

doi: 10.7690/bgzdh.2016.01.003

颗粒阻尼器冲击试验研究

张海东, 洪永明, 杜 杰

(中国人民解放军 73056 部队, 江苏 镇江 212000)

摘要: 针对颗粒阻尼器具有结构简单、可靠性高和适应恶劣环境工作等优点, 设计一款圆柱形颗粒阻尼器。经过与传统液体阻尼器的分析对比, 利用冲击试验对颗粒阻尼器进行研究, 通过阻尼器阻力-位移和阻力-速度等力学特性曲线深入分析各部件对阻尼能耗的影响规律, 并找出颗粒阻尼器在经受冲击时最可能出现性能失效的情况, 证实了颗粒阻尼器耗散冲击动能的可行性, 为颗粒阻尼器进一步的优化设计提供了充分的实验基础。

关键词: 颗粒阻尼; 冲击试验; 动力学分析

中图分类号: TJ02 **文献标志码:** A

Impact Test on the Granular Damper

Zhang Haidong, Hong Yongming, Du Jie

(No. 73056 Unit of PLA, Zhenjiang 212000, China)

Abstract: Design a cylindrical particle damper, according to particle damper characteristics of simple structure, high reliability and poor working environment adaptability, etc. After comparing with the traditional liquid damper, using impact test study of particle damper, and analyzing resistance-displacement and resistance-speed mechanics characteristic curve, to analyze the influence laws of the various components of the damping energy consumption. And to identify the cases of the particle damper performance failure most likely to occur when subjected to impact, demonstrate the feasibility of particle damper dissipate impact energy, and provide sufficient experimental basis for further optimizing the design of the particle damper.

Keywords: granular damping; impact test; dynamic analysis

0 引言

固体颗粒阻尼器是通过颗粒之间、颗粒与杆和筒壁之间的相互作用耗散冲击能量。固体颗粒阻尼器具有结构简单、成本低廉和对密封要求不严格等优点^[1-3]。但大量颗粒组成的系统是一个复杂的非线性系统, 具有许多不同于液体和固体的性质, 筒内颗粒表现出十分复杂的运动行为和力学行为, 无法直接使用现有基本理论对小球耗能过程加以严格解释; 因此, 笔者主要通过冲击试验对阻尼器各部件的作用情况进行研究, 并利用力学性能和耗能曲线定性分析阻尼器各部件对整体受力和耗能的影响。

1 固体阻尼器构成

固体颗粒阻尼器主要由圆柱形筒、阻尼杆、压紧弹簧、活塞和耗能小球等组成, 如图 1 所示。

阻尼器工作原理: 当阻尼杆受到冲击时, 阻尼杆以速度 v 快速后坐插入金属小球中间, 阻尼杆与金属小球, 金属小球之间产生摩擦将冲击动能转化为热能。阻尼杆插入的深度逐渐加大, 阻力增加, 同时活塞沿着弹簧压缩的方向相对运动, 弹簧对金

属小球的压紧力也逐渐增大, 耗能也逐步加大, 最终实现能量的耗散。

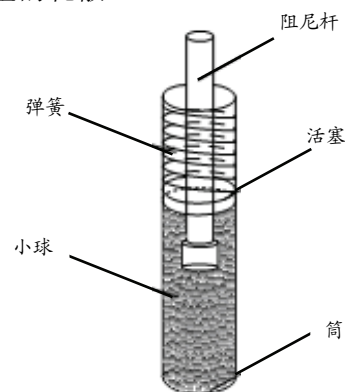


图 1 固体阻尼器结构简图

2 冲击试验

试验设计的落锤式冲击试验台主要由冲击平台(重锤)、导轨、棘轮、紧固装置、底板和起吊装置等组成。图 2 为设计的落锤式冲击试验台整体实物。

测试系统主要由 CA-YD-107 加速度传感器、TLM 位移传感器、电荷放大器、信号调理器、NI PXI-6225 数据采集卡和计算机组成, 如图 3 所示。

收稿日期: 2015-08-23; 修回日期: 2015-10-08

作者简介: 张海东(1976—), 男, 江苏人, 本科, 高工, 从事装备保障研究。

通过 LabVIEW 程序记录试验数据，直接显示加速度-时间曲线和位移-时间曲线，并进行信号分析和处理，得到耗能-时间曲线、速度-位移曲线和后坐阻力-时间曲线。

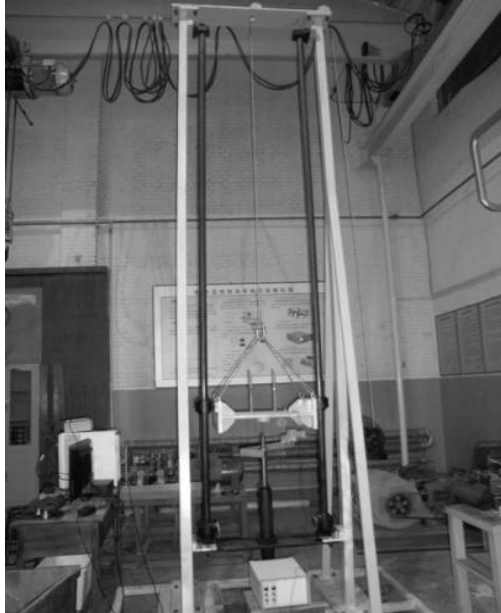


图 2 落锤式冲击试验台

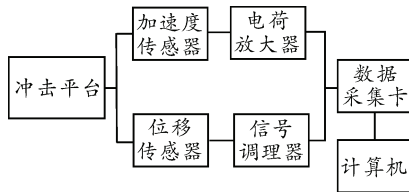


图 3 测量系统连接示意图

3 试验信号处理

1) 加速度-时间曲线。

如图 4 所示，加速度信号在冲击过程中受到外界噪声信号的影响，在冲击时间点附近受到较大的干扰，除去这些干扰可以确定加速度曲线为单脉冲非对称曲线。在试验曲线中出现了较为明显的波峰，说明在冲击瞬间，阻力出现了一个极值，其主要原因是冲击瞬间，筒内小球系统处于非稳态，小球转动和滑动机制尚未形成。过了冲击峰值后，随着阻尼杆插入小球，小球系统作用产生阻力。随着阻力作用，阻尼杆插入小球的速度逐渐降低，小球参与作用的百分比逐渐降低，导致阻力作用也随之逐步降低，加速度曲线也逐渐稳定下降。当第 1 次达到零点后，系统会有小幅震荡，之后会保持在零点。

通过分析加速度-时间曲线可以得出：加速度产生一个较大的峰值，且这种峰值会随着冲击能量的增加而增大，是造成阻尼杆和小球损坏而导致阻尼器失效的一个重要原因。

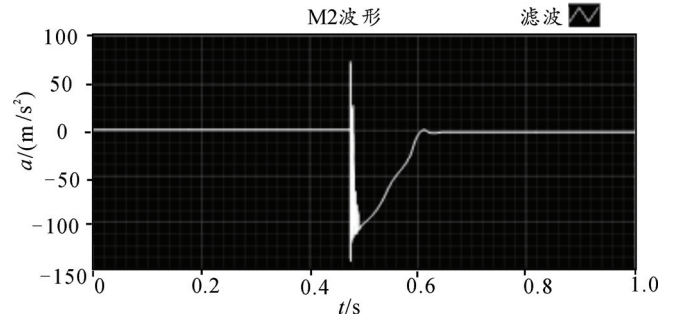


图 4 加速度实测信号

当冲击平台总质量为 100 kg 时，阻尼器在不同冲击高度下所能达到的加速度幅值如表 1 所示。从表中的数值可以看出，随着冲击能量的增加，冲击加速度幅值也有较大的增加。

表 1 冲击试验加速度幅值

冲击高度/m	加速度幅值/(m/s ²)
1.0	95.36
2.0	118.79
3.0	132.31
4.0	145.74

2) 位移-时间曲线。

从图 5 可以看出：阻尼杆插入小球的距离随着时间的增加而逐步增加，直至运动停止时达到最大值；同时，位移增量存在一定的波动，但总体呈现逐渐递减的趋势。

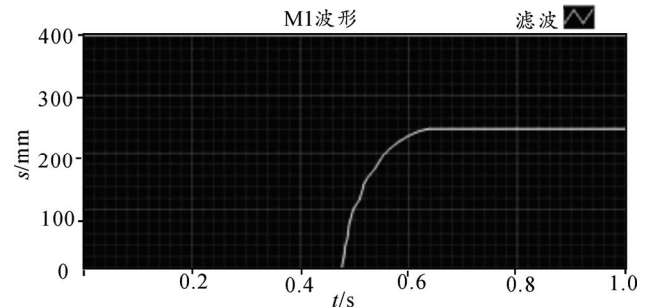


图 5 位移实测信号

当冲击平台总质量为 100 kg 时，阻尼器在不同冲击高度下所能达到的位移幅值如表 2 所示。

表 2 冲击试验位移幅值 mm

冲击高度×10 ³	位移幅值
1.0	120.32
2.0	183.77
3.0	224.12
4.0	274.33

4 力学性能曲线

阻尼器的力学性能主要是从阻力随位移、速度变化速率和波动得出。通过分析阻力-位移曲线和阻力-速度曲线^[4-5]，可以确定在哪个位移点和速度值出现最大的阻力，判断出阻尼器可能出现工作失效情况，并通过进一步的优化设计使阻力的峰值降低，

增强阻尼器的实际耗能水平。

1) 阻力-位移曲线。

根据得到的加速度信号可以计算出阻力-时间曲线，结合已知的位移-时间曲线，可得阻力-位移曲线。位移坐标轴和阻力-位移曲线围成的面积就是阻尼器所耗散的能量，理论上出现近似矩形的曲线才能达到最大的耗能；因此，阻力-位移曲线能够最好地表达阻尼器耗散性能的特性。

图 6 所示为冲击平台质量为 100 kg 时，4 种不同高度释放时的阻力-位移图。从冲击平台接触阻尼杆开始到阻力恢复到零时刻结束。同时设定在冲击平台接触阻尼杆瞬间的位移为 0，则位移为冲击作用下阻尼杆在小球中的位移。

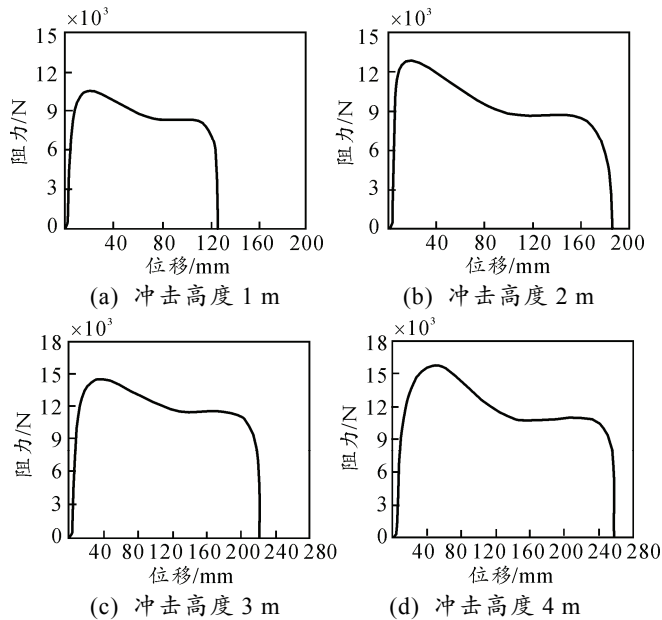


图 6 阻尼器阻力-位移图

每次冲击试验中，冲击平台和阻尼杆从接触到完全碰撞，阻尼力从零快速地变化到最大；当碰撞完成，冲击平台和阻尼杆以相同的速度一起运动，其速度在阻力的作用下开始逐渐减小，阻尼杆的位移逐渐增加；当速度下降为零时，阻尼杆的位移达到最大值，此时系统处于平衡状态。

由图 6 所示的固体颗粒阻尼器阻力-位移曲线在开始阶段迅速上升出现一个尖峰，然后随时间逐渐减小，在作用结束阶段迅速下降，呈现出一个近似矩形的曲线，其特征为能迅速达到阻力的最大值，同时也可以较快回落，能够达到一个较大的耗能目的。但在位移开始阶段出现的一个阻力尖峰值，可能是成为导致阻尼器失效的主要原因之一。

2) 阻力-速度曲线。

对位移曲线求导可得速度-时间曲线，结合已知

的阻力-时间曲线，可以用阻力-速度曲线代表冲击过程中阻力随速度变化的过程。如图 7 所示，质量为 100 kg 的冲击平台在不同高度释放时的阻力-速度曲线。其采集时间为阻尼杆和冲击平台接触时刻起，到加速度第 1 次变为零后延时的一段时间。

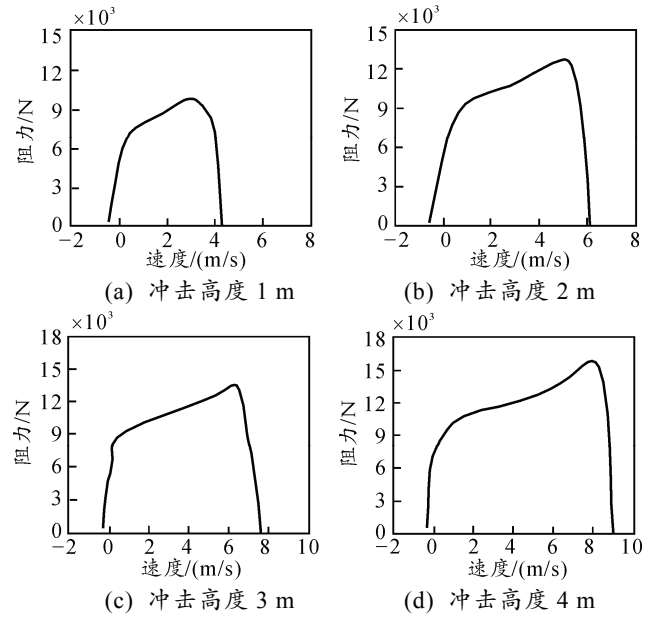


图 7 阻尼器阻力-速度曲线

分析阻力-速度曲线可以发现一个明显的非线性特征：阻尼力除了开始阶段的突增和结束阶段的突减之外，在作用全过程中呈现出阻力随速度下降逐步降低的趋势；同时，冲击产生的阻力也随冲击能量的增加而增大，在阻力和速度达到峰值之后，系统整体趋于稳定，阻力和速度都逐渐下降到零。4 种不同高度释放下的冲击试验所得到的曲线整体走势基本相似；但随着冲击高度的提升，阻力峰值更为明显，速度幅值也随之增加。

5 各部件影响分析

通过多组试验数据总结，发现影响固体阻尼器效果的因素很多，主要包括 2 类：一是小球直径对缓冲耗能特性的影响；二是阻尼杆杆头的不同形状对缓冲耗能特性的影响。试验结果总结为以下几点：

1) 小球直径对阻尼器性能的影响。

固体阻尼器所使用的固体小球自身特性是影响阻尼效果的重要因素，笔者通过试验研究了颗粒直径为 3、5、6 mm 的轴承钢小球在相同冲击条件下，耗能特性的不同来研究颗粒直径对阻尼效果的影响规律。试验中使用冲击高度为 2 000 mm、冲击平台质量为 100 kg 的冲击实验，进行小球尺寸影响规律的对比和分析。

如图 8 所示：试验采用 3 种直径不同的小球，直径为 5 mm 的小球滞回曲线最近似矩形，且阻力峰值最低，阻尼器工作过程更加平稳；可见，在选择耗能小球时，小球的直径并不是越大越好或越小越好。

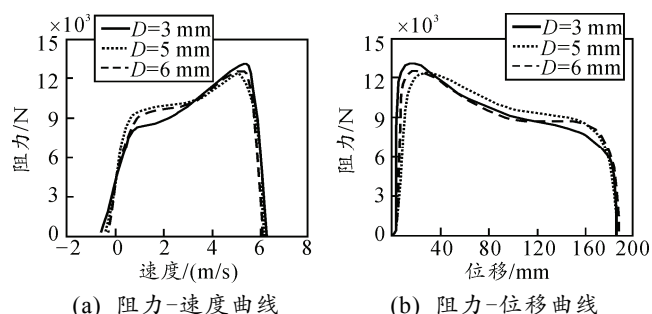


图 8 不同直径颗粒试验曲线

分析整个冲击过程可知：当冲击平台冲击阻尼杆时，系统处于一种非稳态，由于固体的不可压缩性，系统在冲击瞬间产生冲击峰值，只有当筒内小球转动和滑动机制开始产生作用时，系统才会趋于稳定。从颗粒摩擦机理可知颗粒直径越大，颗粒之间的摩擦系数也越大^[6-7]；因此，6 mm 直径小球开始产生转动和滑动作用的阻力峰值比 5 mm 小球相对较大。但随着颗粒直径的进一步减小，当颗粒直径减小到 3 mm 时，相同体积下 3 mm 直径的小球数量远大于 5 mm，是筒内小球系统产生相互滑动和转动时的阻力峰值大于 5 mm 直径小球；因此，本实验中 5 mm 直径小球在冲击试验中也显示出来最优的滞回曲线和最小的阻力峰值。

2) 阻尼杆杆头对阻尼器性能的影响。

阻尼杆杆头形状的变化会使阻尼杆在小球中的作用面积产生显著变化，不仅对小球参与作用的概率有直接影响，而且对阻尼器耗能和缓冲特性也造成较为明显地影响；因此，笔者设计了 3 种驻退杆杆头，如图 9 所示。

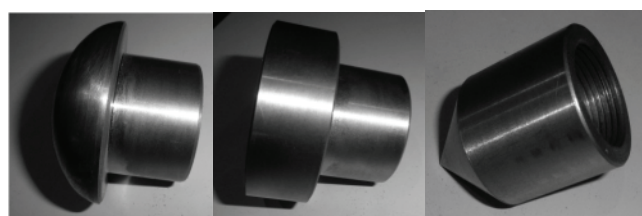


图 9 不同形状驻退杆杆头

图 9 不同形状驻退杆杆头

由图 10 可以看出：圆柱形杆头和圆弧形杆头在冲击过程中的冲击峰值、位移和整体滞回曲线都比较相似；圆锥形杆头的冲击峰值则较低，位移距离

也有了较大增加。出现这种现象的原因主要是：①圆锥形杆头在小球系统内的作用面积较小，带动小球参与运动的能力稍低于圆柱形和圆弧形杆头，因此小球耗散能量的速度较低，作用时间和作用距离则会增加；②由于圆弧形和圆柱形杆头直径为 60 mm，可能导致小球受挤压后向上运动的空隙过小，产生小球出现局部卡死情况，从而增加后坐阻力。

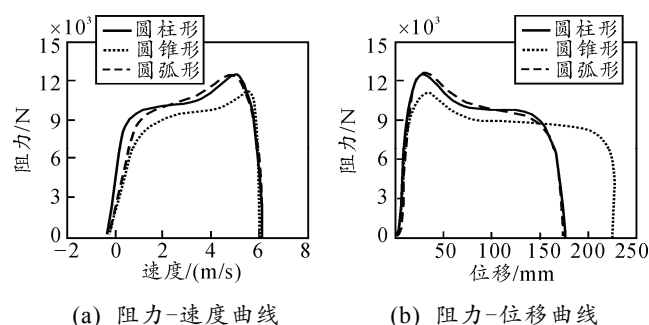


图 10 不同杆头试验曲线

圆锥形杆头比其他 2 种杆头的滞回曲线更加近似矩形，力学性能较好，在位移和作用时间满足要求的情况下圆锥形杆头可以使阻尼器耗能过程更加平稳；但在阻尼杆位移有限和后坐阻力过大的情况下，则需根据要求和计算选择合适的阻尼杆头。

6 结论

通过大量冲击试验，笔者研究了颗粒阻尼器在冲击条件下的耗能情况和力学性能，分析了小球直径和阻尼杆杆头形状对阻尼器耗能效果的影响，找出了颗粒阻尼器在经受冲击时最可能出现性能失效的情况，为颗粒阻尼器的优化设计提供了实验基础。

参考文献：

- [1] 彭政, 陆坤权, 厚美瑛. 阻塞态颗粒介质的慢速阻力[J]. 物理学报, 2009, 58(8): 6566-6572.
- [2] Hou M T, Peng Z, Liu R, et al. Projectile impact and penetration in loose granular bed[J]. Sci Technol Adv Mat, 2005(6): 855-858.
- [3] Hou M T, Peng Z, Liu R, et al. Dynamics of a projectile penetrating in granular systems[J]. Phys Rev E, 2005, 72: 62301-62304.
- [4] 贾九红. 胶泥缓冲器的耗能机理研究和设计[D]. 上海: 上海交通大学, 2007: 33-35.
- [5] 汪玉, 华宏星. 舰船现代冲击理论及应用[M]. 北京: 科学出版社, 2005: 15-22.
- [6] 刘雁梅. 非阻塞性微颗粒阻尼加筋板壳振动功率流特性研究[D]. 西安: 西安交通大学, 2000: 6-11.
- [7] 陆厚根. 粉体技术导论[M]. 上海: 同济大学出版社, 1998: 41-43.