

无序性对脆性材料冲击破碎的影响

陈兴 马刚 周伟 赖国伟 来志强

Effects of material disorder on impact fragmentation of brittle spheres

Chen Xing Ma Gang Zhou Wei Lai Guo-Wei Lai Zhi-Qiang

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 67, 146102 (2018) DOI: 10.7498/aps.67.20180276

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.67.20180276>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2018/V67/I14>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

[非晶材料与物理近期研究进展](#)

Recent progress of the glassy materials and physics

物理学报.2018, 67(12): 126101 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.67.126101>

[非晶合金的高通量制备与表征](#)

Combinatorial fabrication and high-throughput characterization of metallic glasses

物理学报.2017, 66(17): 176106 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.176106>

[准静态颗粒介质的弹性势能弛豫分析](#)

Analysis of elastic energy relaxation process for granular materials at quasi-static state

物理学报.2016, 65(9): 096102 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.096102>

[颗粒介质弹性的弛豫](#)

Relaxation of granular elasticity

物理学报.2015, 64(23): 236101 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.236101>

无序性对脆性材料冲击破碎的影响*

陈兴¹⁾²⁾ 马刚^{1)2)†} 周伟¹⁾²⁾ 赖国伟¹⁾²⁾ 来志强¹⁾²⁾

1) (武汉大学水利水电学院, 水资源与水电工程国家重点实验室, 武汉 430072)

2) (武汉大学水利水电学院, 水工岩石力学教育部重点实验室, 武汉 430072)

(2018年2月3日收到; 2018年3月20日收到修改稿)

脆性材料受冲击荷载作用产生损伤开裂是一个连续介质离散化的过程. 采用连续离散耦合方法模拟了一个脆性圆球以不同初始速度与刚性板的冲击, 重点研究了无序性对脆性材料冲击破碎的影响, 并对其内在机理进行了分析. 本文不考虑材料细观结构的无序性, 材料的无序仅体现在细观断裂参数的非均质性. 数值实验同样揭示了脆性材料在冲击破坏中存在两种破坏模式, 即低速时接触区域的局部损伤和高速时的整体碎裂. 研究表明, 材料无序性对临界冲击速度、破碎模式、碎片形态影响显著. 随着无序度增加, 材料的临界速度增大, 损伤开裂由少量贯穿性裂纹主导转变为全域性的分叉裂纹. 高无序度圆球冲击产生的碎片表面更粗糙, 体型更为扁平细长. 这与细观断裂的主导机制有关, 无序度较高时剪切导致开裂的比重更大, 碎片内部损伤裂纹面更多.

关键词: 无序性, 脆性材料, 冲击破碎, 连续离散耦合方法

PACS: 61.43.-j, 62.25.Mn, 64.70.qj

DOI: 10.7498/aps.67.20180276

1 引言

脆性材料(如玻璃、陶瓷、混凝土等)由于其高硬度、高强度等性能, 被广泛应用于各个领域. 大量实验研究表明, 影响其使用寿命的主要原因之一是材料的无序性. 由于微裂纹、微孔洞、杂质等局部缺陷, 表观均质有序的脆性材料在细观尺度上存在不同程度的无序性. 材料细观结构的无序性和力学性质(如断裂特性)的不均匀分布都会导致材料的无序性^[1,2]. 脆性材料的无序性影响其硬度、耐久性、强度等物理力学特性^[3-5]. 尤其在冲击等动荷载作用下, 材料的局部缺陷处易发生应力集中, 导致裂纹成核、扩展, 最终影响材料的宏观变形和破坏模式^[6]. 因此, 研究脆性材料的冲击破碎有助于从物理本质上加深对脆性材料动力响应的认识.

早期材料冲击破碎研究主要关注碎片质量的统计分布, 随后扩展到冲击破碎形态、临界冲击速

度(动能)、碎片形态等方面. Oddershede等^[7]发现不同材料断裂后, 碎片的质量都服从一定的标度率, 认为材料的碎裂可能存在自组织临界性. Kun等^[8]和Wittel等^[9]开展了壳体脆性材料在动态荷载下的破坏实验, 结果表明在爆炸和冲击两种动荷载下的相变分别具有突变性和连续性. Pernas-Sanchez等^[10]开展了冰球高速冲击刚性板的实验, 冰球的破碎特性更像颗粒聚合体而非固体介质. 物理实验配合高速摄影和观测技术, 能实时记录破坏过程, 在实验结束后测量裂纹面形貌和碎片尺寸^[8,11]. 但是实验难以细致入微地揭示冲击破碎机理. 随着数值模拟方法的发展和计算机性能的飞速提升, 数值模拟在研究材料的冲击破碎方面有了更大的应用空间. Kun和Herrmann^[12], Behera等^[13]和Sator等^[14]分别采用离散元方法(DEM)和分子动力学方法(MD)模拟了二维圆盘的冲击破碎, 发现存在一个临界冲击速度(动能)将材料的冲击响应分为局部损伤和整体碎裂两种状态. Wittel

* 国家重点研发计划(批准号: 2016YFC0401907)和国家自然科学基金(批准号: 51509190, 51579193)资助的课题.

† 通信作者. E-mail: magang630@whu.edu.cn

等^[15]通过分析应力场分布和碎片标度率,认为子午型开裂是冲击碎裂的主要开裂机制.

除了DEM和MD以外,其他一些数值方法,如光滑粒子动力学(SPH)^[16,17]、近场动力学(PD)^[18]、物质点法(MPM)^[19]也逐渐用来研究材料的冲击开裂问题.俞寅等^[20]采用格点-弹簧模型(lattice-spring model)模拟了脆性材料的平板撞击,指出孔洞的塌缩变形和剪切裂纹是影响冲击波传播的根本原因.连续离散耦合分析方法(FDEM)自Munjiza等^[21]提出后,经过不断发展已被广泛应用于岩石开裂、颗粒破碎、混凝土动态断裂等研究^[22-26].Ma等^[27]采用FDEM模拟了均质圆球的冲击破碎,再现了脆性材料的典型冲击破碎行为,并与其他数值模拟方法对比,展示了FDEM方法在模拟冲击破碎方面的优势.Ma等^[28]进一步采用FDEM研究了脆性材料冲击破碎的细观断裂机制和分形特性.

大部分冲击破碎的研究对象为均质脆性材料^[27-30],而材料的无序性对冲击破碎的影响及其机制尚不明确.基于以上研究背景,本文采用FDEM研究了不同无序度的脆性材料的冲击破碎特性.不考虑材料细观结构的无序性,材料的无序仅体现为细观断裂性质的非均质性.模拟了一个脆性圆球以不同初始速度冲击刚性板,假定材料的细观断裂参数服从Weibull分布,并用Weibull模数 k 反映材料的无序程度.首次通过碎片形态的变化规律来解释材料无序度对冲击破碎的影响机制,进一步补充了脆性材料冲击破碎理论.

2 脆性圆球冲击模拟

2.1 FDEM中的开裂模拟

采用连续离散耦合分析方法模拟脆性材料在冲击荷载下的力学响应.在FDEM中,用实体单元和零厚度界面单元来离散计算域,实体单元只发生弹性变形,用以模拟固体材料的弹性响应.界面单元插入到所有相邻实体单元之间,基于非线性断裂力学,通过界面单元的损伤失效来模拟材料的细观开裂.界面单元失效后,此时相邻实体单元间关系转化为接触范畴.这种模拟思路是以许多脆性材料的结构特性为基础,具有实际的物理意义^[31,32].

在界面单元应力状态未达到起裂准则之前,相邻实体单元通过界面单元实现力的传递,并保持

变形连续协调.界面单元的应力状态采用向量 t 表示,包含法向应力 t_n 和两个切向应力 t_{s1}, t_{s2} .法向相对位移和两个切向相对位移分别表示为 δ_n 和 δ_{s1}, δ_{s2} .界面单元的力-位移关系表示为:

$$t = \begin{Bmatrix} t_n \\ t_{s1} \\ t_{s2} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} k_n & & \\ & k_{s1} & \\ & & k_{s2} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \delta_n \\ \delta_{s1} \\ \delta_{s2} \end{Bmatrix}, \quad (1)$$

式中 k_n, k_{s1} 和 k_{s2} 分别为界面单元的法向刚度以及两个切向刚度.为简化起见,不考虑界面单元法向和切向力学响应的耦合,认为3个刚度之间相互独立.同时假定界面单元两个切向刚度相等,即 $k_{s1} = k_{s2} = k_s$.

考虑脆性材料的拉伸和剪切两种断裂机制以及两者的相互作用,界面单元的破坏法则为

$$\left\{ \frac{\langle t_n \rangle}{f_t} \right\}^2 + \left\{ \frac{\langle t_s \rangle}{f_s} \right\}^2 \geq 1, \quad (2)$$

式中 $\langle \cdot \rangle$ 是Macaulay符号,法向应力 t_n 以拉为正; $t_s = \sqrt{t_{s1}^2 + t_{s2}^2}$ 是界面单元上的剪应力; f_s 为材料的细观抗拉强度,抗剪强度 f_s 采用带拉伸截断的Mohr-Coulomb准则确定. $f_n = c + \langle -t_n \rangle \tan \varphi$, c 为内聚力, φ 为内摩擦角.

当界面单元的应力状态满足破坏准则时,界面单元失效,材料在此处发生细观断裂.失效后的界面单元将从模型中删除,之后不再参与计算.材料发生开裂后,采用基于接触势的概念和线性刚度接触模型进行接触分析,具体的接触定义细节可见参考文献^[23, 33].

2.2 脆性材料强度的Weibull分布

材料的许多复杂力学行为与细观力学性质的非均质程度有关,如细观断裂特性(强度、断裂能等).Grange等^[34]通过边缘冲击实验发现不同均质程度的石灰岩具有明显不同的碎裂模式,指出Weibull模数是描述脆性材料的准静态和动态断裂的关键参数.大量的材料实验表明,脆性材料(如玻璃、陶瓷等)的强度具有一定的离散性,通常服从某种统计分布^[34],如基于最弱环理论的Weibull模型可以较好地描述脆性材料由于微孔洞、微裂纹等缺陷导致的细观力学性质的无序化:

$$P = 1 - \exp \left[- \left(\frac{\sigma}{\sigma_0} \right)^k \right], \quad (3)$$

其中 P 是累计失效概率, k 是无量纲的 Weibull 模数, σ_0 是与表征强度 σ 量纲一致的尺度参数. σ_0 控制分布曲线的大小, 与样本的均值相关. k 控制分布曲线的形状, 与分布的分散性有关.

统计不同脆性材料强度分布的 Weibull 模数如表 1 所列, 可见除部分高性能陶瓷外, 大部分脆性材料的 Weibull 模数主要分布在 1—10 之间.

表 1 几类脆性材料强度分布的 Weibull 模数统计结果
Table 1. The Weibull modulus statistical summary of several major brittle materials.

材料类型	强度测试方法	Weibull 模数 k
玻璃 [35,36]	四点弯曲实验, 同轴双圈测试	3.2—6.5
陶瓷 [37,38]	四点弯曲实验	9.1—17.0
牙科陶瓷 [39,40]	三点弯曲实验, 四点弯曲实验	4.7—12.4
生物外壳 [41,42]	三点弯曲实验, 剪切实验	1.8—7.7
单晶硅 [43,44]	四点弯曲实验, 三球实验	2.0—8.4

2.3 FDEM 模拟设置和计算参数

采用 FDEM 模拟了非均质脆性圆球以不同速度垂直冲击光滑刚性板, 如图 1 所示. 假定材料的细观断裂强度服从 Weibull 分布, 并用 Weibull 模

数反映材料的无序度, k 越大, 材料的无序度越低. Weibull 模数 k 分别取为 1, 2, 5 和 10, 对每组 k 进行 10 次独立模拟, 以下分析都是对 10 次模拟的结果进行统计分析. 数值模拟所需参数见表 2.

表 2 冲击模拟输入参数表
Table 2. Parameters values used in impact simulations.

参数及符号	取值	单位	
圆球直径 D	60	mm	
整体模型	实体单元数目 N_t^S	19290	
	界面单元数目 N_t^{CIE}	150264	
	时间步长 Δt	2.0×10^{-9}	s
实体单元	密度 ρ	2700	kg/m ³
	弹性模数 E	80	GPa
	泊松比 ν	0.2	—
	法向刚度 K_n	6.0×10^{13}	N/m ³
界面单元	切向刚度 K_s	2.5×10^{13}	N/m ³
	平均抗拉强度 f_t	16	MPa
	平均内聚力 c	55	MPa
	Weibull 模数 k	1, 2, 5, 10	—
	内摩擦角 φ_i	40	(°)
	裂面摩擦角 φ_f	30	(°)
	接触法则	滑动摩擦系数 μ	0.577

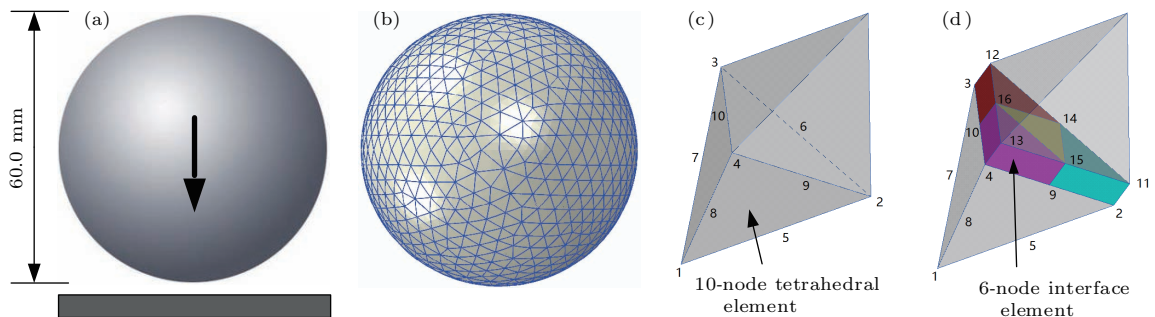


图 1 FDEM 模拟的圆球模型 (a) 60 mm 的圆球冲击刚性板; (b) 圆球的有限元网格; (c) 10 节点四面体单元; (d) 6 节点界面单元 (图中虚设界面单元厚度以便于理解)

Fig. 1. Sphere model of FDEM simulation: (a) A spherical solid with diameter of 60 mm impact against a rigid plate; (b) finite element discretization of the sphere; (c) 10-node tetrahedral element; (d) topology of the 6-node cohesive interface element (the finite thickness is exaggerated for clarity).

3 模拟结果与分析

3.1 冲击破碎过程

图 2 为 Weibull 模数 $k = 5$ 的圆球以 20 m/s 的速度垂直冲击刚性板, 观察其冲击破碎过程. 球体首先在与刚性板接触的区域产生局部损伤, 随后以接触点为中心裂纹萌生、扩展至球体边界, 将球体

劈裂为许多橘瓣状的碎片. 劈开后的碎片在残余动能作用下继续运动, 但是碎片间相互碰撞产生的新裂纹非常少.

碎片质量集合的 p 阶矩定义为 $M_p = \sum_i^n m_i^p - m_{\max}^p$, 式中 n 为碎片数量, m_i 为第 i 个碎片的质量, p 是指数项, m_{\max} 是一次冲击产生的最大碎片的质量. 平均碎片质量定义为碎片集合的二阶矩

与一阶矩之比, $m_{av} = M_2/M_1$. 图3为最大碎片 m_{1st} 、第二大碎片 m_{2st} 和平均碎片质量 m_{av} 随冲击速度的变化, 图中质量均用圆球总质量 m_t 进行归一化. 随着冲击速度增加, m_{1st} 持续减小, 反映了冲击对材料尺寸或质量减小的本质. m_{2st} 和 m_{av} 随冲击速度的演化出现一个明显的峰值, 这与已有

的实验和数值模拟结果相同 [12,14,45]. 在峰值点前后, 材料的冲击响应发生从局部损伤到整体碎裂的相变, 这一现象被视为材料冲击破碎的临界特性, 并将该峰值点对应的速度定义为临界冲击速度. 从图3可以看出该无序度下的圆球临界冲击速度为 15 m/s.

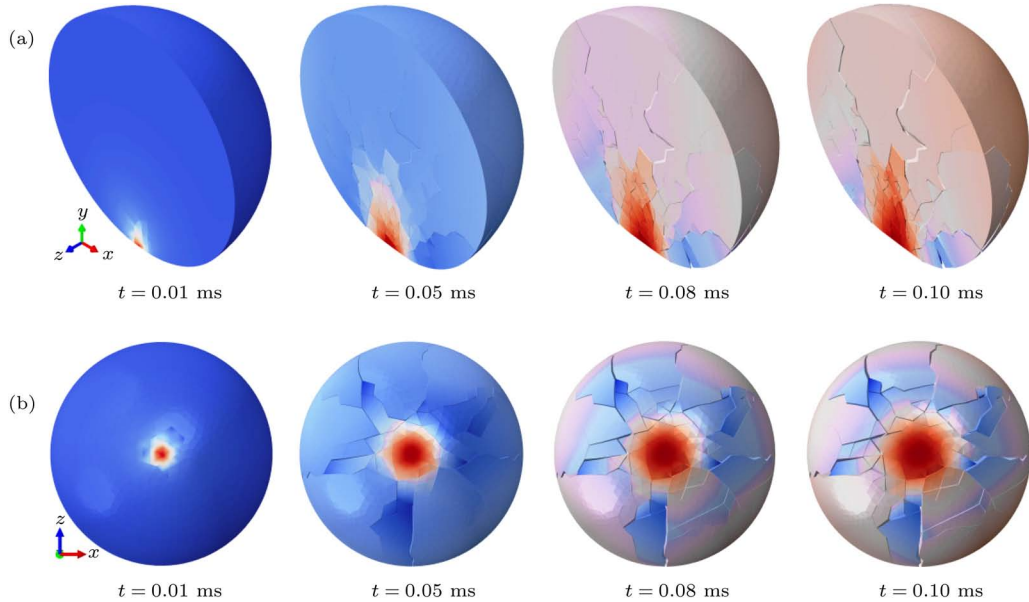


图2 冲击破碎过程 (速度 $V = 20$ m/s, $k = 5$) (a) 半剖视图; (b) 底部视图

Fig. 2. Fracture process at impact velocity of 20 m/s ($k = 5$): (a) Half-sectional view; (b) bottom view.

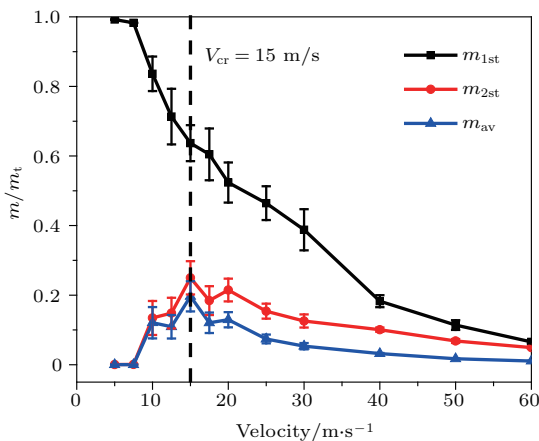


图3 最大碎片、第二大碎片及平均碎片质量随速度的变化 ($k = 5$)

Fig. 3. Evolution of the mass of the two largest fragments and the average fragment mass with the impact velocity ($k = 5$).

3.2 临界冲击速度

图4是不同无序度下最大的两个碎片、平均碎片质量随冲击速度的变化, 因篇幅限制, 只给出 $k = 10$ 和 $k = 1$ 两种情况的结果. 无序度对脆性

材料的临界冲击速度有显著的影响, 即无序度越高 (Weibull 模数 k 越小), 临界冲击速度越大. Weibull 模数 k 为 1, 2, 5 和 10 时, 临界冲击速度 V_{cr} 分别为 80, 40, 15 和 10 m/s. 将临界冲击速度下, 不同无序度的三个碎片质量指标绘制在图5, 可见随着无序度的提高, m_{1st} 和 m_{av} 逐渐减小, 且 m_{1st} 和 m_{2st} 差距逐渐缩小. 对于临界冲击速度的变化, 由于高无序度的材料内部微孔隙、杂质和微裂纹等缺陷越多, 导致临界状态的能量阈值越高, 相应地临界速度下碎片尺寸减小更为明显, 破碎程度更高.

3.3 冲击破碎模式

将 FDEM 模拟的冲击结果和混凝土球冲击实验结果进行对比, 分析脆性材料冲击破碎模式的主要特征. 图6(a)为 FDEM 模拟得到的脆性圆球的典型冲击破碎模式 [28], 图6(b)为 Tomas 等 [46] 提出的冲击破碎模式; 图6(c)为将冲击碎裂后的碎片拼合而成的混凝土圆球 [47], 其中丢失部分为粉碎性的细碎片锥. 对比可见 FDEM 模拟结果与实验

现象符合较好,脆性圆球冲击产生了多条子午型裂纹面和次生裂纹面,并在接触区域和球体顶部分别形成的细碎片锥和残余锥体,再现了脆性材料的主要冲击破碎特性.

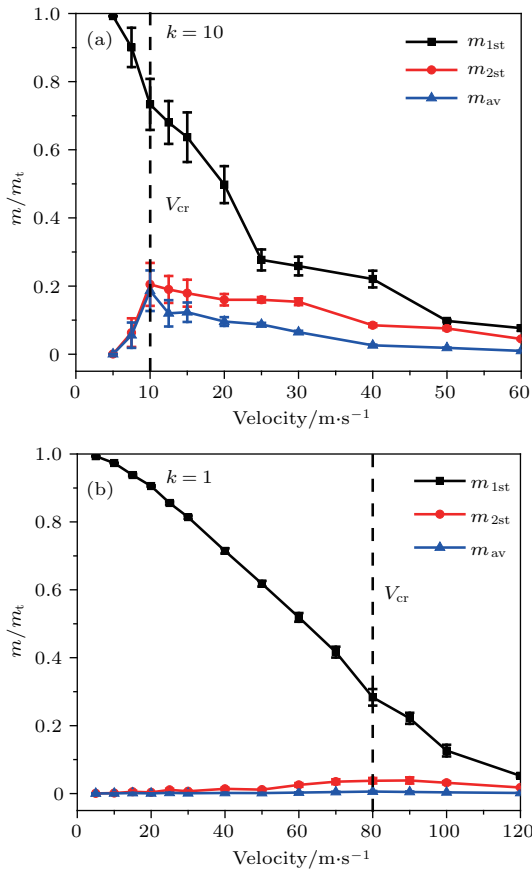


图4 不同无序度下最大的两个碎片质量与平均碎片质量随速度的变化 (a) $k = 10$; (b) $k = 1$

Fig. 4. Evolution of the mass of two large fragments and the average fragment mass with the impact velocity of variously disordered spheres: (a) $k = 10$; (b) $k = 1$.

图7为不同无序度的脆性圆球在相应临界冲击速度下的破裂形式. $k = 10$ 时,冲击产生两条贯穿球体的子午型裂纹面,它们在冲击接触处近乎正交,且没有分叉.球体破裂成数块大碎片和接触区域的小碎片,大、小碎片尺寸差异悬殊. $k = 5$ 时,贯穿性裂纹增加并出现分叉,球体上部和接触点区域分别形成残余锥体和细碎片锥. $k = 2$ 时,裂纹面明显增加,贯穿性裂纹产生了明显分叉.这一现象可以视为开裂的类逾渗现象出现:临界速度下球体的破碎程度提高,尤其是接触点附近的重损伤区,分叉裂纹增加,碎片尺寸差异明显减小. $k = 1$ 时,裂纹更为密集,主导的贯穿性裂纹与分叉裂纹难以区分,重损伤区进一步扩大,碎片的尺寸差异进一步减小,类逾渗现象更为明显.

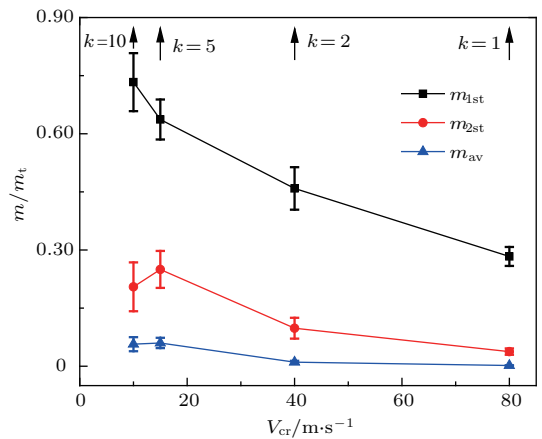


图5 不同无序度圆球临界状态下的三个碎片质量指标对比

Fig. 5. Comparison of three fragment mass indexes of various disordered spheres at respective critical impact velocity.

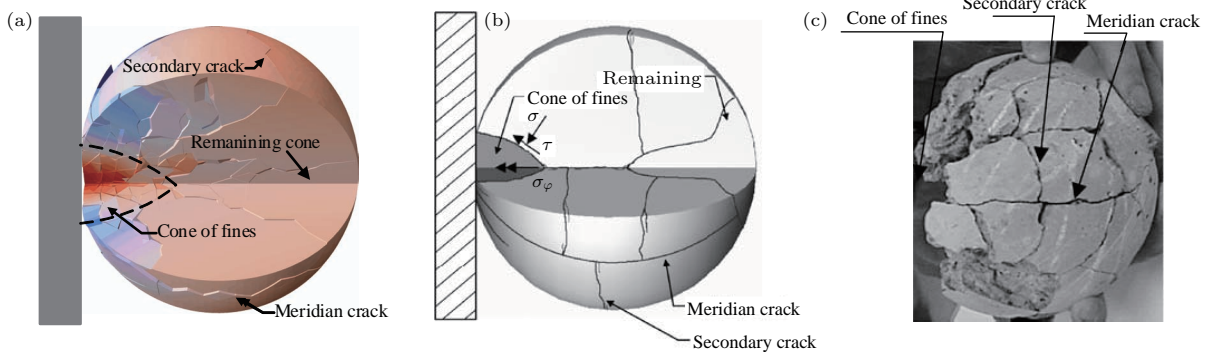


图6 冲击破碎模式 (a) FDEM 模拟结果; (b) Tomas 等 [46] 提出的冲击开裂模式; (c) 冲击破碎后拼合的混凝土球 [47]
Fig. 6. Impact fragmentation pattern: (a) Result of FDEM simulation; (b) fragmentation pattern proposed by Tomas et al. [46]; (c) assemble fragmented parts of a concrete sample [47].

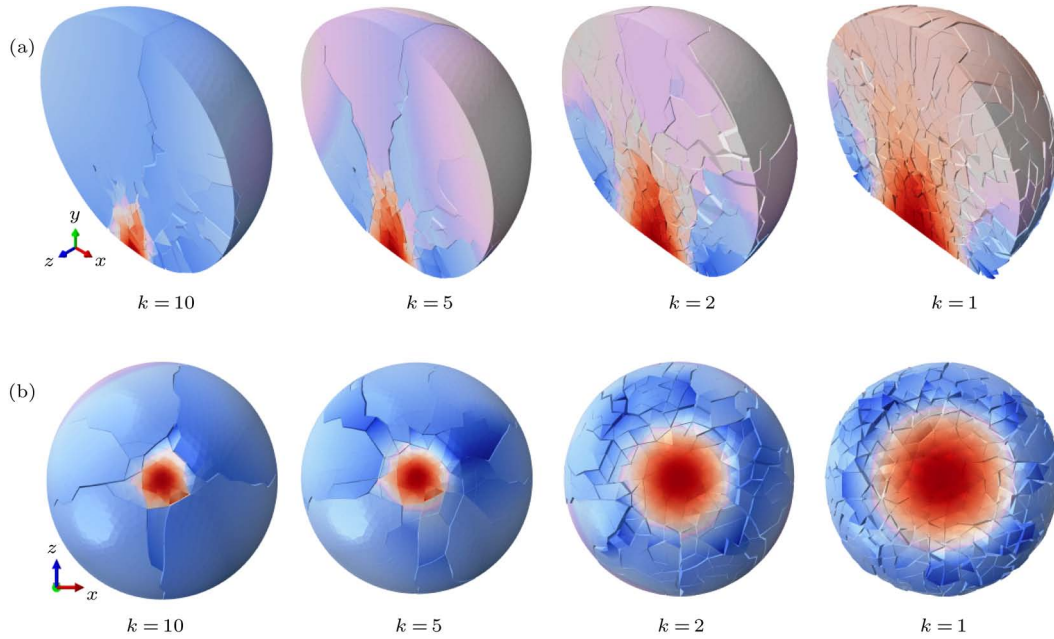


图7 不同无序度圆球的冲击破裂模式 (a) 半剖视图; (b) 底部视图

Fig. 7. Fracture patterns of variously disordered spheres at respective critical impact velocity: (a) Half-sectional view; (b) bottom view.

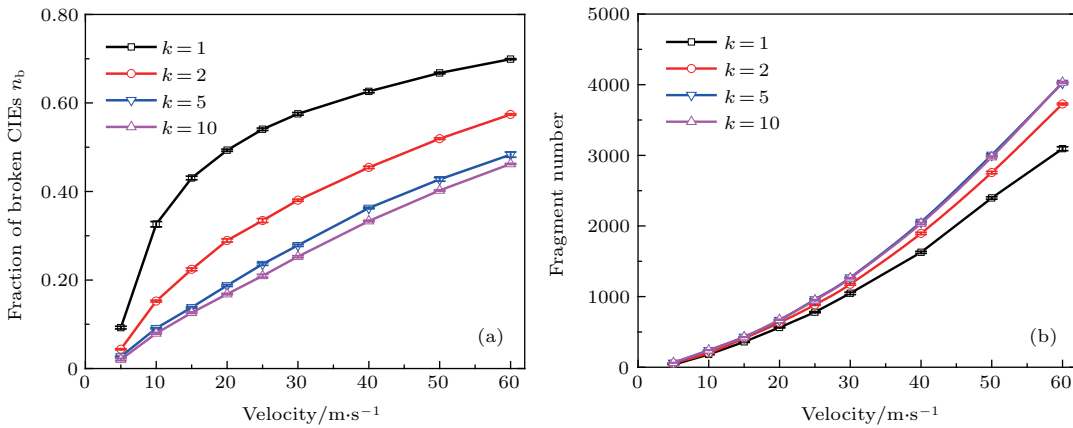


图8 不同无序度圆球冲击产生的失效界面单元分数和碎片数量 (a) 失效界面单元分数; (b) 碎片数目

Fig. 8. Comparison of fraction of broken CIEs and fragment numbers in variously disordered spheres: (a) Fraction of broken CIEs; (b) fragment numbers.

为了量化冲击导致材料损伤开裂, 定义失效界面单元分数 n_b 为失效界面单元占总界面单元的比例. 图8(a)和图8(b)分别为不同无序度的圆球冲击产生的失效界面单元分数和碎片数量. 材料无序度愈高, 即细观断裂参数的分布愈离散, 失效界面单元分数越高. 这是由于相当多界面单元的强度低于平均强度, 在冲击作用下发育较多的微裂纹. 一个有趣的现象是碎片数量与材料无序度呈现相反的规律, 即无序度提高, 冲击产生的碎片数目却越少. 这是由于高无序度情况下冲击产生的微裂纹主要存在于碎片内部, 难以连通成贯穿性裂纹, 因

此不能形成单独的碎片.

3.4 碎片形态

为了深入了解材料无序性对冲击破碎产生的碎片形态的影响, 利用FDEM模拟不规则形状碎片的优势, 建立碎片信息数据库, 对碎片形态进行量化分析. 通过遍历碎片有限元网格的拓扑结构, 识别出所有碎片并得到每个碎片的几何信息, 如碎片的表面积 A 、体积 V 和三个主轴长度. 碎片表面积是通过累加表面网格的面积而得, 碎片体积是所有实体单元的总容积. 采用主成分分析法确定

碎片的三个正交主轴方向后, 通过旋转使其与笛卡尔坐标系平行, 即可得到碎片的长轴 L , 中轴 I 和短轴 S [27]. 采用扁平率和圆度这两个参数来量化碎片形态. 扁平率 F_1 指的是碎片短轴与长轴之比 $F_1 = S/L$, F_1 越小, 碎片越扁平. 圆度 ψ_{3D} 定义为碎片等体积球的表面积与碎片实际表面积之比 $\psi_{3D} = \sqrt[3]{36\pi V^2}/A$, ψ_{3D} 越接近于 1, 碎片的表面越接近于球面, 棱角性越弱.

图 9 (a) 和图 9 (b) 分别为不同无序度的圆球在相应临界冲击速度下冲击破碎产生碎片的扁平率和圆度的概率密度分布. 碎片扁平率概率密度分布函数形状基本一致, 扁平率峰值在 $F_1 = 0.54$ 附近, 碎片圆度峰值在 $\psi_{3D} = 0.66$ 附近. 随着无序度的提高, 扁平率分布的集中程度降低, 峰值位置左移. 无序度较低时, 圆度分布较为对称且集中. 无序度较高时, 圆度分布呈现为左偏分布, 峰值更低, 分布区间更大. 这意味着无序性越强, 临界冲击速度下产生的碎片整体上更为扁平细长, 碎片棱角性

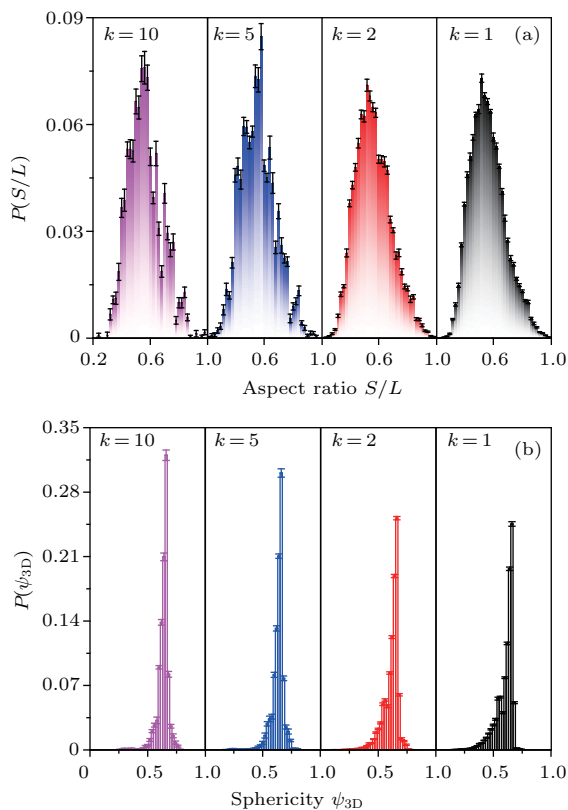


图 9 不同无序度下碎片形态参数的概率密度 P 分布 (a) 扁平率; (b) 圆度

Fig. 9. Probability density P distributions of aspect ratio and sphericity for variously disordered spheres at respective critical impact velocity: (a) Aspect ratio S/L ; (b) sphericity ψ_{3D} .

越强. 两个形态参数分布区间扩大, 表明高无序度会增强碎片形态的变异性.

4 无序度对冲击破碎的影响机制

以上分析表明, 无序性显著地影响了脆性材料的临界冲击速度、冲击破碎模式和碎片形态. 无序性对脆性材料冲击破碎的影响可能与微裂纹产生的主导机制有关. 图 10 展示了临近起裂准则的界面单元的应力状态. 对比可以发现, 低无序度时 ($k = 10$), 微裂纹产生的主导机制是拉伸, 剪切破坏比例较低; 高无序度时 ($k = 1$), 发生剪切破坏的比例明显增加. 这是由于子午型裂纹面的破坏机制为拉破坏, 接触区域的细小碎片主要是由于剪切破坏产生 [28]. 高无序度的脆性圆球的临界冲击速度明显增大, 损伤程度更高, 体现为冲击点附近的高损伤区域扩大, 因此剪切破坏的比例在高无序度圆球中的比例明显增加. 剪切作用致使分叉裂纹增加, 碎片的尺寸明显减小, 碎片表面的棱角性增强. 这与俞寅等 [20] 提出的剪切裂纹两侧介质滑移机制相符合.

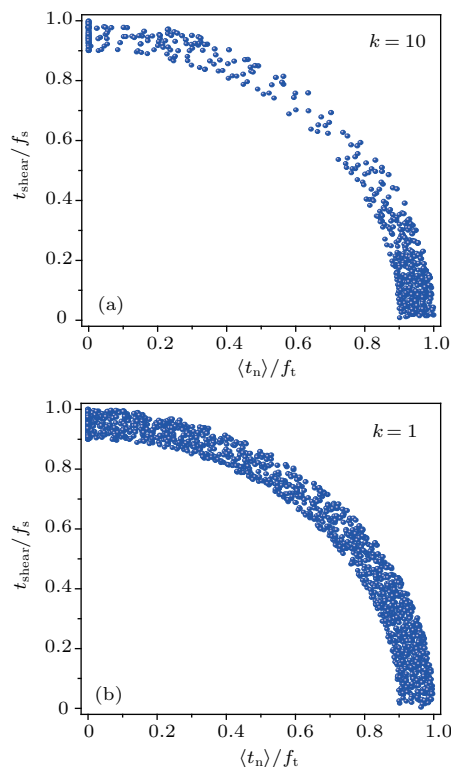


图 10 两种极端无序度下临近破坏的界面单元应力状态 ($t = 0.03$ ms)

Fig. 10. Stress state of the CIEs close to the onset of damage in two extreme cases ($t = 0.03$ ms).

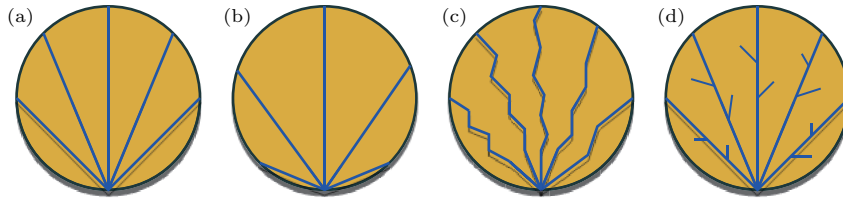


图 11 导致失效界面单元增加的三种裂纹扩展路径特征 (a) 对照组; (b) 扁平率; (c) 棱角性; (d) 分叉裂纹
 Fig. 11. Path features of three crack propagation forms accounting for the increase of failed CIEs: (a) Control group; (b) aspect ratio; (c) angularity; (d) branch crack.

结合碎片形态的统计分布特性, 分析无序性对冲击破碎的影响. 以图 11(a) 作为对照组, 考虑高无序度下产生的碎片数量少而损伤程度高的特点, 单因素分析裂纹扩展路径的变化原因. 保持碎片数量不变, 裂纹面增加可能有三种裂纹扩展路径. 1) 碎片的尺寸差异导致的扁平率分散性, 如图 11(b) 所示; 2) 贯穿性裂纹的弯曲(二维)或者裂纹面的粗糙度增加(三维), 导致碎片棱角性增强, 如图 11(c) 所示; 3) 在贯穿性裂纹上侧生了许多非贯穿性的分叉裂纹, 即冲击过程中产生的碎片数量和碎片尺寸基本不变, 但是高无序度的材料内部产生了更多局部损伤, 如图 11(d) 所示.

5 讨 论

脆性固体材料中裂纹路径的描述在物理实验中备受关注, 在无序性影响下, 裂纹扩展具有间断性, 裂纹面变得参差不齐. 观察到的实验现象主要通过两个理论构想来解释: 低无序度固体裂纹面的不规则性被认为是理想有序固体中产生的一种扰动; 而高无序度固体中的开裂被解释为一种类逾渗现象^[48]. Shekhawat 等^[49]采用随机熔断网络方法模拟了二维脆性材料的开裂, 认为固体材料的开裂损伤是逾渗(percolation)-雪崩(avalanche)-成核(nucleation)这三种破坏相共存的, 如图 12 所示. 低无序度(β 越小)或大尺寸的系统以贯穿性开裂为主导, 无分叉现象, 即成核破坏相. 高无序度或小尺寸的系统, 存在局部小裂纹并凝聚成簇, 即逾渗破坏相. 但更常见的情况下是以雪崩为主导且三相并存的中无序度破坏事件.

本文的 FDEM 数值模拟也观察到这一现象, 即逾渗、雪崩和成核三种破坏形式与材料无序度的关系. 低无序度时, 脆性圆球的碎裂以贯穿性的子午面裂纹为主导, 劈裂产生的碎片质量(尺寸)差异

悬殊. 而无序度较高时, 损伤程度更高但产生的碎片数量反而减少了, 损伤更多地以碎片内部的分叉裂纹(或者说局部裂纹)形式存在. 此外临界冲击速度随无序度的提高而增大, 说明无序性会提高类逾渗行为的能量阈值, 也进一步验证了低无序度下临界状态产生的损伤更大, 可见该理论具有一定的自洽性.

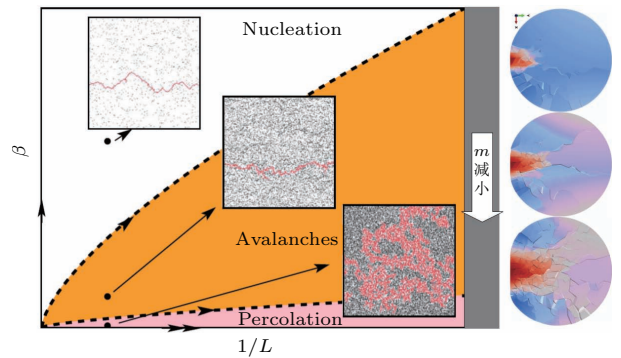


图 12 无序化介质的脆性开裂 左侧为文献^[49]相图; 右侧为本文模拟结果(由上到下 k 分别取为 10, 5 和 2)
 Fig. 12. Brittle fracture in disordered media: left, phase diagram proposed in literature^[49]; right, FDEM simulation results in this work, in which k equals to 10, 5, and 2, respectively (from top to bottom).

6 结 论

研究脆性材料的冲击响应, 关注材料无序性对冲击损伤开裂的影响及其机制解释, 对于合理规避局部缺陷的不利影响及利用微孔洞优化材料功能至关重要. 本文采用 FDEM 模拟了三维脆性圆球垂直冲击刚性板, 细观断裂参数服从 Weibull 分布, 深入讨论了脆性材料的无序性对冲击响应和碎片形态特征的影响. 脆性材料的无序性对冲击响应中的临界速度影响十分显著. 无序度越高, 脆性圆球的临界冲击速度也越高. 不同无序度的脆性材料在临界冲击速度下的破裂模式也明显不同, 低无序度下开裂主要以少量贯穿性裂纹为主; 随着无序度提

高,非贯穿性的分叉裂纹增加;高无序度下以全域性的分叉裂纹为主.与此同时,高无序度明显增强了冲击碎片形态的变异性.无序度越高,破碎产生的碎片整体表现更为扁平、细长,碎片表面更为粗糙.无序性从本质上改变了脆性材料冲击破碎的发生机制.脆性材料内部无序度较低时,冲击过程中的主导破碎机制是拉裂破坏;随着无序度提高,材料剪切破坏所占比例逐渐增大,更多的分叉裂纹产生,碎片内部的损伤相应增加.

参考文献

- [1] Halasz Z, Nakahara A, Kitsunezaki S, Kun F 2017 *Phys. Rev. E* **96** 033006
- [2] Biswas S, Ray P, Roy S 2017 *Phys. Rev. E* **96** 63003
- [3] Li W, Bei H, Tong Y, Dmowski W, Gao Y F 2013 *Appl. Phys. Lett.* **103** 171910
- [4] Zhang Y, Zhao D, Yue Y 2017 *J. Am. Ceram. Soc.* **100** 3434
- [5] Wang J G, Zhao D Q, Pan M X, Shek C H, Wang W H 2009 *Appl. Phys. Lett.* **94** 031904
- [6] Fu Y F, Liang Z Z, Tang C 2000 *Chinese J. Geot. Eng.* **6** 705 (in Chinese) [傅宇方, 梁正召, 唐春安 2000 岩土工程学报 **6** 705]
- [7] Oddershede L, Dimon P, Bohr J 1993 *Phys. Rev. Lett.* **71** 3107
- [8] Kun F, Wittel F K, Herrmann H J, Kroplin B H, Maloy K J 2006 *Phys. Rev. Lett.* **96** 025504
- [9] Wittel F, Kun F, Herrmann H J, Kroplin B H 2004 *Phys. Rev. Lett.* **93** 035504
- [10] Pernas-Sanchez J, Artero-Guerrero J A, Varas D, Lopez-Puente J 2015 *Exp. Mech.* **55** 1669
- [11] Parab N D, Guo Z, Hudspeth M C, Claus B J, Fezzaa K, Sun T, Chen W W 2017 *Int. J. Impact Eng.* **106** 146
- [12] Kun F, Herrmann H J 1999 *Phys. Rev. E* **59** 2623
- [13] Behera B, Kun F, Mcnamara S, Herrmann H J 2005 *J. Phys.: Condens. Matter* **17** S2439
- [14] Sator N, Mechkov S, Sausset F 2008 *EPL* **81** 44002
- [15] Wittel F K, Carmona H A, Kun F, Herrmann H J 2008 *Int. J. Fract.* **154** 105
- [16] Rabczuk T, Eibl J 2003 *Int. J. Numer. Meth. Eng.* **56** 1421
- [17] Su T X, Ma L Q, Liu M B, Chang J Z 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 064702 (in Chinese) [苏铁熊, 马理强, 刘谋斌, 常建忠 2013 物理学报 **62** 064702]
- [18] Silling S A, Askari E 2005 *Comput. Struct.* **83** 1526
- [19] Li F, Pan J, Sinka C 2011 *Int. J. Impact Eng.* **38** 653
- [20] Yu Y, He H L, Wang W Q, Lu T C 2014 *Acta Phys. Sin.* **63** 246102 (in Chinese) [俞寅, 贺红亮, 王文强, 卢铁城 2014 物理学报 **63** 246102]
- [21] Munjiza A, Owen D, Bicanic N 1995 *Eng. Comput.* **12** 145
- [22] Zhou W, Tang L, Liu X, Ma G, Chen M 2016 *Int. J. Impact Eng.* **95** 165
- [23] Ma G, Zhou W, Chang X, Chen M 2016 *Granul. Matter* **18**
- [24] Mahabadi O K, Cottrell B E, Grasselli G 2010 *Rock Mech. Rock Eng.* **43** 707
- [25] Ma G, Zhou W, Ng T, Cheng Y, Chang X 2015 *Acta Geotech.* **10** 481
- [26] Ma G, Zhou W, Chang X, Ng T, Yang L 2016 *Powder Technol.* **301** 118
- [27] Ma G, Zhou W, Zhang Y, Wang Q, Chang X 2018 *Powder Technol.* **325** 498
- [28] Ma G, Zhang Y, Zhou W, Ng T, Wang Q, Chen X 2018 *Int. J. Impact Eng.* **113** 132
- [29] Carmona H A, Wittel F K, Kun F 2014 *Eur. Phys. J.: Spec. Top* **223** 2369
- [30] Carmona H A, Wittel F K, Kun F, Herrmann H J 2008 *Phys. Rev. E* **77** 051302
- [31] Rao K S, Noferesti H 2008 *Defence Sci. J.* **58** 285
- [32] Cui J, Hao H, Shi Y 2018 *Constr. Build. Mater.* **160** 440
- [33] Ma G, Zhou W, Chang X 2014 *Comput. Geotech.* **61** 132
- [34] Grange S, Forquin P, Mencacci S, Hild F 2008 *Int. J. Impact Eng.* **35** 977
- [35] Pisano G, Carfagni G R 2015 *Constr. Build. Mater.* **98** 741
- [36] Joshi A A, Pagni P J 1994 *Fire Safety J.* **22** 45
- [37] King D S, Fahrenholtz W G, Hilmas G E 2013 *J. Eur. Ceram. Soc.* **33** 2943
- [38] Gorjan L, Ambrožič M 2012 *J. Eur. Ceram. Soc.* **32** 1221
- [39] Siarampi E, Kontonasaki E, Andrikopoulos K S, Kantiranis N, Voyiatzis G A, Zorba T, Paraskevopoulos K M, Koidis P 2014 *Dent. Mater.* **30** E306
- [40] Guazzato M, Quach L, Albakry M, Swain M V 2005 *J. Dent.* **33** 9
- [41] Yang W, Zhang G P, Zhu X F, Li X W, Meyers M A 2011 *J. Mech. Behav. Biomed.* **4** 1514
- [42] Lin A Y, Meyers M A 2009 *J. Mech. Behav. Biomed.* **2** 607
- [43] Gruber M, Kraleva I, Supancic P, Bielen J, Kiener D, Bermejo R 2017 *J. Eur. Ceram. Soc.* **37** 4397
- [44] Wereszczak A A, Barnes A S, Breder K, Binapal S 2000 *J. Mater. Sci. Mater. Electron.* **11** 291
- [45] Wittel F K, Kun F, Herrmann H J, Kroplin B H 2005 *Phys. Rev. E* **71** 016108
- [46] Tomas J, Schreier M, Groger T, Ehlers S 1999 *Powder Technol.* **105** 39
- [47] Khanal M, Schubert W, Tomas J 2004 *Granul. Matter* **5** 177
- [48] Toussaint R, Hansen A 2006 *Phys. Rev. E* **73** 046103
- [49] Shekhawat A, Zapperi S, Sethna J P 2013 *Phys. Rev. Lett.* **110** 185505

Effects of material disorder on impact fragmentation of brittle spheres*

Chen Xing¹⁾²⁾ Ma Gang^{1)2)†} Zhou Wei¹⁾²⁾ Lai Guo-Wei¹⁾²⁾ Lai Zhi-Qiang¹⁾²⁾

1) (State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

2) (Key Laboratory of Rock Mechanics in Hydraulic Structural Engineering, Ministry of Education, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

(Received 3 February 2018; revised manuscript received 20 March 2018)

Abstract

Brittle materials have many excellent properties for structural applications, whereas the brittleness and disorder due to defects and micro-cracks cause failure. Fragmentation may occur and often lead to a catastrophic damage, bring dangers to the users especially when brittle materials suffer dynamic loads like impact and explosion. The impact fragmentation of brittle material belongs to the continuum/discretization domain. The combined finite and discrete element method (FDEM) is used to investigate the impact fragmentation of disordered material in detail. In this work, structural disorder in the brittle material is not considered, and the disorder is only reflected in the strength heterogeneity. Assuming that the mesoscopic fracture parameters of brittle materials obey the Weibull distribution, the degree of disorder can be quantified by the Weibull modulus k . The impact of a brittle sphere against a rigid plate is simulated using the FDEM. The dynamic response can be classified into damage and fragmentation zones. In sphere with low material disorder, cracking pattern is mainly dominated by single or more penetrating cracks. Increasing the disorder degree by smaller k , branch cracks emerge. Finally, it changes into a global branch crack in highly disordered sphere. Besides, mass index analysis indicates that higher disordered sphere has a higher critical velocity in impact events, in which the critical impact velocities equal 10, 15, 40 and 80 m/s when the values of m are 10, 5, 2 and 1, respectively. Furthermore, the principal component analysis is adopted for digging the crack features from fragments morphology description. The statistics of two fragment shape indexes shows that fragments coming from the highly disordered spheres have greater variability with a rougher surface and higher flatness overall, corresponding to the fracture pattern. Finally, we conclude that the effects of disorder on impact fragmentation can be ascribed to the dominant cracking mechanism-specifically, the proportion of shear failure mechanism grows with the disorder degree, implying more non-penetrating branch cracks existing in the fragments. We demonstrate that the effect of disorder on impact fragmentation is probably a consequence of a continuous phase nucleation-avalanche-percolation transition as well.

Keywords: disorder, brittle materials, impact fragmentation, combined finite and discrete method

PACS: 61.43.-j, 62.25.Mn, 64.70.qj

DOI: 10.7498/aps.67.20180276

* Project supported by the National Key Research and Development Program of China (Grant No. 2016YFC0401907) and the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 51509190, 51579193).

† Corresponding author. E-mail: magang630@whu.edu.cn