

# 水泥路面改性环氧磨耗层骨料形状特征分析与评价

李晶晶<sup>1,2</sup>, 张 擎<sup>1</sup>, 陈忠达<sup>1</sup>

(1. 长安大学公路学院, 陕西 西安 710064; 2. 陕西交通职业技术学院公路与铁道工程学院, 陕西 西安 710018)

**摘要** 目的 分析水泥路面改性环氧树脂磨耗层骨料形状特征, 建立评价指标体系, 推荐抗剥落性最好的骨料类型. 方法 利用骨料图像测量系统和数字图像处理技术, 对4种骨料的轮廓形状、棱角性和表面纹理等形状特征进行量化研究, 建立二级评价体系, 利用层次分析法计算各级指标权重, 进而对4种骨料的抗剥落性进行评估. 结果 玄武岩、花岗岩、石灰岩和辉绿岩4种骨料的针状性相似; 玄武岩和辉绿岩的圆度和球度更接近于1, 对应的抗滑耐磨性能优于花岗岩和石灰岩; 石灰岩的棱角度数值最高, 其次是花岗岩, 最后是玄武岩和辉绿岩; 表面纹理指数越高, 细观纹理性能越优异, 凹凸的粗糙表面也就越多; 计算4种骨料的骨料形状特征综合评价指标  $A_{sc}$  值, 指出玄武岩是最理想的磨耗层骨料类型, 辉绿岩次之; 并利用玄武岩骨料铺筑一油一石和两油两石的实体工程, 半年后检测两种施工工艺的抗拉强度和剪切强度均大于1.50 MPa, 满足粘结强度的要求. 结论 利用层次分析法计算指标权重, 结合骨料形状特征综合评价指标的计算, 选择水泥路面改性环氧磨耗层骨料, 为工程中预防性养护的进一步发展打下理论基础.

**关键词** 道路工程; 环氧树脂磨耗层; 骨料; 形状特征

中图分类号 TU528.041 文献标志码 A

## Aggregate Shape Analysis and Evaluation of Modified Epoxy Wear Layer for Cement Pavement

LI Jingjing<sup>1,2</sup>, ZHANG Qing<sup>1</sup>, CHEN Zhongda<sup>1</sup>

(1. School of Highway, Chang'an University, Xi'an, China, 710064; 2. School of Highway and Railway Engineering, Shanxi College of Communication Technology, Xi'an, China, 710018)

**Abstract:** The aggregate shape characteristics of modified epoxy wear layer for cement concrete were analyzed, the evaluation index system was established, and then the best aggregate was recommended. The shape characteristics and surface texture of four kinds of aggregate were quantita-

收稿日期: 2017-07-10

基金项目: 国家自然科学基金项目(51508030); 陕西省交通运输厅科研项目(14-09K); 陕西交通职业技术学院院级科研项目(YJ17006)

作者简介: 李晶晶(1985—), 女, 博士研究生, 主要从事路面材料与结构方面的研究.

tively studied by using aggregate image measurement system and digital image processing technology. Based on the analysis of the skid resistance and the anti-peeling property of the aggregate, the secondary evaluation system of modified epoxy wear layer of cement pavement was proposed, and the weight of the index is calculated by the analytic hierarchy process. The anti-peeling properties of four aggregates were evaluated. The results show that the acicularity of basalts, granites, limestone and diabase are similar. The roundness and sphericity of basalt and diabase are closer to 1, and the corresponding skid resistance is better than granite and limestone. The angle value of limestone is the highest value, followed by granite, and finally basalt and diabase. The higher the surface texture index, the better the fine texture performance, the more thorough surface. The aggregate shape characteristics  $A_{sc}$  values of the four aggregates indicate that the basalt is the ideal type of wear layer, followed by diabase. The engineering of one oil and one stone, two oil and two stone was paved by using the basalt aggregate, after six months, both the tensile strength and shear strength are greater than 1.50 MPa, it meets the bonding strength requirements. The weight of the index was calculated by using the analytic hierarchy process, then the evaluation index of aggregate shape characteristics was calculated. The best aggregate is selected by the index for the modified epoxy wear layer for cement pavement, which can lay the theoretical basis for the prevention.

**Key words:** road engineering; epoxy wear layer; aggregate; shape characteristics

水泥路面改性环氧磨耗层结构是在旧水泥路面上加铺骨料和改性环氧树脂黏结材料,其中骨料的性质对其抗滑性能有重要影响,尤其是骨料的形状特征<sup>[1-2]</sup>会影响改性环氧磨耗层空间骨架的构建和表面构造深度,进而影响到水泥路面改性环氧磨耗层结构的抗滑性能,最终对水泥路面的综合路用性能起到重要影响。

骨料对抗滑磨耗层耐久性的影响主要包括<sup>[2-4]</sup>:一是在结构层内部,骨料与改性环氧树脂黏结材料间的粘结性能,它会影响骨料的抗剥落性能,其中影响粘结强度的骨料因素有骨料的粒径、轮廓形状、表面纹理和骨料自身材料类型等;二是骨料在磨耗层表面形成的抗滑构造在使用过程中的抗耐磨程度,影响耐磨性能的骨料因素有骨料自身强度、骨料空间形状特性等。因此,水泥路面抗滑磨耗层的骨料选择与评价可从骨料类型以及形状特征着手,其中形状特征主要包括轮廓形状、棱角性和表面纹理。汪海年等<sup>[2]</sup>利用粗集料形态特征系统,利用轴向系数和圆度两个指标来描述粗集料的二维形状特征;唐伯明等<sup>[3]</sup>对沥青混凝土再生集料的棱角性进

行分析,用球形度和粗糙度两个指标来分析集料的变化特性;彭波<sup>[5]</sup>对沥青混合料集料几何特性与结构进行系统研究,分析集料对沥青混合料的高温性能以及耐久性的影响,提出细集料填充敏感性评价指标;林辉<sup>[6]</sup>采用 CCD 相机和逆光箱获取粗集料图像,对粗集料图像进行识别,获取颗粒数据,选取 4 个轮廓形状量化指标和 4 个棱角性量化指标进行分析,指出它们之间的相关性;胡力群等<sup>[7]</sup>采用洛杉矶磨耗机对粗集料进行磨耗,分析 12 种 OGFC 沥青混合料的棱角性综合值,并分析 OGFC 的马歇尔稳定度、动稳定度、空隙率和抗滑性能;赵键<sup>[8]</sup>建立了一种有效的基于小波帧变换包的纹理分类方法,并对该方法的分类性能和计算效率进行分析,表明优于现有的分类方法;K. S. Thyagarajan 等<sup>[9]</sup>利用小波帧变化机理对集料的纹理性进行分析,指出该方法的优越性;秦雪<sup>[10]</sup>对粗集料和细集料的形状特征参数进行研究,指出高路用性能的集料几何特性指标及规律。参考文献[11-15]采用三维激光技术对骨料的表面形状和棱角性进行量化分析,指出集料形状特征与路面结构性能之间的关

系.国内外对于骨料的研究主要集中在沥青混合料骨料特性及其对力学性能、疲劳开裂、结构特性等方面,对于水泥路面改性环氧磨耗层骨料的研究比较少见,而骨料形状特征对其耐久性有重要影响.因此,笔者对水泥路面改性环氧磨耗层骨料形状特征进行试验分析,结合骨料抗剥落性评价,选出适合抗滑磨耗层的骨料类型.

## 1 试验

### 1.1 骨料类型

目前水泥路面抗滑骨料类型较多,考虑大规模使用方便及施工成本,笔者选取陕西省商洛市商州区兴达石料厂开采并加工的玄武岩、花岗岩、石灰岩,河北石家庄兴隆鑫鑫石料厂生产的辉绿岩进行对比研究.加铺磨耗层应在实现抗滑耐磨性能基础上尽量减小其厚度,骨料粒径不宜过大,以降低改性环氧树脂粘结材料的用量,骨料粒径也不宜过小,否则很难提供足够的构造深度,抗滑性能不满足行车安全.因此,磨耗层骨料粒径选用4.75~9.50 mm,测定其技术指标如表1所示.

表1 骨料的技术性能指标

Table 1 Technical performance indicators of aggregate %

骨料	洛杉矶磨耗损失	磨光值	压碎值
玄武岩	8	46	8
辉绿岩	8	44	9
花岗岩	12	46	11
石灰岩	17	43	18

骨料的洛杉矶磨耗损失值、磨光值和压碎值与骨料的抗滑耐磨性能以及骨料与改性环氧树脂间的粘结性能有很大关系.分析表1可知,洛杉矶磨耗损失:玄武岩与辉绿岩相同,且与花岗岩、石灰岩依次减小,而骨料的洛杉矶磨耗损失越小,骨料越坚硬,耐磨性能越好,表明玄武岩与辉绿岩的耐磨性能最优;磨光值:玄武岩与花岗岩相同,且与辉绿岩、

石灰岩依次减少,磨光值反映骨料的抗滑性能,表明玄武岩和花岗岩抗滑性能最优、压碎值:石灰岩、花岗岩、辉绿岩、玄武岩依次减少,压碎值反映骨料抵抗压碎的能力.虽然通过骨料的技术性能指标宏观分析了骨料的耐磨性能,但未从细观角度量化分析,因此笔者利用骨料图像测量系统和数字图像处理技术对骨料的形状特征进行分析.

### 1.2 试验方法

骨料形状特征主要包括轮廓形状、棱角性和表面纹理三个方面<sup>[2,5-6]</sup>,其中轮廓形状反映了骨料在空间分布上的总体变化,棱角性反映了骨料在转角处的变化,表面纹理反映了在一定范围内骨料表面凹凸不平的情况(见图1).

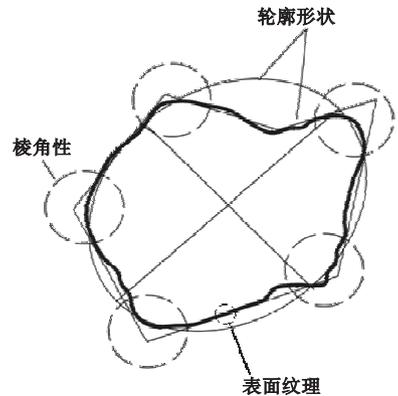


图1 骨料形状特征

Fig. 1 Aggregate shape characteristics

集料图像测量系统(AIMS)是一种可以测量骨料形状、棱角和纹理的仪器(见图2).

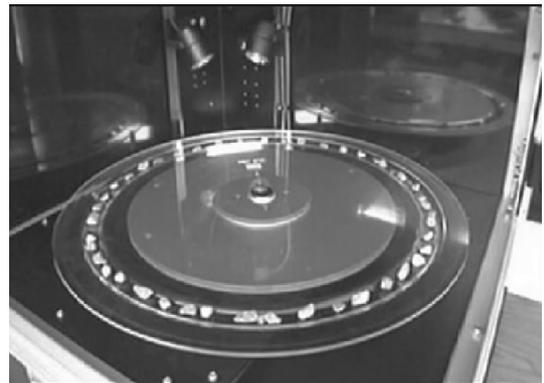


图2 AIMS 检测图

Fig. 2 AIMS detection picture

AIMS 工作原理为对摆放一周的 50 颗骨料利用高精度对焦相机一一拍照,得到每颗骨料的二维投影图像,获取骨料每个凸点处的长度、宽度、等效椭圆的主轴长度、次轴长度、颗粒边界的周长、面积、与水平方向的夹角、骨料边数、梯度方向角等参数.综合国

内外研究成果<sup>[6-15]</sup>,根据 AIMS 测量数据,确定基于图像的骨料形状特征指标如表 2 所示,利用计算得到的骨料轴向系数、形状因子、圆度和球度来描述轮廓形状,梯度角来分析棱角性,通过小波理论来量化表面纹理.

表 2 骨料形状特征的指标

Table 2 Indicators of aggregate shape characteristics

状特征	名称	计算公式	符号含义	指标含义
	轴向系数 $K_A$	$K_A = L_{A,\max} - L_{A,\min}$	$L_{A,\max}$ 、 $L_{A,\min}$ 分别为骨料颗粒等效椭圆的主轴和次轴长度	颗粒的针状性
轮廓 形状	形状因子 $F$	$F = d_s / \sqrt{d_1 d_i}$	$d_1$ 、 $d_s$ 、 $d_i$ 分别为颗粒的最大、最小和中间尺寸	颗粒的形状特征
	圆度 $R$	$R = \frac{l^2}{4\pi A}$	$l$ 为颗粒边界的周长; $A$ 为颗粒图像的面积	颗粒接近圆的程度
	球度 $S$	$S = \sqrt[3]{d_1 d_i / d_s^2}$	符号含义同上	颗粒接近球形的程度
棱角性	棱角度 $I$	$I = \frac{1}{n/3 - 1} \sum_{i=1}^{n-3}  \theta_i - \theta_{i+3} $	$n$ 为骨料边界点数总和; $i$ 为骨料边界的第 $i$ 点; $\theta_i$ 为第 $i$ 点的梯度方向角; $\theta_{i+3}$ 为第 $i+3$ 点的梯度方向角	颗粒轮廓上角度的变化
表面 纹理	表面纹理指数 $W$	$W = \frac{1}{3N} \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^N (D_{i,j}(x,y))^2$	$N$ 为分解等级; $i$ 为 1,2,3 对应的 3 个纹理图像; $j$ 为小波系数指数; $D_{i,j}(x,y)$ 为第 $i$ 个纹理图像 $j$ 个小波系数指数对应的纹理值	颗粒表面的 微观纹理变化

## 2 骨料形状特征分析

### 2.1 轮廓形状

轮廓形状是人眼最容易分辨出的一种特征,可以通过轴向系数、形状因子、圆度等指标来表征.利用骨料图像测量系统 AIMS 对选取的玄武岩、花岗岩、石灰岩和辉绿岩进行外形扫描(见图 3),提取扫描图像中骨料颗粒最长边、最短边、边界周长、边界面积、等效椭圆的最长轴和最短轴尺寸,利用表 2 轮廓形状参数的计算公式,得到 4 种骨料的轮廓形状特征值(见图 4).

从图 4 可以看出,玄武岩、花岗岩、石灰岩和辉绿岩 4 种骨料的轴向系数相差不大,仅 1.5%,说明它们颗粒主轴与次轴比较接近,针状性相似;形状因子反映了骨料的形状

变化,其值越大,表明形状变化越小,颗粒越均匀;骨料圆度和球度越接近于 1,其形状越接近于圆形和球形,说明玄武岩和辉绿岩的圆度和球度高于花岗岩和石灰岩,其圆度和球度的提高可以提高骨料的抗滑耐磨性能,但是会降低骨料和改性环氧树脂黏结材料间的剥落性能.

骨料的抗滑性和抗剥落性是水泥路面改性环氧磨耗层选择骨料时主要考虑的两个因素.虽然圆度和球度大的骨料会使比表面积变小,但是其抗滑性能优于圆度和球度小的骨料,而磨耗层最重要的性能是抗滑性能,因此,在选择骨料时,可以选择合适的改性环氧黏结材料来弥补其骨料抗剥落性的不足,尽量选择圆度和球度接近于 1 的骨料.

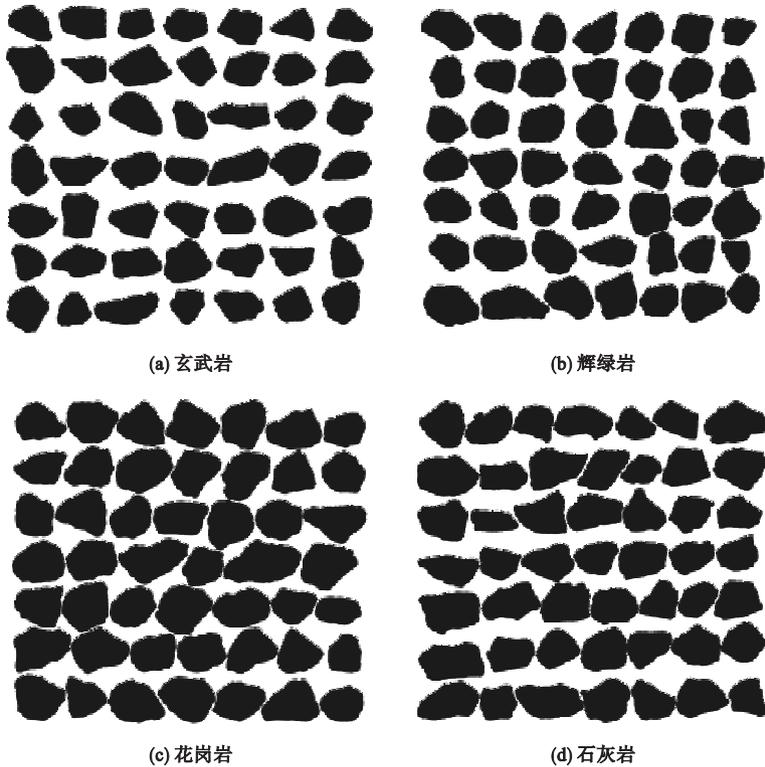


图3 骨料外形扫描图

Fig. 3 Scanning shape of four aggregates

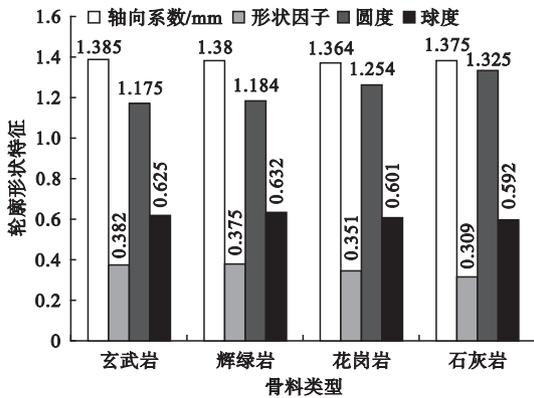


图4 骨料的轮廓形状特征

Fig. 4 Shape feature of aggregates

### 2.2 棱角性

借助骨料图像测量系统 AIMS 对玄武岩、花岗岩、石灰岩和辉绿岩进行外形扫描得到的数据,利用表2棱角性参数的计算公式,得到4种骨料的棱角度(见图5)。

分析图5可知,棱角度数大小依次为:石灰岩、花岗岩、玄武岩、辉绿岩,但是整体变化幅度不大。棱角度数值越大,表明骨料棱角性

越多,表面越粗糙,内摩擦角越大,与改性环氧树脂具有更好的接触性,对应的粘结强度也就越大,抗剥落性越强。在轮廓形状分析中形状因子也可以间接地表征骨料的棱角性,它得出的结论与棱角度数值分析是一致的,由此可见,仅从棱角性方面考虑,石灰岩的抗剥落性最好,但具体在磨耗层骨料类型选用时,需综合考虑。

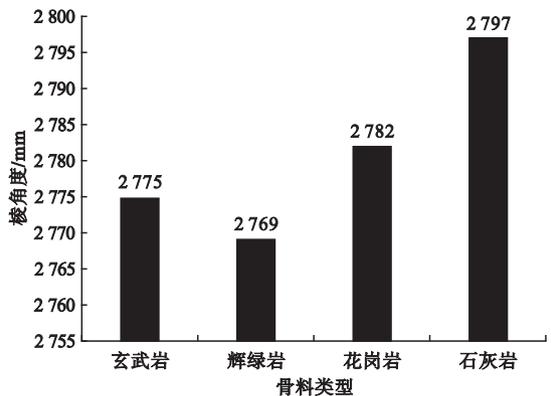


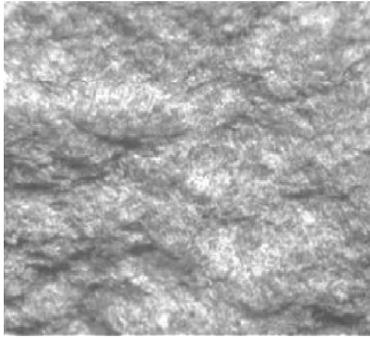
图5 骨料的棱角度

Fig. 5 Angularity of aggregates

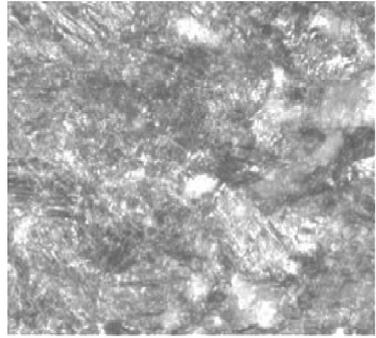
## 2.3 表面纹理

借助骨料图像测量系统 AIMS 对玄武岩、花岗岩、石灰岩和辉绿岩进行表面纹理扫描,表面纹理在图像中是由像素灰度强度值呈现(见图6)。表面纹理指数的计算是基于

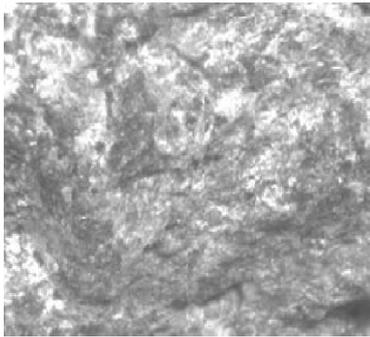
小波理论,对骨料图像的表面纹理变化进行分解与分离,通过小波分析中的短高频基函数和长低频基函数来完成。通过提取数据计算4种骨料的表面纹理指数(见图7)。



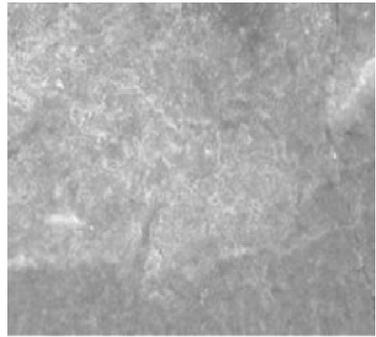
(a) 玄武岩



(b) 辉绿岩



(c) 花岗岩



(d) 石灰岩

图6 骨料表面纹理扫描图

Fig. 6 Surface texture of four aggregates

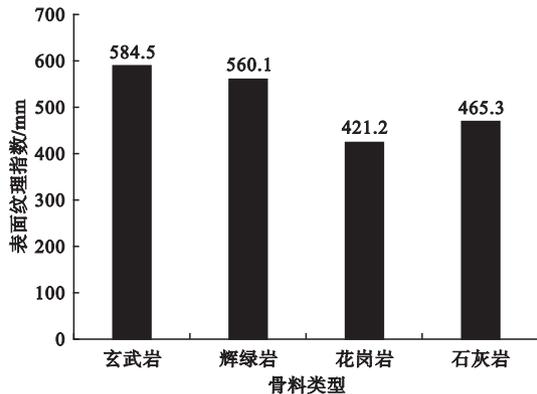


图7 骨料的表面纹理指数

Fig. 7 Surface texture index of aggregates

从图7可以看出,玄武岩的表面纹理指数最高,比花岗岩的表面纹理指数高27.9%,这主要与骨料的岩石种类、成岩机理和破碎机理

等因素有关。玄武岩和辉绿岩的表面纹理指数高,细观纹理性能优异,凹凸的粗糙表面也多,与改性环氧树脂黏结材料有良好的接触,在碾压后能相互嵌挤锁结而具有很大的内摩擦角,从而提高磨损层结构的抗剥落性。

## 3 骨料抗剥落评价

### 3.1 形状特征综合评价指标

骨料对水泥路面改性环氧磨损层抗剥落性的影响指标主要有轮廓形状、棱角性和表面纹理,4种骨料的形状特征参数有明显的差异,球度、圆度越大的骨料对磨损层的抗剥落性越不利,而表面纹理越粗糙却可以增强骨料与黏结材料嵌挤时的内聚力,棱角性好

的骨料有助于提高磨耗层的抗剥落性. 综合比较4种骨料,辉绿岩、玄武岩的性质相差无几,其球度、圆度更接近于球、圆,棱角性小,不利于磨耗层的抗剥落性,但其表面纹理明显优于石灰岩和花岗岩;石灰岩的球度、圆度有利于磨耗层的抗剥落性,棱角性大,但是表面纹理弱于玄武岩和辉绿岩. 水泥路面改性环氧磨耗层的骨料类型选择得如何,会直接影响其抗滑性能和抗剥落性能,从而影响水泥路面的耐久性能和使用寿命. 骨料形状特征综合评价指标  $A_{sci}$  数值越大,表明抗剥落和耐磨性能越好.

$$A_{sci} = \frac{1}{6} (K_{Ai} \omega_1 + F_i \omega_2 + R_i \omega_3 + S_i \omega_4 + I_i \omega_5 + W_i \omega_6). \quad (1)$$

式中: $A_{sci}$ 为第*i*骨料形状特征综合评价指标; $K_{Ai}$ 为第*i*种骨料的轴向系数; $F_i$ 为第*i*种

骨料的形状因子; $R_i$ 为第*i*种骨料的圆度; $S_i$ 为第*i*种骨料的球度; $I_i$ 为第*i*种骨料的棱角度; $W_i$ 为第*i*种骨料的表面纹理指数; $\omega_1$ 为轴向系数的权重值; $\omega_2$ 为形状因子的权重值; $\omega_3$ 为圆度的权重值; $\omega_4$ 为球度的权重值; $\omega_5$ 为棱角度的权重值; $\omega_6$ 为表面纹理指数的权重值.

### 3.2 抗剥落性评价

(1) 利用层次分析法计算权重

对4种骨料的抗剥落性进行评价,关键是确定各个指标的权重. 在此利用层次分析法(AHP)确定各指标的权重<sup>[16-20]</sup>,骨料的抗剥落性主要与骨料的形状特征有关,笔者提出水泥路面改性环氧磨耗层骨料形状特征评价体系(见图8). 把每个层次结构上的因素两两进行比较,构建判断矩阵,再利用AHP的计算方法得到各个因素的指标权重.

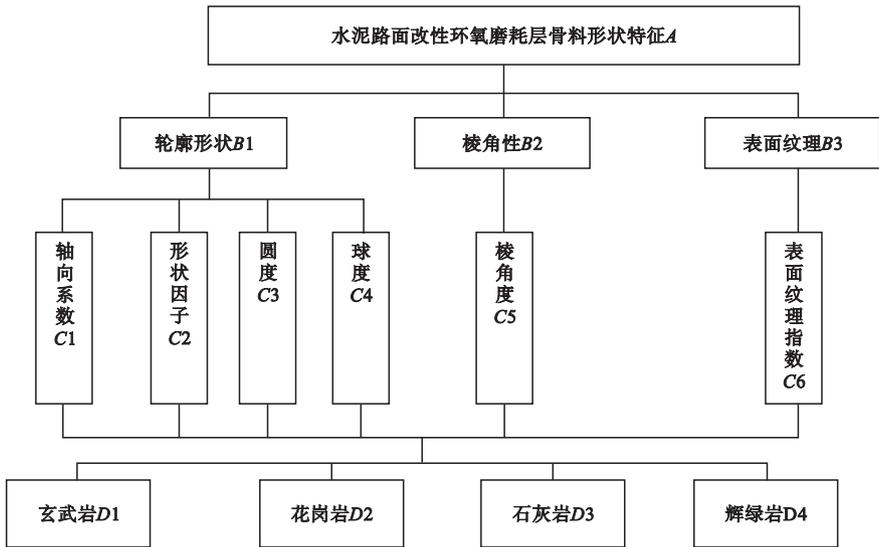


图8 骨料形状特征评价体系

Fig. 8 Evaluation system of aggregate shape

①构建判断矩阵. 层次分析法通常是用1~9的数字来判断两指标的重要性,其比例标度及含义见表3. 对20位专家进行调查<sup>[16-20]</sup>,统计分析回收的调查表,形成各个层次的判断矩阵.

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 1/3 & 1/5 \\ 3 & 1 & 1/4 \\ 5 & 4 & 1 \end{bmatrix},$$

$$B = \begin{bmatrix} 1 & 1/2 & 1/3 & 1/3 \\ 2 & 1 & 1/2 & 1/3 \\ 3 & 2 & 1 & 1/2 \\ 3 & 3 & 2 & 1 \end{bmatrix}.$$

表3 比例标度及含义

Table 3 The proportional scale value and its meaning

标度	含义
1	表示两个元素相比,具有同样重要性
3	表示两个元素相比,前者比后者稍重要
5	表示两个元素相比,前者比后者明显重要
7	表示两个元素相比,前者比后者强烈重要
9	表示两个元素相比,前者比后者极端重要
2,4,6,8	表示上述相邻判断的中间值
倒数	若元素 <i>i</i> 与 <i>j</i> 的重要性之比为 $a_{ij}$ ,
	那么元素 <i>j</i> 与元素 <i>i</i> 重要性之比为 $a_{ji} = \frac{1}{a_{ij}}$

② 计算权向量. 利用公式  $w_i =$

$$\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (a_{ij} / \sum_{k=1}^n a_{kj})$$

计算各指标的权向量.

$$W_A = [0.103\ 8, 0.231\ 1, 0.605\ 1]^T,$$

$$W_B = [0.107\ 2, 0.165\ 1, 0.283\ 2, 0.444\ 5]^T.$$

③ 一致性检验. 利用公式  $\lambda_{\max} =$

$$\sum_{i=1}^n \frac{(AW)_i}{nW_i}$$

计算各判断矩阵的最大特征值.

$$\lambda_{\max A} = 3.086\ 9, \lambda_{\max B} = 4.072\ 1.$$

再利用公式  $CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1}$  和  $CR = \frac{CI}{RI}$ , 进行判断矩阵一次性检验.

$CR_A = 0.077\ 6 < 0.10$ ,  $CR_B = 0.024\ 7 < 0.10$ , 表明两个判断矩阵的一致性可以接受.

④ 计算形状特征各指标权重. 分析并计算水泥路面改性环氧磨耗层骨料形状特征评价指标的各权重为

$$W = [0.011\ 1, 0.017\ 1, 0.029\ 4, 0.046\ 2, 0.023\ 11, 0.665\ 1]^T$$

(2) 4种骨料抗剥落性评价

结合骨料形状特征综合评价指标计算公式和权重的计算结果, 得出4种骨料的  $A_{sc}$  (见图9). 从图9可以看出, 玄武岩与辉绿岩的  $A_{sc}$  值明显高于石灰岩、花岗岩,  $A_{sc}$  值越大, 对应的抗剥落性能越强, 表明玄武岩与辉绿岩的抗剥落性能要优于石灰岩和花岗岩, 而在选择磨耗层骨料类型时还需考虑其抗滑性能, 而玄武岩和辉绿岩的球度、圆度更接近

于1, 表明其有更圆滑的形状, 不易被磨光, 抗滑性能好. 因此, 综合考虑抗剥落性和抗滑性, 玄武岩是最理想的磨耗层骨料类型, 辉绿岩次之.

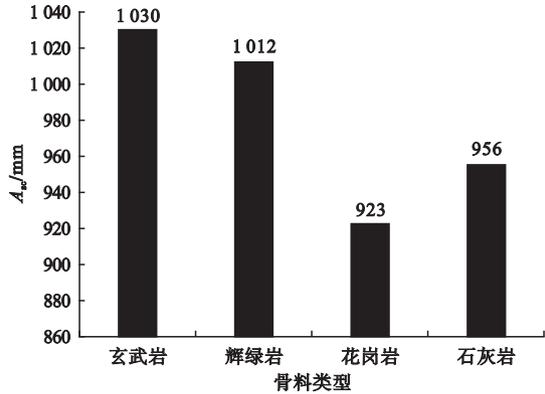


图9 4种骨料形状特征综合值

Fig. 9  $A_{sc}$  of four aggregates

### 3.3 工程实例验证

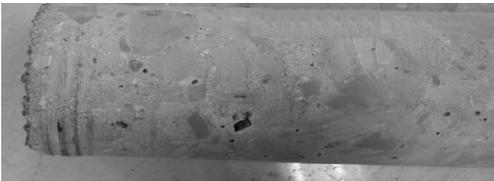
福银高速(G70)漫川关段某隧道作为试验路铺筑改性环氧树脂磨耗层, 为增大隧道水泥混凝土路面与抗滑磨耗层粘结性能, 更好清除路表面油污、松散, 隧道路面加铺前采用微铣刨工艺进行处治, 在施工过程中主要采用单层(一油一石)施工工艺为一层改性环氧树脂+一层2.36~4.75 mm单一粒径骨料; 双层(两油两石)施工工艺为一层改性环氧树脂+一层4.75~9.5 mm单一粒径骨料+一层改性环氧树脂+一层2.36~4.75 mm单一粒径骨料, 试验路段所用的骨料均为陕西省商洛市商州区兴达石料厂开采并加工的玄武岩(见图10).

加铺半年后, 从外观来看单层和双层施工工艺的抗剥落性均良好, 结构没有发现明显病害, 对其进行钻芯取样(见图11), 进行粘结强度试验(见表4). 分析表4可知, 经过半年的运营, 一油一石施工工艺的抗拉强度和剪切强度均在2.2 MPa以上, 两油两石施工工艺的抗拉强度和剪切强度均在1.83 MPa以上, 均大于1.50 MPa, 满足粘结材料的性能要求.

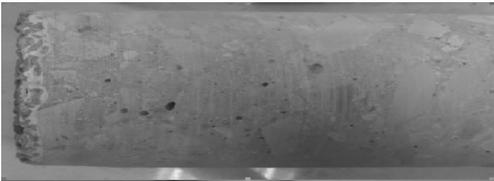


图 10 玄武岩骨料

Fig. 10 Basal aggregate



(a)一油一石



(b)两油两石

图 11 不同施工工艺的芯样

Fig. 11 Core sample of different construction technology

表 4 半年后粘结强度

Table 4 The bond strength after six months

工艺	抗拉强度/MPa	剪切强度/MPa
两油两石	1.83	2.28
一油一石	1.96	2.20

## 4 结 论

(1)玄武岩、花岗岩、石灰岩和辉绿岩 4 种骨料的轮廓形状特征相似,玄武岩和辉绿岩的性质相差无几,其球度、圆度更接近于球、圆,棱角性小,不利于磨耗层抗剥落性的发挥。

(2)棱角度数值大小依次为:石灰岩、花岗岩、玄武岩、辉绿岩,但是整体变化幅度不

大.棱角度数值越大,表明骨料棱角性越多,表面越粗糙,内摩擦角越大,与改性环氧树脂具有更好的接触性,对应的粘结强度也就越大,抗剥落性越强。

(3)表面纹理指数越高,细观纹理性能越优异,凹凸的粗糙表面也就越多,4 种骨料的表面纹理指数大小依次为:玄武岩、辉绿岩、石灰岩、花岗岩。

(4)提出水泥路面改性环氧磨耗层骨料形状特征综合评价指标和二级评价体系,结合层次分析法,计算 4 种骨料的  $A_{sc}$  值,指出玄武岩是最理想的磨耗层骨料类型,通过工程实例验证,玄武岩骨料铺筑的磨耗层经过半年运营,其粘结强度优异。

## 参考文献

- [1] DENNIS G, E YAD M, ARIF C, et al. Characterization of aggregate resistance to degradation in stone matrix asphalt mixtures[J]. Transportation research record, 2006(1962):55-63.
- [2] 汪海年,郝培文.粗集料二维形状特征的图像描述[J].建筑材料学报,2009,12(6):747-751.  
(WANG Hainian, HAO Peiwen. Digital description of two-dimensional shape characteristics of coarse aggregate[J]. Journal of building materials, 2009, 12(6):747-751.)
- [3] 唐伯明,郭鹏,肖巧林,等.沥青混凝土再生集料的棱角性分析[J].中国公路学报,2015,28(1):24-29.  
(TANG Boming, GUO Peng, XIAO Qiaolin, et al. Analysis of angularity of asphalt concrete recycled aggregate[J]. China journal of highway and transport, 2015, 28(1):24-29.)
- [4] 李晓燕,卜胤,汪海年,等.粗集料形态特征的定量评价指标研究[J].建筑材料学报,2015,18(3):524-530.  
(LI Xiaoyan, BU Yin, WANG Hainian, et al. Research on quantitative evaluation of morphological characteristic of coarse aggregates[J]. Journal of building materials, 2015, 18(3):524-530.)
- [5] 彭波.沥青混合料集料几何特性与结构研究[D].西安:长安大学,2008.  
(PENG Bo. Study on geometric characteristics and structure of asphalt mixture aggregate[D]. Xi'an:Chang'an University, 2008.)

- [6] 林辉. 基于数字图像处理技术的粗集料形状特征量化研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2007.  
(LIN Hui. Quantitative study of shape characteristics for coarse aggregate based on digital image processing [D]. Changsha: Hunan University, 2007.)
- [7] 胡力群, 熊伟明, 王军. 粗集料棱角性对 OG-FC 多孔沥青混合料性能的影响[J]. 功能材料, 2014, 45(20): 20150-20154.  
(HU Liqun, XIONG Weiming, WANG Jun. Influence of coarse aggregate angularity on the performance of open-graded friction courses [J]. Journal of functional materials, 2014, 45(20): 20150-20154.)
- [8] 赵健, 张文军. 一种有效的基于小波帧变换包的纹理分类方法[J]. 计算机辅助设计与图形学学, 1997, 9(6): 520-526.  
(ZHAO Jian, ZHANG Wenjun. An effective texture classification method based on wavelet frame transform packets [J]. Journal of computer aided design & computer graphics, 1997, 9(6): 520-526.)
- [9] THYAGARAJAN K S, NGUYEN T, PERSONS C E. A maximum likelihood approach to texture classification using wavelet transform [J]. In Proc. IEEE Int. Conf. on Image Processing, 1994, 2: 640-644.
- [10] 秦雪. 基于图像分析的集料形状特征与分布特征研究[D]. 青岛: 青岛理工大学, 2016.  
(QIN Xue. Research on shape characteristics and distribution characteristics of aggregate based on image analysis [D]. Qingdao: Qingdao University of Technological, 2016.)
- [11] CHEN S, YANG X, YOU Z, et al. Innovation of aggregate angularity characterization using gradient approach based upon the traditional and modified sobel operation [J]. Construction and building materials, 2016(5): 111-119.
- [12] ANOCHIE-BOATENG J K, KOMBA J J, MVELASE G M. Three-dimensional laser scanning technique to quantify aggregate and ballast shape properties [J]. Construction and building materials, 2013, 43(2): 389-398.
- [13] DONDI G, SIMONE A, VIGNALI V, et al. Discrete element modeling of influences of grain shape and angularity on performance of granular mixes for asphalts [J]. Procedia social and behavioral sciences, 2012, 53(3): 399-409.
- [14] BANGARU R S, DAS A. Aggregate shape characterization in frequency domain [J]. Construction and building materials, 2012, 34(9): 554-560.
- [15] COLERI E, KAYHANIAN M, HARVEY J T, et al. Clogging evaluation of open graded friction course pavements tested under rainfall and heavy vehicle simulators [J]. Journal of environmental management, 2013, 129(15): 164-172.
- [16] 何文华, 沈峰, 宗炜, 等. 基于层次分析法的宽幅厚层水泥稳定碎石基层原材料质量评价模型[J]. 公路交通科技(应用技术版), 2015, 11(4): 35-38.  
(HE Wenhua, SHEN Feng, ZONG Wei, et al. Raw material quality evaluation model of wide cement stabilized macadam base based on analytic hierarchy process [J]. Journal of Guizhou university of finance and economics, 2015, 11(4): 35-38.)
- [17] SARIY T L. The Analytic Hierarchy Process [M]. New York: McGraw-Hill, 2012.
- [18] 杨青, 罗小花, 邱欣, 等. 基于多层次模糊综合评价的路用基层材料甄选分析[J]. 浙江师范大学学报(自然科学版), 2016, 39(1): 101-107.  
(YANG Qing, LUO Xiaohua, QIU Xin, et al. Selection and analysis of road base material based on multi-level fuzzy comprehensive evaluation [J]. Journal of Zhejiang normal university (natural science), 2016, 39(1): 101-107.)
- [19] 于玲, 张筱薇, 包龙生, 等. 基于层次分析法的就地热再生沥青路面路用性能后评估[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2017, 33(4): 654-660.  
(YU Ling, ZHANG Xiaowei, BAO Longsheng, et al. The asphalt post evaluation of pavement performance index of hot in-place recycling technology based on the analytic hierarchy process [J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2017, 33(4): 654-660.)
- [20] 张敏江, 张博文, 于保阳. 基于层次分析法的沥青路面冷再生技术后评价指标权重分析[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2012, 28(4): 634-639.  
(ZHANG Minjiang, ZHANG Bowen, YU Baoyang. Analysis of weighing values of post-assessment indexes for cold recycling technology of asphalt pavement based on analytic hierarchy process [J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2012, 28(4): 634-639.)