

聚氨酯-水泥稳定碎石结合体弯拉力学性能研究

沙雪萍¹ 丁飞鹏² 姜子琦³ 汪瑞烨³

1. 安吉县公路与运输管理中心 浙江湖州 313300

2. 杭州博融科创有限公司 浙江杭州 310000

3. 河海大学土木与交通学院 江苏南京 210024

摘要: 通常情况下,道路基层材料总是承担来自车辆荷载的弯拉应力。而对于水泥稳定碎石材料这种半刚性材料,抗拉性能总是作为评价水泥稳定碎石材料弯拉性能的关键指标之一^[1]。基于此,本文针对聚氨酯修复水泥稳定碎石基层裂缝病害问题,以注浆后形成的聚氨酯-水泥稳定碎石结合体为研究对象,通过设置不同缝高比的半圆试件模拟实际裂缝受损状况进行半圆弯曲试验,分析试验结果划分聚氨酯注浆材料的破坏阶段。从荷载、变形、能量等角度探究聚氨酯注浆对水泥稳定碎石材料的弯拉力学性能影响规律。

关键词: 聚氨酯;水泥稳定碎石;弯拉应力;

1. 聚氨酯-水泥稳定碎石结合体试验方案

1.1 试验方法

本文从试验的精度、试验与试件制备的难易程度、聚氨酯影响因素设置等条件,选择适宜的水泥稳定碎石弯拉力学性能试验测定方法^[2]。

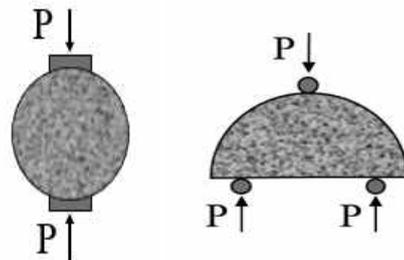
(1) 劈裂试验

劈裂试验,又称为间接拉伸试验,其加载示意图如图1(a)所示。试验过程是在以圆弧形压条、圆柱体试件、圆弧形压条的顺序放置于试验机中并固定,然后启动仪器,加压试件直至试件发生劈裂破坏。再对试验结果进行分析,绘制荷载-变形曲线,读取曲线峰值时的荷载和变形,再根据需求通过公式计算得到劈裂抗拉强度、破坏劲度模量等参数。不同国家规范中对试件尺寸的规定存在一定的差异,通常采用的是 $\phi 101\text{mm} \times 100\text{mm}$ 的圆柱体试件。同时,我国规范规定劈裂试件制备一般采用标准马歇尔试件,同时也可通过路面钻孔取芯获取。

(2) 半圆弯曲试验

半圆弯曲试验(the macroscopic semicircle bending, SCB),最初是用于测试岩石类材料的抗裂性能的一种试验方法。近年来,该方法逐渐应用于研究道路材料的弯拉力学性能和疲劳性能[3,4]。半圆弯曲试验加载示意图如图1(b)所示。试验采用两金属滚轴底部支撑,支撑滚轴平行于试件 q 厚度方向对称布设在半圆试件两侧,支撑滚轴中心处间距

设为 l ,通常选取0.8倍试样直径作为支撑间距^[5]。试件上方中心处为加载点,启动软件施加荷载,直至试件断裂,通过试验结果进行分析得到最大荷载、位移变形,计算破坏时试件的曲线的面积得到断裂能。



(a) 劈裂试验的加载示意图 (b) 半圆弯曲试验的加载示意图

图1 不同弯拉试验加载示意图

(3) 试验方法对比

针对水泥稳定碎石裂缝修复方面,两种试验方法的试件制作难易程度存在差异,且对评价水泥稳定碎石的弯拉力学性能的指标要求侧重不同。因此,本文考虑到多种指标因素影响,将两种试验方法优劣比较汇总得到表1所示结果。

表1 试验方法对比

试验方法	劈裂试验	半圆弯曲试验
聚氨酯影响因素设置	难	易
评价指标	单一(强度)	多样(强度、变形、能量)
试验难易程度	易	易
试件利用率	低	高

分析可知, 虽然劈裂试验作为研究材料抗拉性能最常用的手段之一, 并且具有操作简便、易于掌握、强度结果误差相对较小等优点。但是对于水泥稳定碎石这类材料, 制备预留缝的劈裂试件的难度较大, 且其圆柱体试件中心位置的拉压结合受力情况与实际路面基层的受力状态存在差距, 试验测定试件的变形数据精度较低。因此, 通过劈裂试验我们通常仅能得到强度方面的数据。但仅从强度的角度无法全面的对水泥稳定碎石材料弯拉力学性能进行评价, 因此劈裂试验在评价材料弯拉性能方面具有局限性。

相比之下, 半圆弯曲试验不但具有试验操作简易、试件制作简单、试件利用率高等优点。其试验结果的评价指标丰富, 除了常规的强度与变形数据外, 同时可以得到材料的断裂能指标。而断裂能作为一种具有较好的规律性的评价指标, 是对全面评价水泥稳定碎石弯拉力学性能的良好补充。

此外, 半圆试件的三点受力情况更为接近与实际路况, 可以更好地模拟基层的受力状态, 反映聚氨酯注浆前后水泥稳定碎石基层的弯拉力学性能。

综合来看, 半圆弯曲试验用作评价水泥稳定碎石弯拉力学性能的试验方法具有一定优势, 更符合研究裂缝注浆修复后聚氨酯-水泥稳定碎石结合体弯拉力学性能的试验需求。

1.2 试件材料

(1) 聚氨酯

选用聚氨酯均为烟台万华化学集团股份有限公司产品。

(2) 水泥稳定碎石

试验试验所用材料主要为水泥和碎石。水泥为闻喜水泥厂生产的 PC 32.5 级水泥, 其技术指标见表 2; 碎石为浙江金华产地玄武岩, 其技术指标见表 3。

表 2 水泥指标

指标	抗折强度 (MPa)		抗压强度 (MPa)		凝结时间		细度 (%)	标准稠度需水量 (%)	安定性
	3d	28d	3d	28d	初凝	终凝			
技术要求	≥ 3.5	≥ 5.5	≥ 16.0	≥ 32.5	不早于 90s	不早于 360s	筛余 ≤ 10	28 ± 2	合格
检测结果	4.1	6.4	19.5	37.5	281s	392s	1.6	28.2	合格

表 3 碎石指标

指标	19-31.5 mm	9.5-19mm	4.75-9.5 mm	0-4.75 mm
毛体积相对密度 (g/cm ³)	2.617	2.575	2.560	2.510
表观相对密度 (g/cm ³)	2.664	2.629	2.681	2.522
吸水率 (%)	0.69	0.90	1.31	1.37

试验结果表明, 当水泥掺量为 4.0% 时, 测得的最佳含水量约为 5.2%, 最大干密度为 2.71 g/cm³。

1.3 试验过程

(1) 试件制备

考虑到受外界影响敏感性、试件的压实效果等因素, 本文采用旋转压实的方法, 通过旋转压实仪制备与养护成型直径 150mm、高度 120mm 的圆柱形试件后, 对圆柱体试件的上下两个面进行修边与切割, 得到四个半径 75mm、厚度 50mm 的半圆试件, 再根据试验需要进行切缝处理与聚氨酯注浆。半圆弯曲试验试件制备流程图如图 2 所示, 这种制备方法能够获得易于切割成型且试件利用率较高的半圆试件。

碎石的筛分级配见表 4 水稳碎石与 4.0% 的水泥用量的击实试验所得含水量与密度关系见表 5。

表 4 筛分级配

1#:2#:3#:4#	31.5	26.5	19	13.2	9.5	4.75	2.36	0.6	0.075
22:26:16:36	100	97.8	75.8	70.6	54.0	23.9	21.4	7.9	0.5

表 5 4% 水泥掺量水稳击实试验结果

试件	含水量	干密度 (g/cm ³)	最佳含水量 (%)	最大干密度 (g/cm ³)
1	2.10	2.55	5.2	2.71
2	4.33	2.61		
3	5.21	2.71		
4	7.61	2.65		
5	9.20	2.64		

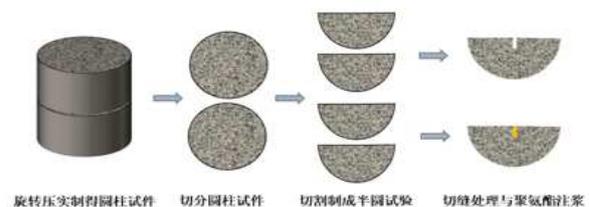


图 2 半圆弯曲试验试件制备流程图

考虑到本文以预切缝的形式模拟实际基层裂缝发展情况, 来研究水泥稳定碎石基层填缝前后的弯拉力学性能, 因

此对 75mm 半径试件进行改造。除设置不切缝 (0R) 试件外, 对其他试件做预设切缝处理, 制备 0.2R、0.4R、0.6R、0.8R 四种不同缝高比的半圆试件, 如图 3 所示。

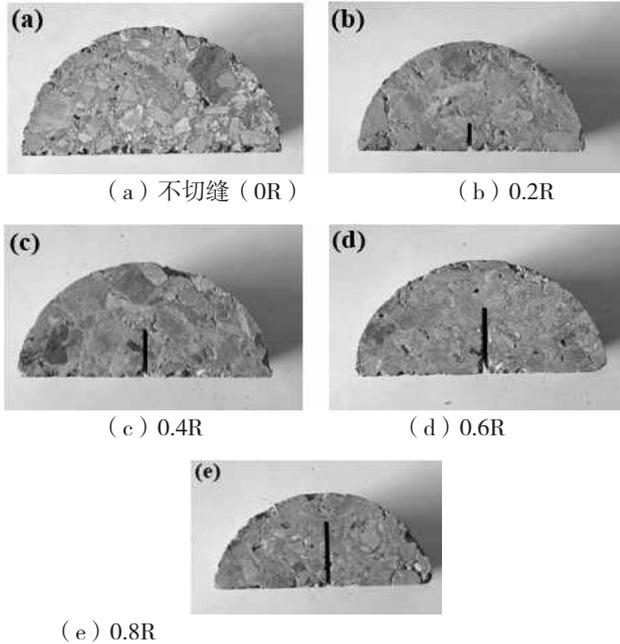


图 3 不同缝高比的半圆弯曲水泥稳定碎石试件

再对 0.2R、0.4R、0.6R、0.8R、1R 水泥稳定碎石试件进行聚氨酯注浆处理, 得到的每种聚氨酯 - 水泥稳定碎石结合体试件如图 4 所示。

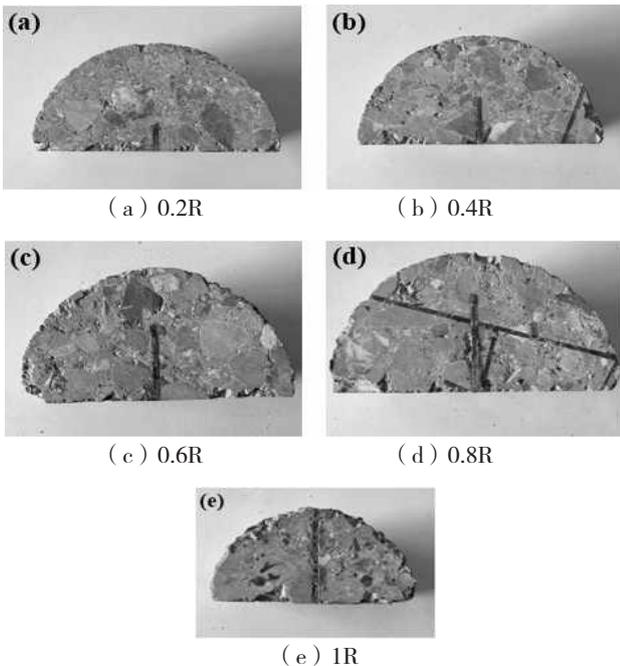
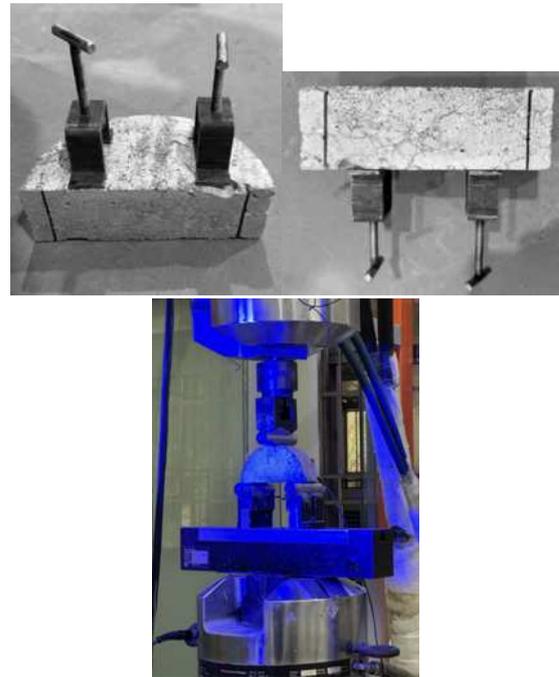


图 4 不同缝高比的半圆弯曲聚氨酯 - 水泥稳定碎石结合体试件

(2) 试件加载

本试验采用 MTS 322 试验机, 试验过程先将试件顶部中线位置抵住加载区, 以底部 0.8 倍试件直径作为支撑的间距采用两金属滚轴支撑, 两支撑滚轴平行于试件的厚度方向并对称布设在半圆试件左右两侧, 再启动试验软件进行半圆弯曲试验。待试验结束后, 通过试验机的多功能材料试验系统, 对试件的荷载、位移等数据参数采集, 数据采集频率为 1000Hz, 试验装置如图 5 所示。



(a) 试件改造 (b) 试件加载

图 5 半圆弯曲试验改造与加载

2 缝高比对水泥稳定碎石的弯拉力学性能影响

对于水泥稳定碎石材料的弯拉力学性能, 一般分析选用最大荷载作为常用的表征指标^[6]。但对于水泥稳定碎石材料, 不同试件之间的最大荷载数据差异度、离散性较大是在实际试验中普遍存在的问题。因此很难仅通过最大荷载这一个指标来评水泥稳定碎石材料的弯拉力学性能。因此, 除了最大荷载外, 考虑到变形指标的易获取性、能量法的广泛适用性与差异性较小的优势, 选取破坏位移与断裂能来综合评价聚氨酯注浆对水泥稳定碎石材料的弯拉力学性能影响。

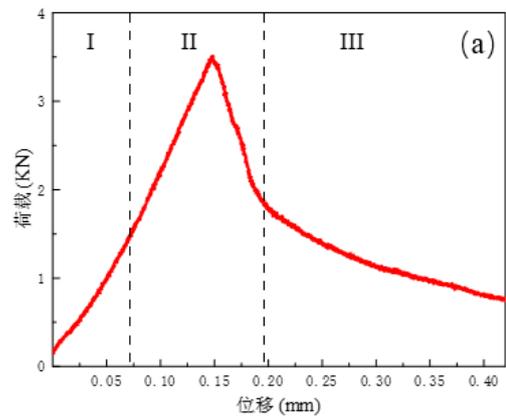
本试验试样较多, 分别对不切缝、0.2R、0.4R、0.6R、0.8R 进行 A、B、C、D、E 编号处理。在完成半圆弯曲试验后, 汇总试验机中最大荷载与破坏位移数据, 统计得到半圆弯曲试验下不同缝高比试件的最大荷载与破坏位移统计表 6。

表 6 半圆弯曲试验下不同缝高比水泥试件最大荷载与破坏位移

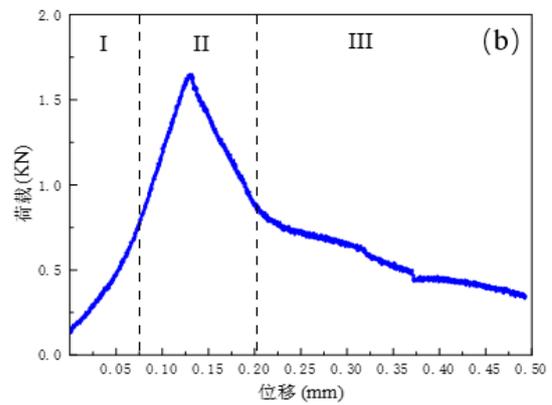
试件	最大荷载 (N)	破坏位移 (mm)
A1	4761.5	0.547
A2	5632.1	0.563
A3	5373.3	0.549
A4	5645.3	0.548
A5	4974.7	0.551
B1	3451.8	0.433
B2	3556.2	0.441
B3	3419.6	0.431
B4	3441.7	0.415
B5	3762.8	0.463
C1	1638.7	0.359
C2	1612.5	0.361
C3	1858.1	0.381
C4	1756.7	0.343
C5	1544.6	0.326
D1	1071.6	0.195
D2	1157.1	0.204
D3	1066.3	0.183
D4	974.6	0.176
D5	1114.2	0.197
E1	350.5	0.134
E2	372.2	0.139
E3	432.5	0.170
E4	447.3	0.165
E5	336.1	0.121

2.1 破坏阶段

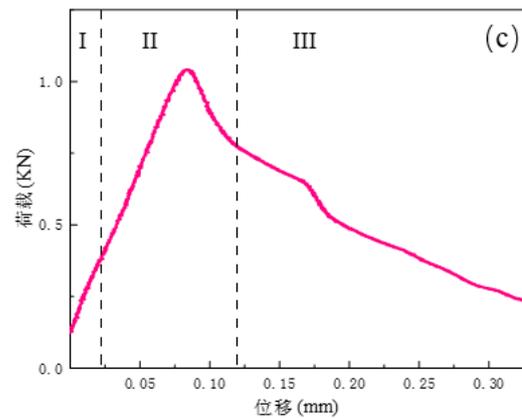
拟合表 6 数据, 得到半圆弯曲试验下不同缝高比水泥稳定碎石材料的荷载 - 位移曲线如图 6 所示。分析可知, 不同缝高比水泥稳定碎石试件各自对应的荷载 - 位移曲线模型相同, 表明不同裂缝发展状况的水泥稳定碎石材料破坏阶段大致相同, 分为损伤积累 (压实)、裂缝扩展 (弹性)、失稳破坏三个阶段^[8]。



(a) 0.2R 试件



(b) 0.4R 试件



(c) 0.6R 试件

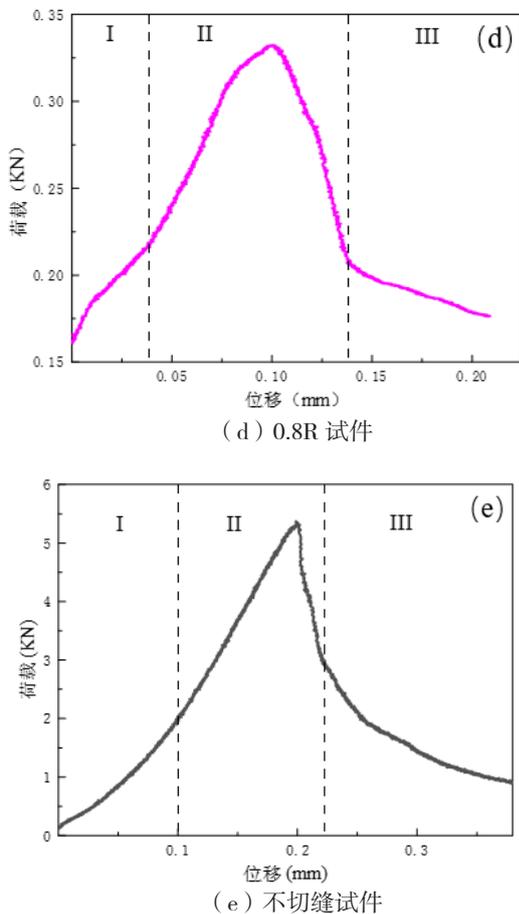


图6 半圆弯曲试验下不同裂缝深度试件荷载-位移曲线

在第 I 阶段损伤积累阶段,随着荷载与位移逐渐增大,试件的荷载-位移曲线斜率呈逐渐增大趋势。这是由于开始处于试验加载初期,试件在与试验仪器压头接触过程中,压头对试件内部不断产生了一种压实效果所导致的,此时试件还未产生变形。

在第 II 阶段裂缝扩展阶段,在荷载到达最大荷载前,试件的荷载-位移曲线都呈现出线性或近似线性增长的趋势,表明在此阶段试件发生弹性变形,试件伴有小裂缝产生。

在第 III 阶段失稳破坏阶段,此时荷载经由最大荷载开始急速降,荷载-位移曲线明显“内凹”并且伴有波动,表明在此阶段,试件裂缝急剧发展,发生失稳,并最终破坏。

2.2 最大荷载与破坏位移

考虑到在试验初期,试件处于一个第 I 阶段压实阶段下,不同缝高比的试件数据离散性较大。因此,参考半圆弯曲试验试件断裂能的规范,对荷载小于 300N,大于 500N 部分的曲线忽略不计。由此拟合汇总得到半圆弯曲试验下不同缝

高比水泥稳定碎石试件荷载-位移曲线汇总图如图 7 所示。分析可知,0.8R (E) 的水泥稳定碎石试件的荷载明显均处于 500N 以下,故本文对于 0.8R (E) 的试件数据予以舍弃,仅分析不切缝、0.2R、0.4R、0.6R 试件变化规律。

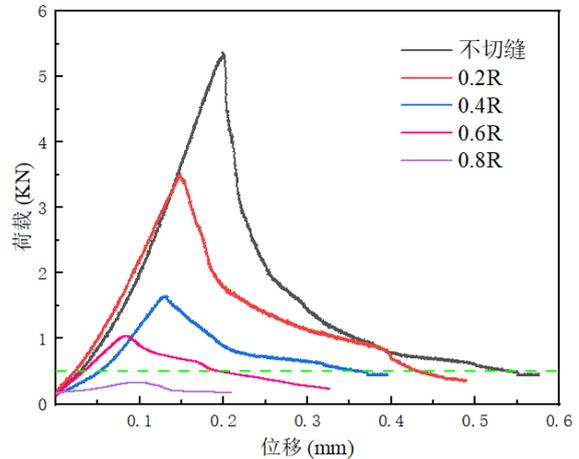
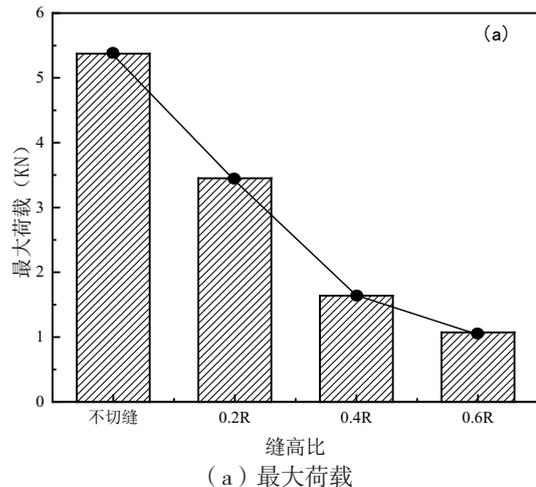


图7 半圆弯曲试验下不同缝高比水泥稳定碎石试件荷载-位移曲线汇总图

分析表 6 数据得到图 8 半圆弯曲试验下不同缝高比试件的最大荷载与破坏位移统计图。可以看出,最大荷载-缝高比、破坏位移-缝高比变化关系均呈现近似线性变化规律,随着缝高比的增加,试件的最大荷载逐级下降约 40%,破坏位移逐级下降约 20%。



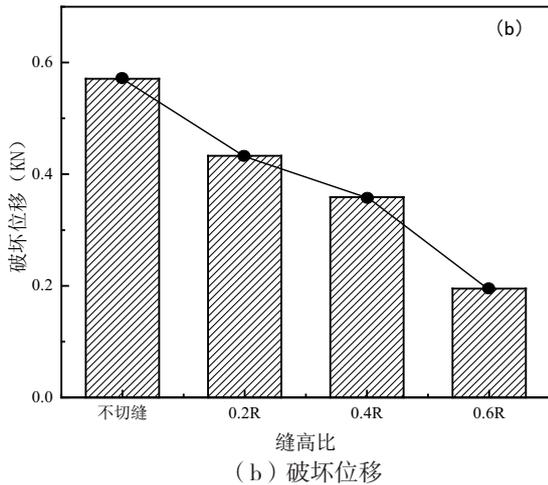


图 8 半圆弯曲试验下不同缝高比水泥稳定碎石试件的最大荷载与破坏位移统计图

最大荷载与破坏位移的变化表明随着裂缝病害发展,水泥稳定碎石材料的弯拉性能逐渐下降。其中,最大荷载与破坏位移相比,缝高比对水泥稳定碎石材料最大荷载的影响更大。因此,为预防水泥稳定碎石这种半刚性材料的裂缝问题,提升其承载能力是关键。

2.3 断裂能

断裂能是表示裂纹面位移从零直至完全分离消耗的能量,反映了材料从完好到断裂所吸收的总能量,可以很好的表征试件断裂时的特性。通过对前文得到的不同缝高比的试件的荷载-位移拟合曲线 300N 与 500N 这一区间内荷载-位移曲线进行积分,可以得到水泥稳定碎石材料在破坏的过程中每个韧带单元所消耗的能量,断裂能计算公式如下:

$$G_f = \frac{W_f}{A_{lig}} \quad (1.1)$$

其中: W_f 为断裂功;

A_{lig} 为韧带面积。

其中 W_f 和 A_{lig} 如式 1.2、式 1.3。

$$W_f = \int_b^a P du \quad (1.2)$$

其中: P 为荷载;

u 为变形。

$$A_{lig} = (r - a)t \quad (1.3)$$

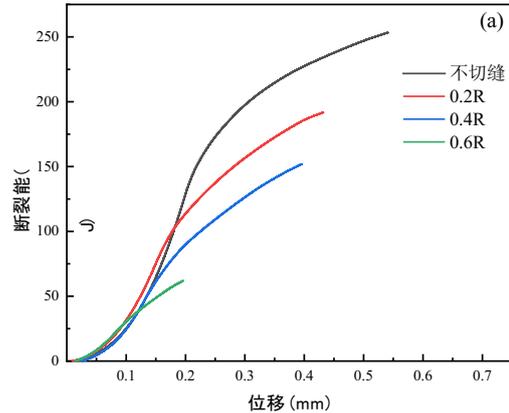
其中: r 为半圆试件半径;

a 为预切缝的深度;

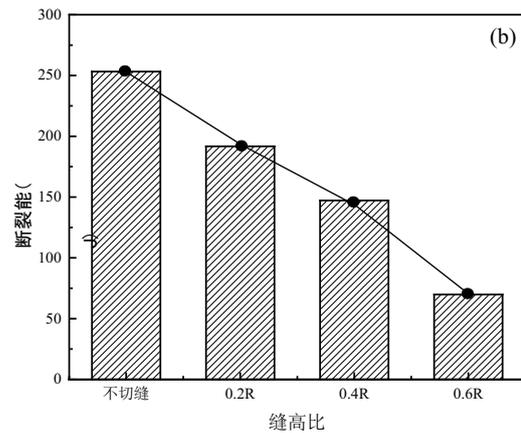
t 为半圆试件厚度。

①缝高比与断裂能的关系分析

图 9 (a), (b) 分别为不同缝高比的水泥稳定碎石材料断裂能曲线与断裂能统计图。可以看出,不同缝高比条件下,各试件对应的断裂能曲线模型一致。断裂能随着缝高比的增大逐渐减小,逐级约减少 28%,呈现近线性变化,表明随着缝高比的增加,水泥稳定碎石材料的弯拉力学性能力逐渐下降。



(a) 断裂能曲线图



(b) 断裂能统计图

图 9 半圆弯曲试验下不同缝高比试件的断裂能

②断裂能曲线与荷载-位移曲线关系分析

基于图 9 (a), 结合每种缝高比试件的荷载-位移曲线, 得到断裂能曲线与荷载-位移曲线关系, 如图 10 所示。分析可知, 随着试验加载, 在荷载-位移曲线达到峰值前, 断裂能曲线斜率逐渐增大, 断裂能增速加快, 表明在到达最大荷载前试件本身并无裂缝产生或仅存在少部分微小裂缝; 当荷载-位移曲线达到峰值时, 断裂能曲线到达拐点, 斜率开始下降, 断裂能增速变缓, 这表明此时试件已经出现宏观大裂缝; 之后, 由于试件还有残余强度, 因此随着位移的

增加, 荷载并非立刻下降至最小, 而是缓慢减小, 断裂能曲线也慢慢接近一个稳定的值, 直至不再增加。

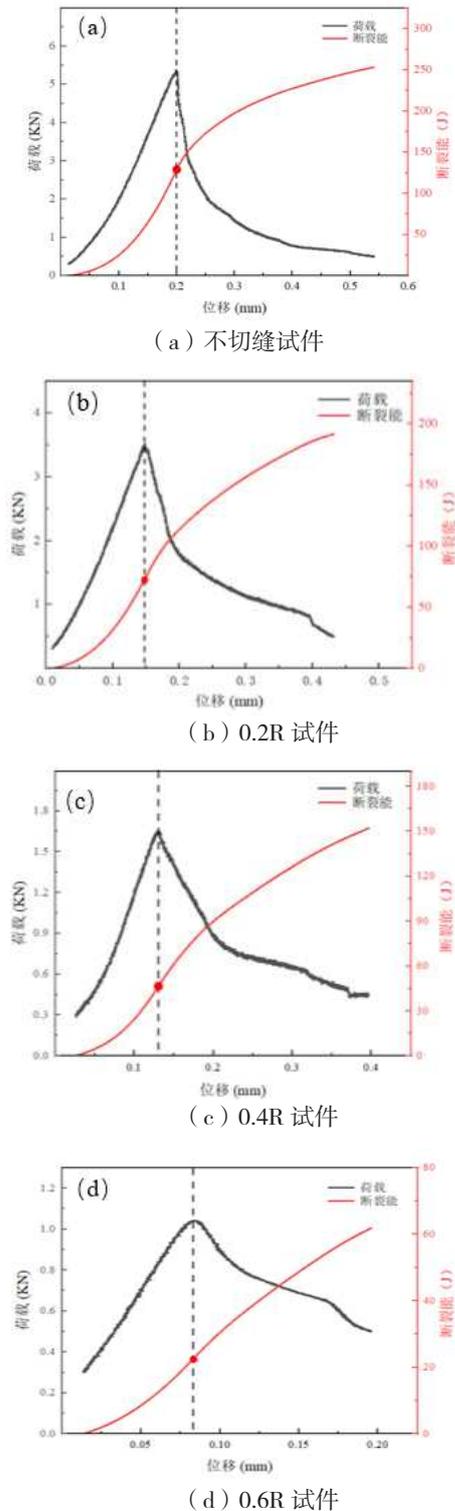


图 10 半圆弯曲试验下不同缝高比试件的断裂能曲线与荷载 - 位移曲线关系

由此可以认为, 当断裂能曲线到达拐点时, 水泥稳定碎石材料到达最大荷载, 弯拉性能已经达到极限, 试件开始失稳破坏。可以将断裂能拐点作为确定材料抗裂性能的依据之一^[7]。

3 聚氨酯注浆对水泥稳定碎石弯拉力学性能影响

通过对试验机读取统计最大荷载与破坏位移数据, 发现注浆后 0.8R 与 1R 试件的数据离散性太大, 因此本文仅汇总注浆后 0.2R、0.4R 与 0.6R 试件的性能指标, 分别编号 a、b、c, 数据见下表 7。

表 7 不同缝高比聚氨酯 - 水泥稳定碎石试件最大荷载与破坏位移

试件	最大荷载 (N)	破坏位移 (mm)
a1	5340.2	0.815
a2	6609.1	0.877
a3	6077.4	0.851
a4	5950.1	0.862
a5	6371.4	0.849
b1	5562.6	0.839
b2	5299.2	0.826
b3	5905.3	0.848
b4	5986.7	0.854
b5	5071.3	0.815
c1	4073.5	0.587
c2	3860.2	0.577
c3	4346.7	0.581
c4	3881.7	0.532
c5	4763.1	0.626

3.1 破坏阶段

为分析注浆后聚氨酯 - 水泥稳定碎石结合体的破坏阶段, 依据表 7 数据, 拟合得到不同缝高比的聚氨酯 - 水泥稳定碎石试件的荷载 - 位移曲线, 如图 11 所示。分析图表可知, 对于 0.2R、0.4R、0.6R 的试件, 聚氨酯 - 水泥稳定结合体的破坏阶段与注浆前的状态下有所不同。在开始加载阶段, 荷载位移曲线呈现线性或近似线性增长趋势, 说明此时存在一段弹性阶段, 所以对于聚氨酯 - 水泥稳定碎石材料试件的破坏阶段分为弹性变形、损伤累积、裂缝扩展、失

稳破坏四个阶段^[9]，这表明聚氨酯注浆修复裂缝病害改变了水泥稳定碎石材料的破坏阶段。

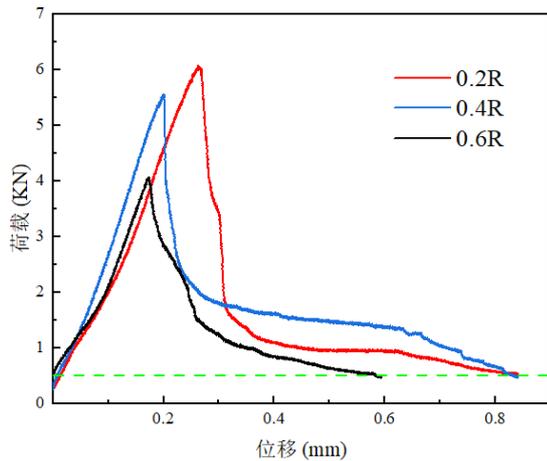
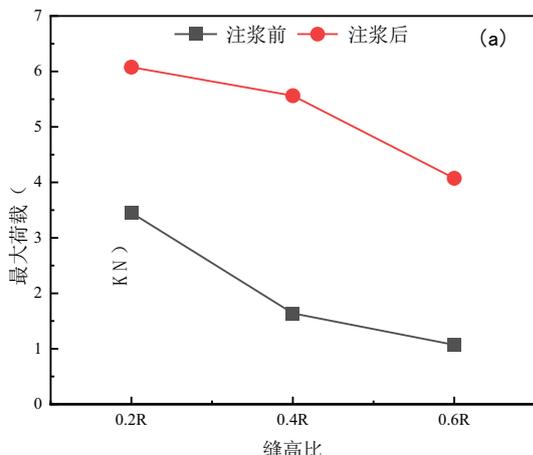


图 11 半圆弯曲试验下不同缝高比聚氨酯 - 水泥稳定碎石试件荷载 - 位移曲线

3.2 最大荷载与破坏位移

分析表 6、表 7 数据，得到注浆前后不同缝高比的水泥稳定碎石材料最大荷载与破坏位移曲线，如图 12 (a)、(b) 所示。可以看出，聚氨酯注浆对水泥稳定碎石材料的弯拉力学性能提升明显。聚氨酯注浆后任意缝高比的聚氨酯 - 水泥稳定碎石试件的最大荷载与破坏位移均得到显著提升：在最大荷载方面，0.2R 试件提升约 175%，0.4R 试件提升约 239%，0.6R 试件提升约 330%。在破坏位移方面，0.2R 试件提升约 100%，0.4R 试件提升约 133%，0.6R 试件提升约 201%。此外，依据受损程度，水泥稳定碎石试件的弯拉力学性能在聚氨酯注浆后可恢复到无损状态下的 80%–120%。



(a) 最大荷载

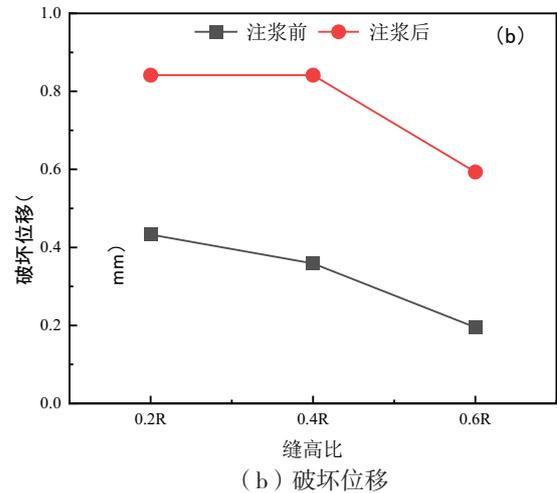


图 12 半圆弯曲试验下不同缝高比聚氨酯 - 水泥稳定碎石试件最大荷载与破坏位移统计图

4 总结

本文设置了不同缝高比的水泥稳定碎石试件来代表水泥稳定碎石基层的裂缝病害的发展情况，通过半圆弯曲试验，探讨了水泥稳定碎石材料的破坏阶段，从最大荷载、破坏位移与断裂能等指标分析了聚氨酯注浆对水泥稳定碎石试件弯拉力学性能的影响规律，主要结论如下：

(1) 对于半圆弯曲试验下试件的破坏阶段，水泥稳定碎石材料呈现出损伤累积、裂缝扩展、失稳破坏三个阶段。聚氨酯 - 水泥稳定碎石材料表现出弹性变形、损伤累积、裂缝扩展、失稳破坏四个阶段。表明聚氨酯注浆改变了水泥稳定碎石材料的损伤破坏发展。

(2) 水泥稳定碎石材料的最大荷载、破坏位移、断裂能随着缝高比的增加逐渐变小。最大荷载逐级平均下降 40%，破坏位移逐级下降约 20%，每级逐级下降约 28%，三种指标均呈近似线性变化，表明对于处于裂缝病害影响下的水泥稳定碎石基层，其实际承载能力的下降速度远超路况表现下降速度。

(3) 聚氨酯注浆对水泥稳定碎石材料弯拉力学性能提升明显，对于任意裂缝病害程度的水泥稳定碎石的最大荷载与破坏位移均提升显著。依据受损程度，水泥稳定碎石试件的弯拉力学性能在聚氨酯注浆后可恢复到无损状态下的 80%–120%，表明对任意裂缝病害程度的水泥稳定碎石基层采用聚氨酯注浆修复技术，为均能极大地恢复甚至提升原路面的承载能力。

参考文献:

- [1] 蔺瑞玉. 半刚性基层抗弯拉性能模型和强度指标关系研究 [D], 长安大学, 2009.
- [2] 罗培峰. 基于半圆弯曲试验的沥青混合料断裂试验方法和评价指标研究 [D], 2017.
- [3] 吴凡. 基于半圆弯曲试验的沥青混合料疲劳愈合性能研究 [D], 2018.
- [4] 徐凯. 基于剩余强度的沥青混凝土耐久性室内研究 [D], 2016.
- [5] 付欣, 刘秋, 陈拴发. 基于 ANSYS 的带切口半圆弯曲试验参数分析 [J]. 公路交通科技, 2012, 29(02): 13-7+28.
- [6] 俞宏峰. 基于半圆弯曲试验的沥青砂浆抗裂性研究 [D], 2019.
- [7] 叶树鹏. 基于 SCB 的老化沥青混合料低温抗裂性能研究 [D], 2022.
- [8] 苏承东, 孙玉宁, 张振华, 等. 饱水对煤层顶板砂岩单轴压缩破坏能量影响的分析 [J]. 实验力学, 2017, 32: 223-31.
- [9] 傅强, 赵旭, 何嘉琦, 等. 基于能量转化原理的混杂纤维混凝土本构行为 [J]. 硅酸盐学报, 2021, 49: 1670-82.