

DOI:10.3969/j.issn.1003-5060.2025.10.016

再生骨料的颗粒形貌表征与特征参数统计分析

李涛¹, 董鸢¹, 葛德宏¹, 刘祯平², 洪丽^{3,4}, 赵丹^{3,4}

(1. 安徽省交控建设管理有限公司, 安徽 合肥 230041; 2. 安徽建工路港建设集团有限公司, 安徽 合肥 230094; 3. 合肥工业大学土木与水利工程学院, 安徽 合肥 230009; 4. 安徽省水泥基材料低碳技术工程研究中心, 安徽 合肥 230009)

摘要: 文章获取 0.60~1.18 mm、1.18~2.36 mm、2.36~4.75 mm、4.75~20.00 mm 4 个粒段(粒段以实际情况划分)的 300 多颗再生骨料的三维形貌, 从颗粒形状、棱角性和表面粗糙度 3 个维度统计再生骨料的形貌特征参数; 通过各参数间独立性分析, 揭示能独立表征再生骨料的颗粒形状、棱角性及粗糙度的特征参数, 建立再生骨料颗粒形貌特征参数的概率分布函数, 明确特征参数的分布范围。

关键词: 再生骨料; 形状参数; 棱角性参数; 表面粗糙度; 独立性分析; 概率分布

中图分类号: TU521.1

文献标志码: A

文章编号: 1003-5060(2025)10-1401-10

Characterization of particle morphology and statistical analysis of characteristic parameters of recycled aggregate from waste concrete

LI Tao¹, DONG Ao¹, GE Dehong¹, LIU Zhenping², HONG Li^{3,4}, ZHAO Dan^{3,4}

(1. Anhui Transportation Holding Construction Management Co., Ltd., Hefei 230041, China; 2. Anhui Construction Engineering Road Port Construction Group Co., Ltd., Hefei 230094, China; 3. School of Civil and Hydraulic Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China; 4. Anhui Province Engineering Research Center of Low-carbon Technology for Cement-based Materials, Hefei 230009, China)

Abstract: This paper obtained the 3D morphology of more than 300 pieces of recycled aggregates in four segments, namely, 0.60-1.18 mm, 1.18-2.36 mm, 2.36-4.75 mm, and 4.75-20.00 mm. The morphological characteristic parameters of the recycled aggregates were statistically analyzed across three scales: particle shape, angularity, and surface roughness. By conducting an independence analysis of the various parameters, the study identified the characteristic parameters that could independently represent the particle shape, angularity, and roughness of recycled aggregates. Probability distribution functions for these morphological characteristic parameters were established, defining their distribution ranges.

Key words: recycled aggregate; shape parameter; angularity parameter; surface roughness; independence analysis; probability distribution

0 引言

为了实现环境的可持续发展,天然河砂的开采已受到严格限制^[1],但是建设砂石的需求量仍然较大。采用再生骨料颗粒替代天然骨料,具有明显的经济和环境效益,是实现可持续发展和绿色建材的重要途径之一^[2]。再生骨料作为一种散

体颗粒材料,与天然骨料相比而言具有形状差异性大、明显不规则的特点。再生骨料的形貌特征直接影响混凝土中骨料间的堆积状态、排列方式、骨料间的接触形式以及骨料与水泥浆体之间的黏结性能,进一步影响混凝土的工作性能、力学性能以及耐久性能。因此,分析再生骨料的颗粒形貌特征并对其特征参数进行表征,有助于实现再生

收稿日期:2024-12-05;修回日期:2025-06-23

基金项目:国家重点研发计划资助项目(2020YFC1909901)

作者简介:李涛(1986—),男,安徽合肥人,安徽省交控建设管理有限公司高级工程师;

洪丽(1985—),女,安徽宣城人,博士,合肥工业大学副教授,博士生导师,通信作者,E-mail:hongli2024@hfut.edu.cn.

骨料的级配优化和高品质利用^[3]。

目前,直接测试法和间接测试法是骨料颗粒形态的主要获取方法。直接测试法是指通过 2D 或 3D 的数字图像处理技术准确获取每颗骨料的颗粒形貌特征。二维图像测量技术主要有 VDG-40 摄像机^[4]、AIMS 骨料聚合成像系统^[5]等图像分析系统。三维测量采用 X-ray CT 扫描^[6]或激光扫描^[7]等方法,通过三维重构获取骨料颗粒的高精度形态特征信息。间接测试法主要采用宏观关联性参数表征骨料颗粒的整体形貌,测试方式有骨料粒形综合指数(ASTM D3398)、松散空隙率法(AASHTO TP56)、砾石破碎面法(JTG E42 ASTM D5821)以及流动时间法(法国(NF18-563))。骨料的形态特征参数大致分为形状、棱角性和表面纹理 3 类,其中形状表示骨料外部的整体形态,反映骨料宏观形态上的变化;棱角性表示骨料边界拐角变化的剧烈程度,反映骨料细观形态上的变化;表面纹理反映骨料表面的粗糙程度,为微观形态上的变化。

国内外学者相继提出周长、面积、长轴长度、短轴长度等形状因子参数,表征骨料形状特征^[6]。棱角性参数反映骨料颗粒棱角的尖锐程度,学者们采用多边形拟合^[8]、椭球形拟合^[9]以及膨胀腐蚀法^[10]等表征骨料的棱角性。骨料的表面粗糙度描述骨料表面凹凸不平的情况,目前针对骨料粗糙度的表征主要有基于颗粒表面轮廓法^[11-12]和基于表面纹理图像法。分形维数法^[13]、灰度图像法和小波分析法^[14]通过处理骨料表面纹理图像表征骨料颗粒整体的表面质地。但是骨料的形貌参数在定义上十分多元化,且众多研究局限于天然骨料。此外,由于破碎方式不同,再生骨料相较于天然骨料,形貌差异性很大。因此,不能直接将天然骨料的形貌参数结果用于表征再生骨料的形貌特征。本文对 0.60~1.18 mm、1.18~2.36 mm、2.36~4.75 mm、4.75~20.00 mm 不同粒段(粒段以实际情况划分)的再生骨料进行 X-ray CT 扫描,通过三维重构获取不同粒段的再生骨料三维形貌;根据骨料的形态特征从整体形状、棱角性和表面粗糙度 3 个维度^[15]对再生骨料的形貌特征进行表征,如图 1 所示;对再生骨料颗粒的形貌特征参数进行统计分析,明确不同粒段再生骨料颗粒形貌特征参数的分布范围;通过独立性分析,提出能独立表征再生骨料颗粒形状、棱角性和表面粗糙度的特征参数,明确再生骨料颗粒形状特征参数的概率分布函数。

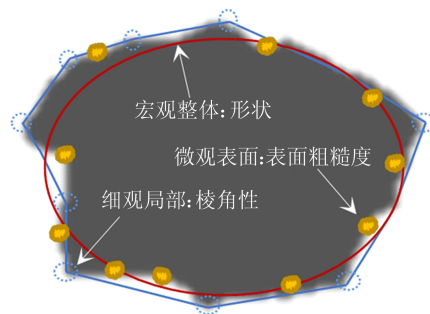


图 1 再生骨料 3 个维度表示示意图

1 再生骨料的颗粒形貌获取试验

1.1 原材料

本文所用的废弃混凝土来源于安徽省桐城市,采用合肥水泥设计研究院开发的再生砂粉破碎装备,对废弃混凝土进行破碎—分选—筛分后,得到 0.60~1.18 mm、1.18~2.36 mm、2.36~4.75 mm、4.75~20.00 mm 4 个粒段的再生骨料颗粒作为研究对象,如图 2 所示。根据标准 T/CAATB 006—2024《再生砂粉分类及应用导则》中的相关规定进行试验,测定再生骨料颗粒的表观密度、空隙率、含水率、吸水率以及浆体质量分数,结果见表 1 所列。

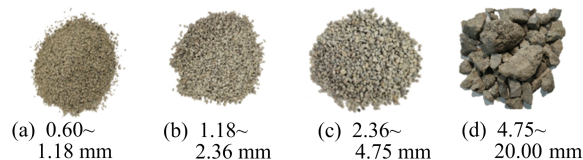


图 2 不同粒段的再生骨料

表 1 再生骨料基本性能

粒径/ mm	表观密度/ (kg/m ³)	空隙率/ %	含水率/ %	w(残余浆体) /%
0.60~1.18	2 431	51	5.8	23.7
1.18~2.36	2 440	47	5.9	21.3
2.36~4.75	2 450	43	4.7	20.9
4.75~20.00	2 536	42	5.4	22.3

1.2 再生骨料颗粒形貌测试样品的制备

为了防止再生骨料颗粒重叠影响测试结果,用硅胶将再生骨料颗粒间隔排列固定在亚克力容器内部,制备不同粒段的再生骨料颗粒样本。因为 0.60~1.18 mm、1.18~2.36 mm 粒径的再生骨料颗粒较小且需要较高的分辨率,所以本文从再生骨料中随机选取 100 余颗粒径为 0.60~1.18 mm 和 80 余颗粒径为 1.18~2.36 mm 再生骨料颗粒统一放置于直径为 300 mm、高为 300 mm 的圆柱体容器内。随机选取 100 余颗粒

径为 2.36~4.75 mm 再生骨料颗粒放置于直径为 300 mm、高为 300 mm 的圆柱体容器内。随机选取 60 余颗粒径为 4.75~20.00 mm 再生骨料放置于直径为 600 mm、高为 600 mm 的圆柱体容器内。再生骨料试验样品如图 3 所示。

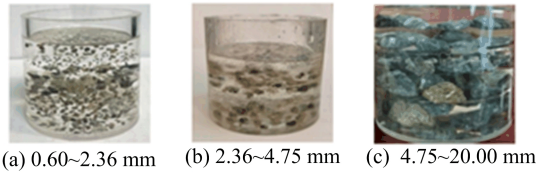


图 3 再生骨料试验样品

1.3 测试方法

本文采用 Waygate 公司(美国)生产的 GE Vtomex 工业 X-ray CT 扫描仪对测试样品进行扫描测试,分别获得 925 张粒径为 0.60~1.18 mm、1.18~2.36 mm 再生骨料样品二维切片图像,像素值为 $1\ 768 \times 1\ 788$;获得 966 张粒径为 2.36~4.75 mm 再生骨料样品二维切片图像,像素值为 $1\ 510 \times 1\ 532$;获得 1 426 张粒径为 4.75~20.00 mm 再生骨料样品二维切片图像,像素值为 $1\ 888 \times 1\ 889$ 。

部分不同粒段再生骨料的二维切片扫描结果如图 4 所示,扫描设备技术参数见表 2 所列,表 2 中,射线扫描方式为扇束。

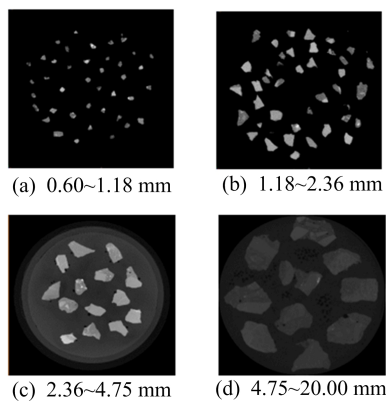


图 4 不同粒段的二维切片图像

表 2 X-ray CT 扫描设备技术参数

指标	参数
最大成像像素	$1\ 980 \times 1\ 980$
细节分辨率/ μm	1
最大功率/W	320
最大电压/kV	240
最小体素大小/ μm	1
焦点探测器距离/mm	800
几何放大倍数	1.39~100.00

1.4 再生骨料颗粒的三维重构

获取不同粒段的再生骨料颗粒的二维切片后,本文采用分水岭变换方法对图像进行分割。以粒径为 2.36~4.75 mm 的再生骨料颗粒为例,重构三维图像过程,如图 5 所示。具体重构步骤如下:① 使用 Avizo 软件对二维图像进行降噪处理,去除图像中噪点^[16];② 将二值图像转换为像素距离最接近的图像,提取轮廓,利用区域生长函数重建表面模型;③ 对每个层面的再生骨料颗粒进行三维重建,并通过 Avizo 软件中的 Volume Edit 提取单颗再生骨料颗粒;④ 划分三角形网格模型,生成 STL 格式,读取并存储再生骨料颗粒的形貌特征 3D 模型文件。

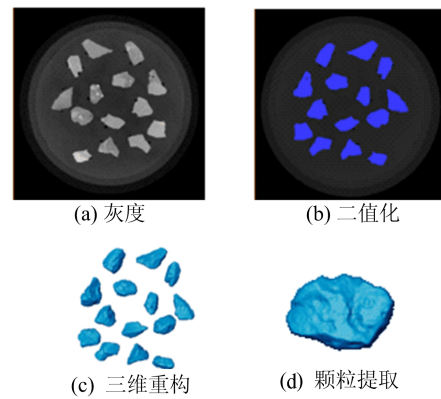


图 5 重构三维图像过程

2 再生骨料颗粒形貌表征

骨料形貌参数特征可由形状、棱角性和表面粗糙度 3 个参数表征。其中:形状描述颗粒的整体形状;棱角性反映颗粒棱角的尖锐程度;表面粗糙度描述颗粒表面的纹理和凹凸情况^[15]。骨料的形状量化参数大多基于其周长、面积、长轴长度、短轴长度等几何形态参数^[9]。轮廓曲率、轮廓梯度、多边形拟合、椭球拟合和腐蚀膨胀法等方法表征粗骨料棱角度^[10]。目前对于骨料粗糙度的表征主要有基于表面轮廓的方法和基于表面纹理图像的方法^[13]。

2.1 形状参数

骨料颗粒的三维形状参数主要包括球形度^[17]和长径比^[15]。颗粒经 X-ray CT 扫描后的切片数据由 Avizo 软件处理后,可以直接生成长度为 L 、宽度为 W 、高度为 T 、表面积为 S 、实际体积为 V_p 的三维颗粒,进而可以计算出再生骨料的球形度和长径比。

球形度 S_p 反映颗粒整体形状接近于球形的

程度,计算公式为:

$$S_p = \sqrt[3]{36\pi V_p^2/S} \quad (1)$$

球形度的取值范围在 0~1.0 之间,球形度越大表示颗粒形状越接近球形。

本文通过计算得到不同粒段再生骨料颗粒的球形度,结果见表 3 所列。通过计算可得,0.60~1.18 mm、1.18~2.36 mm、2.36~4.75 mm、4.75~20.00 mm 4 个粒段的再生骨料颗粒的球形度分别介于 0.679~0.997、0.664~0.920、0.613~0.860、0.623~0.835 之间,平均值分别为 0.864、0.835、0.730、0.736,说明随着再生骨料颗粒粒径的增大,再生骨料颗粒的球形度数值越来越低。这是由于粒径小的再生骨料,经过的破碎次数越多,整形次数越多,形状越接近于球形。

表 3 不同粒段再生骨料的球形度

粒径/mm	分布范围	平均值	离散程度
0.60~1.18	0.679~0.997	0.864	0.005
1.18~2.36	0.664~0.920	0.835	0.002
2.36~4.75	0.613~0.860	0.730	0.003
4.75~20.00	0.623~0.835	0.736	0.003

长径比为再生骨料颗粒的最长轴长度与最短轴长度的比值,计算公式为:

$$A_R = \frac{\max(L, W, T)}{\min(L, W, T)} \quad (2)$$

长径比越大表示再生骨料颗粒越细长,反映颗粒整体形状接近于球体的程度。

本文通过计算得到不同粒段再生骨料颗粒的长径比数值分布,如图 6 所示。计算可得不同粒段再生骨料颗粒的长径比分别为 1.243~3.336、1.264~2.152、1.374~3.442、1.343~3.441 之间,平均值分别为 1.716、1.748、1.996、2.029,离散程度分别为 0.136、0.113、0.063、0.231。

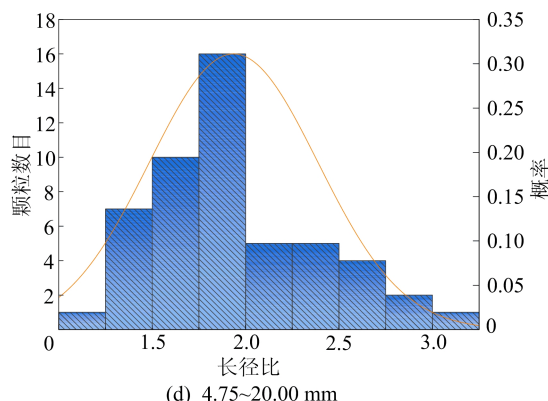
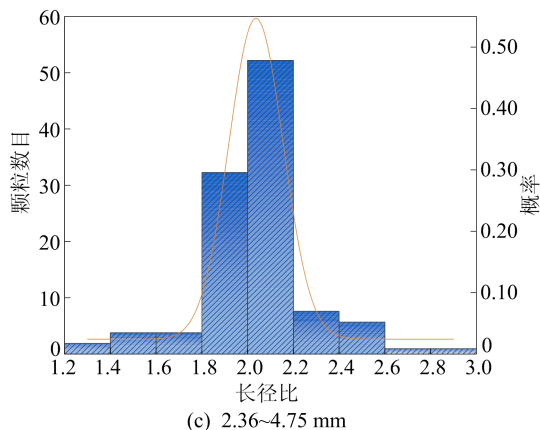
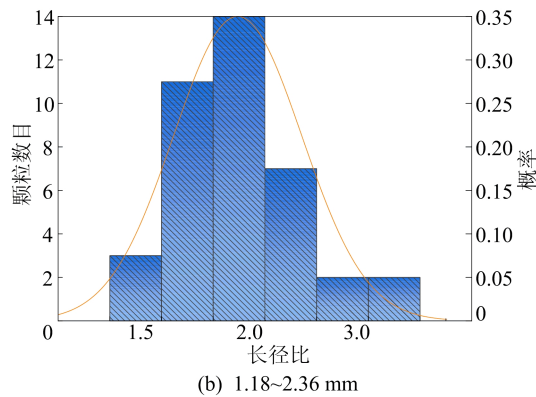
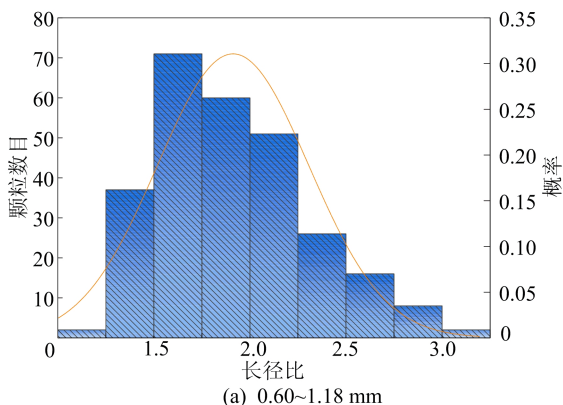


图 6 不同粒段再生骨料长径比数值分布

图 6 表明随着粒径的减小,再生骨料颗粒的长径比降低,这是由于粒径越小的再生骨料,经过的破碎次数越多,长径比越小。

2.2 棱角性

反映骨料棱角性的三维特征参数通常包括凸率^[18]、棱角性参数^[19]。凸率是颗粒体积与包围颗粒的凸边界体积之比,计算公式为:

$$C_x = V_p/V_{CH} \quad (3)$$

其中: V_p 为实际体积; V_{CH} 为凸边界体积。凸率越大,说明颗粒的棱角越不明显。凸率为 1.0 时表示颗粒周边圆滑,无凸起,类似于球体周边。

采用 MATLAB 计算凸率的步骤如下:① 使用 STLread 读取 STL 文件获取顶点和面片数

据,可选 fopen 处理文件头;② 初始化数组存储顶点、面片和法线信息,处理重复数据;③ 基于 Quickhull 算法,选取 4 个关键点建立初始四面体;④ 迭代计算,分配外部点集、寻找最远点、更新边集和面片,直至完成凸包构建;⑤ 最终输出凸包体积和表面积。

基于 X-ray CT 扫描获得再生骨料颗粒形貌特征,统计得到不同粒段再生骨料的凸率数值分布,如图 7 所示。

计算可得不同粒段的再生骨料颗粒的凸率分别介于 0.572~1.040、0.521~0.983、0.535~0.944、0.505~0.921 之间,平均值分别为 0.959、0.879、0.836、0.808,离散程度分别为 0.005、0.022、0.104、0.072。

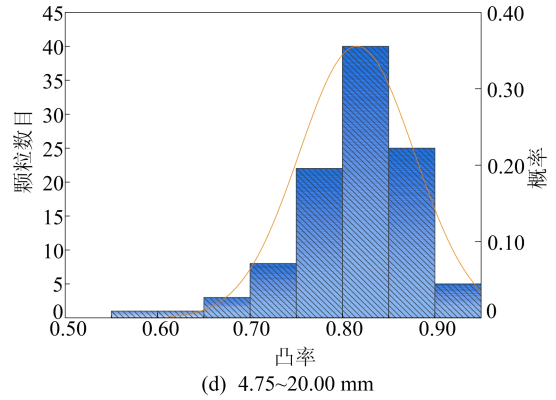
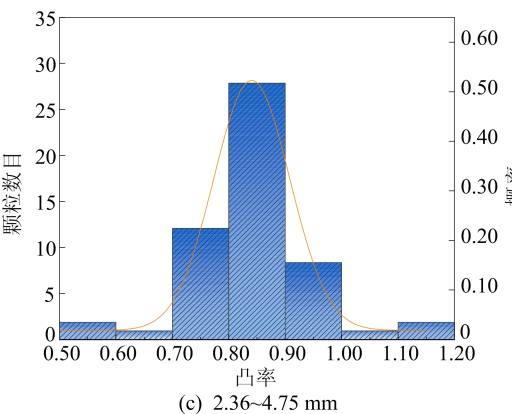
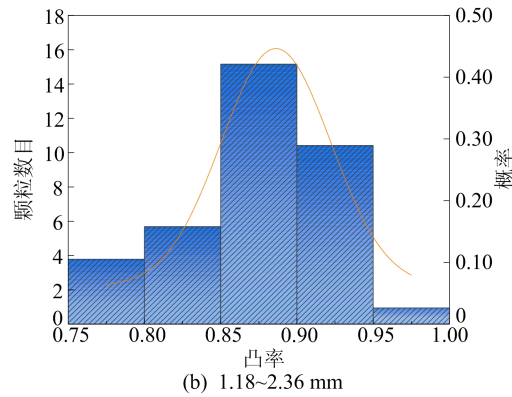
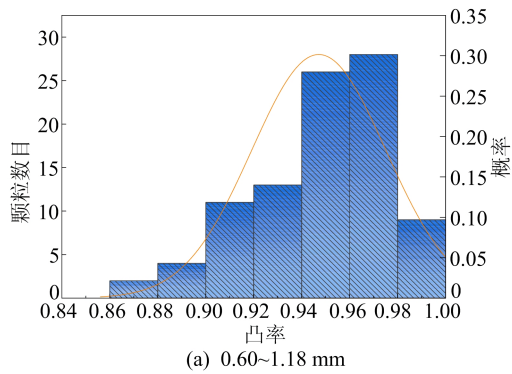


图 7 不同粒段再生骨料凸率数值分布

图 7 表明随着粒径的增加,再生骨料颗粒的凸率不断降低,颗粒的棱角越明显,这是由于较大颗粒在破碎过程中产生更多的裂纹和断裂面,并且较大颗粒在摩擦过程中不易被磨圆,从而保持更多的棱角与不规则形状。

颗粒的棱角性参数是颗粒实际表面积与颗粒外接椭球体表面积的差与颗粒实际表面积的比值,数值越小,表明颗粒周边越平滑,棱角性参数 A_{ng} 计算公式为:

$$A_{ng} = \frac{S - 4\pi \left[\frac{1}{3} \left(\frac{V}{V_e} \right)^{\frac{2p}{3}} L \right]^{\frac{1}{p}}}{S} \quad (4)$$

$$L = L_{max}^p L_{min}^p + L_{max}^p L_{mid}^p + L_{mid}^p L_{min}^p \quad (5)$$

其中: p 取 1.607 5; L_{max} 、 L_{mid} 、 L_{min} 分别为颗粒的长、中、短轴的长度; V 为颗粒体积; V_e 为颗粒外接椭球体积; S 为再生骨料颗粒的真实表面积。

基于 X-ray CT 扫描获得再生骨料颗粒形貌特征,统计得到不同粒段再生骨料的棱角性参数,结果见表 4 所列。从表 4 可以看出,随着粒径的增大,再生骨料颗粒的棱角性参数不断增加,这是由于再生骨料在破碎过程中沿其内部缺陷断裂,较大粒径的再生骨料颗粒产生更多不规则形状和尖锐边缘,因此棱角性参数不断增大。

表 4 不同粒段再生骨料的棱角性参数

粒径/mm	分布范围	平均值	离散程度
0.60~1.18	0.313~0.032	0.102	0.001
1.18~2.36	0.255~0.073	0.132	0.002
2.36~4.75	0.351~0.102	0.132	0.002
4.75~20.00	0.334~0.126	0.222	0.003

2.3 表面粗糙度

反映骨料表面粗糙度的三维特征参数包括粗糙度参数、分形维数^[20]。粗糙度是与颗粒体积相同的椭球表面积减去颗粒体积相同的球体表面积再除以颗粒实际表面积的比值,计算公式为:

$$R_{ou} = \frac{S - 4\pi \left[\frac{1}{3} \left(\frac{V}{V_e} \right)^{\frac{2p}{3}} L \right]^{\frac{1}{p}} - \sqrt[3]{36\pi V^2}}{S} \quad (6)$$

其中: V 为颗粒的实际体积; V_e 为三轴椭球体的体积; S 为颗粒的实际表面积。 R_{ou} 数值越大, 颗粒表面越粗糙。

对再生骨料颗粒形貌进行重构, 通过计算得到不同粒段再生骨料颗粒的粗糙度, 结果见表 5 所列。

从表 5 可以看出, 随着粒径的增大, 再生骨料颗粒的粗糙度不断增大, 这是由于再生骨料在破碎过程中较大粒径的再生骨料颗粒产生的裂纹和破碎、残留砂浆的附着、破碎方法的强烈冲击以及较大颗粒的不规则形状共同作用的结果。

表 5 不同粒段再生骨料的粗糙度

粒径/mm	分布范围	分布范围	离散程度
0.60~1.18	0.003~0.175	0.035	0.001
1.18~2.36	0.001~0.133	0.038	0.001
2.36~4.75	0.009~0.180	0.066	0.001
4.75~20.00	0.003~0.198	0.089	0.001

分形维数采用差分盒维数法, 将三维立方体网格覆盖颗粒表面计算其分形维数, 对于粗糙颗粒表面, 不同尺寸的网格大小对应不同的立方体个数, 通过改变网格尺寸得到不同的立方体个数, 在双对数坐标下拟合直线, 分形维数定义为该直线的斜率。分形维数越大, 颗粒表面纹理越复杂。分形维数 D_r 的计算公式为:

$$D_r = \lim_{r \rightarrow 0} \frac{\ln N_r}{\ln(1/r)} \quad (7)$$

其中: N_r 为不同尺度对应的立方体个数; r 为 XOY 平面上投影平面划分的网格尺度。 D_r 数值越大, 表面越粗糙。

分形维数计算方法如下: 输入三维二值矩阵 $V(x, y, z)$, x, y, z 的取值范围为 0 或 1, 1 表示颗粒图像, 0 表示背景。选取等比网格边长, 将数据域划分为 r^3 立方体, 边缘截断处理。统计各尺度 r 下含 1 的盒子数 N_r , 通过最小二乘法进行拟合, 拟合直线斜率为 D_r 。

本文基于 X-ray CT 扫描获得的再生骨料颗粒形貌特征, 统计得到不同粒段再生骨料的分形维数数值分布, 如图 8 所示。计算可得不同粒段的再生骨料颗粒的分形维数分别为 2.35~2.79、2.62~2.99、2.73~2.96、2.91~2.99, 平均值分别为 2.754、2.836、2.859、2.965, 离散程度分别为 0.033、0.008、0.003、0.002。

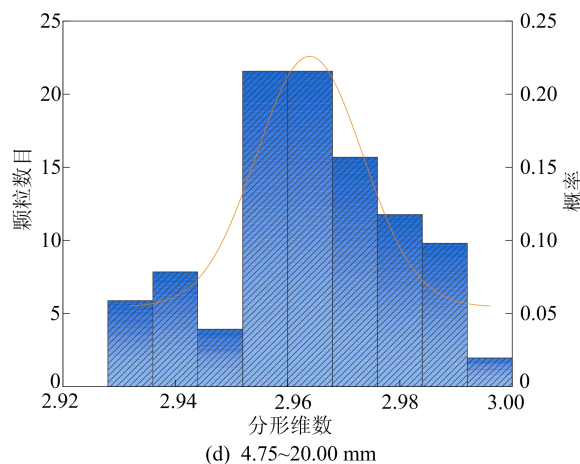
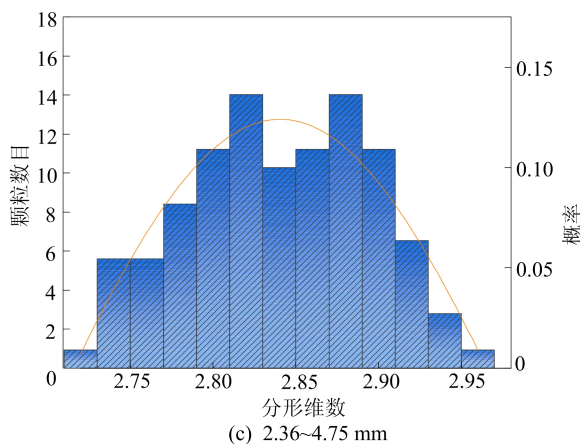
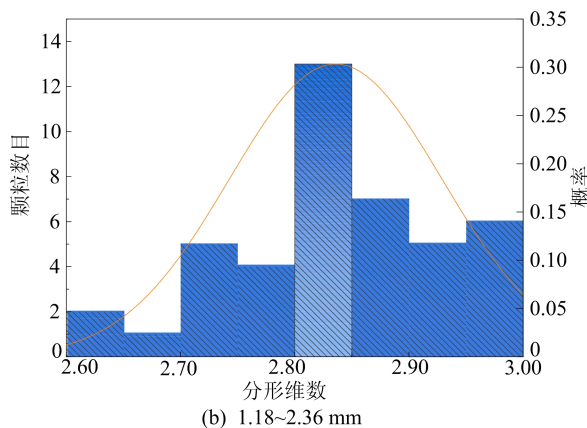
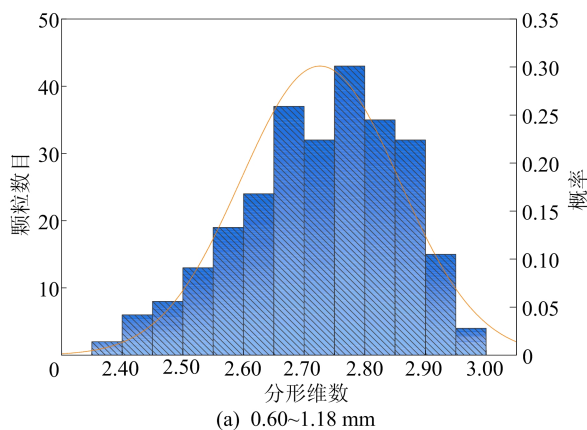


图 8 不同粒段再生骨料分形维数数值分布

说明随着粒径的增大,再生骨料颗粒的分形维数不断增大,颗粒的表面越粗糙。这是由于在破碎的过程中,相对较小的颗粒会经历更多的研磨和摩擦,从而使得再生骨料的表面更光滑。对于再生粗骨料而言,破碎设备的冲击和剪切作用更强,从而导致颗粒表面粗糙度增加。

3 再生骨料颗粒形貌独立性分析

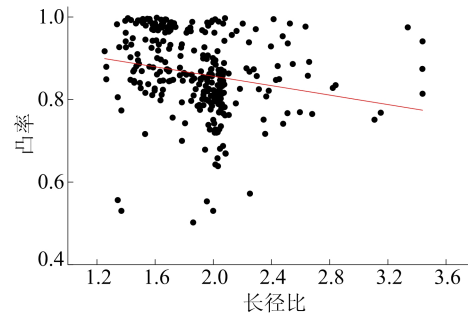
以 4 个粒级再生骨料颗粒为例,对不同参数进行线性回归并计算皮尔逊相关系数 r , r 取值范围为 $-1 \sim 1$, 相关系数的正负表示变量之间呈正相关性或负相关性,绝对值的大小表示相关程度的强弱^[21],计算公式如下:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n [(X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})]}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2}} \quad (8)$$

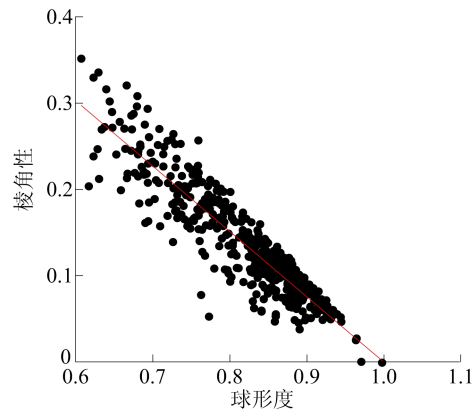
其中, X_i, Y_i 分别为 $X = (X_1, X_2, \dots, X_n), Y = (Y_1, Y_2, \dots, Y_n)$ 第 i 次的二维随机变量; X, Y 分别为 2 个参数对应值; n 为整体样本数量; \bar{X}, \bar{Y} 分别为 X, Y 的平均值。

1) 形状参数与棱角性参数之间独立性分析。形状参数与棱角性参数之间的相关性如图 9 所示。从图 9 可以看出,再生骨料粒径长径比与棱角性之间的相关系数为 0.339,长径比与凸率之间的相关系数为 -0.216 ,球形度与棱角性之间的相关系数为 -0.912 ,球形度与凸率之间的相关系数为 0.736。由以上分析可知,长径比和棱角性的独立性更明显。

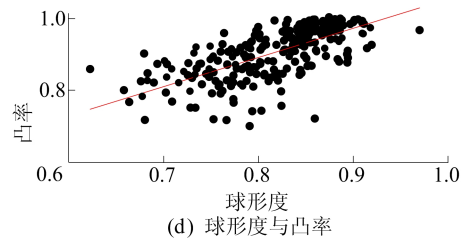
2) 形状参数与粗糙度参数之间独立性分析。形状参数与粗糙度参数之间的相关性如图 10 所示,从图 10 可以看出,再生骨料粒径长径比与分形维数之间的相关系数为 0.215,长径比和粗糙度之间的相关系数为 0.870,球形度与分形维数之间的相关系数为 -0.669 ,球形度与粗糙度之间的相关系数为 -0.474 ,由此可知长径比和分形维数的独立性更明显。



(b) 长径比与凸率



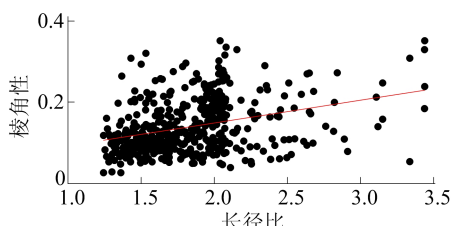
(c) 球形度与棱角性



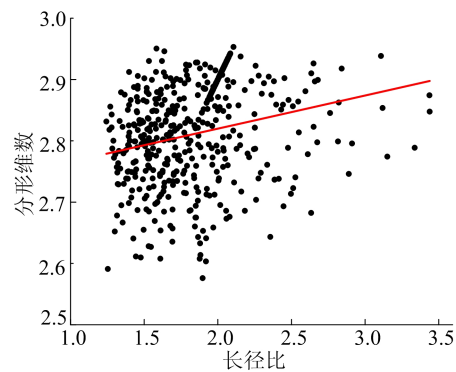
(d) 球形度与凸率

图 9 形状参数与棱角性参数之间的相关性

3) 棱角性参数与粗糙度参数之间独立性分析。棱角性参数与粗糙度参数之间的相关性如图 11 所示。棱角性与分形维数、棱角性与粗糙度、凸率与粗糙度、凸率与分形维数之间的 r 值分别为 0.701、0.497、 -0.348 、 -0.633 。



(a) 长径比与棱角性



(a) 长径比与分形维数

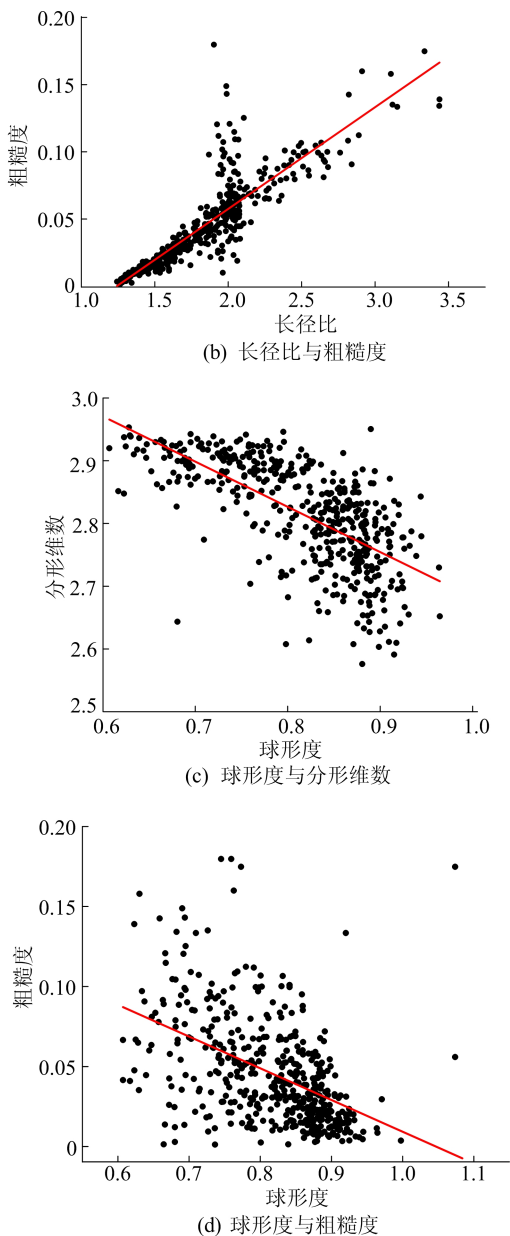


图 10 形状参数与粗糙度参数之间的相关性

从图 11 可以看出,长径比、凸率与分形维数两两相互独立且独立性明显,能够独立表达再生骨料的形状、棱角性和粗糙度的形貌特征。

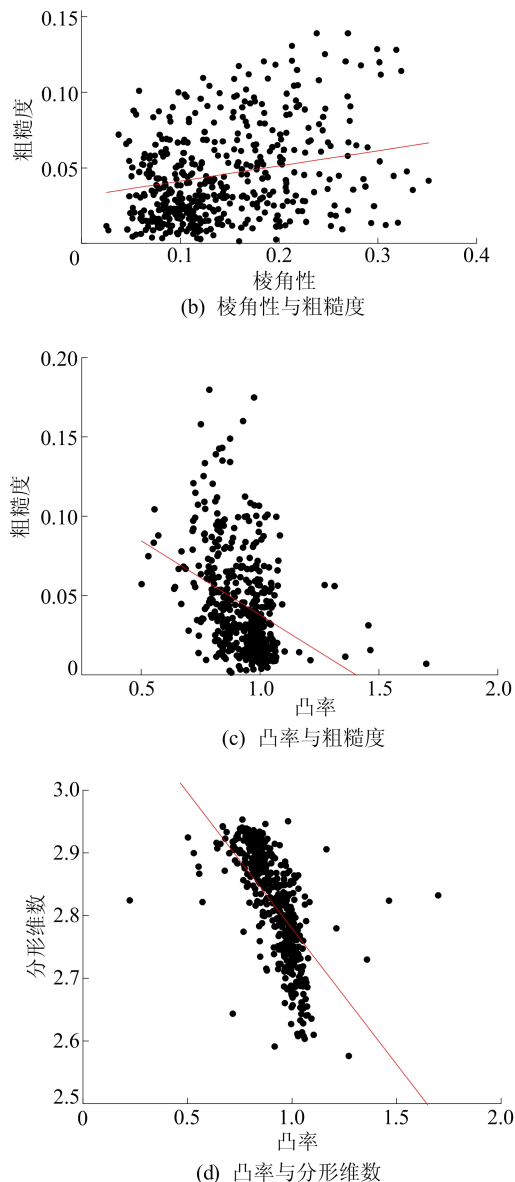
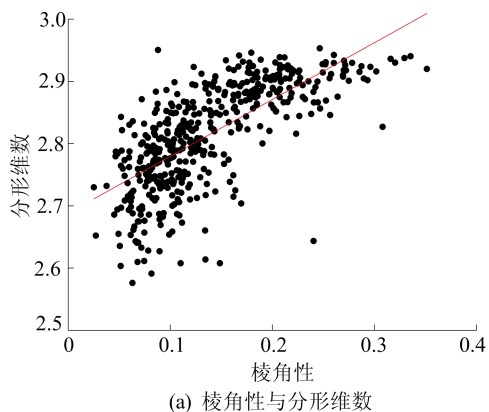


图 11 棱角性参数与粗糙度参数之间的相关性

4 再生骨料颗粒形貌参数统计分析

Kolmogorov-Smirnov(K-S)检验的统计量是样本经验分布函数与理论分布函数之间的最大差异。对于单样本 K-S 检验,统计量计算公式为:

$$D = \sup_x | F_n(x) - F(x) | \quad (9)$$

其中: n 为样本总数; $F_n(x)$ 为样本的经验分布函数,表示小于或等于 x 的样本比例; $F(x)$ 为理论分布函数,表示小于或等于 x 的理论分布概率; \sup 表示取最大值。采用 K-S 法检验每个特征参数的概率分布特征,结果见表 6 所列,不同粒段再生骨料的长径比、凸率和分形维数均满足正态分布。从表 6 可以看出,不同粒段再生骨料的长径比、凸率和分形维数的概率分布函数均可记为正

态分布 $X \sim N(\mu, \sigma^2)$, 其标准差和方差有所不同, 尽管不同粒段的再生骨料形貌参数均满足正态分布, 但其分布参数不同, 随着再生骨料粒径增大, 长径比期望值增大, 4.75~20.00 mm 粒径再生骨料的离散程度最大。凸率期望值减小, 0.60~1.18 mm 粒径的再生骨料离散程度最大, 分形维数增大, 1.18~2.36 mm 粒径的再生骨料离散程度最大。离散程度越大, 说明破碎方式对不同粒径再生骨料的形貌特征影响较大。

表 6 再生骨料正态分布参数检验结果

粒径/mm	参数	统计量	临界值	接受/拒绝
0.60~1.18	长径比	0.063	0.050	接受
	凸率	0.291	0.050	接受
	分形维数	0.249	0.050	接受
1.18~2.36	长径比	0.208	0.050	接受
	凸率	0.851	0.050	接受
	分形维数	0.869	0.050	接受
2.36~4.75	长径比	0.861	0.050	接受
	凸率	0.271	0.050	接受
	分形维数	0.654	0.050	接受
4.75~20.00	长径比	0.116	0.050	接受
	凸率	0.089	0.050	接受
	分形维数	0.946	0.050	接受

5 结 论

本文基于 X-ray CT 试验获取粒径范围分别为 0.06~1.18 mm、1.18~2.36 mm、2.36~4.75 mm、4.75~20.00 mm 的再生骨料颗粒的二维切片图像, 并进行三维重构获得不同粒径的再生骨料颗粒三维形貌。基于宏观、细观和微观 3 个维度分别对再生骨料颗粒的形状、棱角性及表面粗糙度进行统计分析, 明确各参数之间的独立性, 提出能独立表达再生骨料颗粒三维形貌的特征参数, 并通过统计分析建立再生骨料三维形貌特征参数的概率分布函数, 得出如下主要结论:

1) 随着再生骨料颗粒粒径的增大, 再生骨料的颗粒形貌特征参数中反映颗粒形状的长径比逐渐增大, 反映颗粒棱角性的凸率不断降低, 且反映颗粒表面粗糙度的分形维数也不断增大。

2) 再生骨料的长径比、凸率与分形维数两两相互独立且互不影响, 能够独立表达再生骨料的形状、棱角性、粗糙度的形貌特征。

3) 不同粒径再生骨料的形貌特征参数均服从正态分布, 但统计获得的概率分布参数均不相同。

[参 考 文 献]

- [1] LONG L, BAO J Z, LU J X, et al. Systematic evaluation of the effect of replacing river sand by different particle size ranges of fine recycled concrete aggregates (FRCA) in cement mortars [J]. Construction and Building Materials, 2019, 209:147-155.
- [2] WANG J, LI H, WANG Z, et al. Humidity field and moisture transfer of concrete with different pre-saturated recycled sand [J]. Construction and Building Materials, 2023, 382:131338.
- [3] VERIAN K P, ASHRAF W, CAO Y Z. Properties of recycled concrete aggregate and their influence in new concrete production [J]. Resources Conservation and Recycling, 2018, 133:30-49.
- [4] PROWELL B, WEINGART R. Precisions of flat and elongated particle tests: ASTM D4791 and VDG-40 video grader [J]. Transportation Research Record, 1999, 1673:73-80.
- [5] LIU H, YAN Z Y, WANG F C, et al. Quantitative analysis of morphological features of recycled asphalt pavement and natural coarse aggregates using aggregate image measurement system [J]. Case Studies in Construction Materials, 2025, 22:e04410.
- [6] GARBOCZI E J. Three-dimensional mathematical analysis of particle shape using X-ray tomography and spherical harmonics: application to aggregates used in concrete [J]. Cement and Concrete Research, 2002, 32(10):1621-1638.
- [7] BARRETT P J. The shape of rock particles, a critical review [J]. Sedimentology, 1980, 27(3):291-303.
- [8] GE H, SHA A, HAN Z, et al. Three-dimensional characterization of morphology and abrasion decay laws for coarse aggregates [J]. Construction and Building Materials, 2018, 188:58-67.
- [9] ZHAO Y, DUAN Y, ZHU L, et al. Characterization of coarse aggregate morphology and its effect on rheological and mechanical properties of fresh concrete [J]. Construction and Building Materials, 2021, 286:122940.
- [10] ZHU H, FANG H, CAI Y, et al. Development of a rapid measurement system for coarse aggregate morphological parameters [J]. Particuology, 2020, 50:181-188.
- [11] EYAD M, BUTTON J W. Unified imaging approach for measuring aggregate angularity and texture [J]. Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering, 2000, 15(4):273-280.
- [12] 周纯秀, 陈国明, 谭忆秋. 粗集料表面纹理粗糙度的分形测量和描述 [J]. 哈尔滨工业大学学报, 2009, 41(11):85-89.
- [13] ZUZANA F, JAMBOR M. Quantification of aggregates surface texture based on three dimensional microscope measurement [J]. Procedia Engineering, 2017, 192:195-200.
- [14] 付茹, 胡新丽, 周博, 等. 砂土颗粒三维形态的定量表征方法 [J]. 岩土力学, 2018, 39(2):483-490.
- [15] MA K, HUANG X, SHEN J, et al. The morphological characteristics of brick-concrete recycled coarse aggregate

- based on the digital image processing technique[J]. Journal of Building Engineering, 2021, 44: 103292.
- [16] BAUDOUIN M A, HWANG S D, KHAYAT K H. Influence of aggregate characteristics on workability of super workable concrete [J]. Materials and Structures, 2016, 49(1/2): 597-609.
- [17] LARA D, MAIA R, BESSA I, et al. The influence of crushing processes and mineralogy of aggregates on their shape properties and susceptibility to degradation[J]. Construction and Building Materials, 2021, 284: 122745.
- [18] WU J, SHEN W, ZHAO D, et al. Particle characterization of manufactured sand and its influence on concrete properties[J]. Materials, 2022, 15(13): 4593.
- [19] FAN C, HUANG R, HWANG H, et al. Properties of concrete incorporating fine recycled aggregates from crushed concrete wastes[J]. Construction and Building Materials, 2016, 112: 708-715.
- [20] LIU Y, SUN W, NAIR H, et al. Quantification of aggregate morphologic characteristics with the correlation to uncompacted void content of coarse aggregates in virginias [J]. Construction and Building Materials, 2016, 124: 645-655.
- [21] 徐善华, 夏敏. 锈蚀钢材表面的分形维数与多重分形谱[J]. 材料导报, 2020, 34(16): 16140-16143.

(责任编辑 张 镛)

(上接第 1400 页)

[参 考 文 献]

- [1] 杜昱彤, 曲柏宏, 李润文. 我国红皮梨资源及果实着色机制研究进展[J]. 延边大学学报, 2021, 43(4): 98-107.
- [2] LI J, ZHANG M, LI X, et al. Pear genetics; recent advances, new prospects, and a roadmap for the future[J]. Horticulture Research, 2022, 9: uhab040.
- [3] XUE H, SHI T, WANG F, et al. Interval mapping for red/green skin color in Asian pears using a modified QTL-seq method[J]. Horticulture Research, 2017, 4: 17053.
- [4] PENG M, SHAHZAD R, GUL A, et al. Differentially evolved glucosyltransferases determine natural variation of rice flavone accumulation and UV-tolerance [J]. Nature Communications, 2017, 8(1): 1975.
- [5] BULGAKOV P, AVRAMENKO T V, TSITSIASHVILI G S. Critical analysis of protein signaling networks involved in the regulation of plant secondary metabolism; focus on anthocyanins[J]. Critical Reviews in Biotechnology, 2017, 37(6): 685-700.
- [6] SCHAART J, DUBOS C, FUENTE I, et al. Identification and characterization of MYB-BHLH-WD40 regulatory complexes controlling proanthocyanidin biosynthesis in strawberry (*Fragaria xananassa*) fruits[J]. New Phytologist, 2013, 197(2): 454-467.
- [7] ZHAI R, WANG Z, ZHANG S, et al. Two MYB transcription factors regulate flavonoid biosynthesis in pear fruit (*Pyrus bretschneideri* Rehd) [J]. Experimental Botany, 2016, 67(5): 1275-1284.
- [8] YAO G, MING M, ALLAN A C, et al. Map-based cloning of the pear gene MYB114 identifies an interaction with other transcription factors to coordinately regulate fruit anthocyanin biosynthesis [J]. Plant Journal, 2017, 92(3): 437-451.
- [9] NI J B, PREMATHILAKE A T, GAO Y H, et al. Ethylene-activated PpERF105 induces the expression of the repressor-type R2R3-MYB gene *PpMYB140* to inhibit anthocyanin biosynthesis in red pear fruit[J]. Plant Journal, 2021, 105(1): 167-181.
- [10] LAFOUNTAIN A M, YUAN Y. Repressors of anthocyanin biosynthesis [J]. New Phytologist, 2021, 231(3): 933-949.
- [11] ZHENG T, TAN W, YANG H, et al. Regulation of anthocyanin accumulation via MYB75/HAT1/TPL-mediated transcriptional repression[J]. PLoS Genet, 2019, 15(3): e1007993.
- [12] LI C, SHI L, WANG Y, et al. Arabidopsis ECAP is a new adaptor protein that connects JAZ repressors with the TPR2 co-repressor to suppress jasmonate-responsive anthocyanin accumulation[J]. Molecular Plant, 2020, 13(2): 246-265.
- [13] OH E, ZHU J, RYU H, et al. TOPLESS mediates brassinosteroid-induced transcriptional repression through interaction with BZR1 [J]. Nature Communications, 2014, 5: 4140.
- [14] DENG H, CHEN Y, LIU Z, et al. *SlERF. F12* modulates the transition to ripening in tomato fruit by recruiting the co-repressor Topless and histone deacetylases to repress key ripening genes[J]. Plant Cell, 2022, 34(4): 1250-1272.
- [15] LI L, WEI Z, ZHOU Z, et al. A single amino acid mutant in the EAR motif of *IbMYB44. 2* reduced the inhibition of anthocyanin accumulation in the purple-fleshed sweetpotato [J]. Plant Physiology and Biochemistry, 2021, 167: 410-419.

(责任编辑 吴 亮)