

DOI:10.20035/j.issn.1671-2668.2025.01.013

引用格式:胡峻铭.集料破碎机制对沥青混合料性能的影响[J].公路与汽运,2025,41(1):62-66.

Citation: HU Junming. Effect of aggregate crushing mechanism on properties of asphalt mixture[J]. Highways & Automotive Applications, 2025, 41(1): 62-66.

集料破碎机制对沥青混合料性能的影响

胡峻铭^{1,2,3}

(1.中交四航工程研究院有限公司,广东广州 510230;2.水工构造物耐久性技术交通运输行业重点实验室,广东广州 510230;3.广州港湾工程质量检测有限公司,广东广州 510230)

摘要:一级破碎机制(仅采用颚式破碎机)和二级破碎机制(颚式破碎机+反击式破碎机)对集料形状特征、力学性能和沥青混合料性能具有重要影响。文中运用数字图像分析法分析集料形状特征,并进行集料力学性能和沥青混合料刚度、抗车辙和疲劳开裂性能试验,通过共变量分析二级破碎机制对集料和沥青混合料性能的改善效果。结果表明,相较于采用一级破碎机制破碎的集料,采用二级破碎机制破碎的集料具有更好的形状特征,其力学性能更好;在贝雷法的限定比内,二级破碎集料具有更好的装填特性和抗剪强度;采用二级破碎集料制作的沥青混合料,其车辙、疲劳及动态模量等性能指标较好且更稳定。

关键词:公路;集料;破碎机制;力学性能;形状特征;沥青混合料;抗车辙性能;抗疲劳性能;动态模量

中图分类号:U416.217

文献标志码:A

文章编号:1671-2668(2025)01-0062-05

将母岩加工成集料有不同的机械破碎方法,如反击式、压力式、摩擦式等。岩石的破裂面和断裂点会因破碎机制不同而不同^[1]。集料的性质不仅取决于破碎方式,还取决于料源的性质。同料源集料的形状和纹理会因加工机制不同而不同,集料的几何特性通常取决于母岩的矿物性质和破碎方法等^[2-3]。颚式破碎机和反击式破碎机主要通过磨耗、切割、撞击等方式破碎集料。颚式破碎机通常用于母岩的破碎,两个颚被安置在破碎机的锥形体内(上宽下窄),一个固定,另一个做往复运动,产生压缩力作用于集料颗粒,使颗粒破裂面扩大并减少断点的数量,在压缩力作用下颗粒发生破碎^[4-6]。该破碎方式易产生大量针片状颗粒,必须通过附加破碎来优化颗粒形状。反击式破碎机通常用于二次破碎,它通过马达产生的交替冲击力破碎集料^[7]。经一级破碎后的石块进入反击式破碎机后被旋转的轴辊打碎,颗粒与破碎板及其他颗粒撞击产生更多的立方体颗粒,达到二次破碎整形的目的。反击式破碎机生产的颗粒粒径分布广,材料生产率高,但会消耗大量能量。目前,颚式破碎机和反击式破碎机已广泛用于公路工程用集料的生产,学者们也从破碎机制、破碎技术等方面对破碎机进行了较深入的研究^[8-10]。沈小俊等分析了

集料破碎设备配置对集料性能的影响,研究了标准化集料加工流程及集料筛分工艺和除尘工艺^[11]。本文通过试验分析采用一级破碎机制(仅采用颚式破碎机)和二级破碎机制(颚式破碎机+反击式破碎机)破碎的集料的力学性能及装填特性,运用数字图像分析法分析集料颗粒的形状特征,对比分析采用两种破碎机制破碎集料制作的沥青混合料的性能,分析破碎机制对集料力学性能及沥青混合料性能的影响。

1 集料特性

为探明不同破碎机制对集料特性的影响,采购采用两种破碎机制破碎的集料,分别进行集料力学性能试验和形状特征分析。

1.1 力学性能

分别对采用一级和二级破碎机制破碎的集料进行力学性能试验,试验结果见表1。由表1可知:相较于一级破碎集料,二级破碎集料的冲击值、洛杉矶磨耗值、压碎值、针片状颗粒质量分数分别降低32.1%、26.4%、32.2%、30.8%,捣实密度、表观密度、毛体积密度均有所增加,二级破碎集料的力学性能更好。这是因为经二级破碎后,集料颗粒更加立体,形状特征更好,改善了集料的装填特性。

1.2 形状特征

采用数字图像分析法(DIP)比较不同破碎机制下集料的形状特征。通过专业相机获取集料颗粒的

形状参数,运用 Image-j 软件,通过颗粒的长宽比、形状因子、结构因子、球度、圆度和棱角度量集料的形状特征^[12],结果见表 2。

表 1 不同破碎机制下集料的力学性能

破碎机制	冲击值/ %	洛杉矶磨耗 值/%	压碎值/ %	捣实密度/ ($g \cdot cm^{-3}$)	表观密度/ ($g \cdot cm^{-3}$)	毛体积密度/ ($g \cdot cm^{-3}$)	针片状颗粒质量 分数/%
一级破碎	21.2	28.0	27.3	1.421	1.292	2.618	15.6
二级破碎	14.4	20.6	18.5	1.506	1.372	2.652	10.8

表 2 不同破碎机制下集料的形状特征参数对比

破碎机制	筛孔尺寸/mm	长宽比	形状系数	构造系数	球度	圆度	棱角度指数
二级破碎	13.20	1.719	0.418	0.666	0.582	0.584	1.502
一级破碎		1.816	0.416	0.667	0.558	0.566	1.501
二级破碎	9.50	1.856	0.406	0.616	0.571	0.541	1.637
一级破碎		1.901	0.454	0.659	0.602	0.599	1.524
二级破碎	4.75	2.065	0.442	0.684	0.567	0.486	1.472
一级破碎		1.927	0.443	0.661	0.583	0.520	1.515

由表 2 可知:破碎后集料长宽比随着颗粒尺寸的减小而增大,针片状颗粒增多。形状系数是集料量化的重要参数,形状系数越高,集料的形状特征越好。未通过 13.20 mm 筛孔的集料,其形状系数较小,表明含有更多的针片状颗粒。由于针片状颗粒增多,较细颗粒的形状系数较小,集料的球度值减小,圆度值降低。采用两种破碎机制破碎的集料中,13.20 mm 和 9.50 mm 颗粒的棱角度指数较大,4.75 mm 颗粒的棱角度指数较小,二级破碎制作的 9.50~13.20 mm 集料更好,一级破碎制作的 4.75~9.50 mm 集料更好。

2 沥青混合料性能分析

采用 SBS 改性沥青,其性能试验结果见表 3。采用 SMA 改性沥青混合料。依据贝雷法设计集料级配,并掺入 0.3% 球形纤维素,以提高混合料的抗剥落性能^[13]。

表 3 SBS 改性沥青的性能指标

检测项目	检测结果
针入度/(0.1 mm)	56
5 °C 延度/cm	32
软化点/°C	84

2.1 最佳沥青用量的确定

双面击实 75 次,制成空隙率为 4% 的试件进行

马歇尔试验。试验结果如下:采用一级和二级破碎集料制作的沥青混合料的毛体积密度、理论最大相对密度分别为 2.362 g/cm^3 、2.460 和 2.370 g/cm^3 、2.470;空隙率分别为 3.98%、4.04%;152 °C 时的平均剥落值均小于 0.06;抗拉强度比分别为 0.940、0.895;最佳沥青用量分别为 6.42%、6.38%,采用二级破碎集料制作的沥青混合料,其最佳沥青用量较高,主要是由于其含有更多的立方体颗粒和细集料。

2.2 沥青混合料性能试验与分析

通过三轴试验测试集料回弹模量对应的抗剪强度,通过车辙试验、动态模量试验和单轴重复加载永久变形试验测试由两种集料制作的 SMA 沥青混合料的刚度和抗车辙能力,通过四点小梁弯曲疲劳试验和间接拉伸试验测试沥青混合料的抗疲劳性能^[14]。试件尺寸和性能参数见表 4。

表 4 SMA 沥青混合料试件尺寸和性能参数

试验名称	试件尺寸/mm	平均空隙率/%	变异系数
车辙试验	403×403×40	5.45	0.67
动态模量试验	100(直径)×150	5.12	0.90
四点小梁弯曲疲劳试验	381.0×50.8×50.8	5.23	0.54
间接拉伸试验	150(直径)×62	5.16	1.10
单轴重复加载永久变形试验	150(直径)×62	5.19	0.75

2.2.1 三轴试验

根据《力学-经验法路面设计指南》，回弹模量是一种材料特性参数，由重复加载三轴试验确定，进而测定和比较沥青混合料的抗剪强度和回弹特性。采用击实法分别成型二级、一级破碎集料试件，为直径 150 mm、高 300 mm 的圆柱体试件，最佳含水率分别为 5.99%、5.96%，根据重复加载试验后偏应力和围压评估回弹模量。对两种集料回弹模量预测值和测量值的相关性进行比较，均呈线性关系，相关系数分别为 0.93、0.96，二级破碎集料回弹模量期望值与测量值的差异为 73.33%±5%，一级破碎集料为 73.33%±10%，均处于合理范围。

采用一级、二级破碎集料制作的沥青混合料的剪应力、体积应力与回弹模量的关系分别见图 1、图 2。由图 1、图 2 可知：采用二级破碎集料制作的沥青混合料的回弹模量比一级破碎集料混合料的大，这是因为二级破碎集料较好的形状特征有助于改善其抗剪强度，二级破碎能生产出更多的立方体颗粒，立方体颗粒的抗剪能力强于针片状颗粒。不同围压下，两种混合料的剪应力与回弹模量之间存在良好的线性关系，围压越高，弹性模量随剪应力增长得越快；两种混合料的体积应力与弹性模量之间的关系在不同围压下会发生变化，回弹模量随着体积应力的增大而增大。三轴试验结果与力学性能试验和数字图像分析结果一致。

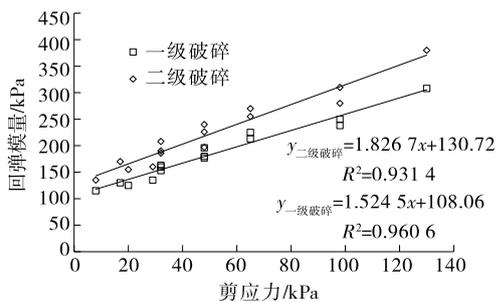


图 1 两种沥青混合料剪应力与回弹模量的关系

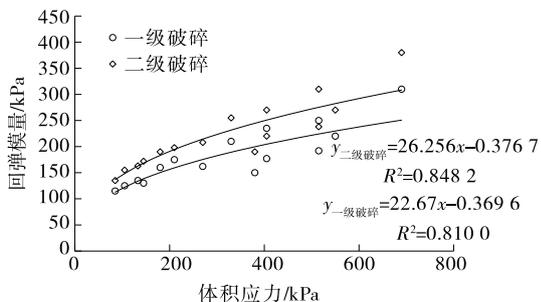


图 2 两种沥青混合料体积应力与回弹模量的关系

2.2.2 车辙试验

通过车辙试验测试沥青混合料的抗车辙能力。试件在 50℃ 温度下经受负荷轮 10 000 次碾压，负荷轮压力为 (700±20) N，限定转速为 53 次/min^[15]。车辙试验结果见图 3。由图 3 可知：采用二级破碎集料制作的沥青混合料的抗车辙能力好于一级破碎集料混合料。二级破碎集料混合料的车辙深度在初段压实时增长速度较高，随着加载次数的增加增长速度减小；一级破碎集料混合料的车辙深度在初段压实时增长速度较小，随着加载次数的增加增长速度增大，累积车辙深度高于二级破碎集料混合料。这是因为二级破碎形成的立方体颗粒在初段压实后，新的骨架排列表现出更好的刚度和抗剪强度。

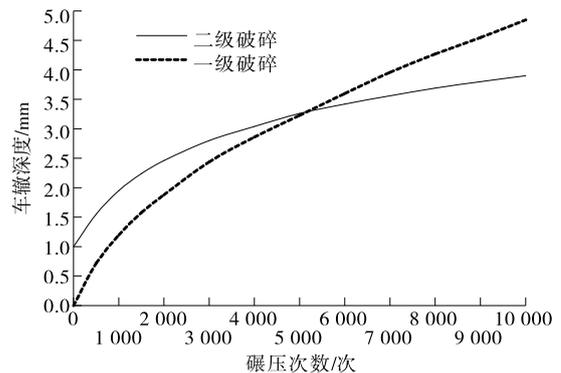


图 3 两种沥青混合料车辙试验结果对比

2.2.3 动态模量试验

动态模量描述应力、应变之间的关系，是沥青路面的一项重要材料属性，可作为路面响应模型参数，预测交通荷载下路面的应力、应变^[16]。采用 Superpave 旋转压实仪制作试件进行动态模量试验，根据试验结果，以 21.1℃ 为基准温度，通过每个温度的单独曲线绘制主曲线图。本文采用以下 s 形函数绘制主曲线图：

$$\log(|E^*|) = \delta + \frac{\alpha}{1 + e^{\beta + \gamma \log(t_r)}}$$

式中： $|E^*|$ 为动态模量； δ 为 $|E^*|$ 的最小值； $\alpha + \delta$ 代表 $|E^*|$ 的最大值； β 、 γ 为 s 形曲线的已知参数； t_r 为基准温度 (21.1℃) 加载时间^[17]。

图 4 为 $|E^*|$ 主曲线图。由图 4 可知：由二级破碎集料制作的沥青混合料的动态模量更高。

2.2.4 间接拉伸试验

用回弹模量表征混合料的抗疲劳性能，通过重复加载间接拉伸试验 (单频) 测定。将空隙率为 5% 的试件切割成直径 150 mm、高 62 mm 的芯样，在

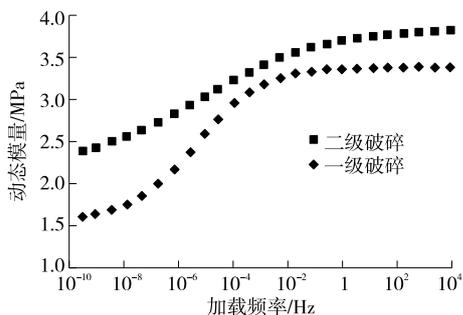


图 4 两种沥青混合料动态模量主曲线图

25 °C 温度下施加持续 1 s、间隔 0.9 s 的正弦波荷载,得到芯样的回弹模量。在 25 °C 温度下,采用一级破碎集料制作的沥青混合料的回弹模量(3 150 MPa)低于由二级破碎集料制作的沥青混合料的回弹模量(4 537 MPa),二级破碎集料混合料的抗疲劳和抗永久变形(车辙)能力更好。

2.2.5 重复荷载永久变形试验

分别对两种沥青混合料进行单轴重复荷载试验,分析缓慢加载速率对蠕变劲度的影响^[18]。采用 UTM-5P 单轴试验机对试件进行应力测试,施加固定大小和周期的重复荷载,通过累积应变参数得到混合料永久变形性能与车辙深度的关系。在施加荷载前,在规定温度下对试件施加持续时间 100 s、大小为 10 kPa 的压力,对试件施加 3 600 个周期的重复正弦脉冲荷载,荷载大小为 300 kPa,脉冲宽度和脉冲周期为 1 000 ms/次。随着脉冲荷载的施加,试件中储存的应变能产生永久变形(见图 5)。利用永久应变可预测特定应力下混合料的蠕变劲度。由图 5 可知:由二级破碎集料制作的沥青混合料的蠕变劲度优于一级破碎集料混合料,其抗永久变形能力更强。

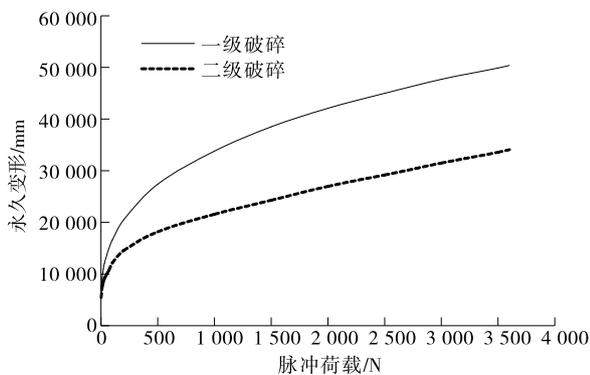


图 5 单轴重复荷载永久变形试验结果

2.2.6 四点弯曲疲劳试验

通过四点弯曲疲劳试验评估沥青面层在交通荷

载反复作用下的疲劳寿命。在环境控制室进行四点弯曲疲劳试验,加载频率为 5 Hz,观察一定疲劳循环次数后 800×10^{-6} 应变产生的疲劳裂纹,相应的疲劳循环次数称为疲劳寿命^[19-22]。重复荷载对两种沥青混合料应变的影响见图 6。由图 6 可知:由二级破碎集料制作的沥青混合料的疲劳寿命高于由一级破碎集料制作的混合料的疲劳寿命,且其曲线斜率更小,表明颗粒形状对沥青混合料性能有一定影响。

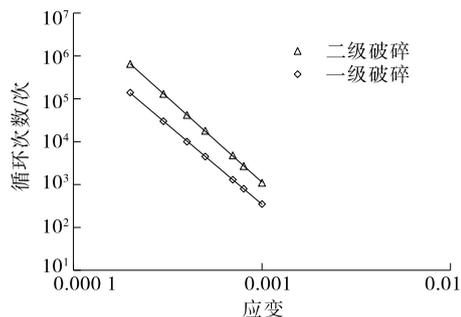


图 6 重复荷载对两种沥青混合料应变的影响

动态模量试验获得的疲劳参数和四点弯曲疲劳试验获得的疲劳寿命见图 7。由图 7 可知:沥青混合料的疲劳寿命随着动态模量因子的增大而增大,由二级破碎集料制作的混合料的两参数之间的线性关系较好($R^2=0.825 0$),而由一级破碎集料制作的混合料的两参数之间的线性关系较差。

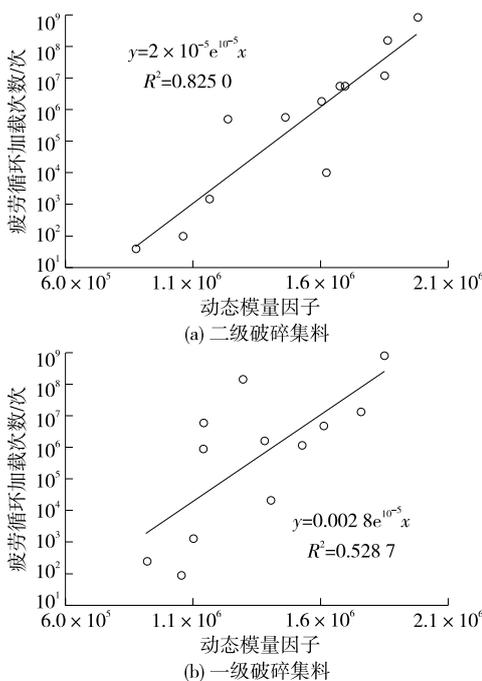


图 7 两种沥青混合料的疲劳寿命与动态模量对比

3 结论

本文通过对同一料源、采用两种破碎机制[颞式破碎+反击式破碎(二级)和颞式破碎(一级)]破碎的集料进行力学性能及形状特征分析,并对采用两种集料制作的沥青混合料进行刚度、抗车辙和抗疲劳开裂等试验,结论如下:

(1) 二级破碎运用反击力进行破碎,可生产更多的立方体颗粒,二级破碎集料具有更低的冲击值、磨损值、压碎值和针片状颗粒质量分数,捣实密度、表观密度、毛体积密度等增大,其力学性能优于一级破碎集料。

(2) 二级破碎集料的整体长宽比较小,形状系数、球度、圆度和棱角度较高,其形状特征比一级破碎集料更好。在贝雷法定限范围内,二级破碎集料表现出更好的装填特性,且成型的沥青混合料具有更高的抗剪强度,而一级破碎集料难以达到最佳密实度。

(3) 分别采用二级、一级破碎集料制作 SMA 改性沥青混合料,通过三轴试验测定回弹模量对应的抗剪强度,通过车辙试验、动态模量试验、单轴重复加载永久变形试验、四点弯曲疲劳试验、间接拉伸试验测试沥青混合料的刚度、抗车辙和抗疲劳开裂性能,结果显示由二级破碎集料制作的沥青混合料的各项性能均优于一级破碎集料混合料。

参考文献:

- [1] 廖科.反击式破碎机破碎作用分析及对集料颗粒形状的影响研究[D].重庆:重庆交通大学,2021.
- [2] 李冬飞,张海,王超.单颗粒岩石在反击式破碎机内的破碎机理研究[J].机械工程师,2019(6):16-20.
- [3] 艾振喜,王志刚.沥青面层碎石加工设备选型及关键技术探讨[J].公路,2021,66(8):55-60.
- [4] 赵小春.基于图像分析的路用集料级配和形态检测方法与应用研究[D].西安:长安大学,2022.
- [5] 吴晓明.基于数字图像处理的集料几何特征研究[D].西安:长安大学,2018.
- [6] 王凤,肖月,崔培德,等.集料形态特征对沥青混合料性能影响规律的研究进展[J].材料导报,2022,36(17):95-107.
- [7] COUTINHO Y, MONTEFALCO L, CARNEIRO A. Influence of aggregate crushing on the results of accelerated alkali-silica reactivity tests[J].Construction and Building Materials,2022,325:126737.
- [8] 彭勇,范亮平,周建华,等.集料分布状态及其与沥青混合料性能研究进展[J].中外公路,2014,34(4):298-305.
- [9] 高磊,解建光,吴成浩,等.基于粗集料形状特征的沥青混合料三维数字试件生成[J].东南大学学报(自然科学版),2017,47(4):793-798.
- [10] 刘钢,赵明志,陆瑞,等.碎石颗粒形态特征及其与堆积特性的关系[J].岩土力学,2019,40(12):4644-4651.
- [11] 沈小俊,石飞,李铁军,等.沥青路面集料标准化加工技术和工艺探讨[J].公路与汽运,2014(2):126-128.
- [12] 杜小婷,汪海年.基于图像分析的粗集料三维形态指标研究[J].公路,2013,58(8):250-254.
- [13] 王泽宇,魏建国,李平.基于贝雷法参数的 AC-20 型沥青混合料优化设计[J].中外公路,2017,37(5):272-275.
- [14] 王燕芳,敖清文,石帅锋,等.基于三轴剪切试验的沥青混合料抗车辙性能研究[J].公路,2020,65(9):259-263.
- [15] 陈杰,榻炜安,熊剑平,等.沥青混合料高温性能评价指标研究[J].中外公路,2020,40(2):68-72.
- [16] 胡旅洋,郑群华,余峰,等.基于同一时温等效因子绘制轴横向动态模量主曲线[J].武汉理工大学学报(交通科学与工程版),2019,43(1):146-152.
- [17] 王昊鹏,杨军,施晓强,等.高模量沥青混合料动态模量及其主曲线研究[J].公路交通科技,2015,32(8):12-17.
- [18] 赵毅,郭志敏,梁乃兴.沥青混合料永久变形黏弹性力学模型通用性研究[J].公路工程,2018,43(2):192-196+200.
- [19] 袁海,朱洪洲,魏巧,等.沥青疲劳试验方法评价[J].中外公路,2020,40(3):241-246.
- [20] 陈浩浩,吴少鹏,刘全涛,等.沥青的疲劳性能评价方法研究[J].武汉理工大学学报,2015,37(12):47-52.
- [21] 张平,何延兵.SBR/PP 复合聚合物及 SBS 改性沥青混合料疲劳特性研究[J].公路与汽运,2023(5):68-71+86.
- [22] 王兴昌,李灏,方星,等.SMA 沥青混凝土断裂与疲劳性能试验研究[J].公路,2011,56(9):196-200.

收稿日期:2024-01-20