

doi: 10.3969/j.issn.1002-0268.2016.05.008

路用粗集料形态可视化识别及其评价方法综述

肖倩, 张蕾

(交通运输部公路科学研究院, 北京 100088)

摘要: 针对当前路用粗集料可视化识别及其评价方法的局限性, 首先总结了目前3类主要的路用粗集料可视化识别技术手段: CCD数字图像处理技术、X射线断层扫描技术以及激光扫描技术的技术特点、研究现状和存在的问题。在此基础上, 从集料的形状、棱角和纹理3个方面对国内外现有的集料形态评价方法及评价指标进行了总结与归纳。针对目前集料形态可视化识别方法及评价方法存在的问题, 提出了需要进一步研究的技术问题, 即一方面, 要继续从三维可视化角度寻求能更为全面、准确识别集料颗粒的视觉化识别方法; 另一方面, 要继续完善和进一步验证粗集料颗粒形态评价指标的客观性和有效性, 建立一套具有广泛认可度的粗集料颗粒形态评价体系。

关键词: 道路工程; 路用粗集料; 可视化识别; 形态评价; 综述

中图分类号: U416.21

文献标识码: A

文章编号: 1002-0268(2016)05-0046-07

A Review of Visual Identification and Evaluation of Coarse Aggregate of Road Pavement

XIAO Qian, ZHANG Lei

(Research Institute of Highway, Ministry of Transport, Beijing 100088, China)

Abstract: In view of the limitations of current methods to visual identify and evaluation the coarse aggregate for road pavement, the research features, status and problems of 3 major means of visual identification technology: CCD digital image processing technology, X-ray tomoscanning technology and laser scanning technology are summarized at first. Then, the existing domestic and foreign evaluation methods and indexes of aggregate in respect of shape, angularity and texture are introduced. For the problems in the visual identification and evaluation methods of current coarse aggregate, the technical issues for further research are proposed, that is, on the one hand, to continuously seek a more comprehensive and accurate visual identification method based on 3D visual technology; on the other hand, to continue improving and to further validating the objectivity and effectiveness of the valuation indexes, and then to establish a set of widely recognized coarse aggregate particle shape evaluation system.

Key words: road engineering; shape evaluation; visual identification; coarse aggregate; review

0 引言

沥青混合料中集料的性质对其工程特性有着十分重要的影响, 尤其是粗集料的形态特征, 关系到沥青混合料空间骨架的构建以及沥青砂浆与集料间的相互作用效应, 进而引起沥青混合料的耐久性、抗疲劳性与力学强度的变化, 最终对沥青路面的综

合路用性能产生重要影响^[1-3]。

广义而言, 粗集料形状特性可以用轮廓形状、棱角性和表面纹理3个不同层次的特征分量来表示。粗集料的轮廓形状和棱角性属于宏观范畴, 粗集料形状越接近立方体且棱角分明, 越有利于矿料级配集料之间的相互嵌锁, 对提高热拌沥青混合料高温稳定性、强度、疲劳性能和耐久性等路用性能起主

收稿日期: 2014-09-22

基金项目: 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金项目(2013-9010)

作者简介: 肖倩(1984-), 女, 江西高安人, 硕士研究生. (q.xiao@rioh.cn)

导作用; 粗集料表面纹理属于亚微观范畴, 良好的粗集料表面纹理不仅可以提高热拌沥青混合料高温稳定性, 而且可以增加粗集料表面沥青膜的厚度, 进而提高热拌沥青混合料疲劳、水稳定性等耐久性能。

鉴于粗集料形状特征对混合料路用性能有显著影响, 同时我国公路路面使用的粗集料由于工艺原因质量参差不齐, 建立科学的粗集料形态特征评价体系显得尤为重要。传统的试验评价方法(如集料的堆积空隙率、内摩阻角、针片状含量等)均是对堆积或成型的集料整体的宏观性质进行测定, 仅表征集料的整体特性, 是基于统计概念的试验方法, 无法直接有效地表征集料颗粒个体的形态特征, 意义并不明确。粗集料的可视化识别技术是近几年发展起来的新兴技术, 具有非接触、全场测量和高精度三大重要特点。它将数字图像处理、医用 CT 及激光扫描等先进技术引入到路用集料形状特征的采集与分析上, 建立了集料颗粒形态的特征提取与三维重构体系。这一方面可以实现对路用集料的形态特征的图形化描述和分类识别; 另一方面可以通过研究集料形态特征与混合料路用性能的相关性, 提出根据路用性能要求的集料形态控制和选择标准。

1 粗集料形态可视化识别技术

粗集料颗粒的综合形态特征主要包括形状、棱角和纹理 3 个方面, 多年来国内外学者运用激光、电子与 CCD (数码相机) 数字图像技术对集料形态测试方法开展了深入研究, 主要形成了 3 类粗集料形态可视化识别的技术手段: (1) CCD 数字图像处理提取集料特征分析及三维信息重构; (2) X 射线断层扫描及三维重构; (3) 激光扫描测量集料三维轮廓。

1.1 CCD 数字图像处理技术

20 世纪 50 年代, 计算机图像处理技术迅速发展并形成新的学科, 数字图像技术逐渐成为图像研究的主要手段, 自动图像分析用于颗粒形状描述在很多的的研究中得到应用。国外在利用图像处理技术研究粗集料的形态特性方面成果显著。

CCD 数字图像处理, 就是利用计算机或其他数字硬件, 对数码图像信息转换而得的电信号进行数学运算, 最终实现对图像的识别、评价和理解。通过对所拍摄集料图像的处理运算, 最终可以提取出粗集料的一次形状参数, 主要包括面积、周长、主轴长度、次轴长度等。但这些还不足以全面反映集料颗粒的形状特征, 一般还需加入二次参数来描述集料的形状、棱角等特性, 主要包括用于描述集料

轮廓形状的形状因子、球度及描述集料棱角性的圆度等指标。更进一步, 还能根据同时拍摄的三视图提取的特征重构集料颗粒的三维信息。

汪海年、郝培文等(2009)^[4]采用数字图像处理技术, 利用自行研制的粗集料形态特征研究系统(MASCA)对粗集料的图像级配特征进行研究, 提出将二维数字图像级配转换为三维机械筛分级配的修正方法。

东南大学孔明^[5]在他的博士论文中利用显微镜连接的摄像机对颗粒进行成像重建, 根据显微镜轴向工作性质, 提出了单目显微镜颗粒测量的共轴立体视觉模型, 对颗粒形状进行重建, 在颗粒三维重建的基础上, 用八叉树方式对颗粒进行表示, 并利用模糊数学对颗粒进行识别, 把颗粒按形状分类。

Illinois 大学的 Rao^[6]开发的采用三台相机同时拍摄一颗传送带上石料的设备, 如图 1 所示。根据集料颗粒 3 个方向上的二维形态特征(见图 2)可进一步重构石料的三维图像信息并计算集料的体积。

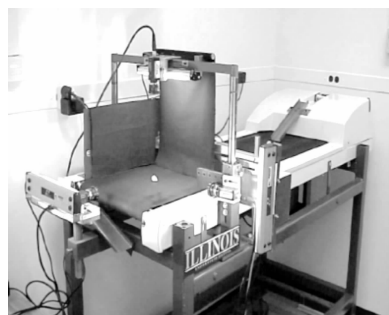


图 1 集料三维测试系统

Fig. 1 Aggregate 3D test system

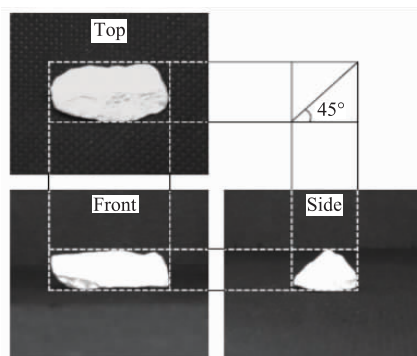


图 2 集料颗粒三维图像

Fig. 2 Aggregate 3D images

另外, 也有几家公司针对 Superpave 体系对集料质量的若干要求开发了自动识别设备。例如 EMACO 公司的 VDG-40 型^[7]自动识别系统, 采用一系列扫描相机采集颗粒由传送带下落过程的图像, 计算分析

颗粒的粒度特征信息,并以此为基础采用回转椭圆模型计算集料颗粒的体积。

WipWare 公司也生产了几个型号的相关产品。分别针对颗粒级配检测和颗粒棱角性以及扁平、细长特征检测。Norbert H. Maerz^[8]开发的一套仪器设备,通过设计两台垂直方向的相机,拍摄颗粒的两个垂直方向断面,通过统计回归方法建立不同方向上的形状、尺寸信息,通过几何概率和体视学原理进行三维拟合重构,计算颗粒的体积。

西维吉尼亚大学^[5]研究仅采用一台数码相机,同时拍摄多集料颗粒的方法,根据颗粒的几何形状特征值以及定义的多个特征值对多集料颗粒的体积进行预估,并以此为基础进一步计算了集料的级配,克服了 Illinois 大学研究方法速度较慢的缺点。但是由于试验所采用的集料类型相对单一,模型在扩大范围应用中的效果还有待验证。

美国 Illinois 大学香槟分校的黄海博士^[9]在其论文中就 CCD 数字图像处理技术中的三维重建问题开展了深入研究,通过 3 个相互垂直方向拍摄的集料颗粒形状数据重构集料三维形状。受制于二维拍摄模式的限制,三维的重构仅能是根据二维直径、棱角性以及矩形度等信息推算拟合三维形状,如图 3 所示,还并不是严格意义上的三维重构。

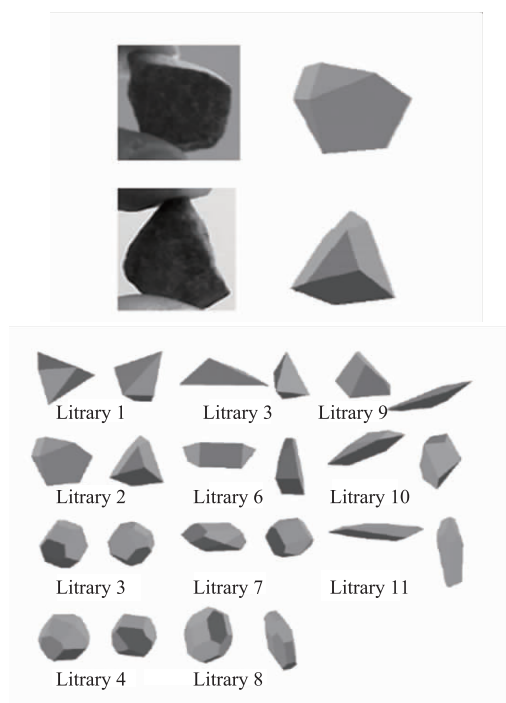


图3 集料三维拟合重构效果

Fig. 3 Aggregate 3D fitting and reconstruction effect

数字图像处理技术因为其方便性、经济性、易于分析等优点,已经成为粗集料形态分析的重要手

段。常规的图像分析手段通常只能获取集料颗粒的二维特征信息,研究者一直以来都在尝试建立二维与三维信息的相关性转换;但由于数码拍摄获取的均为投影面积,集料颗粒的二维轮廓并不完全代表真实颗粒三维表面的起伏变化,特别是棱角特性,因此基于二维数字图像的三维重构仍然存在缺陷,目前尚无统一权威的方法和结论。

1.2 X 射线断层扫描技术

X 射线具有穿透物体并使胶片感光的能力,透视拍摄在医学上的成功应用引起了工业界的注意,工程师很快将其应用到工业检测中,土木工程结构材料的内部探测即是其一。典型的 X 射线扫描系统^[10]如图 4 所示,包括以下主要构件:射线源、辐射探测器和准直器、数据采集系统、样品扫描机械系统、计算机系统及辅助系统等。其中,探测器测量和记录射线源发射透过材料后的射线强度值,数据采集系统将这些强度值转换为数码信号,送进计算机进行处理,经过排列重建,在显示器上显示材料探测层面的切片图。X 射线断层扫描本质上是一个图像系统,它把实际存在的物体投影成一个平面或立体的图像。

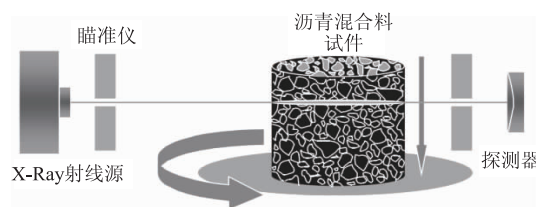


图4 集料 X 射线扫描系统

Fig. 4 Aggregate X-ray scanning system

对于单个集料样本的测量可选择采用小功率的 CT 扫描设备,如 SKYSCAN 的 CT - Analyzer。通过对样本形状的不断断层扫描并配备逆向计算软件匹配综合集料颗粒的三维信息,可进行 3D 模型的重构,见图 5。

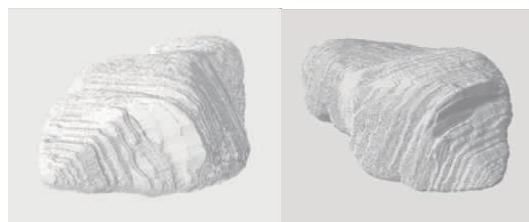


图5 CT 扫描重构集料形状图

Fig. 5 Aggregate shapes by CT scanning reconstruction

分析结果表明,采用 CT 扫描采集集料颗粒并计算得到的粒度尺寸与传统用游标卡尺进行人工量测所得

的结果相关性极好, 相关性超过 0.99 (图 6)。

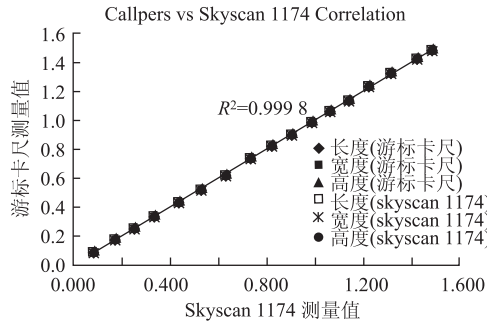


图 6 人工测量结果与 CT 扫描测试结果相关性
(单位: $\times 25.4$ mm)

Fig. 6 Correlation between artificial measurement result and CT scanning test result (unit: $\times 25.4$ mm)

对于沥青混合料中的集料几何形状, 同样可以通过 CT 扫描的方式进行采集和分析 (图 7)。但由于沥青混合料整体试样尺寸较大, 射线穿透试件所需的能量明显大于单颗集料, 因此虽然原理完全相同, 但设备的功率远大于前述设备, 用于沥青混合料检测的 CT 设备功率一般不低于 320 kV, 同时配备相应的防护屏蔽室或防护罩。

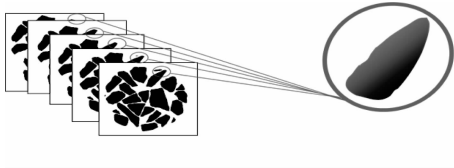


图 7 混合料中集料颗粒 CT 断面图三维重构

Fig. 7 Three-dimensional reconstruction of aggregate particles in mixture based on CT section

X 射线断层扫描技术是当前获取混合料内部结构细观尺度的主流平台, 其扫描输出的一系列连续断层二维切片图像是集料的二维特征提取和三维信息重构的基础。同数字图像处理技术一样, 目前该技术还缺乏关于集料二、三维信息转换的基础性研究, 如从三维尺度科学地描述粗集料形状、棱角性、表面纹理等方面。

1.3 激光扫描技术

三维激光扫描技术是集光、机、电和计算机技术于一体的高新技术, 实现被测物体的三维轮廓重构是通过发射激光, 接触被测样本后, 通过光线反射时间和坐标转换来计算相应点位的三维坐标, 形成被测物体轮廓面上的点云数据, 进而通过逆向工程软件将点云数据拟合成曲面, 如图 8 所示。

哈尔滨工业大学的陈国明^[11]曾采用光纤传感器设计了用于采集集料颗粒表面纹理构造的设备, 采

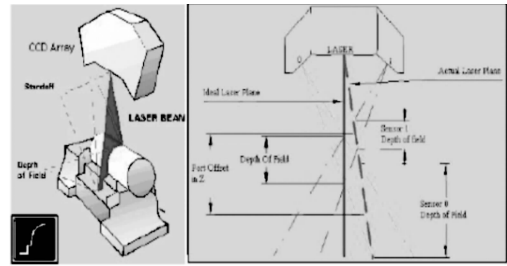


图 8 激光扫描仪工作原理图

Fig. 8 Working principle of laser scanner

样的精度可达 $0.1 \mu\text{m}$ 。该方法的测量精度较高, 可以描述集料颗粒表面细微构造, 但是, 由于其工作原理是靠探测激光往返于集料表面和探测器之间的距离来确定集料的表面构造, 集料本身的颜色将对其反射光产生影响, 为获得高精度的测量结果, 一般要求在检测前对集料进行真空镀膜处理, 该工艺要求较高, 操作难度大。因此, 该方法主要是适用于室内试验研究, 不适合大规模的工程质量控制。

美国弗吉尼亚理工大学汪林兵课题组采用激光扫描仪开展了集料颗粒轮廓及构造形状测定的相关研究, 利用三维重构逆向工程软件实现集料颗粒形状的反向重构 (图 9); 并将采集计算结果与人工量测的方法进行了比较, 对 3 个尺度长、宽、厚度方向数据进行比较回归, 相关性可达到 0.9 以上 (图 10)^[12]。

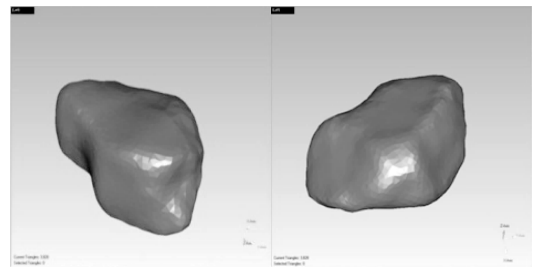


图 9 激光扫描仪成像效果

Fig. 9 Laser scanner imaging effect

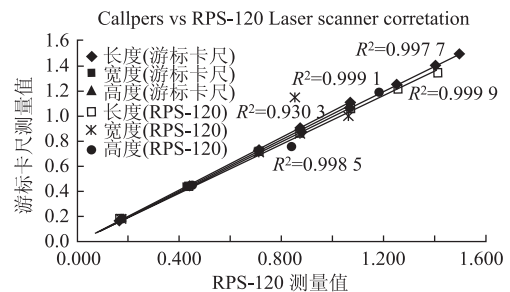


图 10 人工量测方法与激光扫描法试验结果相关性
(单位: $\times 25.4$ mm)

Fig. 10 Correlation between artificial measurement result and laser scanner test result (unit: $\times 25.4$ mm)

采用关节臂式激光扫描仪可以实现多角度自由扫描,克服弗吉尼亚理工大学研究设备需要二次调整样本方向的弊端,实现全样本一次扫描和重构,如图11所示。

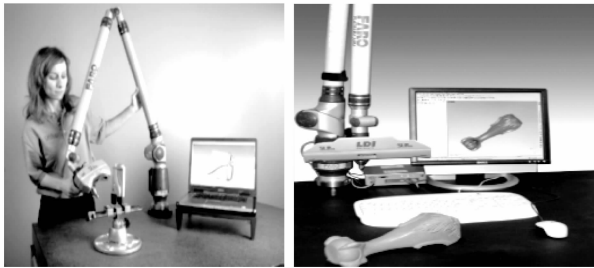


图11 关节臂式激光扫描仪

Fig. 11 laser scanner

三维激光扫描技术突破了传统的单点测量方法,可以密集地大量获取目标对象的数据点,快速测得现有实物的轮廓集合数据,是当前研究的热点之一。但该技术工艺要求高、操作难度大,受自然光线和基料自身颜色影响较大,目前主要应用于室内试验;同时,由于其一般用于物体的外部轮廓形状扫描,因而难以实现混合料中集料的分布与定位。

2 粗集料形态的评价方法

在粗集料可视化识别技术的基础上,研究者们针对集料的形状、棱角和纹理3个方面提出了大量的形态评价指标。

2.1 形状评价方法

通过数字图像信息可以直接获得的集料颗粒一次形状参数主要包括:面积、周长、主轴长度(长轴)、次轴长度(短轴)、等效直径等。然而,一次形状参数不足以全面反映集料颗粒的形状特征。研究者们大多选择一次形状参数进行算术运算得到的二次参数来描述集料的二维形状特征。熊琴^[13]选择长轴和短轴作为大小指标,矩形度、形状指数作为轮廓形状指标。袁峻^[14]则选择了形状比率(长宽比)、矩形度和偏心率3个指标表达集料颗粒的轮廓形状。

汪海年^[15]采用数字图像处理技术,提出了以轴向系数与圆度这2个二次参数来表征粗集料的二维形状特征,结果表明随着集料粒径的增大,其轴向系数呈下降趋势。

肖源杰^[16]等综合国内外的研究成果以及自己所做的大量对比试验结果,根据集料三维视图确定了6个指标来描述粗集料的个体形状特征,包括圆形度、纵横比、近似多边形周、球形度、扁平比和形状因

子,这些指标能更全面地评价集料的三维形状特征。

2.2 棱角评价方法

目前,国外学者提出的基于数字图像的棱角性评价方法主要有以下2类:图像侵蚀膨胀法和轮廓半径的傅里叶级数法^[17]。

Masad等^[18]运用数字图像的侵蚀-膨胀法对棱角特性进行定量研究,采用表面参数SP值表征边界处的棱角特征损失,棱角性越强,边界信息损失越严重,图像处理前后面积的相对差异SP值越大。

Wang等^[19]采用傅里叶级数方法对颗粒的棱角性进行评价,将集料轮廓半径的函数进行傅里叶展开,棱角性越强,棱角显著性指标 α_r 越大。

上述两种方法计算过程都很复杂。汪海年^[17]利用自行研制的粗集料形态特征研究系统,采用颗粒周长法与分形几何法,提出了粗糙度与分形维数2个指标,结果与侵蚀膨胀法一致性良好。

李嘉、林辉^[20]从颗粒的等效椭圆概念出发,建立了基于半径和周长的4个粗集料棱角性的量化指标,考虑颗粒大小影响,进行了面积加权计算。与未压实空隙率的相关性研究表明,基于周长的指标较好,且该加权指标考虑了粗集料的宏观性能,更加合理。

刘振清、杨永顺、刘清泉等^[21]不仅建立了粗集料棱角性量化指标半径法棱角性指数 I_{Arm} 和梯度法棱角性指数 I_{Agm} 的计算公式,还提出了沥青路面粗集料棱角性技术标准,有利于提高粗集料的质量。

2.3 纹理评价方法

纹理特征是图像的重要特征,其本质是刻画像素的邻域灰度空间分布规律。M. Haralick曾对纹理分析方法作了较为全面的总结,基本上可归纳为统计法、结构法、模型法和空间/频率域联合分析法等4类。近年来随着可视化技术的发展,出现了许多纹理分析的新方法^[22]。

杜少文、洪斌等^[23]使用UIAIA集料图像分析仪定量评价粗集料形态特征,提出了表面构造指数ST指标,指标测试结果与实验室人工测试数据具有较高的一致性。

Yeggoni等^[24]利用高分辨率视频相机采集粗集料图像,利用分形算法对图像上的颗粒形状和表面纹理进行测定。

陈国明、谭忆秋等^[25]研究使用基于光纤传感法的激光轮廓仪,并应用算术平均偏差 Ra 直接测量了7种不同粗集料的表面纹理,对不同集料表面纹理的粗糙度进行了分类。研究结果表明,激光轮廓仪能

够直接、准确地测量集料的表面纹理,其评价指标算术平均偏差对集料表面纹理的测定是合理有效的。李智^[26]、张肖宁^[27]等利用自行研发的激光扫描仪测量集料表面构造的细观特性,并采用分形理论对获得的集料纹理曲线进行量化评价。

虽然现有的纹理分析方法有很多种,但很多方法对纹理的描述随分辨率而变化,对方向敏感,易受噪声影响。因此,对于一个具体纹理图像,寻找综合性方法,充分利用各自优势,是近年来的一个研究趋势^[22]。

综上可知,虽然粗集料形态的评价方法很多,但目前基本没有针对不同的形态指标在数值上对集料进行分类的研究,这主要是由于集料形态本身很复杂难以分类,且现有定量评价技术发展还不成熟。

3 结论

粗集料形态可视化识别与形态评价方法应用先进的计算手段、微观分析工具,定量地分析粗集料微观尺度下的形态特征,并形成集料形态评价体系和分类标准,从而从微观角度来深刻理解和分析沥青混合料的力学机理,为改进沥青混合料设计方法,提高路用性能提供依据。

纵观当前路用粗集料形态可视化识别技术的研究,基本上仍是沿用传统的试验-观察的现象学经验方法。针对路用集料形态的数字图像处理和X射线断层扫描分析方法是目前比较成熟的技术手段,但研究工作主要集中在二维层面,结果与实际情况存在较大差异,容易形成误判。与此同时,目前对于粗集料颗粒形态的评价指标也大多是基于集料颗粒二维图像而提出的,对颗粒的描述并不十分完整和全面,同时不同评价方法本身也各有缺陷,无法形成定量的集料形态评判分类体系。因此,一方面,要继续从三维可视化角度寻求能更为全面、准确识别集料颗粒的视觉化识别方法;另一方面,要继续完善和进一步验证粗集料颗粒形态评价指标的客观性和有效性,建立一套具有广泛认可度的粗集料颗粒形态评价体系。

参考文献:

References:

- [1] DESSOUKY S H, MASAD E A, LITTLE D N, et al. Mechanistic Modeling of Permanent Deformation in Asphalt Mixes with the Effect of Aggregate Characteristics [J]. Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, 2006, 75: 535 - 576.
- [2] CATCHALIAN D, MASAP E, CHOWDHURY A, et al. Characterization of Aggregate Resistance to Degradation in Stone Matrix Asphalt Mixtures [J]. Transportation Research Record, 2006, 1962: 55 - 63.
- [3] GUDIMETTLA J M, COOLEY L A, BROWN E R. Workability of Hot-mix Asphalt [J]. Transportation Research Record, 2004, 1891: 229 - 237.
- [4] 汪海年, 郝培文, 庞立果, 等. 基于数字图像处理技术的粗集料级配特征 [J]. 华南理工大学学报: 自然科学版, 2007, 35 (11): 54 - 58
WANG Hai-nian, HAO Pei-wen, PANG Li-guo, et al. Investigation into Grading Characteristic of Coarse Aggregate via Digital Image Processing Technique [J]. Journal of South China University of Technology: Natural Science Edition, 2007, 35 (11): 54 - 58.
- [5] 孔明. 颗粒粒径和形态计算机视觉测量方法研究 [D]. 南京: 东南大学, 2005.
KONG Ming. Investigation on Granularity and Shape of Particle by Computer Vision [D]. Nanjing: Southeast University, 2005.
- [6] RAO C, TUTUMLUER E. Determination of Volume of Aggregates: New Image-Analysis Approach [J]. Transportation Research Record, 2000, 1721: 73 - 80.
- [7] RAUCH A F, HAAS C T, BROWNE C, et al. An Evaluation of Automated Devices to Replace and Augment Manual Sieve Analyses in Determining Aggregate Gradation, ICAR 503 - 2 [R]. Austin: The University of Texas at Austin, 2002.
- [8] MAERZ N H, LUSHER M. Measurement of Flat and Elongation of Coarse Aggregate Using Digital Image Processing [C] // Transportation Research Board 80th Annual Meeting. Washington, D. C.: Transportation Research Board, 2001.
- [9] HUANG Hai. Discrete Element Modeling of Railroad Ballast Using Imaging Based Aggregate Morphology characterization [R]. Urbana: University of Illinois at Urbana-Champaign, 2010.
- [10] 段跃华. 基于X-ray CT的沥青混合料粗集料基础特性研究 [D]. 广州: 华南理工大学, 2011.
DUAN Yue-hua. Research on Basic Characteristics of Coarse Aggregates of Asphalt Mixture Based on X-ray CT [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2011.
- [11] 陈国明, 谭忆秋, 王哲人. 集料表面纹路测量的试验设计 [J]. 中国公路学报, 2016, 19 (2): 36 - 41.
CHEN Guo-ming, TAN Yi-qiu, WANG Zhe-ren. Experimental Design for Measurement on Aggregate Surface Texture [J]. China Journal of Highway and Transport,

- 2006, 19 (2): 36-41.
- [12] WANG L, DRUTA C, ZHOU Y, HARRIS C. Three-dimensional Aggregate Evaluation Using Laser and X-ray Scanning [C] // TRB 2008 Annual Meeting. Washington, D. C.: Transportation Research Board, 2001.
- [13] 熊琴. 粗集料形状特征的数字图像分析 [D]. 重庆: 重庆交通大学, 2011.
- XIONG Qin. Research on Digital Image Technology of Coarse Aggregate Morphology Characteristics [D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2011.
- [14] 袁峻, 钱野. 粗集料形态特征及其对沥青混合料高温抗剪强度的影响 [J]. 交通运输工程学报, 2011, 11 (4): 17-22.
- YUAN Jun, QIAN Ye. Morphological Character of Coarse Aggregate and Its Influence on High-temperature Shear Strength of Asphalt Mixture [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2011, 11 (4): 17-22.
- [15] 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 (6): 747-751.
- WANG Hai-nian, HAO Pei-wen. Digital Description of Two-dimensional Shape Characteristics of Coarse Aggregate [J]. Journal of Building Materials, 2009 (6): 747-751.
- [16] 肖源杰, 倪富健, 都敬丽, 等. 基于图像的粗集料形态对沥青面层抗剪性能的影响 [J]. 郑州大学学报: 工学版, 2006, 27 (4): 44-48.
- XIAO Yuan-jie, NI Fu-jian, DU Jing-li, et al. Influence of Coarse Aggregate Shape Characteristics on the Shearing Properties of Hot-Mix Asphalt [J]. Journal of Zhengzhou University: Engineering Science Edition, 2006, 27 (4): 44-48.
- [17] 汪海年, 郝培文, 肖庆一, 等. 粗集料棱角性的图像评价方法 [J]. 东南大学学报, 2008, 38 (4): 637-641.
- WANG Hai-nian, HAO Pei-wen, XIAO Qing-yi, et al. Digital Image Evaluation Method for Angularity of Coarse Aggregates [J]. Journal of Southeast University: Natural Science Edition, 2008, 38 (4): 637-641.
- [18] MASAD E, BUTTON J W, PAPAGIANNAKIS T. Fine-aggregate Angularity: Automated Image Analysis Approach [J]. Transportation Research Record, 2000, 1721: 66-72.
- [19] WANG L, WANG X, MOHAMMAD L, et al. Unified Method to Quantify Aggregate Shape Angularity and Texture Using Fourier Analysis [J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2005, 17 (5): 498-504.
- [20] 李嘉, 林辉. 基于数字图像处理的粗集料棱角性量化研究 [J]. 公路交通科技, 2008 (7): 27-31.
- LI Jia, LIN Hui. Quantification Research of Coarse Aggregate Angularity Based on Digital Image Processing [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2008 (7): 27-31.
- [21] 刘振清, 杨永顺, 刘清泉, 等. 沥青路面粗集料棱角性表征方法及技术标准 [J]. 中国公路学报, 2010, 23 (4): 8-15.
- LIU Zhen-qing, YANG Yong-shun, LIU Qing-quan, et al. Coarse Aggregate Angularity Description Method and Technical Standard of Asphalt Pavement [J]. China Journal of Highway and Transport, 2010, 23 (4): 8-15.
- [22] 张东东. 沥青混合料集料几何特性研究 [D]. 西安: 长安大学, 2010.
- ZHANG Dong-dong. Geometric Characteristics Study of Aggregate for Asphalt Mixture [D]. Xi'an: Chang'an University, 2010.
- [23] 杜少文, 洪斌, 薛亮. 基于成像技术评估粗集料尺寸和形状特征 [J]. 中外公路, 2007 (1): 188-191.
- DU Shao-wen, HONG Bin, XUE Liang. Imaging Based Evaluation of Coarse Aggregate Size and Shape Properties [J]. Journal of China & Foreign Highway, 2007 (1): 188-191.
- [24] FLETCHER T, CHANDAN C, MASAD E, et al. Measurement of Aggregate Texture and Its Influence on Hot Mix Asphalt (HMA) Permanent Deformation [J]. Journal of Testing and Evaluation, 2002, 30 (6): 524-531.
- [25] 陈国明, 谭忆秋, 石昆磊, 等. 粗集料棱角性对沥青混合料性能的影响 [J]. 公路交通科技, 2006, 23 (3): 6-9.
- CHEN Guo-ming, TAN Yi-qiu, SHI Kun-lei, et al. Influence of Coarse Aggregate Angularity on Hot-mix Asphalt Properties [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2006, 23 (3): 6-9.
- [26] 李智, 刘涛, 刘春雷. 基于激光和真空镀膜技术的集料微观构造评价 [J]. 华南理工大学学报: 自然科学版, 2013, 41 (2): 88-93.
- LI Zhi, LIU Tao, LIU Chun-lei. Microscopic Structure Evaluation of Aggregates Based on Laser Measurement and Vacuum Coating Technology [J]. Journal of South China University of Technology: Natural Science Edition, 2013, 41 (2): 88-93.
- [27] 张肖宁, 孙杨勇. 粗集料的表面微观纹理的激光测量方法及分形性质研究 [J]. 公路交通科技, 2011, 28 (1): 19-24.
- ZHANG Xiao-ning, SUN Yang-yong. Research on Measurement of Surface Micro-texture of Aggregate Using Laser and Its Fractal Character [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2011, 28 (1): 19-24.