

堆石颗粒强度尺寸效应和应变率效应研究

邓远航^{1, 2, 3}, 迟世春^{1, 2, 3}, 闫世豪^{1, 2, 3}

(1. 大连理工大学 海岸与近海工程国家重点实验室, 辽宁 大连 116024; 2. 大连理工大学 工程抗震研究所, 辽宁 大连 116024;
3. 大连理工大学 建设工程学院, 辽宁 大连 116024)

摘要: 为研究堆石颗粒在地震荷载下的破碎强度及其尺寸效应与应变率效应的耦合机制, 采用自主研制的 TPWS-800 中等应变率加载试验机, 对大连石灰岩进行单颗粒强度破碎试验, 颗粒的粒径范围为 60~300 mm, 位移加载速率为 0.01, 0.1, 1 和 10 mm/s。试验结果表明: 大尺寸颗粒的特征强度提升幅度大于小颗粒的, 表明大颗粒的强度效应增强, 而应变率提高将导致尺寸效应减弱。基于广义最弱链 Weibull 模型, 采用幂函数描述颗粒内部微裂纹空间分布的稀疏程度, 拟合不同加载速率下颗粒强度, 发现拟合效果远优于裂纹均匀分布, 且随着加载速率的提高裂纹分布指数减小, 反映了提高加载速率将使“有效裂纹”逐渐稀疏, 这与颗粒强度的应变率效应相对应。

关键词: 岩石力学; 颗粒破碎; 加载速率; 尺寸效应; Weibull 模型; 最弱链理论

中图分类号: TU 45

文献标识码: A

文章编号: 1000-6915(2025)07-1950-09

Effect of the size and strain rate on the particle strength of rockfill materials

DENG Yuanhang^{1, 2, 3}, CHI Shichun^{1, 2, 3}, YAN Shihao^{1, 2, 3}

(1. State Key Laboratory of Coastal and Offshore Engineering, Dalian University of Technology, Dalian, Liaoning 116024, China;
2. Institute of Earthquake Engineering, Dalian University of Technology, Dalian, Liaoning 116024, China;
3. School of Infrastructure Engineering, Dalian University of Technology, Dalian, Liaoning 116024, China)

Abstract: To investigate the coupling mechanisms of fracture strength, size effect, and strain rate effect in rockfill particles under seismic loading, single-particle strength crushing tests were conducted on Dalian limestone using a self-developed TPWS-800 medium-strain-rate loading apparatus. The particle sizes ranged from 60 to 300 mm, with displacement loading rates of 0.01, 0.1, 1 and 10 mm/s. The experimental results revealed that the characteristic strength of larger particles increased more significantly than that of smaller particles, indicating enhanced strength rate effects in larger particles. Conversely, higher strain rates resulted in a weakening of the size effect. Based on the generalized weakest-link Weibull model, a power function was employed to characterize the sparsity of spatial microcrack distributions within the particles. The fitting of particle strengths under different loading rates demonstrated significantly better performance compared to models assuming uniform crack distributions. Furthermore, the crack distribution exponent decreased with increasing loading rates, indicating that higher loading rates caused “effective cracks” to become progressively sparser. This phenomenon corresponds to the strain rate dependence of particle strength.

Key words: rock mechanics; particle fragmentation; loading rate; size effect; Weibull model; weakest chain theory

收稿日期: 2024-12-06; **修回日期:** 2025-03-06

基金项目: 国家重点研发计划 (2016YFB0201001)

Supported by the National Key Research and Development Program of China (Grant No. 2016YFB0201001)

作者简介: 邓远航 (2000-), 男, 2022 年毕业于四川农业大学水利水电工程专业, 现为硕士研究生, 主要从事堆石料颗粒破碎方面的研究工作。

E-mail: dengyh@mail.dlut.edu.cn. 通讯作者: 迟世春 (1964-), 男, 博士, 现任教授。E-mail: schchi@dlut.edu.cn

DOI: 10.3724/1000-6915.jrme.2024.0949

1 引言

汶川地震后对紫坪铺面板堆石坝外形轮廓分析发现,地震后堆石体的外形轮廓均在地震前轮廓之内,表明地震后大坝整体收缩。坝坡的地震永久变形矢量均指向坝内,大部分坝体变形矢量的垂直分量大于水平分量,特别是上部坝体。大坝的地震变形以沉降为主,这正是堆石体剪缩的重要体现^[1-2]。地震后坝体收缩现象反映堆石料在高围压和地震循环荷载作用下发生了颗粒破碎,并导致颗粒间的相互错动、滑移与填充等。因此,颗粒破碎是堆石料地震变形的重要诱因之一。显然,要深入研究堆石体的地震变形,就需要了解堆石颗粒在地震对应应变率下的破碎问题。

静力荷载条件下,岩石颗粒的破碎强度已有大量研究,多采用基于最弱链理论的 Weibull 统计模型来描述^[3-4]。W. L. Lim 等^[5]对 6 种不同类型、3 个粒径范围的铁路道砟进行了颗粒破碎试验,结果表明 Weibull 模型能够较好地描述颗粒强度,并采用幂函数拟合了强度尺寸效应。迟世春等^[6]对 4 组不同粒径大连石灰岩进行了颗粒破碎试验,同样采用 Weibull 模型拟合了颗粒强度,发现同种材料不同粒径颗粒的 Weibull 模量相近。然而经典 Weibull 模型隐含裂纹均匀分布在材料内部的假设,该理想假设无法反映材料中实际裂纹的分布情况^[7]。为克服这一局限性,W. Lei 等^[8-9]提出考虑裂纹分布的广义最弱链复合参数 Weibull 模型,并通过石英岩、玄武岩、盐及糖颗粒的试验验证了模型的适用性,可见该模型能够更有效地反映材料内部裂纹的分布情况。

现有研究表明,静载条件下堆石颗粒的强度具有一定的离散性,并存在尺寸效应,即随着颗粒尺寸的增大而下降^[10]。但与地震荷载对应的应变率作用下颗粒强度的研究较少。其中,岩石和混凝土规则试样的应变率与尺寸效应及其耦合作用的研究已有少量讨论^[11-13],但其应变率与地震荷载下堆石颗粒内的应变率相比偏高。应变率的研究数值分析较多,试验研究则鲜见报道。

由于试验设备制约,传统室内三轴缩尺料试验采用 ≤ 60 mm 粒径的颗粒样本^[10],而实际堆石坝工程中原型粒径可达 600~1 000 mm,对古水、如美等实际堆石坝工程的级配分析表明,其填筑料中 60 mm 以上粒径颗粒占比超过 70%^[14]。室内试验的缩

尺效应会使试验结果偏离较大。近年来,离散元模拟已成为揭示堆石料宏细观力学行为的关键手段,其中颗粒破碎特性是堆石料离散元数值模拟定量分析的基础。然而,已有研究多聚焦于静态或高应变率条件,针对地震荷载对应的中等应变率范围($10^{-4} \sim 10^{-2} \text{ s}^{-1}$)下颗粒破碎的应变率效应与尺寸效应耦合机制仍缺乏系统研究。

为研究加载速率对颗粒强度尺寸效应的影响,本文开展了 60~300 mm 的 6 种不同粒径的大连石灰岩颗粒在 4 种不同加载速率下的颗粒破碎试验,研究了颗粒尺寸和加载速率对颗粒特征强度的影响。进一步假设颗粒内微裂纹服从幂律型的空间位置分布,验证了广义最弱链复合参数 Weibull 模型在不同加载速率下的适用性,并根据微裂纹空间分布随加载速率的变化情况解释了颗粒强度的尺寸效应减弱机制。

2 单颗粒破碎试验

2.1 试验方法

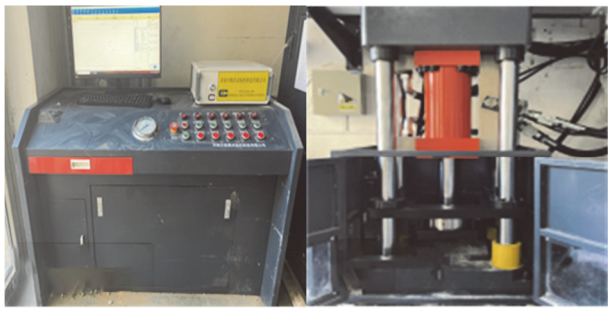
本试验采用大连理工大学自主研发的 TPWS-800 中等应变率加载试验机,如图 1 所示。该试验机主要由主机、油源、电控柜、负荷传感器及 PC 控制测力系统等组成,适用于 60~300 mm 粒径岩石颗粒在不同加载速率下的力学性能测试。试验机可采用力控制或位移控制,位移控制时通过切换动力系统可实现静力加载及中等应变率加载。试验机最大试验荷载为 800 kN,试验力示值相对误差不超过 $\pm 1\%$ 。位移测量分辨率为 0.01 mm,位移传感器量程为 500 mm。

破碎试验选用材料为石灰岩颗粒,取自大连市某采石场。试验粒径在 60~300 mm 范围,通过特制圆孔筛(孔径分别为 60 ± 5 , 90 ± 5 , 120 ± 5 , 150 ± 5 , 240 ± 5 , 300 ± 5 mm)筛选得到。为减小颗粒形状对试验结果的影响,剔除片状、针状等特殊形状颗粒,挑选几何形状相似的一类球状颗粒。

试验方案如表 1 所示,0.01 mm/s 加载速率下颗粒粒径范围为 60~300 mm,0.1, 1 和 10 mm/s 加载速率下颗粒粒径范围为 60~240 mm。每组试验有 40 个颗粒样本,共计 21 组,合计 840 个颗粒的测试。通过试验机软件记录加载过程中的力-位移曲线,当颗粒出现主体破坏时,力-位移曲线图像上荷载值随即大幅下降,试验停止,典型的加载曲线如图 2 所示。



(a) 油源 (b) 电控柜



(c) 控制台 (d) 主机

图 1 TPWS - 800 中等应变率加载试验系统

Fig.1 TPWS - 800 test system for medium strain rate loading

表 1 颗粒破碎试验方案

Table 1 Test programs for particle crushing

试验材料	加载速率/(mm · s ⁻¹)	粒径/mm
大连石灰岩	0.01	60, 90, 120, 150, 240, 300
	0.1	60, 90, 120, 150, 240
	1	60, 90, 120, 150, 240
	10	60, 90, 120, 150, 240

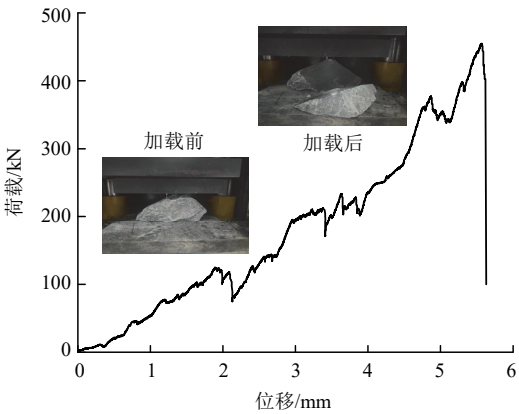


图 2 典型试验力 - 位移曲线

Fig.2 Typical force-displacement curve

由于通过孔塞筛选得到的颗粒实际形状并不规则，采用球度 S_p 对颗粒形状进行描述^[10]，试验时将颗粒放置于下压板上，最稳定状态时颗粒高度记为 H ，与 H 垂直的截面中，取最长边 L 和宽边 W ，满

足 $L \geq W \geq H$ ，球度 S_p 的计算公式如下：

$$S_p = (LWH)^{1/3} / L \times 100\%$$

(1)

表 2 列出了各试验组颗粒的平均球度和标准差，各组颗粒的球度相近，可以忽略形状对各试验组测试结果的影响。

表 2 各试验组颗粒球度

Table 2 Particle sphericity for each experimental group

颗粒粒径/ mm	球度 S_p /%			
	0.01 mm/s	0.1 mm/s	1 mm/s	10 mm/s
60	81.19	79.87	78.91	79.38
	±5.48	±4.35	±4.87	±6.02
90	83.66	85.03	84.24	80.09
	±4.57	±5.56	±5.27	±5.90
120	81.78	83.31	83.74	84.59
	±5.91	±5.93	±2.71	±4.81
150	82.68	84.10	84.94	82.12
	±4.90	±4.93	±5.23	±4.75
240	81.12	80.78	82.08	81.51
	±6.02	±3.59	±5.49	±5.61
300	79.79	-	-	-
	±5.81			

注：“±”前、后数据分别为球度均值和标准差。

2.2 颗粒破碎强度 Weibull 统计分析

颗粒名义强度 σ 一般定义^[3-4]为

$$\sigma = \frac{F}{d^2}$$

(2)

式中： F 为颗粒破坏的峰值荷载； d 为颗粒粒径，取颗粒初始加载高度。

基于最弱链理论的 Weibull 模型，对于颗粒名义强度为 σ ，体积为 V ，粒径为 d 的颗粒，其不破碎概率 P_s 符合下式：

$$P_s = \exp \left[- \left(\frac{V}{V_0} \right) \left(\frac{\sigma}{\sigma_0} \right)^m \right] = \exp \left[- \left(\frac{d}{d_0} \right)^3 \left(\frac{\sigma}{\sigma_0} \right)^m \right]$$

(3)

式中： σ_0 为 Weibull 特征强度，其值为不破碎概率为 37% 时对应的颗粒强度； m 为 Weibull 模量，表征颗粒强度的离散程度； V_0 为基准体积； d_0 为与 V_0 匹配的基准粒径。

对于相同粒径颗粒，当 $d = d_0$ 时，式(3)可化简为

$$P_s = \exp \left[- \left(\frac{\sigma}{\sigma_0} \right)^m \right]$$

(4)

将式(4)两侧取两次对数可得

$$\ln \left[\ln \left(\frac{1}{P_s} \right) \right] = m \ln \sigma - m \ln \sigma_0 \tag{5}$$

按式(5)进行整理，拟合直线斜率即为该粒组的 Weibull 模量 m ，特征强度 σ_0 通过直线在 x 轴上的截距计算得到。加载速率为 0.01，0.1，1，10 mm/s 的试验结果如图 3 所示。除个别强度较低的数据点稍偏离拟合直线外，各加载速率下不同粒径的颗粒试验结果均与 Weibull 拟合较好，整理试验结果得到其 Weibull 模量 m 、特征强度 σ_0 及拟合优度 R^2 参数见表 3。由表 3 可知，各试验组在相同粒径和加载速率条件下，Weibull 模型的拟合优度 R^2 值均高于 0.9，表明该模型可以较好地描述颗粒破碎强度的统计特征。

由表 3 数据绘制各加载速率下颗粒特征强度 σ_0 随颗粒平均加载高度的变化，见图 4。不同加载速率下，颗粒特征强度 σ_0 均随着粒径的增大而减小，

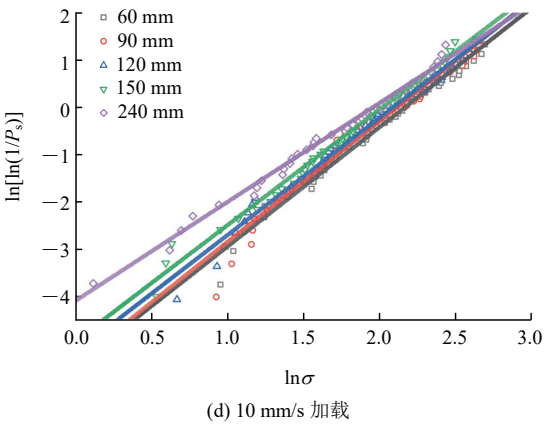
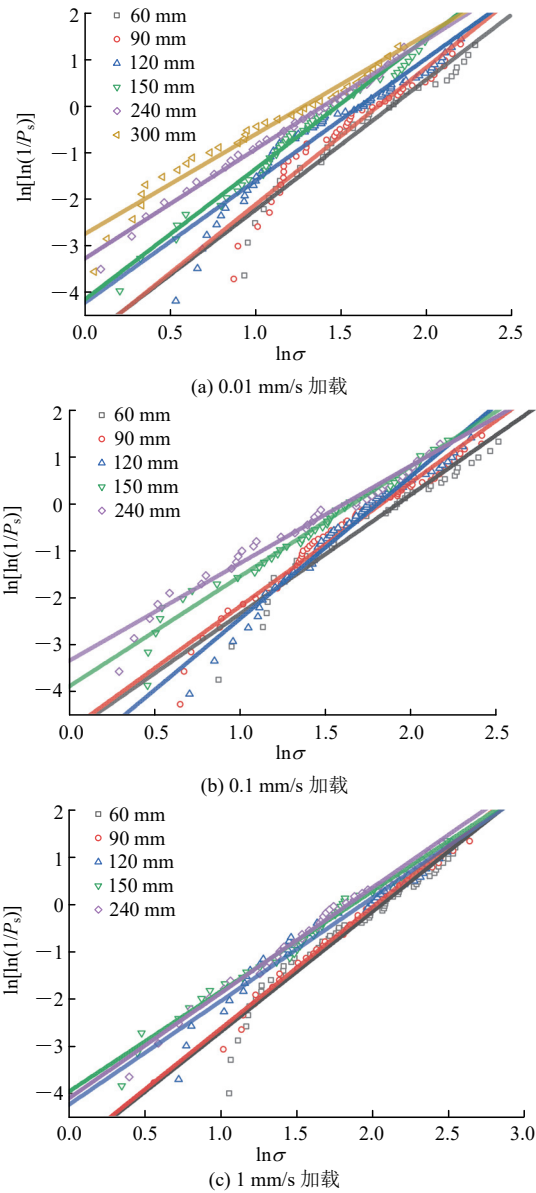


图 3 0.01，0.1，1，10 mm/s 加载下各粒径颗粒破碎强度
Fig.3 Crushing strengths of each particle size under 0.01，0.1，1，10 mm/s loading

表 3 不同加载速率下颗粒试验的 Weibull 参数
Table 3 Weibull parameters for particle experiments at different loading rates

加载速率/ (mm · s ⁻¹)	粒径/ mm	σ ₀ / MPa	m	R ²	m 的均值
0.01	60	6.11	2.80	0.937	2.62
	90	5.65	2.95	0.926	
	120	5.10	2.63	0.928	
	150	4.43	2.81	0.986	
	240	4.09	2.15	0.990	
0.1	60	6.93	2.54	0.939	2.53
	90	6.28	2.64	0.967	
	120	6.15	3.04	0.969	
	150	5.31	2.35	0.970	
	240	5.05	2.08	0.969	
1	60	7.94	2.36	0.921	2.62
	90	7.53	2.90	0.974	
	120	6.99	2.43	0.961	
	150	6.47	3.03	0.909	
	240	6.29	2.40	0.948	
10	60	8.79	2.53	0.984	2.43
	90	8.37	2.56	0.964	
	120	8.17	2.48	0.984	
	150	7.55	2.46	0.989	
	240	7.11	2.10	0.991	

呈现出明显的尺寸效应。同时随着加载速率的提高，各粒径石灰岩颗粒的特征强度 σ_0 均显著提高，具有应变率效应，与周永强等^[15-19]关于规则试样岩石强度应变率效应的研究结论一致。在不同加载速率下，Weibull 模量 m 的均值分别为 2.62，2.53，2.62 和

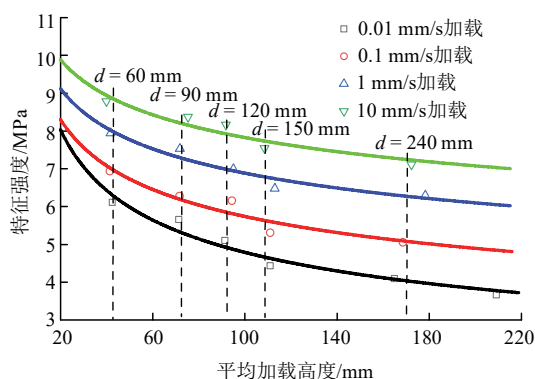


图4 各加载速率下不同粒径颗粒破碎强度的尺寸效应拟合
Fig.4 Fitting of size effect of crushing strength of particles of different sizes at each loading rate

2.43, 模量变化不显著, 表明加载速率对 Weibull 模量的影响较小, 即加载速率不改变颗粒强度分布的离散性。

2.3 基于 Weibull 模型的尺寸效应分析

C. Ovalle 等^[20]研究发现, 式(3)取粒径 d 的 3 次方的拟合效果不佳, 采用参数 n 代替 3:

$$P_s = 1 - \exp \left[- \left(\frac{d}{d_0} \right)^n \left(\frac{\sigma}{\sigma_0} \right)^m \right] \quad (6)$$

在一定的不破碎概率 P_s 下, 颗粒特征强度 σ_0 与粒径的关系:

$$\sigma_0 = \lambda d_a^{-n/m_a} \quad (7)$$

式中: d_a 为颗粒平均加载高度; λ 为常系数, λ , n 通过拟合得到; m_a 为各加载速率下 Weibull 模量平均值。本文试验的颗粒尺寸效应参数见表 4。

表 4 不同加载速率下强度尺寸效应拟合参数

Table 4 Fitting parameters for strength size effect at different loading rates

加载速率/(mm · s ⁻¹)	λ	n	m_a	R^2
0.01	21.08	0.843	2.62	0.951
0.1	16.52	0.581	2.53	0.907
1	15.40	0.458	2.62	0.927
10	15.28	0.353	2.43	0.899

将图 4 中粒径 240 和 60 mm 颗粒的特征强度进行对比, 加载速率为 0.01, 0.1, 1 和 10 mm/s 时, 特征强度比值依次为 0.67, 0.73, 0.79 和 0.81。随着加载速率的逐步提升, 大粒径颗粒的特征强度与小粒径颗粒的差异逐渐变小, 尺寸效应减弱。

将加载速率 10 和 0.01 mm/s 下, 60, 90, 120, 150 和 240 mm 粒径颗粒的特征强度进行对比, 比

值分别为 1.44, 1.48, 1.60, 1.70 和 1.74。加载速率提高, 颗粒的特征强度均有显著增加, 且大尺寸颗粒的强度提升幅度大于小颗粒。式(7)中指数 n/m_a 体现了尺寸效应的强弱。加载速率为 0.01, 0.1, 1 和 10 mm/s 时的尺寸效应指数分别为 0.322, 0.229 和 0.175 和 0.145。随着加载速率的提升, 尺寸效应指数逐渐下降, 尺寸效应则逐渐削弱。综上所述, 加载速率不仅提升颗粒破碎强度, 还影响强度的尺寸效应。

3 不同加载速率下微裂纹分布情况

3.1 广义最弱链复合参数 Weibull 模型

经典 Weibull 模型隐含脆性材料内部的微裂纹均匀分布的假设。然而越来越多的研究案例表明, 这一假设并不足以完美地描述岩石等准脆性材料破坏强度的尺寸效应, 这种模型在解释某些特定材料力学特性时存在局限性^[21]。

为寻求更符合材料内部裂纹实际分布情况的尺寸效应统计模型, W. Lei^[8]假设材料内部的裂纹的空间位置服从幂律分布, 并提出准脆性材料体积 V 与裂纹总数量 N 的关系:

$$N = N(V) = \left(\frac{V}{V_0} \right)^\beta \quad (8)$$

式中: N 为体积为 V 的材料内部微裂纹的数量; V_0 为裂纹占据的基准体积; β 为材料内部微裂纹密集程度的参数; β 的取值存在 3 种情况: 当 $\beta = 1$ 时, 与经典 Weibull 模型一致, 表示微裂纹在材料内部均匀分布, 见图 5(a); 当 $\beta < 1$ 时, 表示裂纹分布情况较均匀分布稀疏, 见图 5(b); 当 $\beta > 1$ 时, 表示裂纹分布情况较均匀分布更为致密, 见图 5(c)。

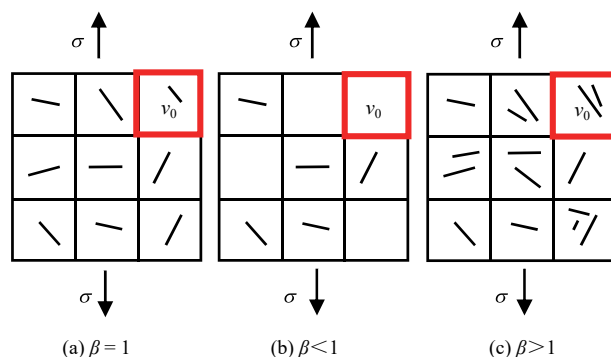


图 5 $\beta = 1$, $\beta < 1$, $\beta > 1$ 对应的材料内部微裂纹分布情况
Fig.5 Distribution of microcracks within the material corresponding to $\beta = 1$, $\beta < 1$ and $\beta > 1$

在均匀应力条件下, 对于一个微分体积单元

δV , 其中的裂纹数量 δN 可用下式表示:

$$\delta N = (\partial N / \partial V) \delta V \quad (9)$$

假定所有微裂纹都是相互独立的, 这样就可以对单个微分体积元素应用最弱链假设。在特定的微观断裂准则(如最大主应力准则)下, 若基准体积 V_0 内, 裂纹扩展导致失效的概率为 $p(\sigma, V_0)$, 该微分体积单元的破坏概率为

$$\delta P(\delta V) = 1 - [1 - p(\sigma, V_0)]^{\delta N} \quad (10)$$

将总体积 V 视为由大量微分体积单元 δV 组成的集合体, 材料整体的累积失效概率 P 可用下式计算:

$$P = 1 - \prod_{i=1}^n [1 - \delta P_i(\delta V_i)] = 1 - \prod_{i=1}^n [1 - P(\sigma, V_0)]^{\delta N_i} \quad (11)$$

应用式(11)可得

$$P = 1 - \exp \left\{ \sum_{i=1}^n \delta N_i \ln[1 - p(\sigma, V_0)] \right\} \xrightarrow{n \rightarrow \infty} 1 - \exp \left\{ \int_V \ln[1 - p(\sigma, V_0)] \frac{\partial N(V)}{\partial V} \delta V \right\} \quad (12)$$

裂纹空间分布为幂律型时, 由式(8)和(9)可得计算微分体积单元内的裂纹数量:

$$\delta N = \frac{\partial N(V)}{\partial V} \delta V = \beta \left(\frac{V}{V_0} \right)^{\beta-1} \left(\frac{\delta V}{V_0} \right) \quad (13)$$

将式(13)代入式(12)可得

$$P = 1 - \exp \left\{ \beta \left(\frac{V}{V_0} \right)^{\beta-1} \int_V \ln[1 - p(\sigma, V_0)] \frac{\delta V}{V_0} \right\} \quad (14)$$

式(14)即为广义的最弱链复合参数 Weibull 统计模型, 根据第一积分中值定理将式(14)简化:

$$\frac{1}{\beta V^\beta} \ln \left(\frac{1}{1-P} \right) = \frac{h(\sigma)}{V_0^\beta} \quad (15)$$

式中: $h(\sigma)$ 为颗粒名义强度 σ 与复合参数 $1/(\beta V^\beta) \{ \ln[1/(1-P)] \}$ 的拟合表达式。通过试算不同的 β , 能得到一条幂律函数“主曲线”来关联复合参数 $1/(\beta V^\beta) \{ \ln[1/(1-P)] \}$ 和颗粒名义强度 σ 。

W. Lei^[8] 采用各种准脆性材料对式(15)进行验证, 建立表述颗粒名义强度 σ 和体积 V 与累积破坏概率 P 之间关系式:

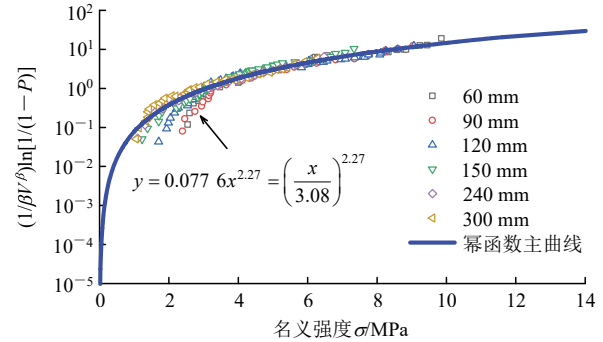
$$P = 1 - \exp \left[-\beta \left(\frac{V}{V_0} \right)^\beta \left(\frac{\sigma}{\sigma_{0,u}} \right)^{m_u} \right] \quad (16)$$

式中: m_u , $\sigma_{0,u}$ 分别为改进模型的 Weibull 模量和特征强度, 可由幂律函数 $h(\sigma)$ 确定。与经典 Weibull 模型式(3)相比, 式(16)引入了裂纹分布参数 β 来描述材

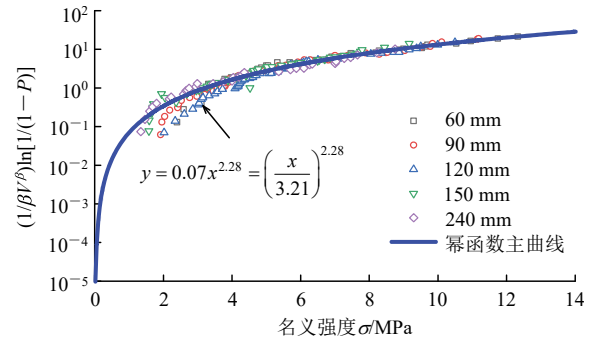
料的裂纹分布情况。

3.2 模型的试验验证

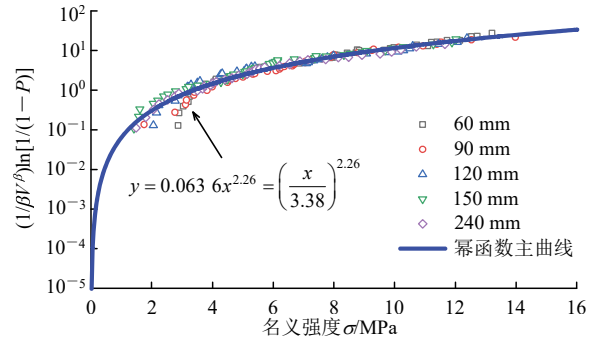
采用复合参数 Weibull 模型对试验结果进行验证, 各加载速率下复合参数 $1/(\beta V^\beta) \{ \ln[1/(1-P)] \}$ 与颗粒名义强度 σ 的拟合情况见图 6, 拟合优度 R^2 分别



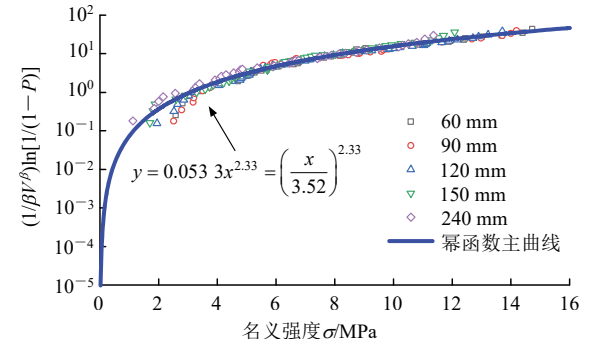
(a) 0.01 mm/s 加载, $\beta = 0.22$



(b) 0.1 mm/s 加载, $\beta = 0.18$



(c) 1 mm/s 加载, $\beta = 0.14$



(d) 10 mm/s 加载, $\beta = 0.09$

图 6 0.01, 0.1, 1, 10 mm/s 加载下颗粒复合参数与名义强度拟合情况

Fig.6 Fitting of parameters and nominal strength under loading at 0.01, 0.1, 1, 10 mm/s

为 0.956, 0.978, 0.970, 0.967。各组试验数据均能落在幂律函数确定的“主曲线”附近, 引入 β 值能较好地判断材料内部裂纹分布的情况。

本试验中粒径 300 mm 颗粒体积能够达到 10 000 cm^3 , 取 $V_0=100 \text{ cm}^3$ 时, 0.01, 0.1, 1, 10 mm/s 加载速率下, 由式(16)确定的累积破坏概率 P 分别为

$$P_{0.01} = 1 - \exp \left[-0.22 \left(\frac{V}{V_0} \right)^{0.22} \left(\frac{\sigma}{3.08} \right)^{2.27} \right] \quad (17)$$

$$P_{0.1} = 1 - \exp \left[-0.18 \left(\frac{V}{V_0} \right)^{0.18} \left(\frac{\sigma}{3.21} \right)^{2.28} \right] \quad (18)$$

$$P_1 = 1 - \exp \left[-0.14 \left(\frac{V}{V_0} \right)^{0.14} \left(\frac{\sigma}{3.38} \right)^{2.26} \right] \quad (19)$$

$$P_{10} = 1 - \exp \left[-0.09 \left(\frac{V}{V_0} \right)^{0.09} \left(\frac{\sigma}{3.52} \right)^{2.33} \right] \quad (20)$$

拟合结果见表 5, 0.01, 0.1, 1 和 10 mm/s 加载速率下裂纹分布参数 β 分别为 0.22, 0.18, 0.14, 0.09, 随加载速率提升, 颗粒中裂纹分布逐渐稀疏, 即扩展的裂纹数量减小。特征强度 $\sigma_{0,u}$ 随加载速率从 3.08 MPa 提升到 3.52 MPa, 与节 2.2 的结论一致, 表现出颗粒强度的应变率效应。 m_u 值变化不大, 颗粒强度分布离散性差别不大。

表 5 不同加载速率下复合参数拟合参数

Table 5 Fitting parameters of composite parametric at different loading rates

加载速率/(mm · s ⁻¹)	β	$\sigma_{0,u}$ /MPa	m_u	R^2
0.01	0.22	3.08	2.27	0.956
0.1	0.18	3.21	2.28	0.978
1	0.14	3.38	2.26	0.970
10	0.09	3.52	2.33	0.967

3.3 复合参数 Weibull 模型的运用及参数验证

将累积破坏概率 P 的式(16)进行简化^[22]:

$$P = 1 - \exp \left[- \left(\frac{\sigma}{\sigma_u} \right)^{m_u} \right] \quad (21)$$

式中: σ_u 为等效特征强度, 且有

$$\sigma_u = \frac{\sigma_{0,u}}{\sqrt[m_u]{\beta}} \left(\frac{V_0}{V} \right)^{\frac{\beta}{m_u}} \quad (22)$$

通过 $\sigma_{0,u}$, m_u 可对各粒径颗粒的平均强度进行预测:

$$\bar{\sigma} = \sigma_u \Gamma \left(1 + \frac{1}{m_u} \right) = \frac{\sigma_{0,u}}{\sqrt[m_u]{\beta}} \left(\frac{V_0}{V} \right)^{\frac{\beta}{m_u}} \Gamma \left(1 + \frac{1}{m_u} \right) \quad (23)$$

预测结果见表 6, 预测平均强度与实际平均强度的最大误差为 6.6%, 最小误差为 0.5%, 说明复合参数 Weibull 模型能够实现从特征强度到平均强度的转换, 较好地反映颗粒强度的统计特征。

表 6 复合参数模型平均强度预测值与实际值对比

Table 6 Composite parametric model mean intensity predictions vs. actual values

加载速率/(mm · s ⁻¹)	粒径/mm	预测强度/MPa	试验强度/MPa	误差/%
0.01	60	5.38	5.44	1.2
	90	4.71	5.03	6.3
	120	4.40	4.51	2.4
	150	4.16	3.96	-5.0
	240	3.63	3.60	-0.7
	300	3.40	3.22	-5.5
0.1	60	6.17	6.13	-0.7
	90	5.52	5.59	1.2
	120	5.14	5.50	6.6
	150	4.94	4.68	-5.6
	240	4.42	4.44	0.5
	300	4.16	3.96	-5.0
1	60	7.12	7.02	-1.4
	90	6.59	6.76	2.5
	120	6.33	6.18	-2.4
	150	6.11	5.77	-6.0
	240	5.57	5.62	0.9
	300	5.38	5.03	-6.3
10	60	7.67	7.80	1.60
	90	7.31	7.41	1.30
	120	7.10	7.15	0.80
	150	6.95	6.68	-4.00
	240	6.55	6.25	-4.90

4 讨 论

裂纹分布参数 β 的物理意义在于表征颗粒内部微裂纹的空间分布特征。以 0.01 mm/s 静态加载条件为例, 裂纹均匀分布($\beta = 1$)时的颗粒试验数据如图 7 所示, 各尺寸颗粒数据点离散程度较高, 此时不存在“主曲线”来对所有尺寸颗粒数据进行关联, 说明均匀分布裂纹模型无法真实反映颗粒内部裂纹的空间分布。相比之下, 当采用幂律分布($\beta =$

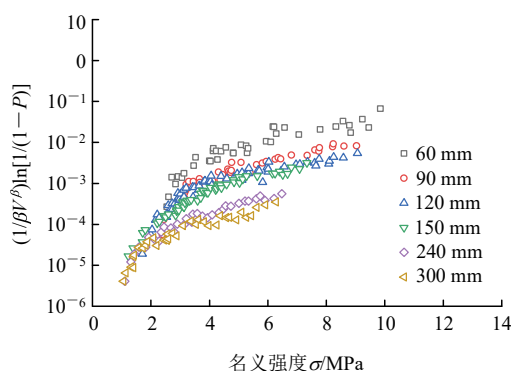


图7 0.01 mm/s 加载下 $\beta=1$ 时颗粒复合参数与名义强度关系

Fig.7 Relation between particle composite parameters and nominal strength of $\beta=1$ under 0.01 mm/s loading

0.22)描述材料裂纹稀疏分布时,不同尺寸颗粒的破坏强度均能落在由幂律函数决定的“主曲线”上($R^2=0.957$),见图6(a),说明相较于均匀分布颗粒,实际裂纹分布情况更符合稀疏分布。

不同加载速率下裂纹分布参数 β 呈现显著差异性:随着加载速率从0.01 mm/s提高至10 mm/s,裂纹分布参数 β 从0.22显著降低至0.09,表明动态加载下裂纹空间分布趋向稀疏化;整体特征强度 $\sigma_{0,u}$ 从3.08 MPa提升至3.52 MPa,反映颗粒整体强度随加载速率提高而增强; m_u 稳定在2.26~2.33范围内,验证了加载速率对颗粒强度离散性无显著影响,与传统Weibull模量基本一致。以上分析表明:加载速率主要通过调控裂纹分布模式(β 值下降)和提升特征强度削弱尺寸效应,而非通过改变强度的离散性实现。

颗粒强度的变化与模型对内部微裂纹的长度、方位、空间位置等随机分布密度的刻画相关^[23]。本文试验中10 mm/s高加载速率下,裂纹扩展时间较静态加载下显著缩短,导致仅大尺寸主导裂纹被激活,小缺陷因反应时间不足被“动态筛选”淘汰,表现为裂纹分布参数 β 值下降, β 值从0.22下降至0.09,模型中考虑裂纹逐渐稀疏。裂纹空间分布从低加载速率下的相对均匀模式转变为高加载速率下的局部簇集模式。对于大尺寸颗粒,由于其体积更大,裂纹簇集区之间的间距也更大。当裂纹从一个簇集区扩展到另一个簇集区时,裂纹扩展需要跨越较大的无缺陷区域。这些无缺陷区域的材料强度较高,裂纹扩展需要更大的强度,从而导致整体强度提升程度相对较大。而小尺寸颗粒由于其体积较小,裂纹扩展路径较短,强度提高相比大颗粒而言较低。

此外国内外学者多从惯性效应与泊松效应对岩石、混凝土等准脆性材料尺寸效应的减弱进行机制

解释^[13-24],惯性作用指物体在动态荷载下产生与加载方向相反的惯性力,该力抑制物体对外荷载的响应。加载速率提高,惯性抗力增强,并且其随试件尺寸的增大而增强。240 mm颗粒在10 mm/s加载下的强度较静态条件提升74%,而60 mm颗粒仅提升44%,惯性效应部分抑制尺寸效应。颗粒在轴向压缩时也会因泊松效应产生横向膨胀趋势,高加载速率下侧向变形的惯性约束作用显著增强,使得大颗粒强度提升幅度高于小粒径颗粒。本文尝试从裂纹分布参数解释颗粒强度的率敏感特性,为岩石颗粒材料动态本构模型的建立提供试验依据。

5 结 论

为研究堆石颗粒强度的尺寸和应变率效应,开展了60~300 mm粒径颗粒在0.01~10 mm/s加载速率下的颗粒破碎试验,分析了复合参数Weibull模型的适用性和颗粒内部裂纹分布情况,主要结论如下:

(1) Weibull模型可以较好地描述颗粒破碎强度的统计特征,不同加载速率下颗粒特征强度均随着粒径的增大而减小。同时,各粒径的特征强度随着加载速率的提高而增大,但Weibull模量变化不显著。

(2) 颗粒特征强度与粒径服从幂律函数关系,加载速率为0.01, 0.1, 1和10 mm/s时,尺寸效应幂指数分别为0.322, 0.229, 0.175, 0.145,幂指数随着加载速率的提升而下降,尺寸效应逐渐削弱。

(3) 假设颗粒内部微裂纹的空间位置分布为幂律型,各加载速率下试验数据均落在复合参数Weibull模型主导的曲线上。裂纹分布参数 β 随加载速率提升而减小,微裂纹的空间分布逐渐稀疏。

参考文献(References):

- [1] 章为民,陈生水.紫坪铺面板堆石坝汶川地震永久变形实测结果分析[J].水力发电,2010,36(8):51-53.(ZHANG Weimin, CHEN Shengshui. Analysis on permanent deformation monitoring data of Zipingpu concrete faced rockfill dam after Wenchuan earthquake[J]. Water Power, 2010, 36(8): 51-53.(in Chinese))
- [2] 陈生水,霍家平,章为民.“5.12”汶川地震对紫坪铺混凝土面板坝的影响及原因分析[J].岩土工程学报,2008,30(6):795-801.(CHEN Shengshui, HUO Jiaping, ZHANG Weimin. Analysis of effects of “5.12” Wenchuan earthquake on Zipingpu concrete face rock-fill dam[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, 30(6): 795-801.(in Chinese))
- [3] XIAO Y, MENG M, DAOUADJI A, et al. Effects of particle size on crushing and deformation behaviors of rockfill materials[J]. Geoscience Frontiers, 2020, 11(2): 375-388.

- [4] 周海娟, 马 刚, 袁 葳, 等. 堆石颗粒压缩破碎强度的尺寸效应[J]. 岩土力学, 2017, 38(8): 2 425 - 2 433.(ZHOU Haijuan, MA Gang, YUAN Wei, et al. Size effect on the crushing strengths of rock particles[J]. Rock and Soil Mechanics, 2017, 38(8): 2 425 - 2 433.(in Chinese))
- [5] LIM W L, MCDOWELL G R, COLLOP A C. The application of Weibull statistics to the strength of railway ballast[J]. Granular Matter, 2004, 6(4): 229 - 237.
- [6] 迟世春, 王 峰, 贾宇峰, 等. 考虑细观单粒强度的堆石料破碎特性研究[J]. 岩土工程学报, 2015, 37(10): 1 780 - 1 785.(CHI Shichun, WANG Feng, JIA Yufeng, et al. Modeling particle breakage of rockfill materials based on single particle strength[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2015, 37(10): 1 780 - 1 785.(in Chinese))
- [7] 闫世豪, 迟世春, 王晋伟, 等. 考虑微裂纹随机分布的堆石颗粒准静态强度统计模型[J]. 岩土力学, 2024, 45(5): 1 378 - 1 387.(YAN Shihao, CHI Shichun, WANG Jinwei, et al. Statistical model for quasi-static strength of rockfill particles considering random distribution of microcracks[J]. Rock and Soil Mechanics, 2024, 45(5): 1 378 - 1 387.(in Chinese))
- [8] LEI W. A generalized weakest-link model for size effect on strength of quasi-brittle materials[J]. Journal of Materials Science, 2018, 53(2): 1 227 - 1 245.
- [9] QIAN G, LEI W, YU Z, et al. Statistical size scaling of breakage strength of irregularly-shaped particles[J]. Theoretical and Applied Fracture Mechanics, 2019, 102: 51 - 58.
- [10] 郭 宇, 迟世春, 米晓飞. 粗粒土颗粒强度和弹性力学参数的试验研究[J]. 岩土工程学报, 2021, 43(9): 1 675 - 1 681.(GUO Yu, CHI Shichun, MI Xiaofei. Experimental study on particle strength and elastic mechanical parameters of coarse-grained soil[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2021, 43(9): 1 675 - 1 681.(in Chinese))
- [11] ZHANG Q B, ZHAO J. A review of dynamic experimental techniques and mechanical behaviour of rock materials[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2014, 47(4): 1 411 - 1 478.
- [12] 洪 亮, 李夕兵, 马春德, 等. 岩石动态强度及其应变率灵敏性的尺寸效应研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(3): 526 - 533.(HONG Liang, LI Xibing, MA Chunde, et al. Study on size effect of rock dynamic strength and strain rate sensitivity[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(3): 526 - 533.(in Chinese))
- [13] JIN L, YU W, LI D, et al. Numerical and theoretical investigation on the size effect of concrete compressive strength considering the maximum aggregate size[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2021, 192: 106130.
- [14] 丁林楠, 李国英. 基于分形级配方程的堆石料颗粒破碎 SBG 模型[J]. 岩土工程学报, 2022, 44(2): 264 - 270.(DING Linnan, LI Guoying. SBG model for particle breakage of rockfills based on fractal gradation equation[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2022, 44(2): 264 - 270.(in Chinese))
- [15] 周永强, 盛 谦, 李娜娜, 等. 不同应变率下岩石材料强度和模量的动态增强因子模型研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2020, 39(增 2): 3 245 - 3 259.(ZHOU Yongqiang, SHENG Qian, LI Nana, et al. Dynamic increasing factor model for strength and modulus of rock materials at different strain rates[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2020, 39(Supp.2): 3 245 - 3 259.(in Chinese))
- [16] 孟庆彬, 韩立军, 浦 海, 等. 尺寸效应和应变速率对岩石力学特性影响的试验研究[J]. 中国矿业大学学报, 2016, 45(2): 233 - 243.(MENG Qingbin, HAN Lijun, PU Hai, et al. Effect of the size and strain rate on the mechanical behavior of rock specimens[J]. Journal of China University of Mining and Technology, 2016, 45(2): 233 - 243.(in Chinese))
- [17] 黄 达, 黄润秋, 张永兴. 粗晶大理岩单轴压缩力学特性的静态加载速率效应及能量机制试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(2): 245 - 255.(HUANG Da, HUANG Runqiu, ZHANG Yongxing. Experimental investigations on static loading rate effects on mechanical properties and energy mechanism of coarser crystal grain marble under uniaxial compression conditions[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(2): 245 - 255.(in Chinese))
- [18] 宫凤强, 王 进, 李夕兵. 岩石压缩特性的率效应与动态增强因子统一模型[J]. 岩石力学与工程学报, 2018, 37(7): 1 586 - 1 595.(GONG Fengqiang, WANG Jin, LI Xibing. The rate effect of compression characteristics and a unified model of dynamic increasing factor for rock materials[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2018, 37(7): 1 586 - 1 595.(in Chinese))
- [19] 王洪亮, 范鹏贤, 王明洋, 等. 应变率对红砂岩渐进破坏过程和特征应力的影响[J]. 岩土力学, 2011, 32(5): 1 340 - 1 346.(WANG Hongliang, FAN Pengxian, WANG Mingyang, et al. Influence of strain rate on progressive failure process and characteristic stresses of red sandstone[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(5): 1 340 - 1 346.(in Chinese))
- [20] OVALLE C, FROSSARD E, DANO C, et al. The effect of size on the strength of coarse rock aggregates and large rockfill samples through experimental data[J]. Acta Mechanica, 2014, 225(8): 2 199 - 2 216.
- [21] BEREMIN F M, PINEAU A, MUDRY F, et al. A local criterion for cleavage fracture of a nuclear pressure vessel steel[J]. Metallurgical and Materials Transactions A—Physical Metallurgy and Materials Science, 1983, 14: 2 277 - 2 287.
- [22] LEI W, QIAN G, YU Z, et al. Statistical size scaling of compressive strength of quasi-brittle materials incorporating specimen length-to-diameter ratio effect[J]. Theoretical and Applied Fracture Mechanics, 2019, 104: 102345.
- [23] YU Z, LEI W, ZHAI J. A synchronized statistical characterization of size dependence and random variation of breakage strength of individual brittle particles[J]. Powder Technology, 2017, 317: 329 - 338.
- [24] 金 浏, 余文轩, 杜修力, 等. 基于细观模拟的混凝土动态压缩强度尺寸效应研究[J]. 工程力学, 2019, 36(11): 50 - 61.(JIN Liu, YU Wenxuan, DU Xiuli, et al. Reserch on size effect of dynamic compressive strength of concrete based on meso-scale simulation[J]. Engineering Mechanics, 2019, 36(11): 50 - 61.(in Chinese))