

基于离散元方法的颗粒材料缓冲性能及影响因素分析*

季顺迎[†] 樊利芳 梁绍敏

(大连理工大学, 工业装备结构分析国家重点实验室, 大连 116023)

(2015年11月30日收到; 2016年2月3日收到修改稿)

在冲击荷载作用下, 颗粒材料通过颗粒间的摩擦及非弹性碰撞可有效进行能量耗散实现缓冲作用. 本文采用离散元方法对冲击荷载下颗粒材料的缓冲过程进行数值分析, 研究不同厚度下颗粒材料的缓冲性能. 计算结果表明: 颗粒层厚度 H 是影响颗粒材料缓冲性能的关键因素, 并存在一个临界厚度 H_c . 当 $H < H_c$ 时, 冲击力随 H 的增加而降低; 当 $H > H_c$ 时, 冲击力对 H 的变化不敏感并趋于稳定值. 此外, 在不同颗粒摩擦系数和初始密集度下对缓冲过程的离散元分析表明, 光滑和疏松颗粒材料具有更好的缓冲性能. 最后, 对颗粒材料在冲击过程中的力链结构和底板的压力分布进行了讨论, 以揭示颗粒材料缓冲性能的内在机理.

关键词: 颗粒材料, 离散元方法, 缓冲性能, 临界厚度

PACS: 45.70.-n, 83.80.Fg, 81.70.Bt

DOI: 10.7498/aps.65.104501

1 引言

颗粒材料是一种具有良好缓冲特性的耗能材料, 主要通过颗粒间的非弹性碰撞和滑动摩擦进行能量耗散^[1-3]. 在外荷载作用下, 颗粒材料间的黏滞作用和塑性变形可有效地吸收冲击能量^[4-6]. 颗粒材料的缓冲性能与其力学性质、粒径、颗粒形态等因素密切相关, 并得到了相应的试验验证^[7-9]. 颗粒材料的耗能特点使其对外荷载有显著的缓冲作用, 并广泛地应用于日常生活和工业生产中. 因此, 对冲击荷载下颗粒材料缓冲特性的研究不仅有助于揭示颗粒材料的基本物理学特性, 可对其在缓冲减振中的工程应用也有很好的科学意义.

目前, 人们更多地关注颗粒材料在受冲击荷载作用时, 冲击物的形状、速度和大小、颗粒材料的摩擦、形态及密度等因素对冲击物拖曳力、冲击坑深度及形态、冲击时间和冲击物运动轨迹等的影响^[1-14]. 颗粒材料中冲击坑的深度与冲击速度、冲

击物及颗粒材料的密度、冲击物尺寸以及冲击方式等因素密切相关^[15-18]. 冲击坑直径不仅受冲击物尺寸、颗粒材料的物理力学性质等参数影响, 还与冲击能量呈指数关系^[12,19]. 此外, 冲击物在颗粒材料中的运行时间也是表征缓冲性能的一个重要参数, 其与冲击物的速度和密度、颗粒材料的密度和粒径等因素密切相关^[20-22]. 颗粒材料对冲击物的拖曳力是影响颗粒缓冲性能的重要因素. 该拖曳力与冲击物的尺寸和形态密切相关^[23-25]. 此外, 它还和冲击深度和冲击速度可呈一次或二次关系^[10,20,26,27]. 在颗粒材料受冲击过程的离散元模拟中, 冲击荷载在时程上可呈现两个峰值, 其分别由冲击物与颗粒开始接触、冲击至底面的反射波引起的^[12,28]. 此外, 在颗粒层底面的冲击力在空间上也呈现出相应的非均匀分布特性^[29]. 最近, 湿颗粒材料对冲击荷载的缓冲性能及其在冲击作用下的运动状态也开展了系统的研究^[30,31]. 由此可见, 冲击力在颗粒材料冲击过程中的时空分布规律还需要深入研究.

* 国家自然科学基金(批准号: 11572067, U1234209)和中央高校基本科研业务费(批准号: DUT15ZD105)资助的课题.

[†] 通信作者. E-mail: jisy@dlut.edu.cn

颗粒层厚度具有调整接触力传输方向的能力, 控制颗粒排列方式能够调整传输方向和分散响应. 在随机排列的颗粒系统下, 冲击力衰减性更强, 并且随着颗粒层厚度的变化接触力呈现指数衰减和幂律衰减两种模式 [32,33]. 此外, 试验研究表明: 颗粒材料对冲击荷载存在一个临界厚度 H_c ; 当 $H < H_c$ 时, 冲击力随颗粒层厚度的增加而减小; 当 $H > H_c$ 时, 冲击力均不再随着 H 的变化而变化, 而是趋于稳定值 [7]. 当冲击深度较浅时, 冲击力一般随冲击深度的增加而线性增加; 随后拖曳力受壁面摩擦效应的影响而不再与冲击深度相关; 当冲击物接近颗粒底层时则受底面边界的影响而呈指数增加 [34,35].

颗粒材料的缓冲性能不仅与其将局部冲击荷载向分布荷载的转化有关, 还受冲击力在颗粒内传播的方式及持续时间的影响 [33,36,37]. 在颗粒系统内, 力链结构是作用力的有效传递途径和方式 [1,2,38]. 若将冲击物在颗粒材料的作用过程分为冲击、贯入和覆盖三个阶段, 颗粒间力链在不同阶段的概率分布极为相近 [21]. 颗粒系统中的力链结构在力的传播过程中具有显著的时间效应, 可将瞬时局部冲击力进行空间扩展和时间延长, 进而降低冲击强度 [37,39]. 此外, 通过考虑颗粒在碰撞过程中的能量耗散 [3,6,40-42] 以及颗粒飞溅引起的能量重新分配问题 [29,43,44], 可更好地揭示颗粒材料对冲击荷载的缓冲机理.

在颗粒材料对冲击荷载的缓冲性能研究中, 采用离散元方法可对颗粒与冲击物、颗粒之间的相互作用进行细观分析, 并由此获得颗粒材料在冲击过程中的能量耗散、力链结构 [45]、冲击坑深度、冲击物速度变化和受力过程等 [46] 宏观力学特性, 进而从细观尺度上揭示缓冲性能的内在线理 [12,29,32,47,48]. 此外, 通过离散元分析可有效地分析冲击物形态和尺寸、冲击速度和角度 [23]、颗粒密集度、摩擦系数和级配、边界约束等因素对颗粒材料缓冲性能的影响 [10,43,49-51]. 因此, 离散元方法是研究颗粒材料冲击特性的有效途径, 可从细观尺度获得宏观尺度上的动力学规律.

本文采用离散元方法建立颗粒材料在球体冲击物作用下的数值模型, 并通过试验结果进行计算模型的验证. 在不同颗粒厚度、颗粒摩擦系数及初始密集度下, 通过对冲击物及底板上的冲击力进行数值计算, 探讨影响颗粒材料缓冲特性的主要因

素, 并通过颗粒间的力链分布特性来揭示颗粒材料缓冲性能的内在线理.

2 颗粒材料冲击过程的离散元模型

针对颗粒材料的结构特点及其对冲击荷载的缓冲特性, 这里采用球体颗粒单元及其非线性接触模型计算颗粒间的相互作用, 对冲击过程中冲击物及颗粒层对底板的作用力进行数值模拟.

2.1 颗粒间的非线性接触模型

颗粒间的接触力主要是由弹性力和黏滞力组成, 同时考虑基于 Mohr-Coulomb 准则的滑动摩擦. 本文采用 Hertz-Mindlin 非线性接触模型计算颗粒间的弹性作用力. 在法线方向, 颗粒之间作用力包括 Hertz 弹性力和非线性黏滞力, 即 [52]

$$F_n = K_n x_n^{3/2} + A K_n x_n^{1/2} \dot{x}_n, \quad (1)$$

式中, x_n 和 (\dot{x}_n) 分别表示颗粒的法向重叠量和相对速度; K_n 为法向刚度系数; A 为颗粒的黏滞参数, 与变形模量、黏性系数和泊松比等力学参数有关, 可通过一定速度下颗粒碰撞的回弹系数确定 [53].

在颗粒接触的切线方向, 基于 Mindlin 理论和 Mohr-Coulomb 摩擦定律, 并忽略黏滞力影响, 则切向接触力表述为

$$F_s^* = K_s x_n^{1/2} x_s, \quad (2)$$

$$F_s = \min(F_s^*, \text{sign}(F_s^*) \mu_p F_n), \quad (3)$$

式中, K_s 为切向刚度系数; x_s 为颗粒的切向变形; μ_p 为颗粒表面摩擦系数. 这里法向刚度 K_n 和切向刚度 K_s 分别为 [54]

$$K_n = \frac{4}{3} E^* \sqrt{R^*}, \quad (4)$$

$$K_s = 8G^* \sqrt{R^*}, \quad (5)$$

式中, $E^* = \frac{E}{2(1-\nu^2)}$, $G^* = \frac{G}{2(1-\nu)}$; 这里 $G = \frac{E}{2(1+\nu)}$, $R^* = \frac{R_A R_B}{R_A + R_B}$; E , G 和 ν 分别为颗粒材料的弹性模量、剪切模量和泊松比, R_A , R_B 为两个相互接触颗粒的半径. 如果颗粒与刚性边界接触, 则可将边界设为半径无限大的球体.

对于非线性接触模型, 两个颗粒间的临界时间步长为 [55]

$$t_{\max} = \frac{\pi R_{\min}}{0.163\nu + 0.8766} \sqrt{\rho/G}, \quad (6)$$

式中, R_{\min} 为最小颗粒半径, ρ 为颗粒材料密度. 在离散元模拟中, 一般取 $dt = \alpha t_{\max}$, 这里 α 为经验系数. 在密集颗粒材料中, 可取 $\alpha = 0.2$ [56].

2.2 颗粒材料冲击过程的离散元模型及试验对比

为分析颗粒材料的缓冲性能, 在刚性圆筒中放置厚度为 H 的球形玻璃颗粒, 并在颗粒表面高度 H_1 处设置球形冲击物. 针对玻璃颗粒缓冲性能的试验条件 [7], 令圆筒高度 $H_2 = 30$ cm, 颗粒单元在圆筒中随机生成, 颗粒总数由颗粒厚度 H 决定, 所有颗粒在重力作用下达到稳定平衡状态, 如图 1 所示. 在离散元计算中颗粒单元的直径按均匀概率密度函数在 [4.0 mm, 5.0 mm] 内随机分布, 其均值为 4.5 mm. 球形冲击物直径为 D , 初速度为 V_0 , 其质心位置距颗粒层表面的高度 H_1 . 此外, 为消除容器壁对冲击过程的影响, 本文采用圆筒内径 R 约为冲击物直径的 4 倍. 离散元模拟中的主要计算参数列于表 1 中.

为检验离散元计算模型的可靠性, 这里对不同颗粒厚度下的冲击过程进行计算, 并与文献 [7] 中的试验结果进行对比. 当颗粒厚度分别为 $H = 0.5$ 和 4.0 cm 时, 计算得到的底板冲击力时程如图 2 (a) 和图 2 (b) 所示. 当颗粒厚度 $H = 0.5$ cm 时, 试验得到的冲击力峰值要高于离散元计算值, 但其冲击力的持续时间则小于离散元计算结果; 当 $H = 4.0$ cm 时, 计算的冲击力峰值则要大于试验值, 试验中冲击力呈现明显的多次波动现象. 从不同颗粒厚度下底板冲击力峰值的变化趋势来看 (如图 3 所示), 冲击力随颗粒厚度的增加均有一个由大变小, 并趋于稳定的过程. 当颗粒厚度 $H = 0$ 时, 最大冲击力的计算值略高于试验值. 这主要是由于在离散元计算

中底板设为刚性板, 而试验中底板下放置的压力传感器会产生相对位移, 起到一定的缓冲作用. 当颗粒厚度 $H < 4.0$ cm 时, 离散元计算的冲击力峰值要略小于试验值. 这主要是由于颗粒材料较少, 其缓冲效果不显著, 而试验系统对冲击能量有一定的吸收作用; 当颗粒厚度 $H > 4.0$ cm 时, 离散元计算的冲击力峰值要略大于试验值. 这主要是由于随颗粒材料的增加, 颗粒间的能量耗散成为缓冲耗能的主要途径. 由于试验中的颗粒形状并非理想球体, 颗粒间具有更大的摩擦力和显著的能量耗散性能. 虽然离散元计算结果与试验值在数值上有一定的差距, 但其在冲击力随颗粒厚度的变化趋势上是一致的. 在离散元计算中, 若进一步考虑试验系统中约束形式和能量耗散, 可更加合理地模拟冲击力的变化规律.

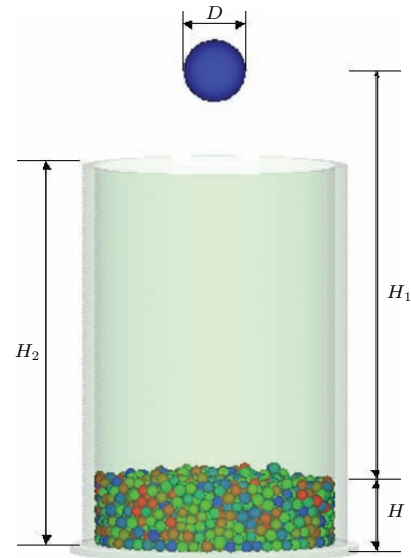


图 1 颗粒材料缓冲性能的离散元模型

Fig. 1. Discrete element model of buffer properties of granular material.

表 1 颗粒冲击离散元模拟的主要计算参数

Table 1. Major computational parameters in DEM simulations of granular impact.

参数	符号	单位	数值	参数	符号	单位	数值
圆筒内径	R	cm	19.0	颗粒粒径	d	mm	4.0—5.0
冲击物高度	H_1	cm	50.0	颗粒弹性模量	E	GPa	5.0
冲击物直径	D	cm	5.0	颗粒泊松比	ν	—	0.22
冲击物质量	M	kg	0.167	颗粒回弹系数	e	—	0.80
冲击速度	V_0	m/s	0.0	颗粒摩擦系数	μ_{pp}	—	0.50
颗粒密度	ρ	kg/m ³	2650.0	筒壁摩擦系数	μ_{pw}	—	0.15

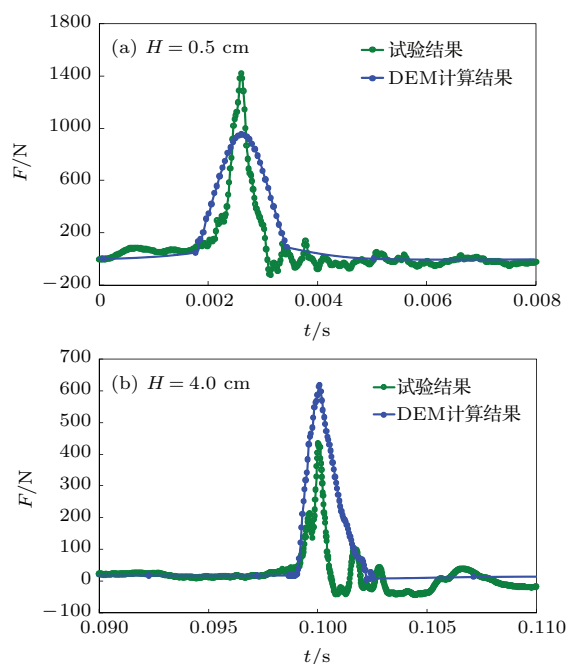


图2 (网刊彩色) 两个典型颗粒厚度下冲击力变化过程的试验值和离散元计算值对比 (a) 颗粒厚度 $H = 0.5$ cm; (b) 颗粒厚度 $H = 4.0$ cm

Fig. 2. (color online) Comparison of impact loads between physical experiment and DEM simulation under two typical granular thicknesses: (a) Granular thickness $H = 0.5$ cm; (b) granular thickness $H = 4.0$ cm.

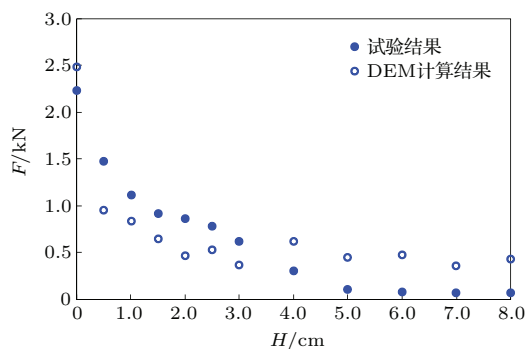


图3 不同颗粒厚度下试验测试和离散元计算获得的底板最大冲击力

Fig. 3. Maximum impact loads obtained with physical experiments and DEM simulations under various granular thicknesses.

3 颗粒材料缓冲性能的临界厚度

颗粒材料的厚度是影响缓冲性能的一个重要因素^[7,33,57]. 对于圆筒容器内颗粒材料缓冲性能的试验研究表明, 冲击物对筒底的冲击力随颗粒厚度的增加而不断减小, 并在厚度达到临界值 H_c 时趋于稳定^[7]. 为获得较好的冲击过程以及显著的缓冲性能, 这里令冲击物的初始速度 $V_0 = 5.0$ m/s, 质量 $m = 0.3$ kg, 在颗粒表面上的初

始高度 $H_1 = 0.30$ m. 其他计算参数采用表 1 中的数值, 并对颗粒材料在厚度 $H = 0—8.0$ cm 范围内的冲击过程进行离散元分析.

3.1 不同颗粒厚度下冲击力的峰值变化

当颗粒厚度 $H = 0$ 时, 即无填充颗粒时, 冲击球体对筒的冲击力时程如图 4 所示, 其峰值 $P_a^0 = 13.46$ kN. 当颗粒厚度分别 $H = 0.8, 1.0, 3.0, 4.5, 6.0$ 和 8.0 cm 时, 计算得到的冲击力时程如图 5 所示. 从图 5 中可以发现, 在不同的颗粒厚度下, 冲击力分别有 1 个或 2 个峰值. 当颗粒厚度 $H = 0.8$ cm 时, 冲击力峰值 $P_a = 6.73$ kN. 若定义颗粒材料的缓冲率 $\lambda = (P_a^0 - P_a)/P_a^0$, 则 $H = 0.8$ cm 时的缓冲率 $\lambda = 50\%$. 随着颗粒厚度的增加, 冲击力峰值 P_a 逐渐减小, 同时在冲击力峰值 P_a 前逐渐萌生一个新的峰值 P_b , 且其随颗粒厚度的增加而越发明显, 两个峰值之间的时间间隔也越来越大. 当颗粒厚度 $H = 8.0$ cm 时, P_a 逐渐消失, P_b 成为惟一峰值.

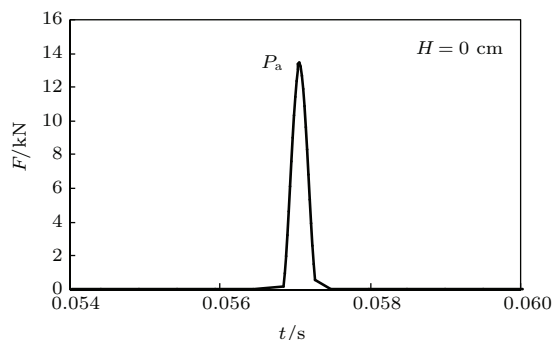


图4 无颗粒时底板力的冲击力时程

Fig. 4. Impact load on bottom plate versus time without granular material.

为研究以上两个冲击力峰值出现及转化的规律, 通过观察冲击物对颗粒材料的冲击过程, 可以发现该过程分为三个阶段. 1) 冲击物对上层颗粒的撞击阶段. 此时上层颗粒在冲击物的快速作用下发生紧密挤压和重新排列, 由此导致的弹性冲击波通过颗粒间的相互接触碰撞而迅速向下层传递, 并使筒底产生冲击力 P_b . 2) 冲击物在颗粒材料中的运行阶段. 冲击物前端不断冲击挤压颗粒材料, 并导致局部密集度不断增大. 冲击物与颗粒材料的接触面积随浸入深度的增加而不断扩大, 并在颗粒阻力作用下速度不断降低, 其动能通过颗粒间的摩擦和碰撞而耗散. 3) 冲击物的静止阶段. 当颗粒材料

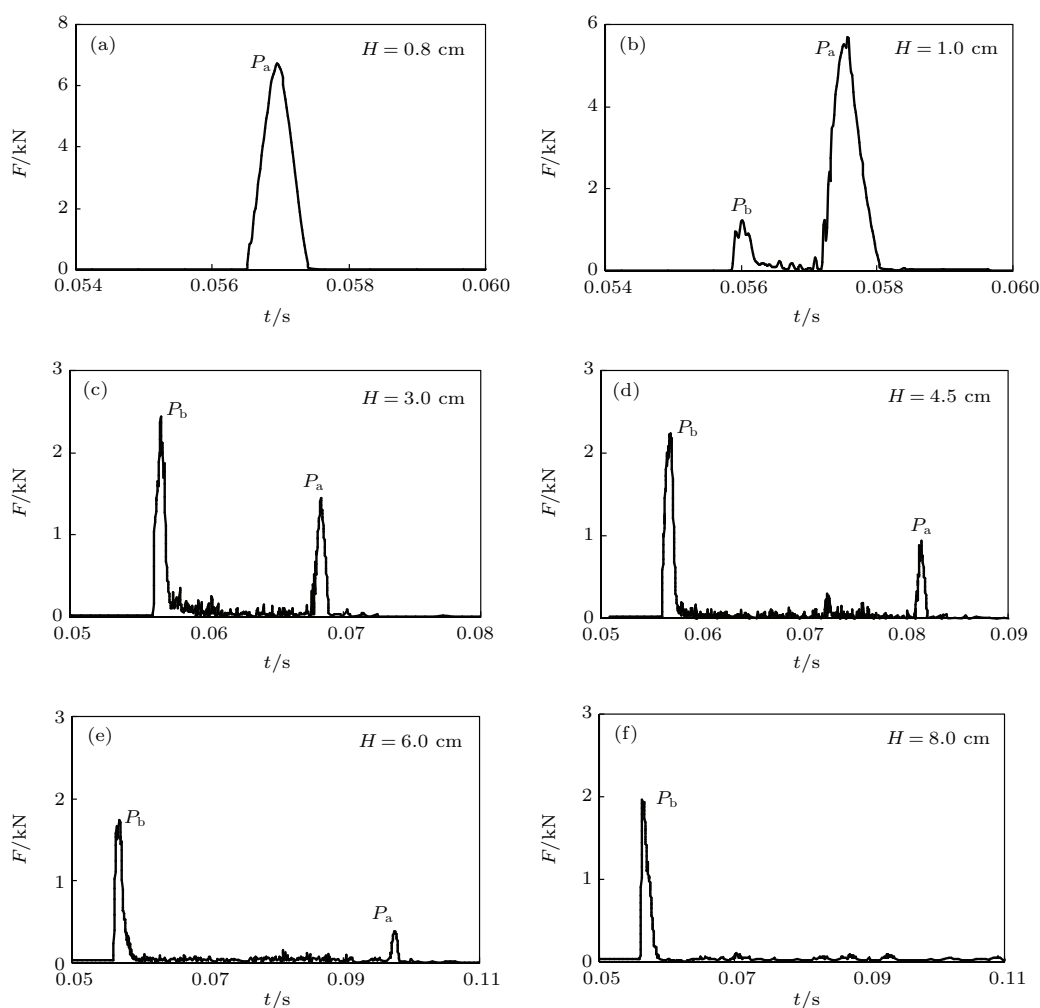


图5 不同颗粒层厚度下底板力的时程曲线 (a) 颗粒厚度 $H = 0.8$ cm; (b) $H = 1.0$ cm; (c) $H = 3.0$ cm; (d) $H = 4.5$ cm; (e) $H = 6.0$ cm; (f) $H = 8.0$ cm
 Fig. 5. Impact loads on bottom plate versus time under various granular thicknesses: (a) Granular thickness $H = 0.8$ cm; (b) $H = 1.0$ cm; (c) $H = 3.0$ cm; (d) $H = 4.5$ cm; (e) $H = 6.0$ cm; (f) $H = 8.0$ cm.

较薄, 如 $H \leq 6.0$ cm 时, 冲击物的动能不能通过与颗粒材料的作用而全部消失, 其可穿透颗粒材料并与筒底直接发生碰撞, 此时会使筒底产生冲击力 P_a , 如图 5(a)–(e) 所示. 当颗粒材料较厚时, 如 $H \geq 8.0$ cm 时, 冲击物的动能通过与颗粒材料的碰撞而全部耗散, 其在颗粒材料中速度不断降低并趋于静止, 如图 5(f) 所示. 此外, 当颗粒材料较薄时, 冲击物会与筒底发生多次碰撞, 形成多个冲击力峰值直至其静止. 以上冲击力峰值的演化过程还需要进一步通过力学试验进行验证, 从而更合理地揭示其双峰结构的转化机理.

3.2 颗粒材料缓冲性能的临界厚度

在颗粒厚度增加过程中, 冲击力峰值 P_a 逐渐减小直至消失, 而峰值 P_b 则不断增大并逐渐趋于

稳定. 不同颗粒厚度下, 冲击力峰值 P_a 和 P_b 的变化过程如图 6(a) 所示. 从图 6(a) 中可以发现, 当颗粒厚度 $H \approx 1.75$ cm 时, 两个冲击力峰值趋于一致. 如取两者的最大值作为颗粒缓冲后的冲击力, 如图 6(b) 所示, 则筒底的冲击力随颗粒厚度的增加而减小. 当 $H > 2.0$ cm 后, 冲击力对颗粒厚度不再敏感. 这里称该厚度为临界厚度 H_c , 即 $H_c = 2.0$ cm. 不同颗粒厚度下的缓冲率 $\lambda = (P_a^0 - P)/P_a^0$ 也绘于图 6(b) 中, 可以发现当 $H > H_c$ 时, 冲击力缓冲率可达 84% 左右. 由于颗粒材料的能量耗散与颗粒摩擦系数、密集度、弹性模量、形态及粒径等颗粒参数, 以及冲击物形态、尺度、冲击速度等因素密切相关, 因此临界厚度在不同颗粒材料性质和冲击条件下也会有很大的差异.

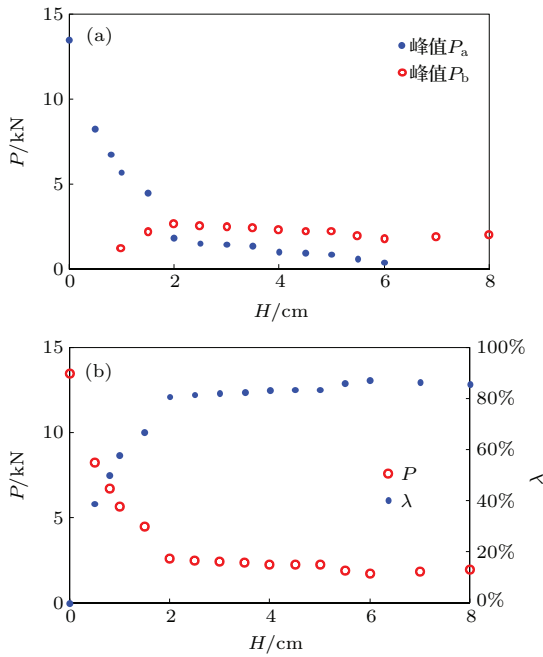


图6 两个冲击力峰值随颗粒厚度的变化 (a) 两个冲击力峰值; (b) 最大冲击力峰值及颗粒缓冲率
 Fig. 6. Evolutions of two impact load peaks under various granular thicknesses: (a) Two impact load peaks; (b) maximum impact load peaks and buffer ratio of granular materials.

在冲击运动过程中,冲击力峰值 P_a 和 P_b 的时间间隔随颗粒厚度的增加而不断增大,如图7所示. 与之对应,两个峰值出现时冲击物所处的位置也有所不同. 这里将两个峰值的时间间隔记作 Δt ,冲击物所处距离记作 ΔS ,其随颗粒厚度的变化情况如图7所示. 可以发现, ΔS 和 Δt 均随颗粒厚度 H 的增加而增加,并且 ΔS 与 H 呈线性关系. 但 Δt 随 H 的变化则分为两部分,当 $H < 3.5$ cm 时 Δt 的斜率要明显低于其在 $H > 3.5$ cm 时的斜率. ΔS 和 Δt 与颗粒厚度 H 的线性拟和关系可写为

$$\Delta S = 0.91H - 0.32, \tag{7}$$

$$\Delta t = \begin{cases} 5.43H - 4.65 & (H < 3.5 \text{ cm}), \\ 10.36H - 21.61 & (H > 3.5 \text{ cm}), \end{cases} \tag{8}$$

式中, H 和 ΔS 的单位均为 cm, Δt 的单位为 ms.

由于 ΔS 反映了两个峰值出现时冲击球体所处的位置,即 P_a 对应的冲击物与颗粒表面发生接触碰撞的位置, P_b 对应的是冲击物与筒底碰撞的位置,因此 ΔS 与 H 呈很好的线性关系. 考虑冲击物对颗粒材料冲击一段深度后才出现显著的冲击力,以及冲击力在颗粒层中的传播时间,因此 ΔS 与 H

的斜率要稍小于1.0,且其存在一定的截距0.32 cm. 冲击力峰值间隔 Δt 则主要反映冲击物在颗粒材料中的运行时间,其同时取决于冲击物的运行速度和颗粒厚度,其中运行速度主要体现为 $\Delta t-H$ 的斜率. 当颗粒较薄 ($H < 3.5$ cm) 时,冲击物受到颗粒材料的缓冲较小,其运行速度较快,则其斜率相对较小;而当颗粒较厚 ($H > 3.5$ cm) 时,冲击物在颗粒缓冲作用下运行速度明显降低,使其运行时间相对较长,从而 $\Delta t-H$ 的斜率相对较大.

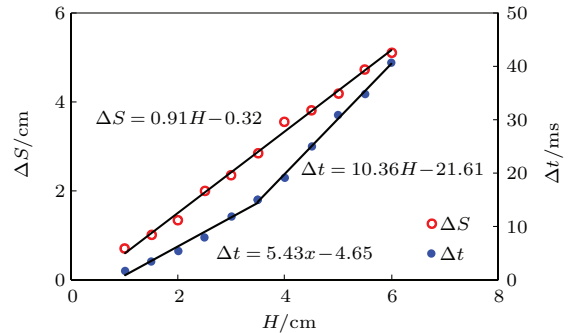


图7 不同颗粒厚度下两个冲击力峰值的空间距离和时间间隔
 Fig. 7. Spatial distance and temporal intervals between two impact load peaks under various granular thicknesses.

冲击物对颗粒材料的冲击力不仅在峰值上受颗粒厚度的影响,同时在冲击的持续时间上也有很大的差异,如图8所示. 可以看出,冲击力的持续时间随颗粒厚度的增加而增大. 当 $H < H_c$ 时 (这里 $H_c = 2.0$ cm),冲击力的幅值和持续时间对颗粒厚度极为敏感;而当 $H > H_c$ 时,冲击力的持续时间不断增加,但其幅值变化不大. 此时,颗粒材料的缓冲性能趋于稳定.

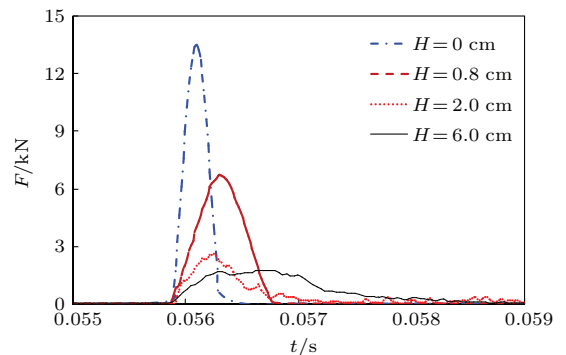


图8 (网刊彩色) 不同颗粒层厚度下冲击力的变化过程
 Fig. 8. (color online) Impact loads versus time under various granular thicknesses.

4 颗粒材料缓冲性能的影响因素分析

颗粒的密度、形状、粒径等因素是影响颗粒材料缓冲性能的重要因素 [7,10,13]. 颗粒材料的弹性模量越小、密度越大、颗粒形态越不规则, 碰撞过程中的耗能效果越好 [7,33]. 此外, 颗粒的混合比、粒径比、表面摩擦系数以及密集度等都影响着颗粒材料的缓冲性能. 其中, 颗粒摩擦系数及密集度对颗粒材料的能量耗散和流动特性有着显著影响 [58]. 下面主要对不同颗粒摩擦系数和密集度下颗粒材料的缓冲过程进行离散元分析.

4.1 颗粒摩擦系数的影响

为研究颗粒间摩擦系数对颗粒材料缓冲性能的影响, 这里取颗粒厚度 $H = 8.0$ cm, 其大于临界厚度以消除颗粒厚度的影响. 此外, 为确保颗粒材料初始密集度 C_0 的一致性, 在生成颗粒材料时采用相同的摩擦系数, 并在颗粒系统达到平衡之后缓慢调整颗粒间的摩擦系数. 下面分别取摩擦系数 $\mu_{pp} = 0, 0.1, 0.2, 0.4, 0.5, 0.6, 0.8$ 和 1.0 进行颗粒材料缓冲性能的离散元计算. 计算参数取表 1 中数

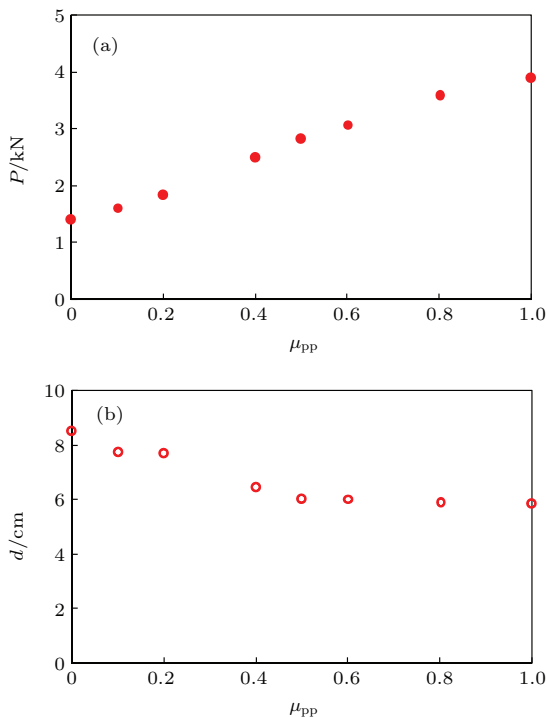


图9 不同摩擦系数下冲击力峰值和冲击坑深度的变化 (a) 冲击力峰值; (b) 冲击坑深度

Fig. 9. Impact load peaks and crater depths under various inter-particle friction coefficients: (a) Impact load peaks; (b) depth of impact crater.

值, 其中初始密集度 $C_0 = 0.57$. 由此计算得到不同摩擦系数下筒底的冲击力和冲击坑深度如图 9 所示, 冲击力时程如图 10 所示. 可以发现, 冲击力随摩擦系数的增大而显著增加, 冲击深度则随之减小并趋于稳定. 特别对于完全光滑的颗粒材料 ($\mu_{pp} = 0$), 冲击过程明显较长, 从而通过增加缓冲时间降低了冲击力.

在颗粒冲击过程中, 摩擦力的主要作用是阻止颗粒间以及颗粒与冲击物间的相对滑移和滚动, 并通过接触面处的相对滑动达到耗能效果. 当颗粒摩擦系数较小时, 颗粒系统稳定性较弱, 容易发生滑动乃至局部流动 [59]. 冲击物在颗粒材料中的运动距离较长, 使其动能消耗有相对较长的缓冲时间. 随着摩擦系数的增加, 颗粒间有更有效的能量耗散, 冲击物在颗粒中的运行距离相对较短, 至使冲击力相对较高. 以上结果表明, 光滑颗粒具有更好的缓冲性能, 同时冲击物也更容易在光滑颗粒中运行.

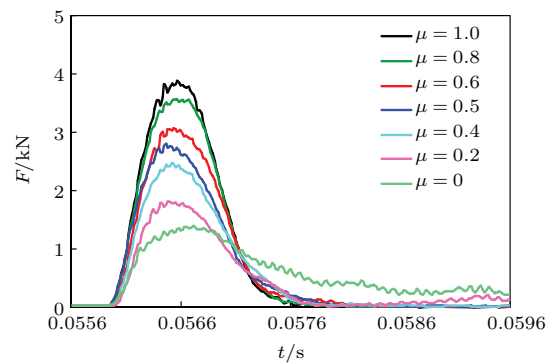


图10 不同摩擦系数下冲击力时程

Fig. 10. Impact load versus time under various inter-particle friction coefficients.

4.2 颗粒材料初始密集度的影响

颗粒材料的运行状态与其密集度有密切关系 [58,59]. 在低密集度下, 颗粒冲击时的空气作用不可忽略, 并会使细小颗粒形成射流; 随着密集度的增加, 空气作用不断降低; 在中密集度下, 冲击坑的形态受密集度影响显著 [60]. 本文主要对密实颗粒材料的缓冲性能进行分析.

颗粒厚度 $H = 8.0-9.0$ cm, 通过调整颗粒初始排列时的摩擦系数以得到不同的密集度. 计算参数采用表 1 中数值, 并使颗粒系统初始密集度 C_0 在 $0.54-0.61$ 之间变化, 计算得到的冲击力峰值及冲击坑深度如图 11 所示. 从图 11 (a) 冲击力峰值

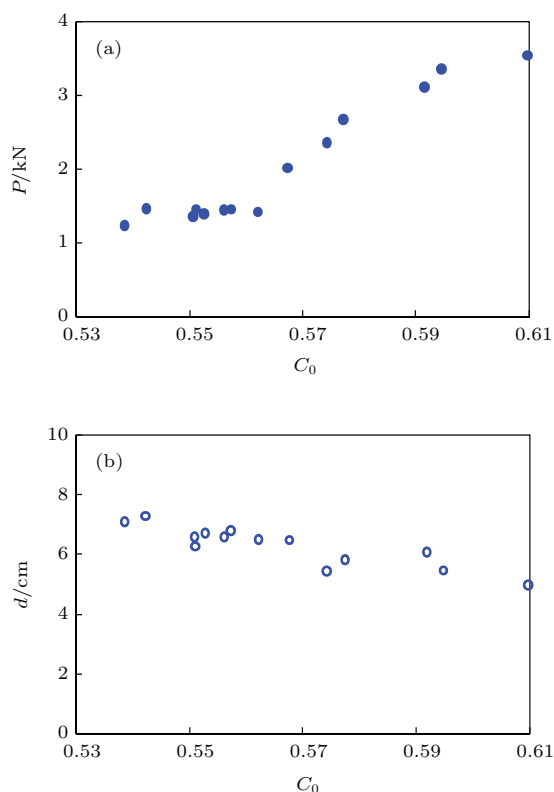


图 11 不同颗粒密集度下的冲击力峰值及冲击坑深度变化 (a) 冲击力峰值; (b) 冲击坑深度

Fig. 11. Impact load peaks and crater depths under various granular concentration: (a) Impact load peaks; (b) depth of impact crater.

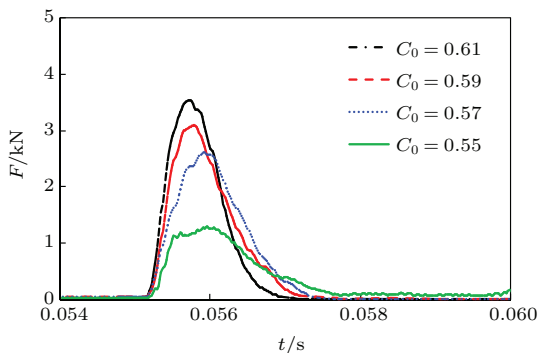


图 12 (网刊彩色) 颗粒材料在不同初始密集度下的冲击力时程

Fig. 12. (color online) Impact load versus time under various concentrations of granular material.

P 的变化可以发现, 当初始密集度 $C_0 < 0.56$ 时, 颗粒间存在很多孔隙, 颗粒外力扰动下有很大的自由移动空间, P 对 C_0 不敏感; 当 $C_0 > 0.562$ 时, 密实排列的颗粒对外界冲击有很强的阻力, P 随 C_0 的增加而变大, 即颗粒排列越密实, 缓冲效果越弱. 从图 11 (b) 冲击坑深度 d 的变化可以发现, d 随 C_0 的增加而变小, 即颗粒排列越密实, 冲击物的冲击深度越浅. 不同密集度下, 颗粒材料的冲击力时程

如图 12 所示. 从中可发现, 颗粒材料越密实, 冲击力峰值越高, 冲击力持续的时间也就越长. 这也进一步说明了密实颗粒材料由于颗粒间持续接触, 颗粒运动受到较强的约束, 从而增加了对冲击物的阻力, 缩短了冲击力的持续时间, 使其具有相对较弱的缓冲性能.

5 颗粒材料在冲击过程中的力链分布特性

力链结构是颗粒材料中作用力的主要传播途径, 也是颗粒系统承受外力的基本构架. 当颗粒系统受外载荷或边界约束作用时, 其内部力链具有很强的不均匀性 [38,61]. 对颗粒材料在冲击过程中力链结构的分析, 有助于揭示颗粒材料缓冲性能的内在机理.

5.1 颗粒冲击中的力链演变过程及颗粒厚度影响

这里取颗粒厚度 $H = 7.0$ cm, 其他计算参数取表 1 中数值, 对冲击过程中不同时刻的力链进行计算. 在 $t = 0$ 时刻, 冲击物以初速度 $V_0 = 5.0$ m/s 下落, 在 $t = 55.8$ ms 到达颗粒层表面. 当颗粒层受到冲击载荷作用时, 作用力通过力链传递并呈现明显的拱效应, 计算结果如图 13 所示. 为清晰观察颗粒系统力链结构, 这里只绘出大于平均接触力的力链.

当 $t = 55.8$ ms 时冲击物到达颗粒材料表面, 力链从接触点处向四周扩展, 力链数目逐渐增加但强度减弱, 如图 13 (a) 所示. 随着时间的延长, 力链逐渐向周围空间延展, 力链长度延长且数量及强度均有所增加, 如图 13 (a)—(e). 当 $t = 57.2$ ms 冲击力达到峰值后, 力链数目减少, 力链强度降低, 冲击物运动趋于稳定. 以上过程显示了冲击力峰值演化过程中所对应的力链结构变化. 力链的萌生、扩展及消失的过程表征了颗粒间作用力的变化规律, 同时也是颗粒间弹性势能传递和耗散的过程.

为分析颗粒厚度对缓冲性能的影响, 这里将颗粒厚度 $H = 3.0, 5.0$ 和 7.0 cm 时冲击力峰值所对应的力链结构及底板接触力分布绘于图 14 中. 可以发现, 颗粒间的力链主要集中在冲击物的底部, 并随颗粒深度的增加而减弱, 且变得更加密集. 此外,

颗粒材料对底板的冲击力呈非均匀分布, 且当颗粒较薄时, 底板上承受的颗粒冲击力要明显高于厚颗粒

时的冲击力. 随着颗粒厚度的增加, 颗粒间力链更加密集, 从而使底板上的压强明显减弱.

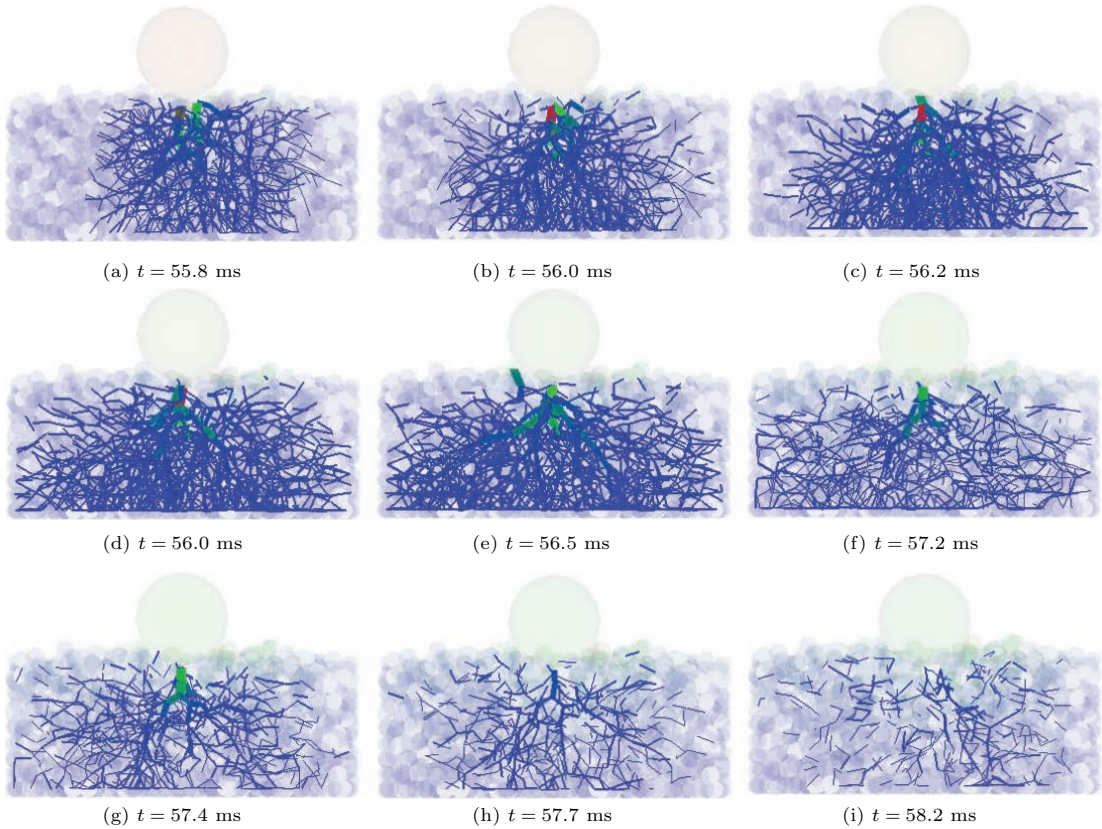


图 13 颗粒冲击过程中力链结构的演化过程

Fig. 13. Evolution of force chain structure during the impact process of granular material.

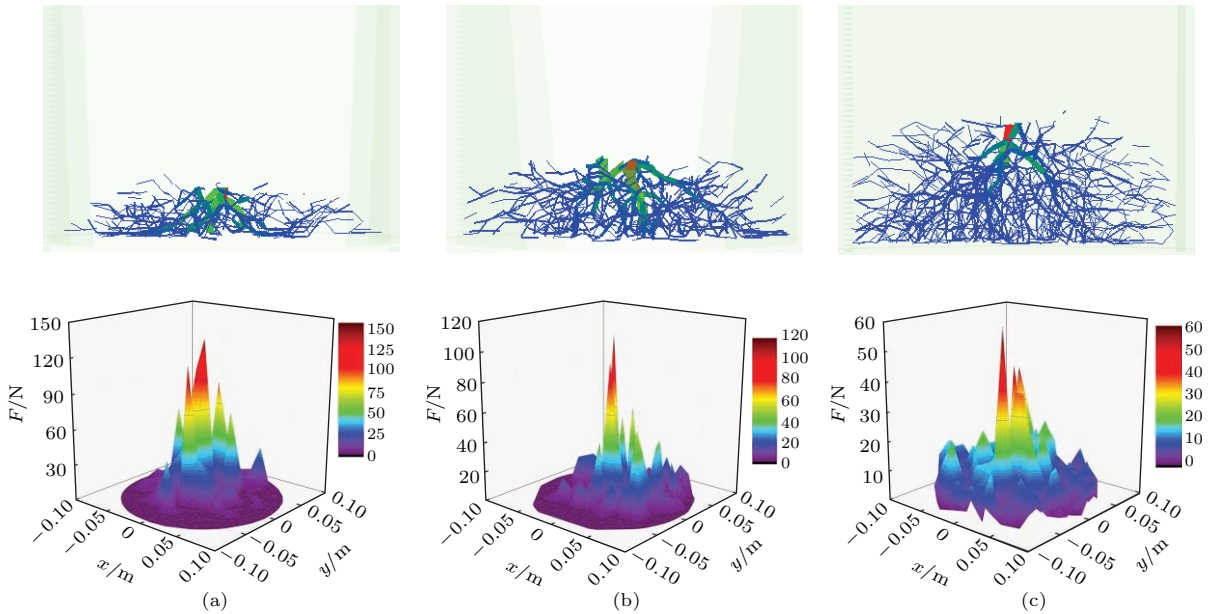


图 14 不同颗粒层厚度下的力链结构及底板分布力 (a) $H = 3.0$ cm; (b) $H = 5.0$ cm; (c) $H = 7.0$ cm

Fig. 14. Force chain structures and impact load distributions on bottom plate under various granular thicknesses: (a) $H = 3.0$ cm; (b) $H = 5.0$ cm; (c) $H = 7.0$ cm.

5.2 颗粒摩擦系数和初始密集度对力链的影响

当颗粒摩擦系数 $\mu_{pp} = 0.2, 0.5$ 和 1.0 时, 计算得到的力链分布和冲击力峰值对应的底面压力分布如图 15 (a) 所示. 从图 15 (a) 中可以看出, 随着摩擦系数的增大, 力链越加密实. 从颗粒间作用力的概率分布 (如图 16 (a) 所示) 可发现, 颗粒间摩擦系数越大, 颗粒间弱作用力的概率密度越小, 而强作用力的概率密度越大. 颗粒间的切向摩擦力增大了颗粒间的相互作用, 使颗粒系统更加稳定. 虽然摩擦力可提高颗粒间的摩擦耗能, 但其不利于颗粒单元的相互运动, 使颗粒材料缓冲性能有所降低.

当颗粒初始密集度 $C_0 = 0.54, 0.57$ 和 0.61 时, 冲击力峰值处的颗粒间力链结构和作用力概率分布密度如图 15 (b) 和图 16 (b) 所示. 可以发现, 密集度的增加使力链分布更加密实, 且较弱作用力的概率密度分布不断降低, 进而较强作用力的概率密度不断增大. 类似于颗粒摩擦系数的影响, 密集度的增加使颗粒系统具有更强的稳定性, 不宜于颗粒间的相互运动, 从而减弱了颗粒材料的缓冲性能.

从以上分析可以发现, 在光滑颗粒和低密集度下, 颗粒间的力链结构越弱, 颗粒系统越不稳定, 在冲击作用下颗粒越容易发生相对运动, 从而可延展冲击力的持续时间, 减低冲击力峰值, 达到良好的缓冲效果.

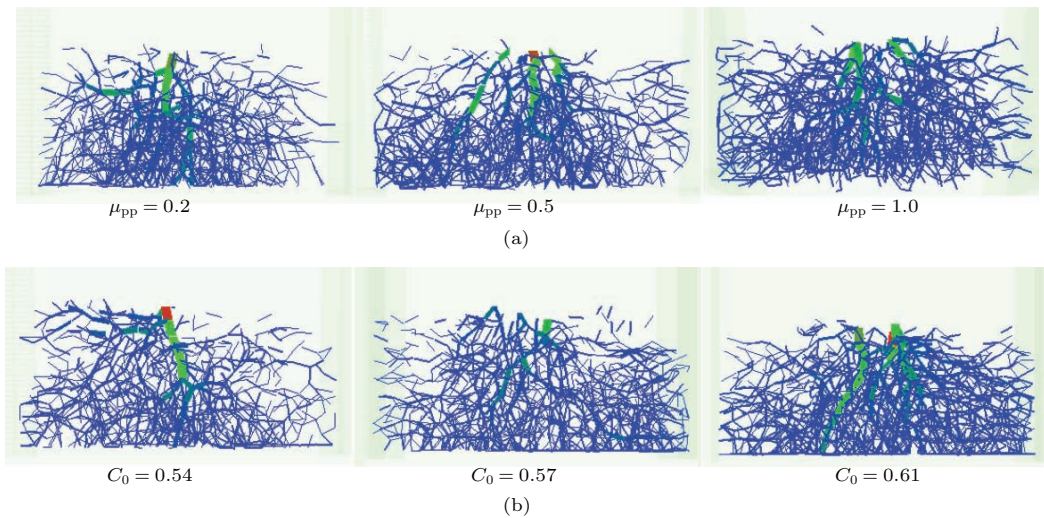


图 15 颗粒摩擦和初始密集度对力链结构的影响 (a) 不同摩擦系数下的力链结构 ($C_0 = 0.58$); (b) 不同初始密集度下的力链结构 ($\mu_{pp} = 0.5$)

Fig. 15. Influences of friction coefficient and initial concentration of granular materials on the force chain structure: (a) Force chain structures under various inter-particle friction coefficients when the initial concentration $C_0 = 0.58$; (b) force chain structures under various initial concentration when the inter-particle friction coefficient $\mu_{pp} = 0.5$.

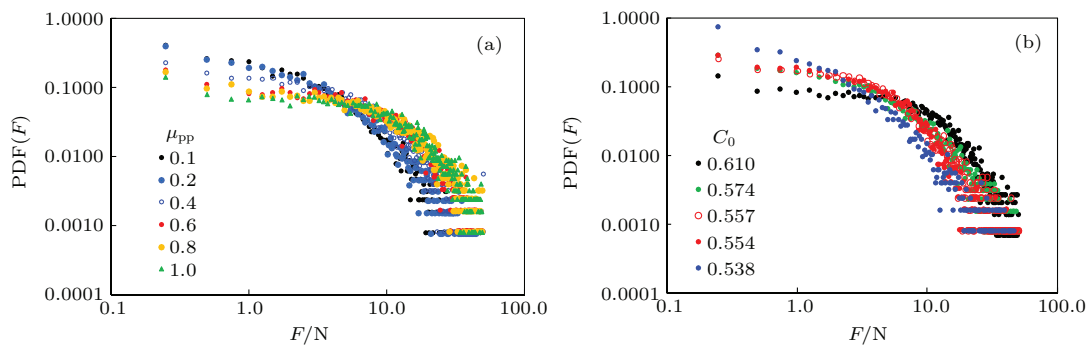


图 16 不同摩擦系数和初始密集度下颗粒间作用力的概率密度 (PDF) 分布 (a) 颗粒摩擦系数的影响; (b) 初始密集度的影响

Fig. 16. Probability density functions of inter-particle impact forces under various inter-particle friction coefficients and initial concentrations: (a) Influence of inter-particle friction coefficient; (b) influences of initial concentration of granular material.

6 结 论

本文采用离散元方法对颗粒材料在冲击荷载作用下的缓冲性能进行了数值分析, 通过与试验结果的对比验证, 探讨了颗粒厚度、颗粒摩擦和初始密集度对冲击力时程的影响. 研究表明, 颗粒厚度是影响颗粒材料缓冲性能的重要因素, 并存在一个临界厚度 H_c . 当颗粒厚度 $H < H_c$ 时, 颗粒材料的缓冲性能随颗粒厚度的增加而明显提高; 当 $H > H_c$ 时, 缓冲性能对 H 不再敏感. 当颗粒较薄时, 受颗粒材料中的弹性波及冲击物直接冲击影响, 底板冲击力呈两个峰值; 当颗粒较厚时, 冲击物不能穿透颗粒层, 其能量被颗粒材料全部耗散, 其对底板冲击力只有一个峰值. 以上冲击力双峰结构的转化过程还将进一步开展相应的力学试验进行验证. 此外, 离散元计算结果表明光滑和初始密集度低的颗粒材料具有更好的耗能缓冲效果. 最后, 对不同厚度、摩擦系数和密集度下颗粒材料受冲击时的力链结构进行了分析, 讨论了底板颗粒压力的分布规律和作用力概率分布特性, 从而在细观尺度上探讨了颗粒材料的缓冲性能.

参考文献

- [1] Stone M B, Bernstein D P, Barry R, Pelc M D, Tsui Y K, Schiffer P 2004 *Nature* **427** 503
- [2] Geng J, Howell D, Longhi E, Behringer R P, Reydellet G, Vanel L, Clément E, Luding S 2001 *Phys. Rev. Lett.* **87** 035506
- [3] Yu T, Zhang G H, Sun Q C, Zhao X D, Ma W B 2015 *Acta Phys. Sin.* **64** 044501 (in Chinese) [余田, 张国华, 孙其诚, 赵雪丹, 马文波 2015 物理学报 **64** 044501]
- [4] Du Y C, Wang S L, Zhang J L 2010 *Int. J. Impact. Eng.* **7** 309
- [5] Toiya M, Hettinga J, Losert W 2007 *Granular Matter* **9** 323
- [6] Zhao Z, Liu C S, Brogliato B 2008 *Phys. Rev. E* **78** 031307
- [7] Ji S Y, Li P F, Chen X D 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 301 (in Chinese) [季顺迎, 李鹏飞, 陈晓东 2012 物理学报 **61** 301]
- [8] Ruiz-Suarez J C 2013 *Rep. Prog. Phys.* **76** 066601
- [9] Clark A H, Petersen A J, Kondic L, Behringer R P 2015 *Phys. Rev. Lett.* **114** 144502
- [10] Uehara J S, Ambroso M A, Ojha R P, Durian D J 2003 *Phys. Rev. Lett.* **90** 194301
- [11] Jaeger H M, Nagel S R, Behringer R P 1996 *Rev. Modern Phys.* **68** 1259
- [12] Kondic L, Fang X, Losert W, O'Hern C S, Behringer R P 2012 *Phys. Rev. E* **85** 011305.
- [13] Nordstrom K N, Lim E, Harrington M, Losert W 2014 *Phys. Rev. Lett.* **112** 228002
- [14] Pacheco-Vazquez F, Ruiz-Suarez J C 2011 *Phys. Rev. Lett.* **107** 218001
- [15] Omidvar M, Iskander M, Bless S 2014 *Int. J. Impact Eng.* **66** 60
- [16] Ambroso M A, Santore C R, Abate A R, Durian D J 2005 *Phys. Rev. E* **71** 051305
- [17] Walsh A M, Holloway K E, Habdas P, de Bruyn J R 2003 *Phys. Rev. Lett.* **91** 104301
- [18] Wang D, Ye X, and Zheng X 2012 *Euro. Phys. J. E* **35** 7
- [19] Pacheco-Vazquez F, Caballero-Robledo G A, Solano-Altamirano J M, Altshuler E, Batista-Leyva A J, Ruiz-Suarez J C 2011 *Phys. Rev. Lett.* **106** 218001
- [20] Goldman D I, Umbanhowar P 2008 *Phys. Rev. E* **77** 021308
- [21] Ciamarra M P, Lara A H, Lee A T, Goldman D I, Vishik I, Swinney L 2004 *Phys. Rev. Lett.* **92** 194301
- [22] Katsuragi H, Durian D J. 2007 *Nature Phys.* **3** 420
- [23] Ye X Y, Wang D M, Zheng Z J 2012 *Phys. Rev. E* **86** 061304
- [24] Peng Z, Xu X, Lu K and Hou M 2009 *Phys. Rev. E* **80** 021301
- [25] Albert I, Sample J G, Morss A J, Rajagopalan S, Barabasi A L, Schiffer P 2001 *Phys. Rev. E* **64** 061303
- [26] Hou M, Peng Z, Liu R, Lu K, Chan C K 2005 *Phys. Rev. E* **72** 062301
- [27] Takehara Y, Fujimoto S, Okumura K 2010 *Epl-Europhys. Lett.* **92** 44003
- [28] Nishida M, Tanaka Y 2010 *Granular Matter* **12** 357
- [29] Tanaka K, Nishida M, Kunimochi T, Takagi T 2002 *Powder Technol.* **124** 160
- [30] Birch S P D, Manga M, Delbridge B, Chamberlain M 2014 *Phys. Rev. E* **90** 032208
- [31] Brzinski III T A, Schug J, Mao K, Durian D J 2015 *Phys. Rev. E* **91** 022202
- [32] Awasthi A, Wang Z Y, Broadhurst N, Geubelle P 2015 *Granular Matter* **17** 21
- [33] Sakamura Y, Komaki H 2012 *Shock Waves* **22** 57
- [34] Stone M B, Barry R, Bernstein D P, Pelc M D, Tsui Y K, Schiffer P 2004 *Phys. Rev. E* **70** 041301
- [35] Peng Z, Jiang Y M, Liu R, Hou M Y 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 024502 (in Chinese) [彭政, 蒋亦民, 刘锐, 厚美琪. 2013 物理学报 **62** 024502]
- [36] Xue K, Bai C 2011 *Phys. Rev. E* **83** 021305
- [37] Bourrier F, Nicot F, Darve F 2008 *Granular Matter* **10** 415
- [38] Chen Q, Hou M Y 2014 *Chin. Phys. B* **23** 074501
- [39] Jiang Y J, Zhao Y, Towhata I, Liu D X 2015 *Powder Technol.* **270** 53
- [40] Muller P, Poschel T 2011 *Phys. Rev. E* **84** 021302
- [41] Chung Y C, Ooi J Y 2011 *Granular Matter* **13** 643
- [42] Zhang G H, Sun Q C, Shi Z P, Feng X, Gu Q, Jin F 2014 *Chin. Phys. B* **23** 076301
- [43] Oger L, Ammi M, Valance A, Beladjine D 2005 *Eur. Phys. J. E* **17** 467

- [44] Crassous J, Beladjine D, Valance A 2007 *Phys. Rev. Lett.* **99** 248001
- [45] Abd-Elhady M S, Abd-Elhady S, Rindt C C M, van Steenhoven A A 2010 *Adv. Powder Technol.* **21** 150
- [46] Tiwari M, Mohan T R K, Sen S 2014 *Phys. Rev. E* **90** 062202
- [47] Loranca-Ramos F E, Carrillo-Estrada J L, Pacheco-Vazquez F 2015 *Phys. Rev. Lett.* **115** 028001
- [48] Wada K, Senshu H, Matsui T 2006 *Icarus* **180** 528
- [49] Ciamarra M P, Lara A H, Lee A T, Goldman D I, Vishik I, Swinney H L 2004 *Phys. Rev. Lett.* **92** 194301
- [50] Nelson E L, Katsuragi H, Mayor P, Durian D J 2008 *Phys. Rev. Lett.* **101** 068001
- [51] Li Y, Dove A, Curtis J S, Colwell J E 2016 *Powder Technol.* **288** 303
- [52] Ramirez R, Poschel T, Brilliantov N V, Schwager T 1999 *Phys. Rev. E* **60** 4465
- [53] Park J, Song J J 2009 *Int. J. Rock Mech. Min.* **46** 1315
- [54] Maio F P D, Renzo A D 2005 *Chem. Eng. Sci.* **60** 1303
- [55] Kremmer M, Favier J F 2001 *Int. J. Numer. Meth. Eng.* **51** 1407
- [56] Yan Y, Ji S Y 2009 *Int. J. Numer. Anal. Met.* **34** 978
- [57] Nishida M, Okumura M., Tanaka K 2010 *Granular Matter* **12** 337
- [58] Tapia F, Espindola D, Hamm E, Melo F 2013 *Phys. Rev. E* **87** 014201
- [59] Midi G D R 2004 *Eur. Phys. J. E* **14** 341
- [60] Umbanhowar P, Goldman D I 2010 *Phys. Rev. E* **82** 010301
- [61] Bi Z W, Sun Q C, Liu J G, Jin F 2011 *Mech. Eng.* **33** 10 (in Chinese) [毕忠伟, 孙其诚, 刘建国, 金峰 2011 力学与实践 **33** 10]

Buffer capacity of granular materials and its influencing factors based on discrete element method*

Ji Shun-Ying[†] Fan Li-Fang Liang Shao-Min

(State Key Laboratory of Structural Analysis for Industrial Equipment, Dalian University of Technology, Dalian 116023, China)

(Received 30 November 2015; revised manuscript received 3 February 2016)

Abstract

As a typical energy dissipation system, granular material acts as a buffer under the action of impact load, with absorbing and dissipating energy effectively through the sliding friction and viscous contacts between particles. In this paper we study the buffer capacity of granular material under impact load, by the discrete element method (DEM). The spherical elements are filled randomly into a rigid cylinder under the action of gravity. A spherical projectile with a certain initial velocity drops into the granular bed from a given height. The impact loads on the projectile and the rigid bottom plate of cylinder are both obtained with DEM simulations. The simulated impact loads on the bottom plate are compared well with the physical experiment data. The influences of granular thickness, sliding friction and initial concentration on buffer capacity are investigated under the impact of spherical projectile. The DEM results show that granular thickness H is a key factor for buffer capacity. In the DEM simulations, the impact load on bottom plate presents unique characteristics under various granular thickness values. With granular thickness increasing from zero, a transition from one peak to two peaks takes place, then the two peaks return to one peak in the time curve of impact load. The evolution of impact load peak with its temporal interval is discussed. A critical thickness H_c is obtained. The impact force decreases with the increase of granular thickness when $H < H_c$, but is independent of the granular thickness when $H > H_c$. Moreover, the impact forces are simulated under various sliding friction coefficients and initial concentrations. It is found that the smooth and loose granular material has more effective buffer capacity. Finally, the spatial structures of force chains and the distribution of impact forces on bottom plate are discussed to reveal the mechanism of buffer properties of granular material on a micro scale.

Keywords: granular material, discrete element method, buffer capacity, critical thickness

PACS: 45.70.-n, 83.80.Fg, 81.70.Bt

DOI: 10.7498/aps.65.104501

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 11572067, U1234209) and the Fundamental Research Funds for the Central Universities, China (Grant No. DUT15ZD105).

[†] Corresponding author. E-mail: jisy@dlut.edu.cn