

基于灰色关联度的铁路道砟表面形态指标研究

潘 飞¹, 童晓莹², 边 疆^{*3}, 徐鹏程³

(1. 长安大学 公路学院, 陕西 西安 710064;
2. 陕西省城乡规划设计研究院, 陕西 西安 710021;
3. 南京工业大学 道路工程研究所, 江苏 南京 210009)

摘要: 道砟作为直接承受铁路轨道荷载的材料, 需要有较好的表面形态和抗磨耗能力. 以新建铁路用一级碎石道砟为研究对象, 通过洛杉矶磨耗试验改变道砟的表面形态, 利用图像处理软件确定出面积、等效椭圆长轴长度、等效椭圆短轴长度、费雷特最大直径、费雷特最小直径、轴向系数、圆度和 Angularity (P) 8 个表面形态指标; 对不同磨耗次数下各评价指标的变化趋势和不同粒径的损失百分比进行分析, 进一步结合灰色关联分析理论提出最优评价指标和具体要求. 结果表明: 各评价指标值都随着磨耗次数的增加逐渐减小, 最终趋于稳定状态; 16~25 mm 与 56~63 mm 粒径的道砟在洛杉矶磨耗试验中最易被磨耗. 结合灰色关联度计算结果, 最后确定出 Angularity (P)、轴向系数和圆度为道砟表面形态的最优评价指标.

关键词: 道砟; 洛杉矶磨耗; 数字图像处理; 灰色关联分析; Angularity (P); 轴向系数

中图分类号: U214.11

文献标识码: A

doi: 10.7511/dllgxb202003007

0 引言

截至 2018 年底, 全国铁路营业里程达 13.1×10^4 km. 作为铁路路基的重要组成部分, 道砟和枕木共同起着增大受力面积、分散列车荷载、防止铁轨在长期较大压力作用下产生过大沉降的作用. 通常有明显棱角性, 形状近似于立方体, 有一定粗糙凸起表面形态的道砟在实际工程中能形成相互嵌挤的结构. 这种结构能有效提高道砟间内摩擦力, 并使道床具有一定弹性, 而这种弹性不仅能够吸收机车的冲击和振动, 保证列车平稳行驶, 也大大改善了路基的承荷环境^[1]. 因此, 必须对长期磨耗与冲击作用下道砟表面形态的变化足够重视^[2].

然而, 针对道砟表面形态特征方面的相关研究较少, 在实际工程中目前还是通过传统的筛分方式对道砟的粒径进行控制, 且仅靠经验粗略要求其针片状指数不大于 20%, 片状指数不大于 20%^[3]. 此外, 随着图像处理技术的成熟和普及,

出现了利用图像处理方式进行集料和道砟的形状研究^[4]. 主要有两方面: 一种是利用图像识别技术直接测量线性维度或周长、面积, 如 Kuo 等拍摄随着托盘旋转的集料, 通过图像处理软件得到其三维形态参数^[5]. 另一种是在边界上对形状、角度和表面纹理进行额外测量或处理, 如汪海年等采用粗集料形状特征研究系统(MASCA)提出以长细比和圆度来评价粗集料的形状特征^[6]; Wang 等通过傅里叶分析法得出了量化集料形状、棱角性和纹理^[7]; Mahmoud 等用聚合成像系统测量了不同磨耗次数下集料的表面纹理, 通过角度变化和重量损失评价道砟形状在磨耗过程中的变化情况^[8]. 然而, 在上述研究中, 由于粗集料和道砟分别对应铁道和道路体系中的原材料, 各自岩性及级配有所差异, 用来评价集料的形状特征指标直接应用于道砟的可行性尚未可知; 此外, 道砟表面形态是影响其抗磨耗性的重要因素之一, 部分研究虽然提出了相关评价指标, 但与道砟的抗磨耗性能缺乏联系, 其可靠程度仍需进一步论证.

收稿日期: 2019-12-19; 修回日期: 2020-03-28.

基金项目: 国家自然科学基金青年基金资助项目(51508270).

作者简介: 潘 飞(1995-), 男, 硕士生, E-mail: feipan@chd.edu.cn; 边疆^{*}(1984-), 男, 讲师, E-mail: bianj29@njtech.edu.cn.

基于此,针对缺乏判断道砟颗粒表面形态的指标,以及缺乏研究磨耗次数与表面形态评价指标的相关性,导致不能确定经过长期磨耗后道砟的使用性能的问题,本文提出以某一新建铁路一级碎石道砟为研究对象,结合洛杉矶磨耗试验和数字处理技术,初步确定评价表面形态的一维和二维指标;进一步结合灰色关联分析理论,通过对比分析各指标与磨耗次数的相关程度,最终提出

最优的表面形态评价指标,为道砟的实际使用提供参考.

1 原料及试验方案

1.1 道砟材质性能与级配

选取原矿为石英砂岩的某一新建铁路一级碎石道砟为研究对象,按照相关试验规程对道砟材质性能进行检测^[9],测试结果如表 1 所示.

表 1 道砟材质性能

Tab. 1 Ballast material properties

规范及 实测	洛杉矶磨耗率 $A_{LA}/\%$	标准集料冲击 韧度 P_i	石料耐磨硬度系数 K (干磨)	标准集料压碎率 $C_a/\%$	道砟集料压碎率 $C_b/\%$	渗透系数 $P_m/$ ($10^{-6} \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$)
规范要求	$18 < A_{LA} < 27$	$95 < P_i < 110$	$18 < K(\text{干磨}) < 18.3$	$8 < C_a < 9$	$19 < C_b < 22$	> 4.5
实测结果	21.5	106	18.2	8.7	21.4	5.42
规范及 实测	石粉试模件抗压 强度 σ/MPa	石粉液限 $L_l/\%$	石粉塑限 $L_p/\%$	硫酸钠溶液浸泡 损失率 $L/\%$	密度 $\rho/$ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	容重 $R/$ ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)
规范要求	< 0.4	> 20	> 11	< 10	> 2.55	> 25.00
实测结果	0.34	26.6	14.3	5.1	2.67	26.17

经验证,所用道砟的材质性能指标均满足规范要求,此外,根据《铁路碎石道砟》(TB/T 2140—2008),道砟粒径级配还应满足表 2 规定.

表 2 新建铁路用一级碎石道砟粒径级配要求

Tab. 2 Requirements for the particle size grade of the first-class crushed stone ballast for new railway

筛孔尺寸/mm	通过率/%	筛孔尺寸/mm	通过率/%
16	0~5	45	55~75
25	5~15	56	92~97
35.5	25~40	63	100

试验中称取 5 kg 道砟,选用道砟级配及质量如表 3 所示.

表 3 试验用碎石道砟粒径级配及质量

Tab. 3 Particle size grade and quality of crushed stone ballast for test

粒径/mm	通过率/%	粒径/mm	通过率/%
< 16	1	35.5~40	14
16~25	5	40~45	15
25~31.5	10	45~56	37
31.5~35.5	10	56~63	8

由于粒径 $<16 \text{ mm}$ 的颗粒在磨耗过程中损

耗严重,实际只分析包含粒径 16 mm 以上颗粒.

1.2 试验方案

洛杉矶磨耗率是用来表征碎石道砟抵抗冲击、磨耗、边缘剪切等联合作用的能力,良好的表面形态能够使道砟相互嵌挤,增加内摩擦力并为道床提供一定弹性.较好的抗磨耗性能使道砟在行车荷载作用下长期保持原有形态,从而保证道床稳定性.因此,通过分析磨耗次数与道砟表面形态之间的关系,确定良好的表面形态应具有的最高要求,是研究的主要思路.

在原料基本性能满足要求的基础上,采用洛杉矶磨耗试验改变道砟原有的颗粒形态特征.试验采用的洛杉矶磨耗仪为圆形滚筒,直径 710 mm,转速 31~33 r/min;采用钢球直径 46.0~47.6 mm,质量为 390~445 g.试验步骤如下:

(1)将一份涂色、标号、图像采集后的试样装入洛杉矶磨耗仪,装入试验用 6 个钢球,盖好盖板,拧好盖板螺丝.

(2)设定圆筒转动 200 转,转动结束后用扳手拧开螺丝,打开盖板,倒出试样.

(3)将试样水洗后,放入烘箱烘干至恒重,然后进行补漆,晾干后进行图像采集.

(4)以 200 转为间隔重复试验,直到 1 000 转后停止,试验见图 1 所示.



(a) DM-III 洛杉矶单筒磨耗仪



(b) 道砟磨耗

图1 道砟磨耗试验

Fig. 1 Ballast abrasion test

2 图像采集与表面形态评价指标的选取

研究不同磨耗次数下不同粒径道砟的表面形态特征,精确获得磨耗前后的道砟几何参数.道砟为散粒体材料,形状不规则,采用人工多次测量不仅费时费力,也存在较大误差等问题.基于此,在获取图像的基础上,借助数字图像处理技术,使图像数字化的同时,快速实现道砟几何参数的精确计量.

对二维平面图像处理技术和3D激光扫描技术而言,后者通常对道砟几何形态能够更为精确地测量与评价.然而,一方面由于3D激光扫描仪器较为昂贵,算法相对复杂;另一方面,现有三维技术主要为确定道砟内静态压碎行为、内部结构应力分布及裂纹扩展等研究做铺垫,导致在实际工程中大规模应用时较困难.与之相比,二维平面图像处理技术具有测量方式简单、设备成本极低,且更为工程应用所接受等优点,仍然被广泛采用.本文拟分析几何形态参数与磨耗次数之间的关系,对道砟内部情况不做详细讨论,故选用测量简便的二维平面图像处理技术,为实际工程应用提供指导.

2.1 图像采集与数字化

试验采用数码相机实现图片采集,并通过Image pro Plus (IPP)数字图像处理软件提取图片每个像素点的RGB值(0~255).在图片中指定涂色后的道砟图像内部的一个参考点,在参考点RGB值的基础上设置10的公差.软件会对图片内部符合要求的像素点进行选取从而得到精确的道砟轮廓.

采用数码相机对同一物体进行俯视拍摄时,受拍摄高度或拍摄角度差异等因素影响,拍摄图像会有不同程度的几何位置、尺寸、形状畸变,从而产生几何失真,影响数据的准确性.因此,参考相关研究采用垂轴法,利用针孔模型的原理,对图像失真问题进行矫正^[10].具体步骤如下:

(1)选取12枚质量良好,无明显变形的一元硬币,并利用游标卡尺确定各硬币的直径(mm);

(2)将硬币随机排列在同一张A4纸上,位置如图2所示;

(3)在采光良好条件下,将数码相机利用支架固定在硬币正上方,并选择在不同高度进行垂直拍摄;

(4)对拍摄的照片利用IPP软件进行图像数字化处理,原理如图3所示;



图2 图像校正

Fig. 2 Image correction

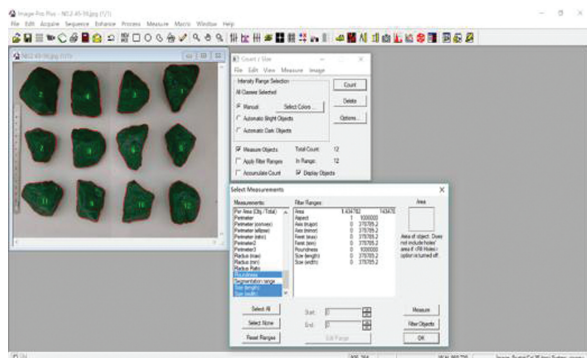


图3 IPP软件数字化处理

Fig. 3 IPP software digitization

(5)从软件中导出 12 枚硬币的所有周长 C (mm)和直径 D (mm)两个参数,并计算各自的平均值;

(6)与原有硬币的直径和周长进行比较,最终确定误差较小、成像良好的拍摄高度 H (cm),具体拍摄尺寸见表 3.

表 3 不同拍摄高度硬币尺寸

Tab. 3 Coin size for different shooting heights

高度/cm	参数/mm	平均值	标准差	变异系数/%
20	D	—	—	—
	C	—	—	—
25	D	25.241 4	0.228 1	0.90
	C	79.777 7	0.712 6	0.89
30	D	25.294 8	0.374 6	1.50
	C	79.924 9	1.196 3	1.50
35	D	25.280 4	0.318 5	1.26
	C	79.875 6	1.182 2	1.48
40	D	25.269 6	0.361 9	1.43
	C	79.835 9	1.156 6	1.45

经测量,一元硬币实际平均直径与周长分别约为 25.00 mm、78.50 mm.当拍摄高度为 20 cm 时,相机不能将硬币完整地拍摄出来,因此试验中 25 cm 高度为能拍摄完整硬币图像的最低高度.从表 3 中发现当拍摄位置高于 25 cm 时,变异系数均大于 1%,即均大于 25 cm 处的,反映出此时 12 枚硬币直径与周长的离散程度变大,误差也相应变大.而在 25 cm 高度拍摄时,误差最小,不仅反映出数码相机自带的变形修正功能的可用性,而且能够较好地控制图像失真问题.故后续图像采集时,均采用 25 cm 高度拍摄.此外,在 25 cm 拍摄高度基础上,进一步对不同粒径道砟进行摄取,结果表明:随着粒径尺寸不断增大,与实际相比,道砟变异系数不断减小,即误差减小;道砟在粒径尺寸为 16 mm 时的变异系数最大,但其仍不超过 0.9%.因此,道砟粒径尺寸对拍摄高度的影响在此次研究中忽略不计.

2.2 道砟表面形态评价指标的选取

目前评价颗粒的形态特征主要从颗粒的边界轮廓、形状尺寸、纹理以及棱角性入手.考虑到道砟颗粒粒径分布范围较广,形状各异,因此主要从外部轮廓与棱角性两方面来评价道砟的表面形态.

为更好地对磨耗前后的道砟表面形态进行评价,首先需要确定评价指标.通过 Image pro Plus

软件分析,可以获得道砟的面积 A 、等效椭圆长轴长度 $L_{a,max}$ 、等效椭圆短轴长度 $L_{a,min}$ 、费雷特最大直径 D_{max} (指颗粒二维投影轮廓两边界平行线间的最大距离)、费雷特最小直径 D_{min} 等几何参数.其中通过计算 $L_{a,max}$ 、 $L_{a,min}$ 、 A 、周长 P ,可进一步得到轴向系数 K_a 、圆度 R 两个参数.此外,参考程小云提出反映颗粒棱角性的 Angularity (P) 二维指标,共同作为道砟表面形态的评价指标^[11].计算公式分别如式(1)、(2)和(3)所示.

$$K_a = L_{a,max} / L_{a,min} \quad (1)$$

K_a 值越大说明颗粒具有越明显的针状特性;反之,越接近于 1 则说明颗粒的针状特性越不明显.

$$R = P^2 / 4\pi A \quad (2)$$

圆度指标表示颗粒二维形状接近标准圆的程度.正多边形的边数越多其对应的圆度值越接近于 1.

$$\text{Angularity}(P) = \left(\frac{P}{P_c} \right)^2 \quad (3)$$

式中: P_c 为道砟颗粒的等效椭圆周长,程小云认为两种周长的比值可以消除轮廓形状的影响作用,故本研究将这组基于等效椭圆和周长的指标与其他指标进行对比分析.图 4 为等效椭圆与等效圆示意图.

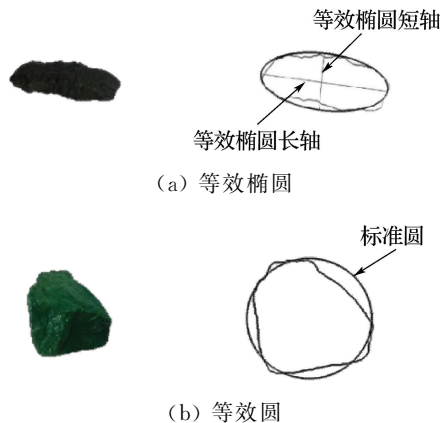


图 4 等效示意图

Fig. 4 Equivalent diagram

3 磨耗次数与表面形态评价指标的关系

3.1 各评价指标均值随磨耗次数变化情况

在确定评价指标基础上,结合磨耗试验,最终可得到各指标随磨耗次数的变化规律如图 5 所示.

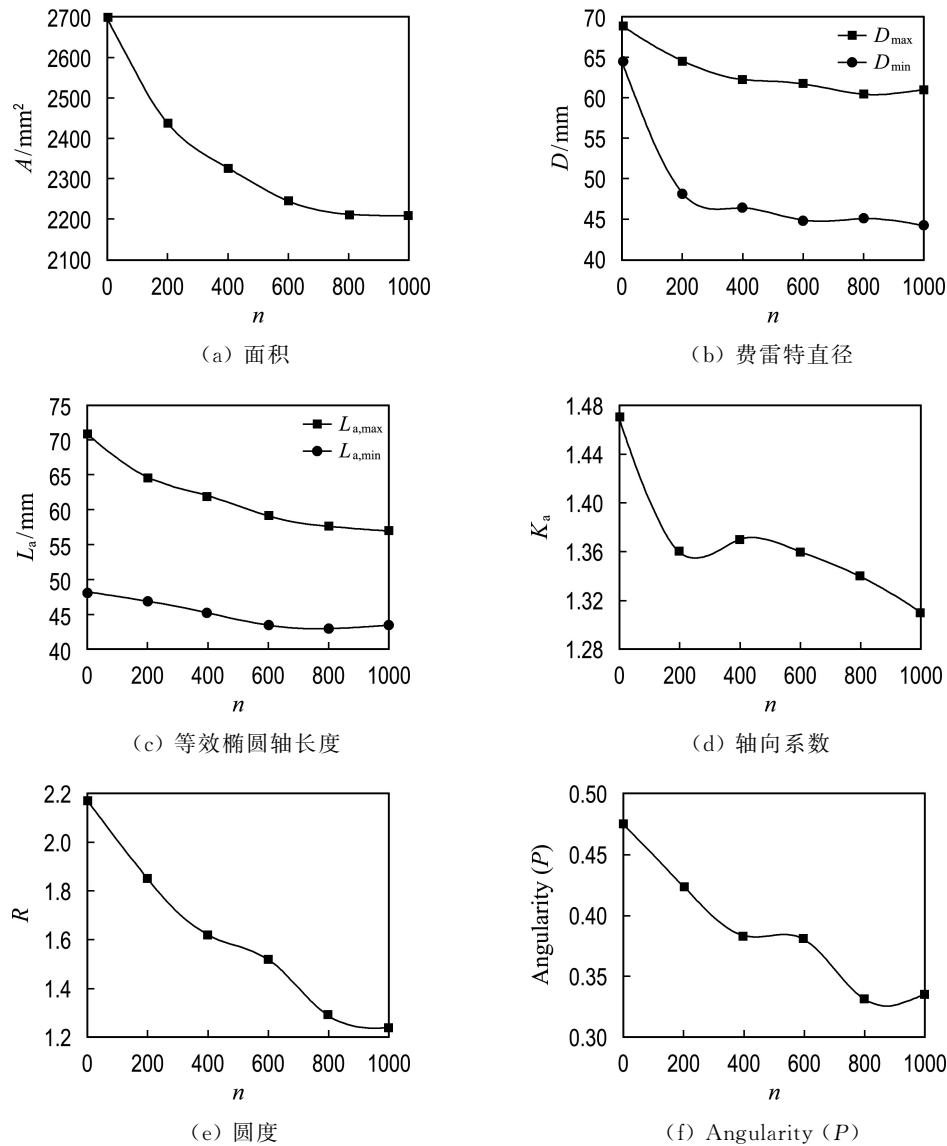


图5 各评价指标随磨耗次数的变化情况

Fig. 5 Changes of evaluation indexes with the number of abrasion

由图 5(b)、(c)可知,费雷特直径与等效椭圆轴长度均属于一维评价指标,都随着磨耗次数不断增加而缓慢减小.磨耗次数从 0 增加到 1 000,等效椭圆长轴长度最终趋近于 60 mm,等效椭圆短轴长度最终趋近于 45 mm;费雷特最大直径最终趋近于 60 mm,费雷特最小直径最终趋近于 45 mm.结果表明,这两个一维指标最大值与最小值趋于一致,有较好相关性和一致性,均能在一定程度上反映道砟在磨耗后的表面形态.

此外,面积、轴向系数、圆度和 Angularity (P)属于二维评价指标,其中,由图 5(a)可知,面积随着磨耗次数增加而逐渐减小,最终趋近 2 200 mm^2 ;而轴向系数与圆度均随着磨耗次数的增加呈现先

减小、后波动趋势.

由图 5(d)可知,在磨耗次数较少时,轴向系数高于 1,道砟颗粒部分呈明显针状、长条状;但是随着磨耗次数增加,道砟在磨耗过程中会出现一些破碎的情况,所以轴向系数迅速减小;随着磨耗次数接近 1 000 次,道砟结构趋于稳定,针片状减少,最终在 1.3 左右波动,表明轴向系数与磨耗次数有着较好的相关性.

由图 5(e)可知,在磨耗次数较少时,圆度数值较大,表明棱角性较为明显;但是随着磨耗次数增加,棱角性在磨耗过程中不断被削弱,在磨耗次数接近 1 000 次时,道砟结构趋于稳定.圆度在 1.2 左右波动,不仅说明圆度与磨耗次数有着较

好的相关性,也反映道砟接近于圆形时,道砟在磨耗过程中长轴部分的损失比短轴的损失更大。

由图 5(f)可知,磨耗次数较少,Angularity(P)逐渐趋于 0.3.表明随着磨耗次数增加,棱角性在磨耗过程中不断被削弱,在磨耗次数接近 1 000 时,道砟形态趋于稳定。

3.2 各粒径损失百分率分析

图 6 为道砟 1 000 次磨耗后,面积、等效椭圆长轴长度、等效椭圆短轴长度、费雷特最大直径、费雷特最小直径指标累计损失百分率 Q . 31.5~35.5 mm 粒径的道砟在经过 1 000 次的磨耗之后其累计损失百分率是最小的.而 16~25 mm 与

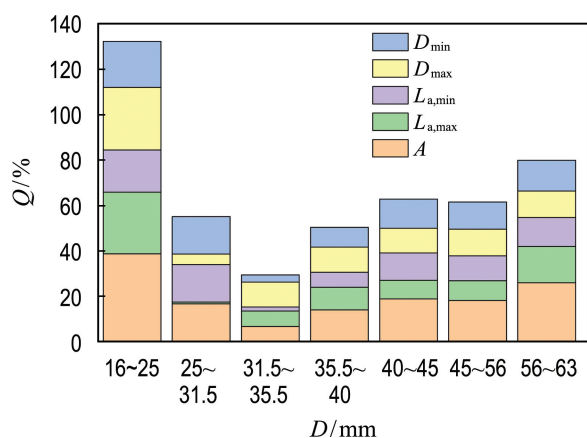


图 6 各粒径损失百分率

Fig. 6 Percentage loss of each particle size

56~63 mm 的小粒径与大粒径磨耗累计损失百分率相比其他粒径要大一些.因此在实际的工程应用中应注意小粒径与超大粒径的岩石,避免由于小粒径与超大粒径道砟的磨耗而导致道砟粒径均一化,使得道砟间的嵌挤结构消失,影响工程质量。

4 磨耗次数与表面形态评价指标灰色关联分析

结合试验结果,发现无论是一维还是二维指标,其均与磨耗次数有着较好的相关性,但依然无法精确判断最优指标,因此,结合灰色关联分析理论^[12],进一步通过数理统计方法确定最优评价指标。

4.1 灰色关联度计算

以磨耗次数作为参考数列,分别计算磨耗次数($x_0(k)$)与面积($x_1(k)$)、等效椭圆长轴长度($x_2(k)$)、等效椭圆短轴长度($x_3(k)$)、费雷特最小直径($x_4(k)$)、费雷特最大直径($x_5(k)$)、轴向系数($x_6(k)$)、圆度($x_7(k)$)及 Angularity (P)($x_8(k)$)的灰色关联度,从而找出评价道砟形态关联度最高的指标。

根据灰色关联度计算公式,首先对各指标的原始试验数据进行区间值化处理,再进行差值化计算,最后计算关联系数.各指标的试验结果如表 4 所示。

表 4 试验结果表

Tab. 4 Test result table

k	$x_0(k)$	$x_1(k)$	$x_2(k)$	$x_3(k)$	$x_4(k)$	$x_5(k)$	$x_6(k)$	$x_7(k)$	$x_8(k)$
1	0	2 696.61	70.89	48.21	50.12	68.88	1.47	2.17	0.48
2	200	2 438.20	64.71	46.89	48.26	64.48	1.36	1.85	0.42
3	400	2 326.44	61.99	45.25	46.43	62.24	1.37	1.62	0.38
4	600	2 245.24	59.08	43.44	44.89	61.74	1.36	1.52	0.38
5	800	2 211.96	57.63	43.01	45.10	60.46	1.34	1.29	0.33
6	1 000	2 208.82	56.95	43.48	44.25	61.01	1.31	1.24	0.34

(1) 区间值化处理

$$\begin{aligned}
 x(0) &= \{x_0(1), x_0(2), x_0(3), x_0(4), \\
 &\quad x_0(5), x_0(6)\} = \\
 &\quad \{0, 200, 400, 600, 800, 1\,000\} \\
 x(1) &= \{x_1(1), x_1(2), x_1(3), x_1(4), \\
 &\quad x_1(5), x_1(6)\} = \\
 &\quad \{2\,696.61, 2\,438.20, 2\,326.44, \\
 &\quad 2\,245.24, 2\,211.96, 2\,208.82\}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{由 } \max_k(x_0(k)) &= x_0(6) = 1\,000, \min_k(x_0(k)) \\
 &= x_0(1) = 0
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 y_0(k) &= \frac{x_0(k) - \min_k(x_0(k))}{\max_k(x_0(k)) - \min_k(x_0(k))} = \\
 &\quad \frac{x_0(k) - 0}{1\,000 - 0} = \frac{x_0(k)}{1\,000}
 \end{aligned}$$

可得区间值化处理后的磨耗次数:

$$y(0) = \{y_0(1), y_0(2), y_0(3), y_0(4),$$

$y_0(5), y_0(6)\} =$ (2)求差序列
 $\{0, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0\}$ 由公式 $\Delta_{0j}(k) = |y_0(k) - y_j(k)|, j = 1,$
 同法,其他指标区间值化处理后结果见表 5. $2, \dots, 8, k = 1, 2, \dots, 6,$ 可得表 6 差序列.

表 5 区间值化处理后的数列

Tab. 5 Sequences after interval value processing

k	$y_0(k)$	$y_1(k)$	$y_2(k)$	$y_3(k)$	$y_4(k)$	$y_5(k)$	$y_6(k)$	$y_7(k)$	$y_8(k)$
1	0	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0
2	0.2	0.470 2	0.556 4	0.746 2	0.683 1	0.477 4	0.311 6	0.656 7	0.643 1
3	0.4	0.241 1	0.361 5	0.430 8	0.371 4	0.211 4	0.373 9	0.407 6	0.363 2
4	0.6	0.074 7	0.152 5	0.082 7	0.109 0	0.152 0	0.311 6	0.299 5	0.341 9
5	0.8	0.006 4	0.048 8	0	0.144 8	0	0.187 0	0.053 7	0
6	1.0	0	0	0.089 6	0	0.065 3	0	0	0.026 6

表 6 差序列汇总

Tab. 6 Difference sequence summary

k	$\Delta_{01}(k)$	$\Delta_{02}(k)$	$\Delta_{03}(k)$	$\Delta_{04}(k)$	$\Delta_{05}(k)$	$\Delta_{06}(k)$	$\Delta_{07}(k)$	$\Delta_{08}(k)$
1	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0
2	0.270 2	0.356 4	0.546 2	0.483 1	0.277 4	0.111 6	0.456 7	0.443 1
3	0.158 9	0.038 5	0.030 8	0.028 6	0.188 6	0.026 1	0.007 6	0.036 8
4	0.525 3	0.447 5	0.517 3	0.491 0	0.448 0	0.288 4	0.300 5	0.258 1
5	0.793 6	0.751 2	0.800 0	0.655 2	0.800 0	0.613 0	0.746 3	0.800 0
6	1.000 0	1.000 0	0.910 4	1.000 0	0.934 7	1.000 0	1.000 0	0.973 4

(3)求每行的最大差与最小差

由 $\max_k(\Delta_{01}(k)) = 1.000 0, \min_k(\Delta_{01}(k)) = 0.158 9; \max_k(\Delta_{02}(k)) = 1.000 0, \min_k(\Delta_{02}(k)) = 0.038 5; \max_k(\Delta_{03}(k)) = 1.000 0, \min_k(\Delta_{03}(k)) = 0.030 8; \max_k(\Delta_{04}(k)) = 1.000 0, \min_k(\Delta_{04}(k)) = 0.028 6; \max_k(\Delta_{05}(k)) = 1.000 0, \min_k(\Delta_{05}(k)) = 0.188 6; \max_k(\Delta_{06}(k)) = 1.000 0, \min_k(\Delta_{06}(k)) = 0.026 1; \max_k(\Delta_{07}(k)) = 1.000 0, \min_k(\Delta_{07}(k)) =$

$0.007 6; \max_k(\Delta_{08}(k)) = 1.000 0, \min_k(\Delta_{08}(k)) = 0.036 8;$ 可得 $\Delta_{\max} = \max_j(\max_k |\Delta_{0j}(k)|) = 1.000 0, \Delta_{\min} = \min_j(\min_k |\Delta_{0j}(k)|) = 0.007 6.$

(4)计算关联度

根据 $\xi_{0j}(k) = \frac{\Delta_{\min} + \rho \Delta_{\max}}{\Delta_{0j}(k) + \rho \Delta_{\max}}$, 其中 $\rho = 0.5$, 得

关联系数; 由 $\gamma_{0j} = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \xi_{0j}(k)$, 可得各指标与磨损次数的关联度, 汇总后的结果如表 7 所示.

表 7 关联系数汇总

Tab. 7 Summary of correlation coefficients

j	$\xi_{0j}(1)$	$\xi_{0j}(2)$	$\xi_{0j}(3)$	$\xi_{0j}(4)$	$\xi_{0j}(5)$	$\xi_{0j}(6)$	γ_{0j}	排序
1	0.338 4	0.659 1	0.770 5	0.495 1	0.392 4	0.338 4	0.499 0	8
2	0.338 4	0.592 8	0.942 8	0.535 7	0.405 7	0.338 4	0.525 6	4
3	0.338 4	0.485 2	0.956 4	0.499 0	0.390 5	0.359 9	0.504 9	6
4	0.338 4	0.516 3	0.960 3	0.512 3	0.439 4	0.338 4	0.517 5	5
5	0.338 4	0.653 0	0.737 2	0.535 5	0.390 5	0.353 8	0.501 4	7
6	0.338 4	0.830 0	0.964 9	0.643 9	0.456 1	0.338 4	0.595 3	2
7	0.338 4	0.530 6	1.000 0	0.634 2	0.407 3	0.338 4	0.541 5	3
8	0.338 4	2.256 7	0.945 7	0.669 6	0.390 5	0.344 5	0.824 2	1

由表7可知: y_j 对 x_0 的关联度排序为 $\gamma_{08} > \gamma_{06} > \gamma_{07} > \gamma_{02} > \gamma_{04} > \gamma_{03} > \gamma_{05} > \gamma_{01}$,即各评价指标与磨损次数关联性排序依次为 Angularity (P)、轴向系数、圆度、等效椭圆长轴长度、费雷特最小直径、等效椭圆短轴长度、费雷特最大直径、面积。

4.2 道砟形态特征评价指标的提出

结合磨损试验和灰色关联分析理论,可以看出在评价道砟表面形态时,二维评价指标 Angularity(P)、轴向系数、圆度与一维的等效椭圆长度、费雷特直径指标相比,与磨损次数的关联度更高,这是由于一维指标最小化了轮廓形状对磨损性能的影响,二维指标更能完整地描述道砟颗粒的轮廓与棱角性,因此与磨损次数相关程度更高,表明 Angularity (P)、轴向系数和圆度可以很好地表现道砟的受磨损情况,是评价道砟在使用过程中磨损变化的最优指标。此外,试验结果指出在磨损次数达到1 000次时,除去破碎颗粒,发现不论颗粒初始形态如何,轴向系数最终趋于1.3,圆度最终趋于1.2。

5 结 论

(1)采用垂轴法,利用针孔模型的原理,提出图像采集时均采用25 cm高度拍摄,从而对图像失真问题进行矫正。

(2)通过Image pro Plus软件,初步确定了道砟面积、等效椭圆长轴长度、等效椭圆短轴长度、费雷特最大直径、费雷特最小直径、轴向系数、圆度和棱角性作为道砟表面形态的评价指标。

(3)磨损试验结果表明:各指标均随着磨损次数的增加而减小,且最终都趋于稳定;在铁路用一级碎石道砟粒径级配中,16~25 mm与56~63 mm粒径的道砟在洛杉矶磨损试验中最易被磨损、击碎,在实际的工程应用中应注意小粒径与超大粒径的岩性,尽量选用抗磨损性能较好的岩石。

(4)灰关联度计算表明各指标与磨损次数均有着较好的相关性,其中棱角性、轴向系数、圆度与磨损次数的关联性最高,表明棱角性、轴向系数和圆度可以很好地表现道砟的受磨损情况,是评价道砟在使用过程中磨损变化的最优指标。

参考文献:

[1] 井国庆,付 豪,贾文利,等. 高速铁路有砟轨道横阻阻力宏观分析[J]. 铁道工程学报, 2018, 35(9): 21-25.

JING Guoqing, FU Hao, JIA Wenli, *et al.* Macro-micro analysis of lateral resistance for high speed railway ballasted track [J]. *Journal of Railway Engineering Society*, 2018, 35(9): 21-25. (in Chinese)

[2] 边 疆,徐鹏程,张 东. 列车荷载作用下道砟材料的累积变形和破碎规律[J]. 南京工业大学学报(自然科学版), 2019, 41(2): 261-268.

BIAN Jiang, XU Pengcheng, ZHANG Dong. Accumulated deformation and broken rules of ballast material under train load [J]. *Journal of Nanjing Tech University (Natural Science Edition)*, 2019, 41(2): 261-268. (in Chinese)

[3] 王 创,井国庆,鄢录朝,等. 中俄铁路碎石道砟加工指标技术标准的对比研究[J]. 铁道技术监督, 2017, 45(2): 5-8,12.

WANG Chuang, JING Guoqing, QIE Luchao, *et al.* Comparative study on technical standards for railway ballast processing index between China and Russia [J]. *Railway Quality Control*, 2017, 45(2): 5-8,12. (in Chinese)

[4] 李 朋,刘鉴兴,肖杰灵,等. 基于图像处理的道砟颗粒二维廓形追踪提取算法[J]. 铁道标准设计, 2019, 63(5): 20-25.

LI Peng, LIU Jianxing, XIAO Jiuling, *et al.* Algorithm based on image processing for tracing and extracting 2D contour of railway ballast [J]. *Railway Standard Design*, 2019, 63(5): 20-25. (in Chinese)

[5] KUO C Y, FROST J D, LAI J S, *et al.* Three-dimensional image analysis of aggregate particles from orthogonal projections [J]. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 1996(1526): 98-103.

[6] 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. (in Chinese)

[7] WANG L, DRUTA C, ZHOU Y, *et al.* 3D Aggregate evaluation using laser and X-Ray scanning [M] // *Advances in Computed Tomography for Geomaterials: GeoX 2010*. New York: John Wiley and Sons, 2013.

[8] MAHMOUD E, MASAD E. Experimental methods for the evaluation of aggregate resistance to polishing, abrasion, and breakage [J]. *Journal of*

- Materials in Civil Engineering**, 2007, **19**(11): 977-985.
- [9] 中国铁道科学院研究院. 铁路碎石道砟试验方法: TB/T 2328—2008 [S]. 北京: 中国铁道出版社, 2008.
- Research Institute of Chinese Academy of Railway Sciences. The Method for Railway Ballast: TB/T 2328-2008 [S]. Beijing: China Railway Press, 2008. (in Chinese)
- [10] 潘 慧, 汪 敏, 徐建亮, 等. 成像距离对图像畸变系数的影响研究 [J]. 计量学报, 2014, **35**(3): 221-225.
- PAN Hui, WANG Min, XU Jianliang, *et al.* Study on the influence rule of different imaging distance to distortion coefficients [J]. **Acta Metrologica Sinica**, 2014, **35**(3): 221-225. (in Chinese)
- [11] 程小云. 基于矿料颗粒量化指标的沥青混合料优化设计 [D]. 西安: 长安大学, 2010.
- CHENG Xiaoyun. Study on the optimizing mix design based on particle shape of coarse aggregate [D]. Xi'an: Chang'an University, 2010. (in Chinese)
- [12] 戴俊攀. 基于荷载应力灰关联分析的沥青冷再生路面结构与材料设计 [J]. 公路, 2018, **63**(3): 212-216.
- DAI Junqian. Structure and material design of cold recycled asphalt pavement based on load stress grey correlation analysis [J]. **Highway**, 2018, **63**(3): 212-216. (in Chinese)

Research on surface morphology index of railway ballast based on grey correlation degree

PAN Fei¹, TONG Xiaoying², BIAN Jiang^{*3}, XU Pengcheng³

(1. Highway School, Chang'an University, Xi'an 710064, China;

2. Shaanxi Institute of Urban & Rural Planning and Design, Xi'an 710021, China;

3. Institute of Road Engineering, Nanjing Tech University, Nanjing 210009, China)

Abstract: As the material directly bearing the railway track load, ballast needs to have better surface morphology and wear resistance. The first-class crushed stone ballast for the new railway was taken as the research object, Los Angeles abrasion test was used to change the surface morphology of the ballast, and image processing software was used to determine eight surface morphology indexes: area, equivalent ellipse long axis length, equivalent ellipse short axis length, Ferret maximum diameter, Ferret minimum diameter, axial coefficient, roundness and Angularity (P). The change trend of each evaluation index and the loss percentage of different particle size under different abrasion times were analyzed, and the optimal evaluation index and specific requirements were further put forward in combination with the grey correlation analysis theory. The results show that the values of each evaluation index gradually decrease with the increase of abrasion times, and finally tend to be stable. 16-25 mm and 56-63 mm size ballast are most easily worn in Los Angeles abrasion test. Combined with the results of grey correlation degree calculation, angularity (P), axial coefficient and roundness are determined as the optimal evaluation indexes of ballast surface morphology.

Key words: ballast; Los Angeles abrasion; digital image processing; grey correlation analysis; Angularity (P); axial coefficient