Building Materials*, 2009, 12(6): 672—675. (In Chinese)
- [8] 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): 1—5.
LING Tian-qing, LI Yao-nan, DONG Qiang, *et al.* Influence of rubber particles on micro-surfacing performance and its noise-reduction effect [J]. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, 2011, 11(5): 1—5. (In Chinese)
- [9] 陈渊召, 李振霞. 橡胶颗粒沥青路面的除冰机理[J]. *中南大学学报: 自然科学版*, 2013, 44(5): 2073—2081.
CHEN Yuan-zhao, LI Zhen-xia. Deicing mechanism for crumb rubber asphalt pavement[J]. *Journal of Central South University: Natural Science*, 2013, 44(5): 2073—2081. (In Chinese)
- [10] 顾义明, 王国忠, 高明星. 橡胶颗粒沥青混合料低温力学性能的研究[J]. *内蒙古农业大学学报*, 2011, 32(1): 220—223.
GU Yi-ming, WANG Guo-zhong, GAO Ming-xing. Research on temperature mechanical properties of granulated crumb rubber asphalt mixture[J]. *Journal of Inner Mongolia Agricultural University*, 2011, 32(1): 220—223. (In Chinese)
- [11] FRANTZIS P. Crumb rubber-bitumen interactions: Cold-stage optical microscopy[J]. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2003, 15(5): 419—426.
- [12] Asphalt rubber usage guide[S]. Sacramento: State of California Department of Transportation MS# 5, 2003:1—4.
- [13] AHO B, VAVRIK W, CARPENTER S. Effect of flat and elongated coarse aggregate on field compaction of hot-mix asphalt[J]. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2001, 1761: 26—31.
- [14] PAN T, TUTUMLUER E, CARPENTER S H. Effect of coarse aggregate morphology on permanent deformation behavior of hot mix asphalt[J]. *Journal of Transportation Engineering*, 2006, 132(7): 580—589.
- [15] 黄卫, 钱振东, 程刚. 环氧沥青混凝土在大跨径钢桥面铺装中的应用[J]. *东南大学学报: 自然科学版*, 2002, 32(5): 783—787.
HUANG Wei, QIAN Zhen-dong, CHENG Gang. Application of epoxy asphalt concrete to pavement of long-span steel bridge deck[J]. *Journal of Southeast University: Natural Science*, 2002, 32(5): 783—787. (In Chinese)
- [16] 周晓华, 宗海, 王晓, 等. 环氧沥青混合料低温性能研究[J]. *公路*, 2006, 1: 179—182.
ZHOU Xiao-hua, ZONG Hai, WANG Xiao, *et al.* Research on low temperature performances of epoxy asphalt mixture [J]. *Highway*, 2006, 1: 179—182. (In Chinese)
- [17] 葛折圣, 黄晓明, 许国光. 用弯曲应变能方法评价沥青混合料的低温抗裂性能[J]. *东南大学学报: 自然科学版*, 2002, 32(4): 653—655.
GE Zhe-sheng, HUANG Xiao-ming, XU Guo-guang. Evaluation of asphalt mixture's low-temperature anticracking performance by curvature strain energy method[J]. *Journal of Southeast University: Natural Science*, 2002, 32(4): 653—655. (In Chinese)