

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2022.01.016

染色石膏颗粒一维压缩破碎与形状演化

于际都,刘斯宏,沈超敏,毛航宇

(河海大学水利水电学院,江苏 南京 210098)

摘要: 使用染色石膏颗粒研究颗粒破碎过程中的形状演化,采用基于正交视图的拍照识别方法获取颗粒形状,借助 Weibull 分布函数对颗粒形状的统计分布进行定量表征,分析了染色石膏颗粒一维压缩破碎前后的颗粒形状特征。结果表明:破碎产生的颗粒与亲代颗粒粒径相差越大,其表面越粗糙、圆度越差、越扁平,且形状因子分布越不均匀;存活颗粒相比亲代颗粒形状变得更规则,形状因子分布趋向于均一化,而破碎颗粒的形状演化则完全相反;由于整体试样既包含存活颗粒又包含破碎颗粒,其形状演化规律未表现出明显的一致性。

关键词: 颗粒破碎;染色石膏;一维压缩;形状因子;Weibull 分布

中图分类号: TV41 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1980(2022)01-0110-07

Breakage and shape evolution of dyed gypsum particles under one-dimensional compression

YU Jidu, LIU Sihong, SHEN Chaomin, MAO Hangyu

(College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: Detailed shape evolution during particle crushing was investigated using dyed gypsum particles. The particle shape information was measured from photographs with two orthogonal orientations and the Weibull function was introduced to quantify the statistical distribution of particle shapes. Then, the shape characteristics of particles under one-dimensional compression were investigated. It is found that child particles that have more size differences with parent particles are more rough, less spherical, more elongated, and flatter, with wider distribution range of shape factors. Surviving particles become more regular compared with parent particles and the distribution ranges of their shape factors tend to narrow down, whereas the broken particles show the opposite changing trends. However, all particles within a size range consist of both the surviving particles and the broken particles so that the overall particle shapes do not show consistent changing trends.

Key words: particle crushing; dyed gypsum; one-dimensional compression; shape factor; Weibull distribution

颗粒破碎在堆石坝工程中非常常见,严重的颗粒破碎可能导致坝体沉降过大和不均匀变形。颗粒粒径、级配、形状、堆积密度、岩性以及环境因素等均会影响颗粒破碎的程度,同时颗粒破碎也会造成颗粒级配、形状等的改变。颗粒破碎过程中的形状变化对材料的堆积、摩擦和剪切特性等均产生显著影响^[1-2],但目前对形状演化的规律尚不了解。

为了分析颗粒形状,首先要对其进行测量和表征。测量方法可归结为 3 类:①静态颗粒二维形状测量^[3],即通过扫描、拍照等方式对静止颗粒的特定断面取像;②动态颗粒二维形状测量^[4],即采用高速摄像机对运动颗粒的断面进行随机捕捉;③三维形状重构^[5-6],即采用断层或激光扫描技术重构颗粒的真实形状。颗粒形状表征也可分为反映颗粒表面凹凸程度的粗糙度、反映颗粒棱角尖锐程度的圆度和反映颗粒三维尺寸相似程度的球度 3 个尺度^[1]。在此基础上,一些学者提出了比较实用的表征指标,比如凸度、纵横比、延伸

基金项目: 国家自然科学基金(U1765205);江苏省研究生科研与实践创新计划(KYCX20_0544);中央高校基本科研业务费专项(学生项目)(B2005208)

作者简介: 于际都(1996—),男,硕士研究生,主要从事土石坝材料研究。E-mail: yujidu126@gmail.com

通信作者: 刘斯宏(1964—),男,教授,博士,主要从事粒状体力学、土石坝工程等研究。E-mail: sihongliu@hhu.edu.cn

引用本文: 于际都,刘斯宏,沈超敏,等. 染色石膏颗粒一维压缩破碎与形状演化[J]. 河海大学学报(自然科学版),2022,50(1):110-116.

YU Jidu, LIU Sihong, SHEN Chaomin, et al. Breakage and shape evolution of dyed gypsum particles under one-dimensional compression[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences),2022,50(1):110-116.

度和扁平度等^[2,4,7]。

利用这些形状指标,国内外学者统计了不同工况下的颗粒破碎形状特征。Zhao 等^[8]研究了单个颗粒的断裂特征,发现破碎颗粒的形态与颗粒矿物成分、岩性均有关系。Altuhafi 等^[9]通过一维压缩试验发现初始级配对形状演化具有较大影响,级配良好的颗粒在压缩过程中仅遭受轻微磨圆导致粗糙度降低,而均一粒径颗粒则发生了灾难性的破碎,生成的颗粒形状十分不规则。Zhang 等^[7]通过均一粒径钙质砂的大位移环剪试验,发现颗粒倾向于变得更加光滑,何建乔等^[10]也发现了类似的现象。以上试验均表明,当应力或者剪切应变足够大时,颗粒形状演化会趋于稳定状态,而 Yan 等^[11]对破碎终止的试样进行重构和再加载,发现颗粒依然会破碎,颗粒形状仍会继续变化。

以上研究从整体上把握了颗粒形状演化趋势,但是无法区分破碎产生的颗粒与未破碎颗粒的形状差异。近年来,有研究者对颗粒进行染色以对破碎颗粒进行示踪,如 Nakata 等^[12]将表面染色的若干颗粒置于三轴试样中,以观察单个颗粒在试样中的断裂特征;彭宇等^[13]对钙质砂进行染色,借助图像分割方法对颗粒破碎量进行精细化统计。但是染色的天然颗粒经过多次破碎后可能较难辨别出颜色。为了避免出现以上问题,于际都等^[14]提出采用人工制备的染色石膏颗粒进行破碎试验。人工制备的石膏颗粒具有一般岩土颗粒材料的脆性性质,且可以保证颗粒颜色均一,是研究颗粒破碎较为理想的人工材料。在以上研究的基础上,本文借助染色石膏颗粒进一步分析一维压缩破碎过程中的颗粒形状演化。

1 染色石膏颗粒制备

试验使用的石膏粉为高强度 α-半水石膏粉 ($\text{CaSO}_4 \cdot \frac{1}{2}\text{H}_2\text{O}$), 2 h 抗折强度为 7 MPa, 白度为 92, 细度为 200, 初凝时间为 8 min, 脱模时间为 30 min, 石膏、水与颜料的配合比为 1 : 0.34 : 0.02(质量比)。将按比例配好的染色剂和石膏粉混合搅拌均匀, 然后充分振动以排出气泡, 待石膏不再流动后放入 20 ℃ 恒温室内养护 24 h, 最后将制备好的石膏板机械破碎成石膏颗粒, 如图 1 所示。共制备 20.0 ~ 12.6 mm、12.6 ~ 7.9 mm、7.9 ~ 5.0 mm、5.0 ~ 3.1 mm 4 种粒径的颗粒, 对应的颜色分别为灰、绿、红、黄, 中值粒径分别为 15.9 mm、10.0 mm、6.3 mm、4.0 mm(下文用中值粒径代表整个粒组)。经过测试, 颗粒的平均相对密度为 2.30。

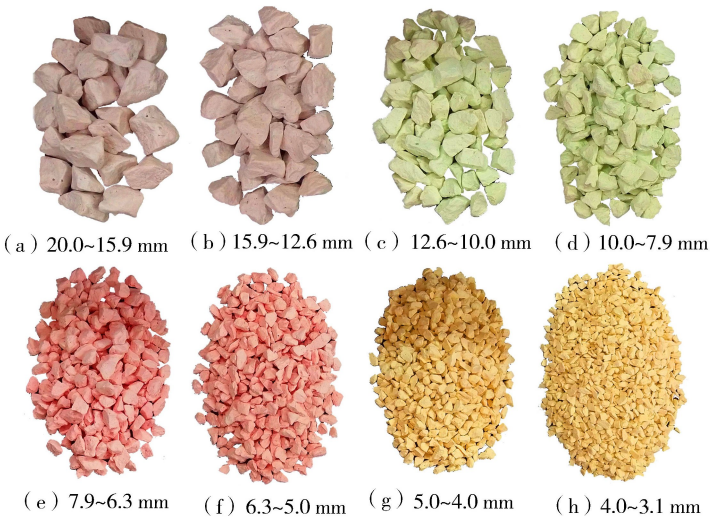


图 1 染色石膏颗粒
Fig. 1 Dyed gypsum particles

2 颗粒形状测量与表征

通过相机拍照获取颗粒的俯视图和侧视图,用以分析颗粒的二维和三维形状特征。图 2 为颗粒拍照装置示意图,水平和垂直方向各放置一个刻度尺,用于标定颗粒尺寸。ImageJ^[4]、Imago^[15]、PCAS^[16]等程序均可进行图像处理,本文采用自行开发的算法程序进行图像处理,主要步骤如下:①读取图像,根据图像实际尺寸和像素尺寸计算比例尺;②将 RGB 图转换成灰度图,调整阈值后生成二值图;③提取图像中的连通域,去除面积异常连通域;④根据定义计算连通域形状参数。

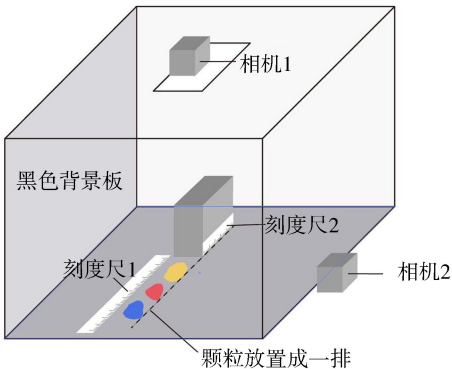


图 2 颗粒拍照装置示意图
Fig. 2 Schematic diagram of particle shape photographing device

本文使用了文献[4]中定义的凸度 C_x 、圆度 S 和纵横比 A_R 3 个形状因子,并定义了扁平率 F_n 用于分析颗粒破碎后扁平程度的变化,如图 3 所示,计算公式分别为

$$C_x = A/(A + A_1) \quad S = P_{EAC}/P = \pi d_{EAC}/P = 2\sqrt{\pi A}/P \quad A_R = d_{Tmin}/d_{Tmax} \quad F_n = d_{Smin}/d_{Tmax} \quad (1)$$

式中: A 、 P 分别为颗粒投影面积和周长; $A+A_1$ 为颗粒的凸面积; d_{EAC} 、 P_{EAC} 分别为等面积圆直径和周长; d_{Tmax} 、 d_{Tmin} 、 $\bar{d}_T$ 为颗粒俯视图的最大、最小和平均费雷特直径(费雷特直径为与颗粒相切的两条平行线之间的距离); d_{Smin} 为侧视图的最小费雷特直径。使用自行开发的算法程序对文献[4]中的颗粒图像进行识别,结果与使用 ImageJ 识别结果基本一致,表明该程序是可靠的。

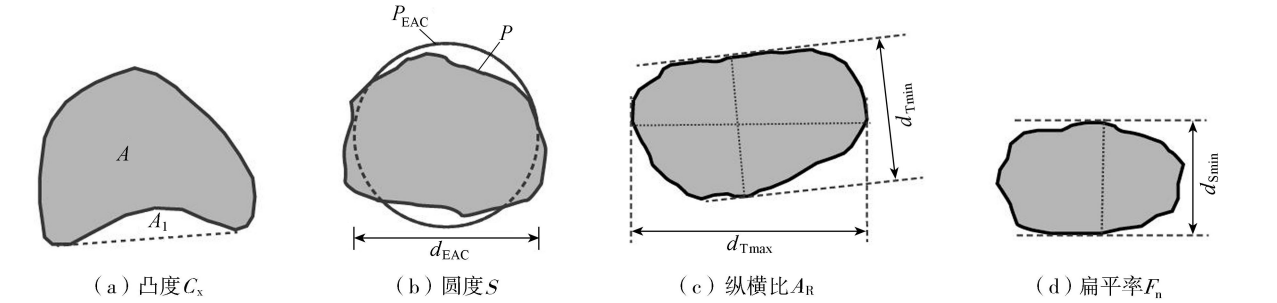


图3 形状因子定义示意图

Fig.3 Schematic diagram of the definition of particle shape factors

拍照时调整颗粒方向尽量使之处于最稳定的姿态,使其短轴近似与水平面垂直,而俯视图近似为颗粒的最大投影(以下称为主投影)。图4(横轴采用对数坐标,图9~12同)和图5对比了粒径范围为15.9~20.0 mm的颗粒主投影和随机投影的图像识别结果。由图4可见, d_{Tmin} 和筛分粒径最为接近,而 d_{EAC} 、 d_{Tmax} 和 $\bar{d}_T$ 的结果较筛分粒径偏大,但它们的分布曲线基本平行;随机投影相比主投影,粒径分析结果偏小,且离散性更大。由图5可见,随机投影的 A_R 和 S 会偏小, C_x 基本一致,因为 A_R 和 S 都是和特征粒径相关的参数,而 C_x 与粒径无关,它只和颗粒表面的凹凸程度有关。因此通过本文方法获取颗粒的俯视图和侧视图,可近似得到颗粒的长轴、中轴和短轴,即使不进行三维形状重构,也可以大体获取颗粒的三维形状特征。

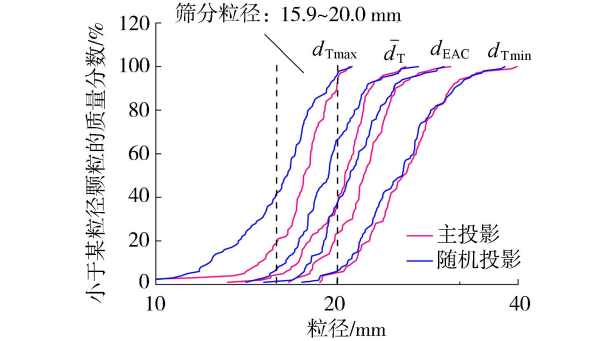


图4 不同颗粒投影面的粒径分析结果

Fig.4 Particle size analysis results of different particle projections

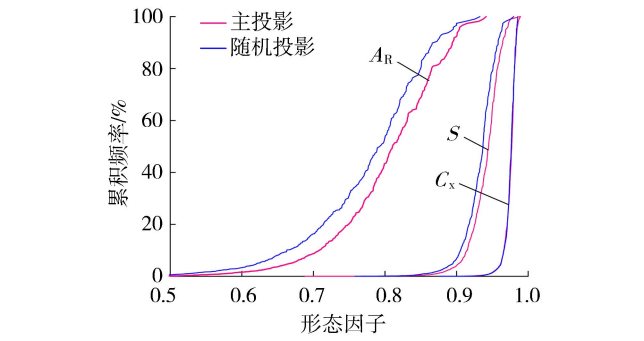


图5 不同颗粒投影面的形状分析结果

Fig.5 Particle shape analysis results of different particle projections

3 一维压缩试验

对染色石膏颗粒进行一维压缩试验。测试试样由4种粒径的颗粒各150 g混合而成,共600 g。试样直径为100 mm,高度为75.25 mm,初始孔隙比为1.266。试验以0.5 mm/min的速率加载到6.4 MPa后卸载。对破碎后的颗粒进行筛分,并将同一个粒组中不同颜色的颗粒分开,如图6所示,小于3.1 mm的颗粒因粒径较小暂未统计。定义试验后仍处于原粒径区间的颗粒为存活颗粒,反之称为破碎颗粒。图7为试验前后各粒组颗粒的质量分布。试验后,灰色颗粒破碎产生的子颗粒覆盖所有粒组;而4.0 mm粒组则有全部4种颜色的颗粒,其中黄、红、绿、灰色颗粒的质量分数分别为62%、27%、8%和3%,有62%的颗粒为存活颗粒,其余38%的颗粒由大颗粒破碎产生,显然破碎产生的颗粒占了很大的比例。

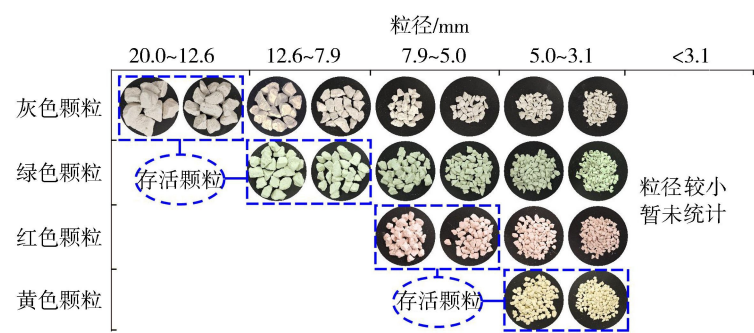


图 6 压缩后按照粒径和颜色分离的染色石膏颗粒
Fig. 6 Dyed gypsum particles separated according to particle size and color after test

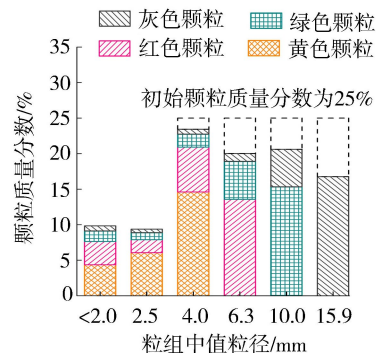


图 7 破碎后各粒组颗粒详细的质量分布
Fig. 7 Detailed mass distribution of particles in each size range after test

4 颗粒形状演化结果分析

4.1 形状因子统计分布

描述形状因子的方式通常有两种,一是用形状因子的平均值,一是绘制频率分布曲线,形如图 5 所示。采用平均值的方法忽略了形状因子的分布特征,而绘制频率分布曲线过于烦琐,且不利于定量分析。本文采用 Weibull 函数^[17]对形状因子的累积频率分布进行表征:

$$F(x) = 1 - \exp[-(x/x_0)^k]$$
 (2)

式中: x 为形状因子的值; $F(x)$ 为形状因子的累积频率; x_0 为特征值形状因子,等于 63% 累积频率下的形状因子; k 为 Weibull 模量,反映形状因子的分布范围, k 越大,形状因子的分布范围越小。图 8 为灰色颗粒形状因子累积频率分布及采用式(1)拟合的结果,拟合值与试验值吻合较好。对初始颗粒和子代颗粒形状因子分布均进行了拟合,相关系数 R^2 均不小于 0.966,表明形状因子的统计分布符合 Weibull 分布。

4.2 形状演化规律分析

图 9 和图 10 分别为破碎前后颗粒形状因子大小和分布模量对比。对于初始颗粒, C_{x0} 的取值范围为 0.95~0.97, S_0 为 0.92~0.95, A_{R0} 为 0.74~0.77, F_{n0} 为 0.53~0.56;而凸度的 Weibull 模量 k_{C_x} 为 60~80,圆度的 Weibull 模量 k_s 为 25~35,纵横比的 Weibull 模量 k_{A_R} 为 7~9,扁平率的 Weibull 模量 k_{F_n} 为 4.5~5.5。可见, F_n 的分布范围最广, A_R 次之,而 C_x 和 S 的差异性并不显著。对比试验前后颗粒的形状特征,发现破碎后粗颗粒的总体形状因子有所增大,而细颗粒的形状因子变化没有明显规律;而破碎后颗粒的 k 值均高于初始值,即颗粒形状因子的分布范围变窄,意味着同一粒组颗粒形状的差异性降低。很多学者也做过类似的分析,但总的来说破碎后的颗粒整体形状变化趋势并不统一,有些学者认为这和颗粒的初始形状有关^[7]。

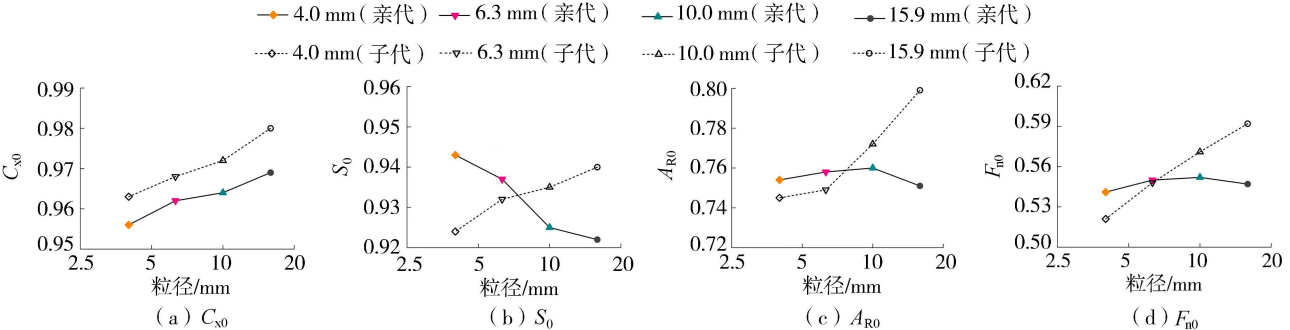


图 9 试验前后颗粒的总体特征形状因子
Fig. 9 Characteristic shape factors of overall particles before and after test

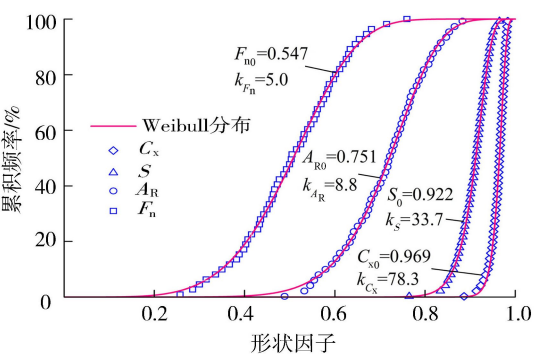


图 8 形状因子分布 Weibull 函数拟合结果
Fig. 8 Fitting results of the distribution of particle shape factors using Weibull function

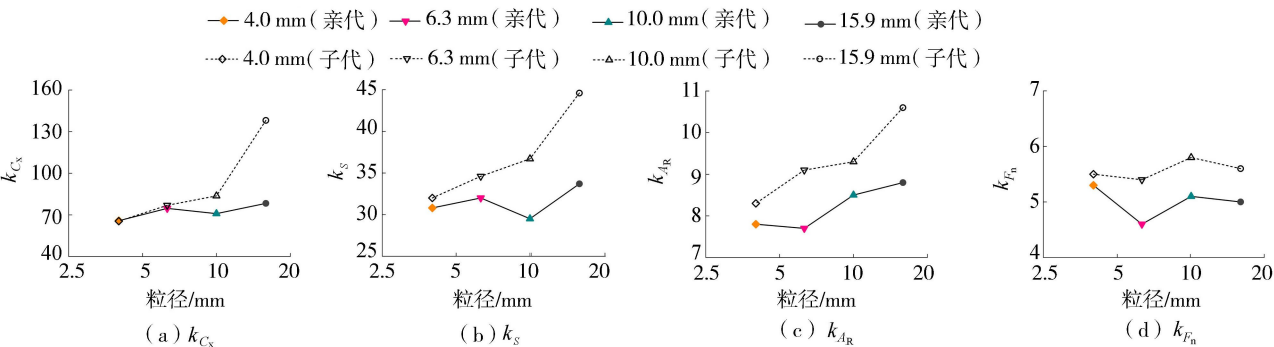


图 10 试验前后颗粒的总体形状因子 Weibull 分布模量

Fig. 10 Weibull modulus of shape factors of overall particles before and after the test

图 11 和图 12 进一步对比了不同亲代颗粒对应的子代颗粒的形状特征,通过分析可以得出以下规律:

- a. 同一亲代颗粒破碎产生的子代颗粒,粒径越小,形状因子越小。即子代颗粒和亲代颗粒粒径差距越大,其表面愈粗糙,圆度愈差,形状愈细长和扁平,且形状分布愈不均一,因为细颗粒可能是经历多次破碎产生的。与 C_x 和 S 相比, A_R 和 F_n 的变化更为明显,尤其是 F_n ,比如 15.9 mm 灰色子代颗粒的 $F_n(0.592)$ 和 4.0 mm 灰色子代颗粒的 $F_n(0.380)$ 相差 56%,这主要是因为细颗粒多为粗颗粒应力集中剥落产生,这些剥落的碎片通常呈片状。
- b. 相同粒径的子代颗粒,其对应的亲代颗粒粒径越大,子代颗粒的形状因子越小。这表明破碎后的颗粒即使处于同一粒径区间,但由于其来源不同,它们的形状产生了明显的差异。图 7 显示试验后的 10.0 mm、6.3 mm 和 4.0 mm 粒组分别有 26%、32% 和 38% 的颗粒为来自粗颗粒破碎产生的碎片,这个比例随着粒径区间的减小而增大。细颗粒区间由于接收了更多粗颗粒破碎产生的碎片,其整体形状更容易受到影响,比如图 10 中 6.3 mm 和 4.0 mm 的 A_R 和 F_n 较初始值有所降低,而颗粒形状因子的改变可能会对颗粒的存活概率造成影响。

c. 存活颗粒的形状因子总体上大于其亲代颗粒,而破碎颗粒的形状因子则小于其亲代颗粒。存活颗粒

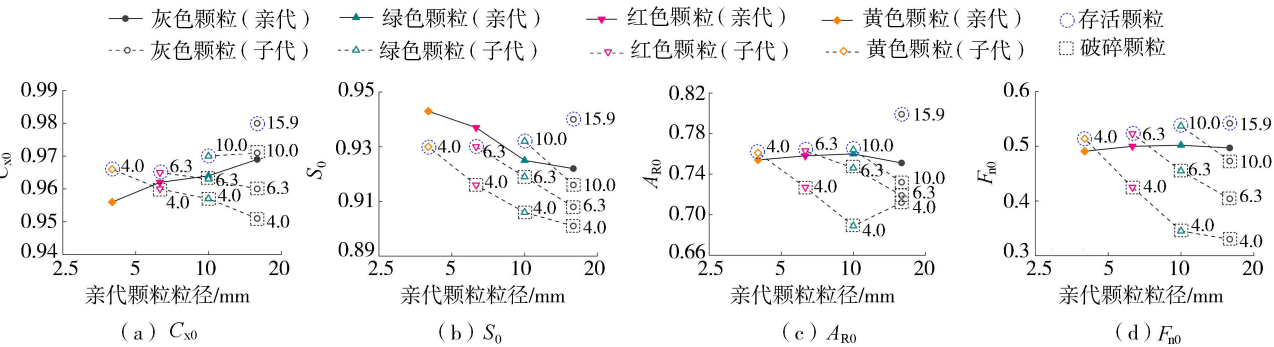


图 11 子代颗粒的特征形状因子

Fig. 11 Characteristic shape factors of child particles

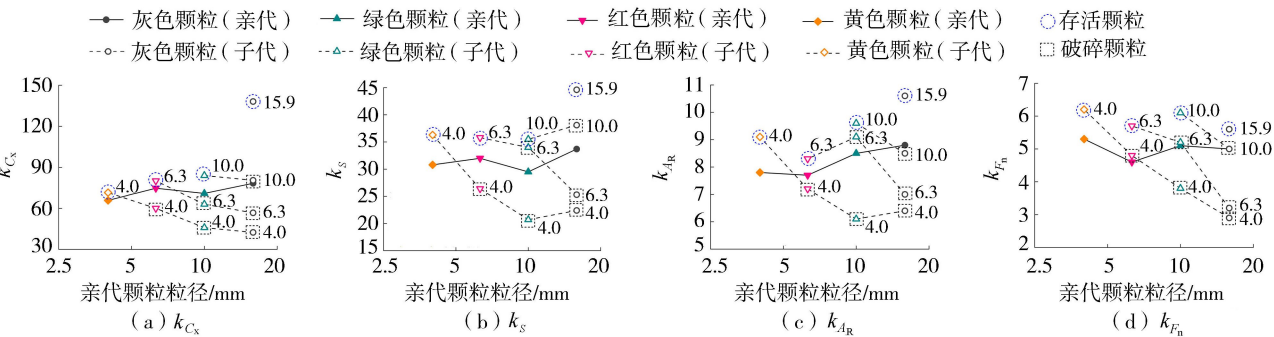


图 12 子代颗粒的形状因子 Weibull 分布模量

Fig. 12 Weibull modulus of shape factors of child particles

没有发生明显的破碎,因此粒径没有发生明显变化,但由于与周围颗粒的接触摩擦,颗粒表面的棱角被磨圆,直接导致 C_x 和 S 增大,并且间接影响了 A_R 和 F_n 。较大颗粒的磨圆现象更为明显,因为其与更多的颗粒接触。而对于发生破碎的颗粒,它们不仅粒径改变,同时颗粒形状也发生明显劣化,一个显著的变化是颗粒变得更加扁平。

d. 形状因子分布模量和形状因子特征值表现出一致的演化趋势。存活颗粒的形状因子分布在一个更窄的范围,因为存活颗粒经过磨圆后表面更光滑且形状更接近球形;而破碎颗粒则可能经过分裂、剥落、磨损等多种碎裂模式产生,因此形态差异更大。

通过以上分析发现,存活颗粒的形状因子增大,而破碎颗粒的形状因子减小。而同一粒组所有颗粒既包含存活颗粒也包含破碎颗粒,其平均形状因子取决于存活颗粒和破碎颗粒的形状及二者的比例。这个比例受很多因素的影响,比如加载的应力、加载的方式、初始颗粒的形状、初始级配、应力水平等,所以颗粒破碎的演化结果不存在确定性,因此出现不同的试样在不同的试验工况下形状演化结果差别较大的现象。

5 结 论

- a. 子代颗粒与亲代颗粒粒径相差越大,颗粒表面越粗糙、圆度越差、越扁平,且形状因子分布越不均匀。
- b. 存活颗粒相比亲代颗粒,形状变得更规则,形状因子分布趋向于均一化,而破碎颗粒的形状演化则完全相反。
- c. 由于整体试样既包含存活颗粒又包含破碎颗粒,其形状演化规律未表现出明显的一致性。

参考文献:

[1] CHO G C,DODDS J,SANTAMARINA J C. Particle shape effects on packing density,stiffness,and strength,natural and crushed sand[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering,2006,132(5):591-602.

[2] ALTUHAFI F N,COOP M R,GEORGIANNOU V N. Effect of particle shape on the mechanical behavior of natural sands[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering,2016,42(12):04016071.

[3] LI Cheng,ZHENG Junxing,ZHANG Zhen,et al. Morphology-based indices and recommended sampling sizes for using image-based methods to quantify degradations of compacted aggregate materials[J]. Construction and Building Materials,2020,230:116970.

[4] ALTUHAFI F,O’ SULLIVAN C,CAVARRETTA I. Analysis of an image-based method to quantify the size and shape of sand particles[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering,2013,139(8):1290-1307.

[5] YANG Hao,ZHOU Bo,WANG Jianfeng. Exploring the effect of 3D grain shape on the packing and mechanical behaviour of sands [J]. Géotechnique Letters,2019,9(4):299-304.

[6] 邹德高,田继荣,刘京茂,等. 堆石料三维形状量化及其对颗粒破碎的影响[J]. 岩土力学,2018,39(10):3525-3530. (ZOU Degao,TIAN Jirong,LIU Jingmao,et al. Three-dimensional shape of rockfill material and its influence on particle breakage[J]. Rock and Soil Mechanics,2018,39(10):3525-3530. (in Chinese))

[7] ZHANG X,HU W,SCARINGI G,et al. Particle shape factors and fractal dimension after large shear strains in carbonate sand [J]. Géotechnique Letters,2018,8(1):73-79.

[8] ZHAO B,WANG J,COOP M R,et al. An investigation of single sand particle fracture using X-ray micro-tomography [J]. Géotechnique,2015,65(8):625-641.

[9] ALTUHAFI F N,COOP M R. Changes to particle characteristics associated with the compression of sands[J]. Géotechnique,2011,61(6):459-471.

[10] 何建乔,魏厚振,孟庆山,等. 大位移剪切下钙质砂破碎演化特性[J]. 岩土力学,2018,39(1):165-172. (HE Jianqiao,WEI Houzhen,MENG Qingshan,et al. Evolution of particle breakage of calcareous sand under large displacement shearing[J]. Rock and Soil Mechanics,2018,39(1):165-172. (in Chinese))

[11] YAN W M,SHI Y. Evolution of grain grading and characteristics in repeatedly reconstituted assemblages subject to one-dimensional compression[J]. Géotechnique Letters,2014,4(3):223-229.

[12] NAKATA Y,HYODO M,HYDE A F L,et al. Microscopic particle crushing of sand subjected to high pressure one-dimensional compression[J]. Soils and Foundations,2001,41(1):69-82.

[13] 彭宇,丁选明,肖杨,等. 基于染色标定与图像颗粒分割的钙质砂颗粒破碎特性研究[J]. 岩土力学,2019,40(7):2663-2672. (PENG Yu,DING Xuanming,XIAO Yang,et al. Study on particle breakage property of calcareous sand by dyeing tracking

and particle image segmentation method[J]. Rock and Soil Mechanics,2019,40(7):2663-2672. (in Chinese))

[14] 于际都,沈超敏,刘斯宏. 染色石膏颗粒一维压缩破碎与粒径迁移[J]. 岩石力学与工程学报,2020,39(5):1071-1079. (YU Jidu,SHEN Chaomin,LIU Sihong. Breakage and migration of dyed gypsum particles under one-dimensional compression [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2020,39(5):1071-1079. (in Chinese))

[15] PRUDÊNCIO JR L R,WEIDMANN D F,DE OLIVEIRA A L,et al. Particle shape analysis of fine aggregate using a simplified digital image processing method[J]. Magazine of Concrete Research,2013,65(1):27-36.

[16] 刘春,许强,施斌,等. 岩石颗粒与孔隙系统数字图像识别方法及应用[J]. 岩土工程学报,2018,40(5):925-931. (LIU Chun,XU Qiang,SHI Bin,et al. Digital image recognition method of rock particle and pore system and its application[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2018,40(5):925-931. (in Chinese))

[17] WEIBULL W. A statistical distribution function of wide applicability[J]. Journal of Applied Mechanics,1951,13: 293-297.

(收稿日期:2020-09-21 编辑:熊水斌)

+++++

(上接第43页)

[8] 张礼兵,徐勇俊,金菊良,等. 安徽省工业用水量变化影响因素分析[J]. 水利学报,2014,45(7):837-843. (ZHANG Libing, XU Yongjun,JIN Juliang,et al. Analysis of influencing factors of industrial water consumption changes in Anhui Province[J]. Journal of Hydraulic Engineering,2014,45(7):837-843. (in Chinese))

[9] 陈东景. 我国工农业水资源使用强度变动的区域因素分解与差异分析[J]. 自然资源学报,2012,27(2):332-343. (CHEN Dongjing. The regional factor decomposition and difference analysis of the changes in the intensity of water use in industry and agriculture in my country[J]. Journal of Natural Resources,2012,27(2):332-343. (in Chinese))

[10] 孙才志,谢巍. 中国产业用水变化驱动效应测度及空间分异[J]. 经济地理,2011,31(4):666-672. (SUN Caizhi,XIE Wei. Measurement and spatial differentiation of the driving effect of China's industrial water use change[J]. Economic Geography, 2011,31(4):666-672. (in Chinese))

[11] ANG B W . Decomposition analysis for policymaking in energy:which is the preferred method? [J]. Energy Policy,2004,32 (9):1131-1139.

[12] DUARTE R,PINILLA V,SERRANO A. Looking backward to look forward:water use and economic growth from a long-term perspective[J]. Applied Economics,2013,46(2):212-224.

[13] LUYANGA S,MILLER R,STAGE J. Index number analysis of Namibian water intensity[J]. Ecological Economics,2006,57(3): 374-381.

[14] 庄立,王红瑞,张文新. 采用因素分解模型研究京津冀地区用水变化的驱动效应[J]. 环境科学研究,2016,29(2):290-298. (ZHUANG Li,WANG Hongrui,ZHANG Wenxin. Using factor decomposition model to study the driving effect of water changes in the Beijing-Tianjin-Hebei region[J]. Environmental Science Research,2016,29(2):290-298. (in Chinese))

[15] 佟金萍,马剑锋,刘高峰. 基于完全分解模型的中国万元GDP用水量变动及因素分析[J]. 资源科学,2011,33(10):1870-1876. (TONG Jinping,MA Jianfeng,LIU Gaofeng. Analysis of the changes and factors of China's water consumption per ten thousand yuan GDP based on a complete decomposition model [J]. Resources Science, 2011,33(10):1870-1876. (in Chinese))

[16] 张强,王本德,曹明亮. 基于因素分解模型的水资源利用变动分析[J]. 自然资源学报,2011,26(7):1209-1216. (ZHANG Qiang,WANG Bende,CAO Mingliang. Analysis of water resources utilization changes based on factor decomposition model[J]. Journal of Natural Resources,2011,26(7):1209-1216. (in Chinese))

[17] 王凤婷,张倩,吴锋. 产业转型发展下北京市社会经济系统用水变化及驱动因素[J]. 水利经济,2019,37(6):13-20. (WANG Fengting,ZHANG Qian,WU Feng. Changes and driving factors of water use in Beijing's socio-economic system under the development of industrial transformation[J]. Journal of Economics of Water Resources,2019,37(6):13-20. (in Chinese))

[18] 梁进社,洪丽璇,蔡建明. 中国城市化进程中的能源消费增长:基于分解的1985—2006年间时序比较[J]. 自然资源学报, 2009,24(1):20-29. (LIANG Jinshe,HONG Lixuan,CAI Jianming. The growth of energy consumption in the process of urbanization in China: a time-series comparison between 1985 and 2006 based on decomposition [J]. Journal of Natural Resources,2009,24(1):20-29. (in Chinese))

[19] 洪丽璇,梁进社,蔡建明,等. 中国地级以上城市工业能源消费的增长:基于2001—2006年的数据分解[J]. 地理研究, 2011,30(1):83-93. (HONG Lixuan,LIANG Jinshe,CAI Jianming,et al. The growth of industrial energy consumption in cities above the prefecture level in China:based on data decomposition from 2001 to 2006 [J]. Geographical Research,2011,30(1): 83-93. (in Chinese))

(收稿日期:2021-04-21 编辑:胡新宇)