

冲击荷载下颗粒物质缓冲性能的试验研究*

季顺迎[†] 李鹏飞 陈晓东

(大连理工大学工业装备结构分析国家重点实验室, 大连 116023)

(2012年1月5日收到; 2012年3月6日收到修改稿)

颗粒物质是一种复杂的能量耗散体系, 颗粒间的摩擦和黏滞作用可使冲击荷载引起的能量有效衰减, 颗粒间的力链结构又可将瞬时局部冲击荷载进行空间扩展和时间延长, 达到良好的缓冲效果. 为研究颗粒物质对冲击荷载的缓冲性能, 本文采用重力作用下球体冲击筒内颗粒物质的试验系统, 研究了筒体底部作用力在颗粒材料、颗粒厚度等因素影响下的变化规律. 试验结果表明: 非规则颗粒具有更加良好的缓冲性能, 粗颗粒的缓冲性能略高于细颗粒. 颗粒厚度 H 是影响缓冲性能的重要因素, 并存在一个临界厚度 H_c . 当 $H < H_c$ 时, 缓冲性能随 H 的增加而增强; 当 $H > H_c$ 时, H 对缓冲效果的影响不再显著. 以上研究是在同一冲击能量下进行的, 而对于不同冲击能量下的 H_c 还需要深入开展. 通过颗粒物质对冲击荷载缓冲性能的试验研究, 可揭示颗粒材料的基本物理力学行为, 为其在缓冲减振领域中的应用提供依据.

关键词: 颗粒物质, 缓冲性能, 能量消耗, 冲击荷载

PACS: 47.70.-n, 45.70.Mg, 45.50.Tn

1 引言

颗粒物质是由大量离散固体颗粒组成的集体, 是一种复杂的非平衡态的能量耗散体系, 并表现出诸多独特的力学特性^[1-3]. 颗粒系统中的能量消耗主要是以颗粒之间的非弹性碰撞和滑动摩擦为主. 在外荷载的作用下, 颗粒间会发生强烈挤压和摩擦, 其内部复杂的力链结构发生断裂和重组, 进而消耗大量能量^[4,5]; 此外, 当颗粒间的碰撞为非弹性碰撞时, 即存在黏滞作用和塑性变形, 此时变形和作用过程是不可逆的, 亦会发生能量转化^[6]. 对两球颗粒碰撞过程中的能量耗散问题, 研究发现低屈服强度、高弹性模量、高密度的颗粒材料具有更强的耗能效果^[7-9]. 由此, 当颗粒物质承受冲击荷载时, 其内部颗粒间的摩擦和非弹性碰撞会有效地耗散冲击动能, 达到缓冲效果.

在颗粒系统内, 力链结构是有效的作用力传播

途径, 并可将点荷载快速地转化为分布荷载, 并受颗粒的材料性质和排列方式的影响^[10,11]. 有关力链结构的演化规律, 人们进行了大量系统研究. 无论其符合椭圆方程、双曲线方程, 还是抛物线方程, 均具有将集中荷载向外扩展的规律^[12,13]. 由此, 它可将局部冲击荷载在空间上不断扩展, 进而降低冲击强度. 此外, 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, 从而可将瞬时冲击荷载在时间上进行延迟, 这也在一定程度上达到缓冲效果.

颗粒系统的缓冲作用也源于其在冲击荷载下的飞溅现象, 并由此将冲击动能通过颗粒系统的弹性形变能转化为颗粒动能, 并在颗粒物质上形成具有一定规则的冲击坑. 试验研究发现, 冲击坑的直径及深度与冲击物的速度、质量以及颗粒尺寸之间有密切关系, 并可拟合为幂指数函数^[14-16]. 此外, 通过物理试验还确定了容器的边界效应对于球体冲击颗粒层深度的影响、颗粒溢出质量与冲击能

* 国家自然科学基金 (批准号: 11172063)、国家重点基础研究发展计划 (批准号: 2010CB731502) 和新世纪优秀人才支持计划 (批准号: NCET-08-0072) 资助的课题.

[†] E-mail: jisy@dlut.edu.cn

量的线性关系、颗粒尺寸效应对黏弹性碰撞中能量耗散的影响^[17-20];另外,通过离散单元数值模拟也确定了球体冲击和准静态加载过程中,颗粒物质的动力特性及其力链的分布形态^[21].以上研究为揭示颗粒物质的缓冲性能提供了思路.

目前,对于颗粒物质能量耗散方面的工作,无论是试验研究还是数值模拟均处于初步阶段,对其在冲击过程中运动规律的认识也有待加深.颗粒物质的能耗机理在颗粒阻尼器中的应用已开展了前期研究,并因具有减振频带宽、附加质量轻和材料廉价等优点,呈现出广阔的应用前景^[22-25].但对颗粒物质的缓冲性能研究及工程应用开展的较少.

本文以垂直冲击荷载下颗粒物质为研究对象,试验研究了不同颗粒材料和厚度影响下的冲击荷载,得到了颗粒系统缓冲性能的一般性规律,为开展颗粒物质在缓冲减振方面的工程应用提供科学依据.

2 颗粒缓冲性能的试验装置及方案

为测定颗粒物质在冲击荷载下的缓冲性能,设计了如图1所示的试验装置.该装置中的有机玻璃圆筒高度 $h = 30\text{ cm}$,外径 $D = 20\text{ cm}$,壁厚 $t = 0.5\text{ cm}$,并在钢质筒底安置3个CL-YD系列压电式力传感器以测量冲击力.这3个传感器安装在距离筒底中心 6.5 cm 的圆周上,相互之间夹角均为 120° .试验中同步测得3个传感器的冲击力并由此得到冲击合力.试验中选用规则玻璃颗粒和非

规则砂粒作为试验颗粒材料,且分别选用两种不同粒径,其参数列于表1.

表1 两类颗粒材料的粒径参数(单位: mm)

粒径	参数	细粒玻璃	粗粒玻璃	细砂	粗砂
最小粒径	D_{\min}	0.4	4.0	0.4	1.5
最大粒径	D_{\max}	0.6	5.0	0.7	2.5
平均粒径	\bar{D}	0.5	4.5	0.5	2.0

试验中采用石质球体作为冲击重物,其质量 $m = 167\text{ g}$,直径 $d = 5\text{ cm}$.容器直径为冲击球体直径的4倍,为颗粒直径的8倍以上,并采用光滑的有机玻璃侧壁,从而消除了边界影响^[26].在圆筒内放置不同厚度的玻璃颗粒或砂粒,厚度在 $0-9\text{ cm}$ 之间,冲击物由相对颗粒表面 50 cm 高度处自由下落.通过安装在底部的力传感器在 50 kHz 采集频率下测量圆筒底部的冲击力,由此研究冲击力的变化规律及颗粒物质的缓冲性能.

3 颗粒厚度及颗粒材料性质对缓冲性能的影响

采用两种粒径的玻璃颗粒和砂粒,在不同颗粒厚度下进行冲击试验,通过对筒底冲击力的测量可确定颗粒厚度以及颗粒材料性质对缓冲性能的影响.

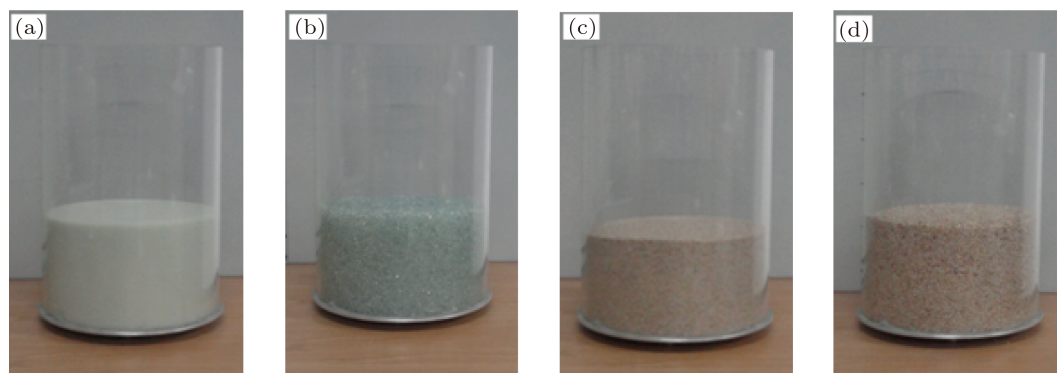


图1 试验装置及颗粒材料 (a) 细粒玻璃; (b) 粗粒玻璃; (c) 细砂; (d) 粗砂

3.1 颗粒厚度对缓冲性能的影响

首先采用平均粒径 $\bar{D} = 0.5 \text{ mm}$ 的玻璃颗粒, 当颗粒厚度 H 分别为 1 和 6 cm 时测得的筒底冲击力时程如图 2(a) 和 (b) 所示. 当 $H = 1 \text{ cm}$ 时, 筒底冲击力出现多个峰值, 且呈规律性的递减趋势; 当 $H = 6 \text{ cm}$ 时, 冲击力呈现一个主峰值, 随即出现几个较小峰值直至冲击接触力趋于零. 这两个典型的时程曲线分别代表了缓冲颗粒在薄层和厚层条件下的冲击力变化特征.

在以上冲击力的时程曲线中, 第一个峰值最直接地反映了颗粒系统的缓冲效果. 为更好地表征冲击力的变化规律, 将同种材料、不同厚度下各时程曲线的第一个峰值叠放在同一个时刻 t 下, 进而通过对第一个峰值的对比以分析不同颗粒厚度下冲击力的变化规律. 首先以平均粒径 $\bar{D} = 0.5 \text{ mm}$ 的细粒玻璃为例, 颗粒厚度分别为 0, 0.5, 1, 2, 3, 4 和 5 cm 时, 第一个峰值的冲击力如图 3(a) 所示. 可以发现, 随着颗粒填充厚度的不断增加, 相应的冲击力峰值逐渐下降, 时程曲线整体形状趋于扁平. 这说明在冲击过程中传递到底板的冲击力逐渐减小, 颗粒系统耗散的能量逐渐增多. 然后, 选

用平均粒径 $\bar{D} = 0.5 \text{ mm}$ 的细砂进行试验, 其结果如图 3(b) 所示. 可以看出, 冲击力峰值随颗粒厚度的变化与前者相似, 即随着颗粒厚度的增加, 冲击力峰值逐渐下降. 但其与图 3(a) 相比, 曲线的整体波动性较大, 规律性较弱. 这主要是由于细砂颗粒形态的不规则性, 使得颗粒间的摩擦耗能更加显著, 进而引起冲击力变化的随机性更加明显.

图 3 所示冲击力时程曲线中的负值表明在冲击过程中颗粒系统会出现振荡现象. 该振荡会导致装置底板产生一定的振动, 并对安装在其底部的力传感器产生一定的拉力. 随着颗粒厚度的增加, 底板受到的颗粒冲击力也就越小, 其振荡幅度也就越小, 从而对传感器的拉力也就越不明显. 也就是说, 冲击力时程中的负值在一定程度上也反映出颗粒系统的缓冲效果. 冲击力中的负值越小, 则振荡越小, 缓冲效果也就越显著. 从图 3(a) 可以看到, 玻璃颗粒的厚度在 0—1.0 cm 时, 负值较多, 在 2.0—5.0 cm 时则较少出现负值; 在细砂颗粒的图 3(b) 中, 则负值很小. 这说明具有规则颗粒形态的玻璃颗粒材料的振荡相对剧烈, 具有非规则颗粒形态的细砂颗粒材料具有更好的缓冲效果.

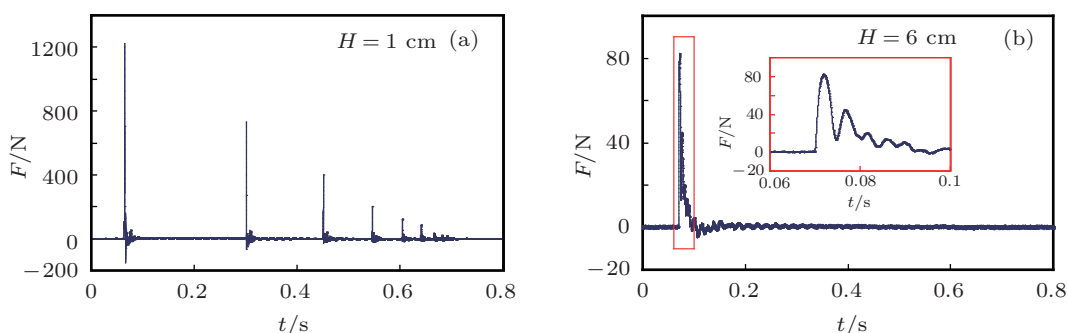


图 2 典型的颗粒缓冲后的冲击力时程 (a) 颗粒厚度 $H = 1 \text{ cm}$; (b) 颗粒厚度 $H = 6 \text{ cm}$

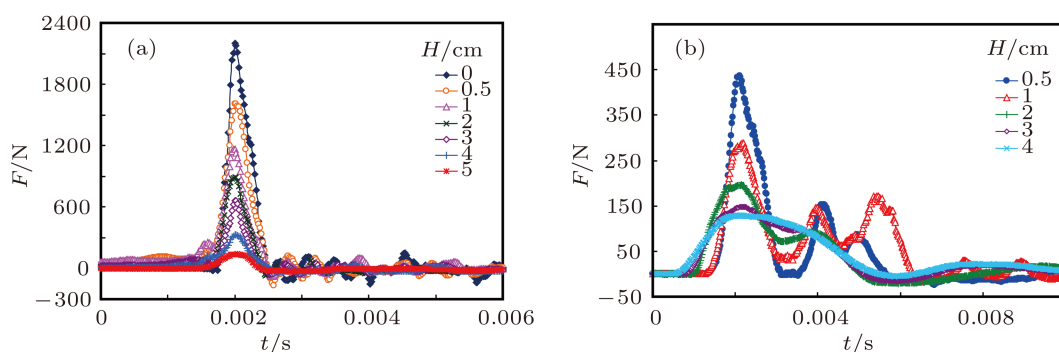


图 3 不同厚度颗粒下的冲击力时程曲线 (a) 细粒玻璃; (b) 细砂

3.2 颗粒材料性质对缓冲性能的影响

选取不同颗粒材料在同一颗粒厚度下进行冲击力测试, 由此分析材料性质对颗粒缓冲性能的影响. 当颗粒填充厚度 $H = 0.5 \text{ cm}$, 采用不同粒径的玻璃颗粒与砂粒得到的冲击力时程如图 4 所示. 无论是玻璃颗粒还是砂粒, 其大粒径的冲击力均略低于小粒径的冲击力; 此外, 砂粒缓冲下的冲击力要明显低于玻璃颗粒, 表现出良好的缓冲耗能性能. 重复以上试验各 3 次, 将不同颗粒材料缓冲下的冲击力平均峰值 $\bar{F}_{0.5}$ 列于表 2 中, 同时考虑无颗粒缓冲条件下的峰值 $\bar{F}_0 = 2239.05 \text{ N}$, 得到以上颗粒材料在填充厚度为 0.5 cm 时的缓冲效果. 可以发现, 细粒和粗粒玻璃缓冲后的冲击力分别为无颗粒缓冲时 \bar{F}_0 的 66% 和 61%, 细砂和粗砂缓冲后的冲击力分别为 \bar{F}_0 的 18% 和 17%. 因此, 各种颗粒材料均有显著的缓冲效果, 大粒径颗粒比小粒径颗粒的缓冲效果略高, 砂粒的缓冲性能要明显优于玻璃颗粒.

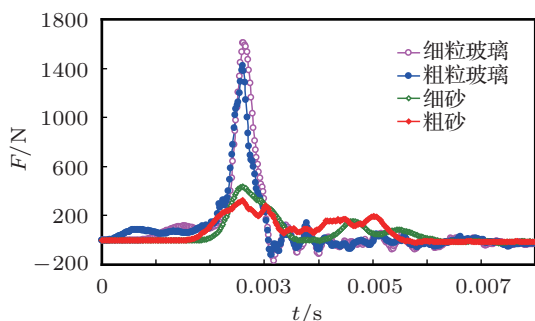


图 4 不同颗粒材料缓冲下的冲击力时程曲线

表 2 颗粒厚度为 0.5 cm 时不同冲击峰值力均值比较

颗粒材料	峰值力均值 $\bar{F}_{0.5}/\text{N}$	$\bar{F}_{0.5}/\bar{F}_0$
小粒径玻璃	1473.47	0.66
大粒径玻璃	1366.04	0.61
细砂	398.66	0.18
粗砂	382.86	0.17

为全面地分析颗粒物质的缓冲性能, 分别在不同颗粒厚度 H 下重复进行了三次冲击力测试, 其峰值点均值与颗粒厚度的关系如图 5 所示. 可以发现, 随着 H 的增加, 冲击力逐渐减小. 对于玻璃和砂粒, 都存在一个临界厚度值, 其分别为 $H_c = 5 \text{ cm}$ 和 $H_c = 2 \text{ cm}$. 当颗粒厚度大于临界值 H_c 后, 冲击

力趋于稳定, 缓冲效果趋势于一致. 这表明粒径、颗粒形状等因素对颗粒缓冲性能的影响减弱, 而颗粒厚度成为影响缓冲效果的控制因素, 且不再随厚度的增加而发生变化. 此外, 当颗粒厚度小于 H_c 时, 砂粒的缓冲效果要明显优于玻璃颗粒. 这主要是由于两种材料的形态引起的. 形状相对不规则的砂粒, 其表面粗糙, 摩擦系数较大, 具有更好的缓冲耗能效果.

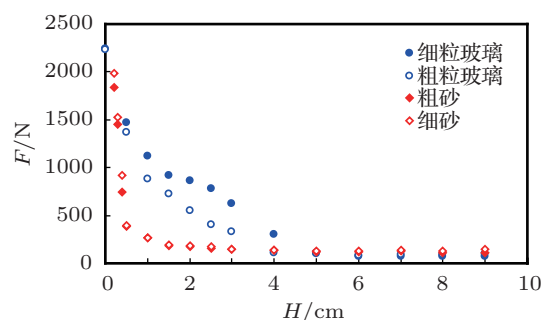


图 5 颗粒材料在不同颗粒厚度 H 下的冲击力峰值 F 变化规律

4 冲击力衰减过程分析

在冲击物冲击筒内颗粒物质时, 筒底部冲击力在不同颗粒厚度下呈现两种典型的时程变化特征, 即上文中图 2 所示. 特别是当颗粒厚度较小时, 冲击力呈现出有规律性的衰减过程; 即便颗粒厚度较大时, 冲击力峰值也呈逐渐衰减趋势. 下面以玻璃颗粒为例, 通过对冲击力峰值的变化规律分析可确定颗粒物质对冲击力的衰减特征.

4.1 冲击力峰值的衰减特性

这里分别以平均粒径 $\bar{D} = 0.5 \text{ mm}$ 和 $\bar{D} = 4.5 \text{ mm}$ 的玻璃颗粒为例, 在不同颗粒厚度下冲击力时程曲线中选取各峰值, 结果如图 6(a) 和 (b) 所示. 从中可以看出, 两种粒径的玻璃颗粒均表现出很好的缓冲特性, 且冲击力峰值取对数后与峰值次数呈明显的线性衰减过程. 该线性斜率随颗粒厚度的增加而增大, 表明冲击力的衰减程度随颗粒厚度的增加而增强. 但当颗粒厚度增加到其临界值 H_c (这里 $H_c = 5 \text{ cm}$) 后, 线性斜率大体相同, 即此时颗粒厚度对缓冲性能的影响不再明显.

4.2 冲击力峰值间隔的变化规律

从冲击力时程曲线可以发现, 在冲击力峰值 F 衰减过程中, 各峰值间的时间间隔 Δt 也不断变小. 这里对玻璃颗粒在不同厚度下冲击力峰值间隔进行了确定, 如图 7 所示. 可以发现, 当颗粒厚度小于其临界值, 即 $H < H_c$ 时, 峰值间隔 Δt 随峰值出现

次数 n 的增加而不断减小, 且 Δt 的对数与 n 大体呈线性关系; 随着颗粒厚度的增加, Δt 的衰减不再显著, 基本保持不变. 这说明颗粒物质在受到冲击后, 其内部会有一个周期性的振荡现象. 当颗粒厚度较小时, 该振荡现象明显, 且振荡周期随着系统能量的降低而呈递减趋势; 当颗粒厚度较大时, 该振荡因颗粒系统对冲击能量的快速耗散而不显著.

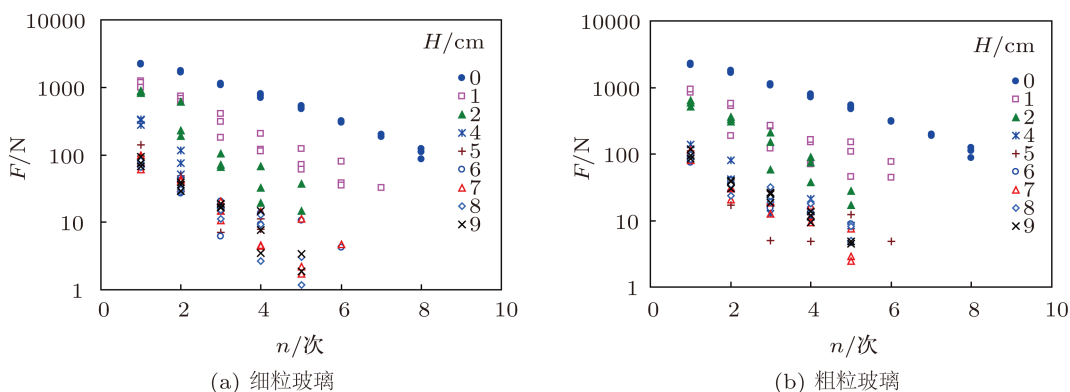


图 6 不同颗粒厚度 H 下冲击力峰值 F 随峰值次数 n 的衰减过程 (a) 细粒玻璃; (b) 粗粒玻璃

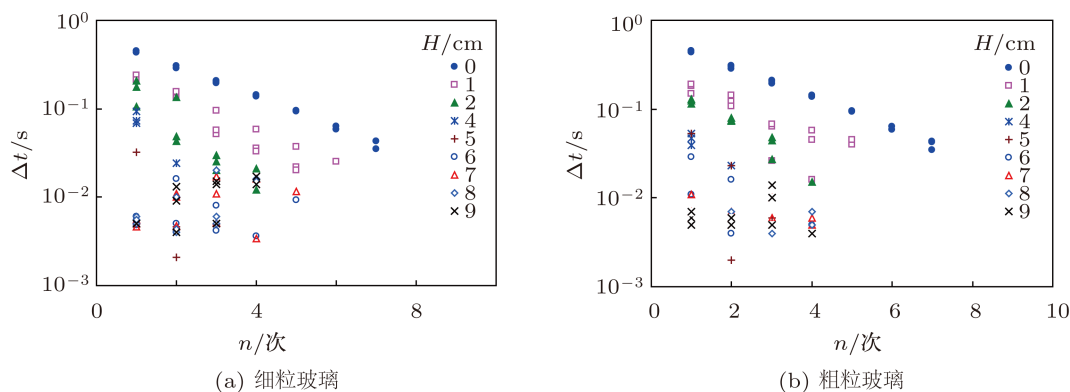


图 7 不同颗粒厚度 H 下冲击力峰值间隔 Δt 的变化规律 (a) 细粒玻璃; (b) 粗粒玻璃

将不同颗粒厚度下冲击力时程中的前两次峰值间的时间间隔 Δt 进行确定, 对三组试验的 Δt 取均值后得到其与填充厚度 H 的关系如图 8 所示. 这里对粗砂和细砂的测试结果也进行了确定. 可以看出, 当 $H < H_c$ 时, Δt 均随 H 的增加而呈递减趋势; 当 $H > H_c$ 时, Δt 不再受 H 的影响. 这说明颗粒系统在冲击后的振荡周期会随颗粒厚度的增加而减小, 并当厚度达到其临界值 H_c 时, 这种振荡现象因颗粒系统对冲击能量的快速耗散而趋于消失. 此外, 砂粒的 Δt 要明显低于玻璃颗粒, 也说明砂粒的耗能效果要优于玻璃颗粒.

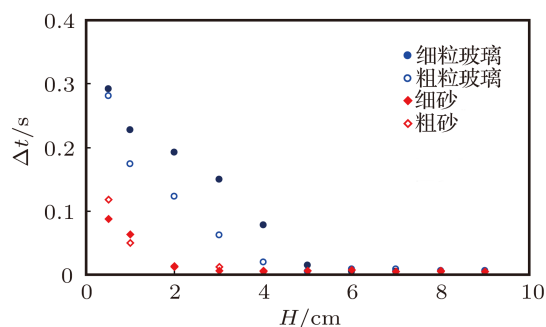


图 8 冲击力峰值时间间隔 Δt 与冲击厚度 H 的对应关系

将冲击力时程中第一次峰值出现的时间设

为 0, 在不同填充厚度下的冲击力峰值 F 与其所出现时间 t 的关系绘于图 9 中. 可以发现, 当 $H < H_c$ 时, 冲击力峰值 F 随颗粒厚度 H 的增加而下降,

且各冲击峰值出现的时间 t 也随 F 的减小而降低; 当 $H > H_c$ 时, 颗粒厚度对 F 的影响不显著. 这再一次证明了颗粒厚度对缓冲性能的影响.

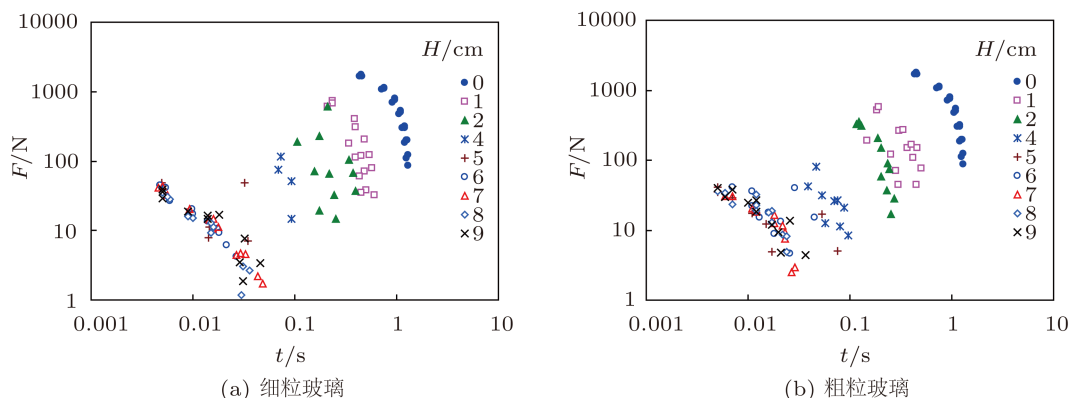


图 9 不同颗粒厚度下冲击力峰值 F 与所出现时间 t 的对应关系 (a) 细粒玻璃; (b) 粗粒玻璃

5 结论

颗粒物质是一种典型的能量耗散体系, 其对冲击荷载具有良好的缓冲性能. 以垂直冲击荷载下圆筒内的颗粒物质为研究对象, 对玻璃颗粒和砂粒两种典型颗粒物质的缓冲性能进行了试验研究. 结果表明, 颗粒的粒径、颗粒形态、材料性质和填充厚度对颗粒物质缓冲性能均有影响. 由于砂粒具有不同的颗粒形态, 表面摩擦系数大, 其缓冲性能明显优于具有规则形态的玻璃颗粒, 且大粒径颗粒的缓冲性能要优于小粒径颗粒.

无论是玻璃颗粒还是砂粒, 颗粒厚度是影响缓冲性能的关系因素, 并存在一个临界厚度 H_c . 对于玻璃颗粒有 $H_c = 5$ cm, 对于砂粒有 $H_c = 2$ cm. 当颗粒厚度低于 H_c 时, 缓冲性能随颗粒厚度的增加

而增强; 当颗粒厚度高于 H_c 时, 缓冲性能对颗粒厚度不再敏感. 在冲击荷载下, 颗粒系统呈现一定的振荡现象, 并在颗粒厚度低于临界厚度时表现出显著的规律性. 通过对冲击力峰值和时间间隔对应关系的分析, 发现颗粒厚度越大, 冲击力峰值衰减的越快, 即缓冲性能越强.

通过对不同类型颗粒物质缓冲性能的试验研究, 揭示了粒径、形态和颗粒厚度等因素对缓冲性能的影响. 对颗粒系统缓冲性能的内在机理研究, 尚需在不同颗粒材料、不同冲击能量等条件下进一步开展系统的研究. 此外, 采用离散元方法可对颗粒系统中力链结构、系统耗能等因素进行全面分析, 有助于对颗粒物质缓冲性能从不同角度进行深入理解.

- [1] Lu K Q, Liu J X 2004 *Physics* **33** 629 (in Chinese) [陆坤权, 刘寄星 2004 物理 **33** 629]
- [2] Sun Q C, Wang G Q 2009 *Introduction of Particle Material Mechanics* (1st Ed.) (Beijing: Science Press) p3 (in Chinese) [孙其诚, 王光谦 2009 颗粒物质力学导论. (北京: 科学出版社) 第 3 页]
- [3] Ji S Y 2007 *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics* **39** 223 (in Chinese) [季顺迎 2007 力学学报 **39** 223]
- [4] Ji S Y, Shen H H 2006 *Journal of Engineering Mechanics* **132** 1252

- [5] Sun Q C, Wang G Q 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 4667 (in Chinese) [孙其诚, 王光谦 2008 物理学报 **57** 4667]
- [6] He S M, Wu Y, Li X P 2008 *Engineering Mechanics* **25** 19 (in Chinese) [何思明, 吴永, 李新坡 2008 工程力学 **25** 19]
- [7] Du Y C, Wang S L, Zhang J L 2010 *International Journal of Impact Engineering* **37** 309
- [8] Wu C Y, Li L Y, Thornton C 2005 *International Journal of Impact Engineering* **32** 593
- [9] Etsion I, Kligerman Y, Kadin Y 2005 *Journal of Solids and Structures* **42** 3716

- [10] Liu L, Zhang L, Liao S 2010 *Science in China* **53** 892
- [11] Mueth D M, Jaeger H M, Nagel S R 1998 *Phys. Rev. E* **57** 3164
- [12] Goldenberg C, Goldhirsch 2002 *Phys. Rev. Lett.* **89** 084302
- [13] Luding S 2005 *Nature* **435** 159
- [14] Goldman D I, Umbanhowar P 2008 *Phys. Rev. E* **77** 021308
- [15] Uehara J S, Ambroso M A, Ojha R P, Durian D J 2003 *Phys. Rev. Lett.* **90** 194301
- [16] Pacheco V F, Ruiz J C S 2009 *Phys. Rev. E* **80** 060301
- [17] Ogale S B, Shinde S R, Karve P A, Ogale A S, Kulkarni A, Athawale A, Phadke A, Thakurdas R 2005 *Physica A* **362** 181
- [18] Antypov D, Elliott J A 2011 *Phys. Rev. E* **84** 021303
- [19] Katsuragi H, Durian D J 2007 *Nature Phys.* **3** 420
- [20] Zhao Z, Liu C S 2008 *Phys. Rev. E* **78** 031307
- [21] Addiss J, Collins A, Bobaru F, Promratana K, Proud W G 2009 *Dymat International Conferences Brussels Belgium*, September 7–11, 2009 p59
- [22] Duncan M R, Wassgren C R, Krousgrill C M 2005 *Journal of Sound and Vibration* **286** 123
- [23] Mao K M, Wang M Y, Xu Z W, Chen T N 2004 *Powder Technol.* **142** 154
- [24] Xia Z W, Shan Y C, Liu X D 2007 *Journal of Aerospace Power* **10** 1737 (in Chinese) [夏兆旺, 单颖春, 刘献栋 2007 航空动力学报 **10** 1737]
- [25] Remillat C 2007 *Mechanics of Materials* **39** 525
- [26] Seguin A, Bertho Y, Gondret P 2008 *Phys. Rev. E* **78** 010301

Experiments on shock-absorbing capacity of granular matter under impact load*

Ji Shun-Ying[†] Li Peng-Fei Chen Xiao-Dong

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

(Received 5 January 2012; revised manuscript received 6 March 2012)

Abstract

Granular matter is a complex energy dissipation system. The friction and the viscous contacts among particles can dissipate effectively the system energy caused by external impact load. The force chain structure in granular system can extend the local impact in spatial dimension and expand the instantaneous impact in temporal dimension, thus to obtain the effective shock-absorbing effect. To investigate the absorbing capacity of granular matter under an impact load, in the present study, we develop an experimental system, in which a rock ball impacts granular matter in a cylinder under gravity, and the impact force on the cylinder bottom is measured with three load cells. The influences of particle size, material property, thickness of granular matter on shock-absorbing capacity are discussed. The results show that irregular particles have more shock absorbing capacity, while the large-size particles have a slightly higher shock absorbing capability than the small-size particles. The thickness of granular matter, H , is a key parameter to affect the shock-absorbing. Critical thickness, H_c , is obtained in the experiments. The shock-absorbing capacity of granular matter is enhanced with H increasing when $H < H_c$, while H has little influence on shock-absorbing when $H > H_c$. The results above are obtained with constant impact energy. Critical thickness H_c should be a function of impact energy and will be determined in the next study. With the experiments on shock-absorbing capacity of granular matter, it can reveal basic mechanical behaviors of granular materials and be applied in mechanical vibration absorptions.

Keywords: granular matter, shock-absorbing capacity, energy dissipation, impact load

PACS: 47.70.-n, 45.70.Mg, 45.50.Tn

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 11172063), the National Basic Research Program of China (Grant No. 2010CB731502), and the Program for New Century Excellent Talents in University of Ministry of Education of China (Grant No. NCET-08-0072).

[†] E-mail: jisy@dlut.edu.cn