

文章编号:1000-8055(2011)05-1159-07

基于离散单元法的二维颗粒阻尼研究

唐 伟¹, 王延荣¹, 王相平², 杨剑秋¹

(1. 北京航空航天大学 能源与动力工程学院, 北京 100191;

2. 中国航空工业集团公司 沈阳航空发动机设计研究所, 沈阳 110015)

摘 要: 针对自由端带空腔的 L 型悬臂梁建立了二维颗粒阻尼物理模型, 发展并利用离散单元法 (DEM) 对二维颗粒阻尼进行了数值仿真, 重点考查了二维空腔尺寸对颗粒阻尼的影响规律: ①高度非线性的颗粒阻尼能够显著地抑制结构振动, 阻尼值至少比金属材料阻尼大一个数量级; ②当无量纲加速度 $\Gamma < 1$ 时, 颗粒阻尼很小; 当 $\Gamma > 1$ 时, 随 Γ 增加, 颗粒阻尼先增大后减小, 即存在临界无量纲加速度使得阻尼最大; ③颗粒阻尼的峰值随水平无量纲碰撞间隙的增加而增大, 并向 Γ 减小方向略微偏移; 而随垂直无量纲碰撞间隙增加, 该峰值也增大, 但却向 Γ 增大方向偏移。所发展方法的计算值与实验结果吻合很好, 可用于颗粒阻尼器的设计及应用。

关 键 词: 颗粒阻尼; 离散单元法 (DEM); 振动抑制; 空腔尺寸; 非线性阻尼

中图分类号: V231.92

文献标志码: A

Numerical study of particle damping in two dimensions by use of discrete element method

TANG Wei¹, WANG Yan-rong¹, WANG Xiang-ping², YANG Jian-qiu¹

(1. School of Jet Propulsion,

Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China;

2. Shenyang Aeroengine Research Institute,

Aviation Industry Corporation of China, Shenyang 110015, China)

Abstract: The physical model of particle damping in two dimensions was developed for the cavity with particles inside located at the free end of an L-shaped beam, and discrete element method (DEM) was used to investigate the effects of two-dimensional cavity sizes on particle damping. The results show that: (1) the highly nonlinear particle damping, which is at least one order of magnitude higher than the intrinsic material damping of metals, can significantly suppress the vibration of structures; (2) when dimensionless acceleration amplitude $\Gamma < 1$, particle damping is very small; however, when $\Gamma > 1$, it firstly increases and then decreases with the increase of Γ , indicating that there is a critical dimensionless acceleration amplitude for the highest damping; (3) the peak value of particle damping increases and appreciably shifts to the lower Γ with the increase of horizontal dimensionless impact clearance. However, it also increases but shifts to a higher Γ with the increase of vertical dimensionless impact clearances. The simulation results agree well with the experimental data, and can be applied to the practical design of a particle damper.

Key words: particle damping; discrete element method (DEM);
vibration suppression; cavity size; nonlinear damping

收稿日期: 2010-05-17; 修订日期: 2010-08-07

基金项目: 国家重点基础研究发展计划 (2007CB210103)

作者简介: 唐伟 (1984—), 男, 四川遂宁人, 硕士生, 主要从事航空发动机结构强度、振动及气弹稳定性研究。

在航空发动机的研制和使用过程中,振动故障难以避免.据统计,在航空发动机总故障中振动故障已超过60%^[1].现代航空发动机趋向于采用整体叶盘转子来提高性能,而且某些部件除了要承受较高的温度外,还得承受很大的离心载荷.在这些极苛刻环境下,干摩擦、黏弹性材料等传统阻尼技术难以持续地达到良好的减振效果;而颗粒阻尼技术却显示了极大优势^[2-3]:构造简单、工作频率和温度范围广、附加质量小、抗老化、减振降噪效果好,在航空发动机空心风扇叶片和其他薄壁结构件上具有潜在的应用前景.

颗粒阻尼是能够达到较高机械阻尼的被动减振技术之一,它将装有金属或陶瓷材料等颗粒的空腔附着在结构振动较大的区域,通过颗粒与颗粒以及颗粒与空腔之间的非弹性碰撞和摩擦将动能转化为热能,从而达到减振目的.美国通用、波音等公司^[4]对GE-XTE45风扇叶盘进行了颗粒阻尼减振实验,初步研究表明颗粒阻尼可有效地抑制结构振动. Flower^[5]针对航天结构的颗粒阻尼进行了研究,并以悬臂梁实验进行验证.结果表明颗粒阻尼与空腔内部尺寸有关,尤其是沿振动方向的空腔尺寸. Flint^[6]对处于0~5 000 g离心载荷场中的颗粒阻尼进行了实验,考查了填充率、颗粒尺寸、形状以及材料等因素对颗粒阻尼的影响.实验结果表明,在高离心载荷下颗粒阻尼仍具有良好的减振效果. Friend和Kinra^[7], Bhatti和王延荣等^[8]将所有颗粒简化为单个质点来研究,其理论结果与实验结果吻合较好.离散单元法(DEM)能够真实地模拟每个颗粒的运动及其碰撞和摩擦耗能. Saeki^[9-10]采用DEM法对单自由度水平振动系统的颗粒阻尼进行了研究,进而对多元颗粒阻尼器进行了理论及实验研究,发现随阻尼器数目增加,最佳空腔尺寸将减小. Bai等人^[11-12]先后对活塞型和方型颗粒阻尼器进行了数值研究.此外,国内的陈天宁、徐志伟、毛宽民等人^[13-15]也利用DEM法对颗粒阻尼进行了数值研究,深入分析了颗粒阻尼的能量耗散机理,并进行了实验以验证其理论模型的正确性.

到目前为止,国内外对颗粒阻尼的理论及实验研究,其空腔的运动大多局限在一维方向上.因此,为了考查空腔在多维方向上运动时的颗粒阻尼特性,本文建立了L型梁二维颗粒阻尼模型,发展了二维颗粒阻尼的DEM法,并进行了数值仿真,得到了二维空腔尺寸对颗粒阻尼的影响规律,数值模拟与实验结果吻合得相当好.

1 理论与数值模型

1.1 空腔的运动方程

如图1(a)所示,二维颗粒阻尼模型由颗粒及自由端附有矩形空腔的等截面L型悬臂梁构成. L型悬臂梁水平段与竖直段长度之比约为3:1,竖直段较短,可作为刚性质量块来处理.空腔及竖直段梁质量为 M_a 、转动惯量为 I_a ,故该振动系统可简化为自由端带质量块的单自由度悬臂梁系统.实际上,空腔在水平和垂直两个方向上作平移运动,故可用图1(b)所示的二自由度系统来描述空腔的运动,两方向的运动通过颗粒与空腔壁面的相互作用力进行耦合.

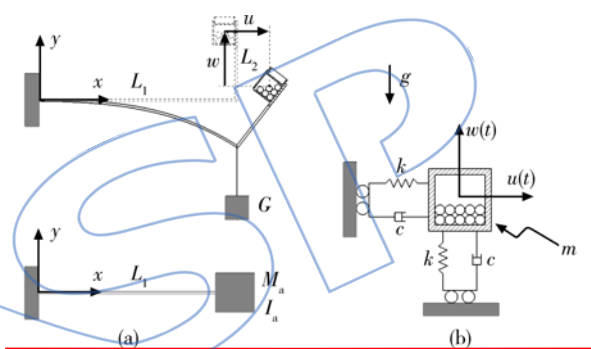


图1 L型梁简化模型

Fig. 1 Simplified model of L-shaped beam

设L型梁密度为 ρ ,弹性模量为 E ,横截面积为 A ,振动角频率为 ω ,振型函数为 $Y(x)$.根据上述假设可得,水平段梁的边界条件为

$$\begin{aligned} Y(0) &= 0; \quad Y'(0) = 0 \\ EJY''(L_1) &= \omega^2 I_a Y'(L_1) \\ EJY'''(L_1) &= -\omega^2 M_a Y(L_1) \end{aligned} \quad (1)$$

通过以上边界条件联立求解可得L型梁的振动频率为16.091 Hz,与实测频率16.086 Hz相差很小,从而验证了简化模型.

由归一化条件 $Y(L_1) = 1$ 确定振型函数,得到等效质量和等效刚度分别为

$$m = \rho A \int_0^{L_1} Y^2 dx + I_a [Y'(L_1)]^2 + M_a \quad (2)$$

$$k = EJ \int_0^{L_1} (Y'')^2 dx \quad (3)$$

空腔的运动微分方程为

$$\begin{bmatrix} m & 0 \\ 0 & m \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{u} \\ \ddot{w} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} c & 0 \\ 0 & c \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{u} \\ \dot{w} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} k & 0 \\ 0 & k \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u \\ w \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_{pu} \\ f_{pw} \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中“ $\cdot$ ”表示对时间求一阶导数, c 为等效阻尼;
 f_{pu}, f_{pw} 分别为颗粒与空腔内壁的相互作用力在
水平和垂直方向上的分量。

由式(4)可知,虽然质量、刚度和阻尼矩阵是
解耦的,但方程右端项颗粒对空腔的激励力却是
相互耦合的,因此空腔在两个方向上的运动状态
是相互耦合的。

1.2 颗粒的运动方程

在颗粒动力学领域,颗粒作为基本单元,每个
颗粒除了三个方向的平动外,还包括三个方向的
转动,共 6 个自由度;颗粒通常为可变形的球体,
颗粒之间发生碰撞时,会导致微小的变形量,从而
产生法向斥力和切向摩擦力。

颗粒碰撞模型如图 2 所示,半径均为 r ,位移
为 $\mathbf{P}_i$ 和 $\mathbf{P}_j$ 的颗粒,以平动速度 $\mathbf{V}_i, \mathbf{V}_j$ 和转动速度
 $\boldsymbol{\omega}_i, \boldsymbol{\omega}_j$ 发生碰撞,因此,碰撞相对变形量 δ_{ij} , 相对
法向速度 $\mathbf{V}_{nij}$, 相对切向速度 $\mathbf{V}_{tij}$ 可分别表示为

$$\begin{aligned} \delta_{ij} &= 2r - |\mathbf{P}_{ij}| \\ \mathbf{V}_{nij} &= (\mathbf{V}_{ij} \cdot \mathbf{n}_{ij}) \mathbf{n}_{ij} \\ \mathbf{V}_{tij} &= \mathbf{V}_{ij} - \mathbf{V}_{nij} - \frac{1}{2}(\boldsymbol{\omega}_i + \boldsymbol{\omega}_j) \times \mathbf{P}_{ij} \end{aligned} \quad (5)$$

式中 $\mathbf{P}_{ij} = \mathbf{P}_i - \mathbf{P}_j$ 为相对位移, $\mathbf{V}_{ij} = \mathbf{V}_i - \mathbf{V}_j$ 为
相对速度, $\mathbf{n}_{ij} = \frac{\mathbf{P}_{ij}}{|\mathbf{P}_{ij}|}$ 为法向单位矢量, $\boldsymbol{\tau}_{ij} =$
 $\frac{\mathbf{V}_{tij}}{|\mathbf{V}_{tij}|}$ 为切向单位矢量。当 $\delta_{ij} > 0$ 时,发生碰撞,
此时可根据接触力模型计算颗粒的受力。

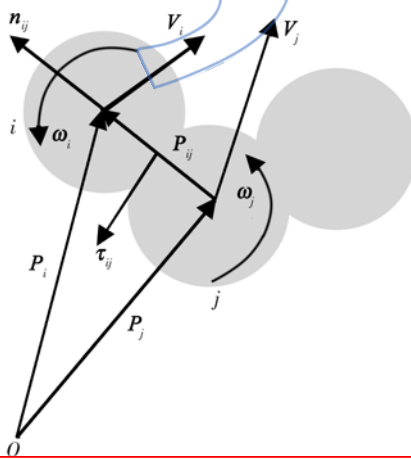


图 2 碰撞示意图

Fig. 2 Sketch of impact model

经过近几十年的发展,已出现几大类接触力
模型,可根据实际情况选择合适的法向力和切向
力模型。本文选择 Tsuji 等人提出的法向接触力
模型^[16],其表达为

$$f_n = k_n \delta_{ij}^{3/2} \mathbf{n}_{ij} - \eta \sqrt{m_i k_n} \delta_{ij}^{1/4} \mathbf{V}_{nij} \quad (6)$$

式中 m_i 为颗粒质量, η 是仅与恢复系数有关的阻
尼常数, k_n 为赫兹接触刚度,表达如下

$$k_n = \frac{4}{3} E_{\text{eff}} \sqrt{R_{\text{eff}}} \quad (7)$$

其中 R_{eff} 为等效接触半径,颗粒与颗粒(p-p)接触
时 $R_{\text{eff}} = r/2$, 颗粒与平壁(p-w)接触时 $R_{\text{eff}} = r$;
 E_{eff} 为等效弹性模量,由于本文所用颗粒几何和
材料参数均相同,故

$$E_{\text{eff}} = \begin{cases} \frac{E_i}{2(1-\nu_i^2)} & (\text{p-p}) \\ \frac{E_i E_0}{E_0(1-\nu_i^2) + E_i(1-\nu_0^2)} & (\text{p-w}) \end{cases} \quad (8)$$

式中 E 和 ν 分别表示弹性模量和泊松比,下标“ i ”
表示颗粒,“ 0 ”表示平壁。

切向力模型采用 Coulomb 摩擦定律

$$\mathbf{f}_t = -\mu |\mathbf{f}_n| \boldsymbol{\tau}_{ij} \quad (9)$$

同一时刻,颗粒 i 可能与多个颗粒相碰,故此
时颗粒所受的合力和合力矩分别为

$$\mathbf{f}_i = \sum_{j=1}^N (\mathbf{f}_n + \mathbf{f}_t) \quad (10)$$

$$\mathbf{T}_i = \sum_{j=1}^N \left[-\frac{1}{2} \mathbf{P}_{ij} \times \mathbf{f}_t \right] \quad (11)$$

由式(10)和式(11),可得颗粒 i 的运动方程为

$$\begin{aligned} m_i \ddot{\mathbf{P}}_i &= \mathbf{f}_i - m_i \mathbf{g} \\ I_i \ddot{\boldsymbol{\theta}}_i &= \mathbf{T}_i \end{aligned} \quad (12)$$

式中 $\mathbf{g}$ 为重力加速度, $\boldsymbol{\theta}_i$ 为颗粒转角, I_i 为颗粒
的转动惯量(对于球体 $I_i = (\frac{2}{5} m_i r_i^2)$)。

1.3 数值积分格式

通过上述分析可以发现,颗粒之间以及颗粒
与空腔之间发生碰撞时的运动微分方程是高度非
线性的,因此只能通过数值积分方法进行求解。在
颗粒阻尼器中,颗粒数目通常介于几百到几十万,
而为了满足收敛条件,数值模拟时间步一般取为
碰撞时间的 $1/50$ ($10^{-5} \sim 10^{-8}$ s 量级),因此选取
一种有效的数值积分格式显得尤为重要。

中心差分格式^[17]是目前普遍采用的数值格
式。该方法将颗粒速度和位置错开半个时间步
 $\Delta t/2$ 进行积分,然后由颗粒位置计算接触力,其
具体表达如下

$$\mathbf{V}_i^{(t+\Delta t/2)} = \mathbf{V}_i^{(t-\Delta t/2)} + \frac{\mathbf{f}_i^{(t)} - m_i \mathbf{g}}{m_i} \Delta t \quad (13)$$

$$\boldsymbol{\omega}_i^{(t+\Delta t/2)} = \boldsymbol{\omega}_i^{(t-\Delta t/2)} + \frac{\mathbf{T}_i^{(t)}}{I_i} \Delta t \quad (14)$$

由 $t + \Delta t/2$ 时刻的速度,计算 $t + \Delta t$ 时刻

的位移

$$\mathbf{P}_i^{(t+\Delta t)} = \mathbf{P}_i^{(t)} + \mathbf{V}_i^{(t+\Delta t/2)} \Delta t \quad (15)$$

$$\boldsymbol{\theta}_i^{(t+\Delta t)} = \boldsymbol{\theta}_i^{(t)} + \boldsymbol{\omega}_i^{(t+\Delta t/2)} \Delta t \quad (16)$$

在得到 t 时刻的位移后,就可进行接触识别,而 DEM 法中计算时间的大部分是颗粒接触对的识别,本文采用的是 Link-Cell 法并结合速度表进行接触识别,其具体过程可参考文献[18-19].

1.4 阻尼的确定

定义 1 碰撞间隙(Δ). 如图 3 所示,当颗粒按立方体晶胞格式规则排布时,空腔尺寸与颗粒层总高度之差. 对于同一实验配置,颗粒质量不变,因此水平和垂直碰撞间隙满足下列关系:

$$d_h(d_v - \Delta_v) = d_v(d_h - \Delta_h) \quad (17)$$

由式(17)可知,当某方向上的碰撞间隙改变时,另一方向上的碰撞间隙也会随之发生变化,即水平与垂直碰撞间隙具有依赖关系. 若要改变某方向的碰撞间隙而又要保持另一方向上的碰撞间隙不变,则只有通过改变空腔在这两个方向上的尺寸比来实现.

无量纲碰撞间隙可表示为

$$\Delta' = \frac{\Delta \cdot \omega_n^2}{g} \quad (18)$$

式中 ω_n 为结构(空腔)的固有振动频率, g 为重力加速度.

相应地,无量纲加速度可以表示为

$$\Gamma = \frac{x \cdot \omega_n^2}{g} = \frac{v \cdot \omega_n}{g} \quad (19)$$

式中 x, v 分别为空腔振动位移和速度的幅值.

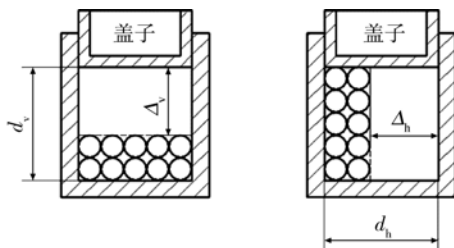


图 3 碰撞间隙的定义

Fig. 3 Definition of the impact clearances

本文采用文献[7]对颗粒阻尼的定义来描述减振效果,即

定义 2 颗粒阻尼可表示为

$$\Psi_i = \frac{\Delta h_i}{h_i} \quad (20)$$

式中 Δh_i 为第 i 个振动周期内因碰撞和摩擦所消

耗的能量, h_i 为该周期内的最大动能.

如果颗粒在空腔速度衰减曲线的峰值 V_i 和 V_{i+1} 处均与空腔接触,则

$$\Delta T_i = \frac{1}{2} M (V_i^2 - V_{i+1}^2) \quad (21)$$

式中 M 为结构总质量. 由于振动系统的速度响应是逐渐衰减的,因此,颗粒阻尼由下式确定:

$$\Psi_i = \frac{V_i^2 - V_{i+1}^2}{V_i^2} \quad (22)$$

2 实验验证

实验采用的等截面 L 型悬臂梁具有如下参数:材料为 1Cr18Ni9Ti,密度为 7900 kg/m^3 ,弹性模量为 184.0 GPa ;水平段长为 250 mm ,垂直段长为 85 mm ;其矩形截面宽为 30.2 mm ,厚为 2.85 mm . 空腔内部尺寸在水平面内分别为 20.12 mm 和 27.28 mm ;铅垂方向尺寸可变,最大值为 28.3 mm . L 型梁、空腔以及颗粒的质量分别为 227.7 g , 77.2 g 和 16.63 g .

如图 4 所示,实验采用非接触测量的方式进行,测试系统主要由 OFV-5000 型振动控制仪和 PSV-400 激光扫描头组成的高速扫描式激光测振仪以及数据采集系统构成.

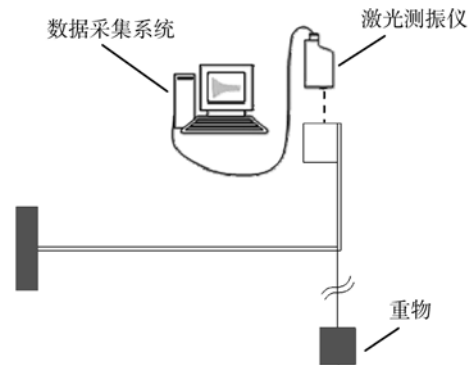


图 4 实验设备示意图

Fig. 4 Sketch of the experimental setup

无量纲碰撞间隙 (Δ'_h, Δ'_v) 分别为 (1.06, 1.17), (6.49, 3.75) 和 (10.35, 7.93) 时,对颗粒阻尼进行了测试. 其中每种空腔测试均考虑了 16 种不同初始条件,且对各种初始条件均进行了 3 次重复实验,重复性很好,选择其中较好的数据作为实验最终结果. 表 1 列出了实验和数值模拟的系统参数.

表1 实验和数值模拟的系统参数

Table 1 System parameters used in simulations and experiments

L 型梁		颗粒	
等效质量/kg	0.202	数目	4125
等效刚度/(N/m)	2071.48	材料	Steel
等效阻尼/(kg/s)	0.06	直径/m	0.001
固有频率/Hz	16.09	密度/(kg/m ³)	7700
		摩擦因数 μ	0.28
		阻尼常数 η	0.094

3 结果与分析

本文通过实验和数值模拟的方法,考查了二维空腔尺寸对颗粒阻尼的影响,获得了阻尼随无量纲加速度的变化规律。

图5分别给出了有无颗粒两种情况下的空腔速度响应随时间的变化曲线。可以看出,存在颗粒阻尼时,空腔振动衰减很快,说明颗粒阻尼可以显著地抑制结构振动。

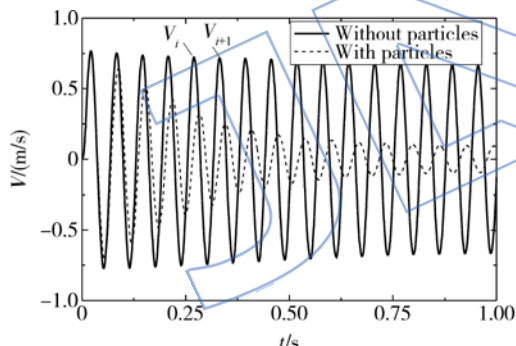


图5 空腔速度随时间的变化

Fig. 5 Velocity of cavity versus time

对于三种不同空腔尺寸,实验测得的结构阻尼随无量纲加速度的变化如图6所示。图中实心点表示以水平和垂直方向合成速度 $v = \sqrt{\dot{u}^2 + \dot{w}^2}$ 来计算的阻尼,而空心点则表示仅按垂直方向速度 $\dot{w}$ 来计算的阻尼,可见仅按垂直方向速度计算的阻尼几乎可以代表结构总阻尼,这说明颗粒阻尼在水平和垂直两个方向上的分量近似相等。其原因是L型梁按固有模式振动,空腔在两个方向上具有相同的振动参数。因此,为了方便,后面的分析仅涉及垂直方向上颗粒阻尼。

对实验数据进行最小二乘法拟合可得:当不存在颗粒时,结构最大阻尼约为0.015;而存在颗

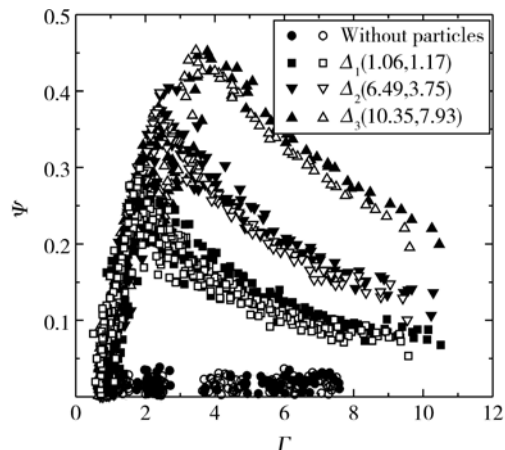


图6 总的颗粒阻尼与垂直方向上颗粒阻尼的对比

Fig. 6 Comparison of the total particle damping and the particle damping only in vertical direction

粒时,结构最大阻尼达到0.433,约为前者的29倍,这说明颗粒阻尼能够显著增大结构阻尼。

图7给出了不同空腔尺寸下,实验及数值模拟所得的阻尼随无量纲加速度的变化规律。从图中可以看出,颗粒阻尼随无量纲加速度 Γ 呈非线性变化:当 $\Gamma < 1$ 时,颗粒因不能克服重力加速度而随空腔一起运动,没有碰撞发生,仅存在较小摩擦力,故 Ψ 很小;当 $\Gamma > 1$ 时,随无量纲加速度 Γ 的增加,颗粒阻尼 Ψ 先增大后减小,即存在临界无量纲加速度 (Γ_{cr}) 使 Ψ 取极值。除此之外,随空腔尺寸的增大, Ψ 也增大。对于较小的空腔尺寸,即使 Γ 很小,颗粒与空腔上下内壁面发生碰撞,故颗粒阻尼仅有一个峰值;而空腔尺寸较大时,只有当 Γ 也较大时,颗粒才具有足够的加速度到达空腔顶部并与之发生碰撞,故此时 Ψ 具有两个大小不同的峰值。另外,对比数值与实验结果还可以发现,数值模拟所得的颗粒阻尼值比实验值要低,其原因是数值模拟仅考虑了主要耗能机制(非弹性碰撞和摩擦耗能),而在实际的颗粒阻尼中却包含着碰撞、摩擦、噪声、黏附力等多种耗能机理。

图8给出了垂直无量纲碰撞间隙 $\Delta'_v = 3.75$ 时,水平无量纲碰撞间隙 Δ'_h 对阻尼的影响。由图可见:当 $1 < \Gamma < \Gamma_{cr}$ 时,颗粒主要与空腔下壁面发生作用, Ψ 几乎不受 Δ'_h 影响;而当 $\Gamma > \Gamma_{cr}$ 时, Ψ 随 Δ'_h 增大而减小,但当 Δ'_h 增大到一定程度时 Ψ 减小的趋势更趋平缓,说明当 Δ'_h 足够大时,颗粒阻尼对 Δ'_h 的变化不再敏感。另外,随 Δ'_h 增大,空腔内壁面总面积增大,与之接触的颗粒数目也增加,从而增加了摩擦和碰撞耗能,故阻尼峰值增大且其对应的无量纲加速幅值略有减小。

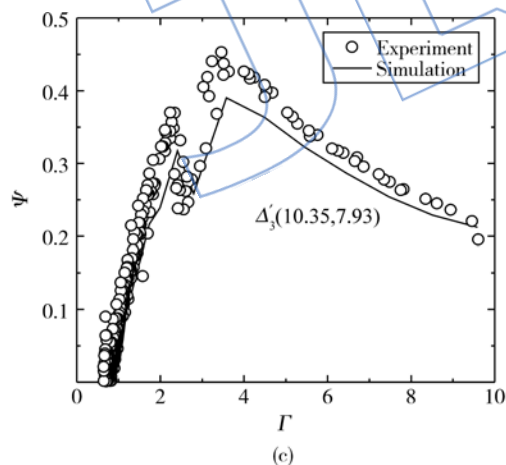
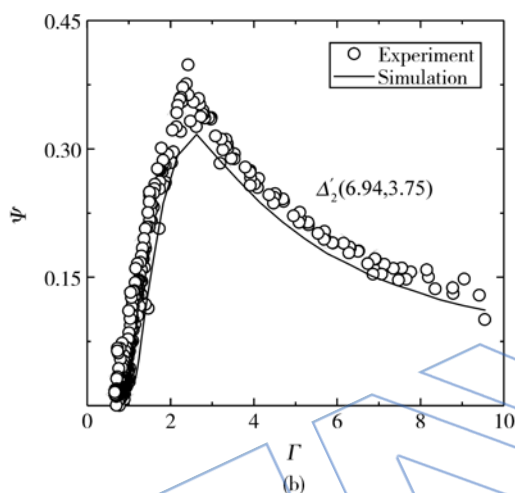
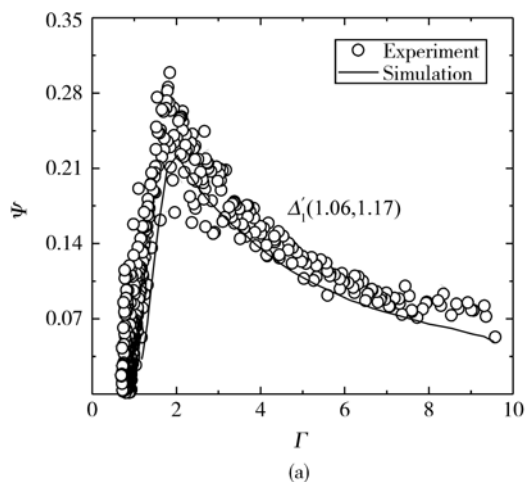


图7 不同空腔尺寸下颗粒阻尼随无量纲加速度的变化

Fig. 7 Particle damping versus dimensionless acceleration amplitude (Γ) under different cavity sizes

图9给出了水平无量纲碰撞间隙 $\Delta'_h = 6.49$ 时,垂直无量纲碰撞间隙 Δ'_v 对阻尼的影响.可以看出,随 Δ'_v 间隙增大, Ψ 峰值增大并向较大的无量纲加速度幅值处偏移.当 $\Gamma > \Gamma_{cr}$ 时, Δ'_v 越大,颗

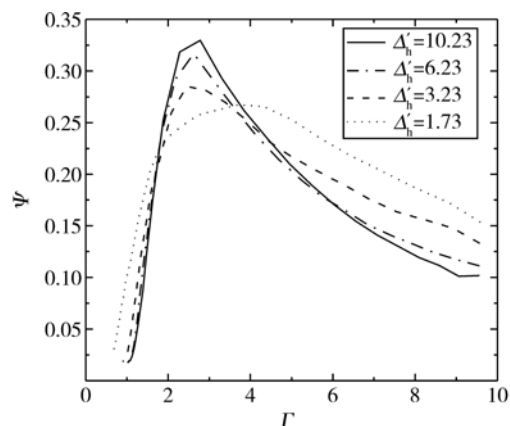


图8 水平无量纲碰撞间隙对阻尼的影响
($\Delta'_v = 3.75$)

Fig. 8 Effect of horizontal dimensionless impact clearances on damping ($\Delta'_v = 3.75$)

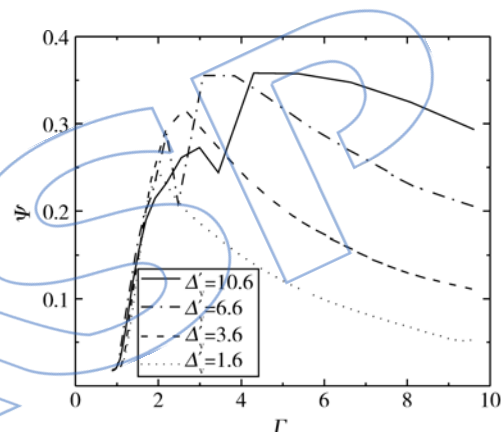


图9 垂直无量纲碰撞间隙对阻尼的影响
($\Delta'_h = 6.49$)

Fig. 9 Effect of vertical dimensionless impact clearances on damping ($\Delta'_h = 6.49$)

粒移动距离也就越大,与空腔内壁面的碰撞强度更加剧烈,从而增大了碰撞和摩擦耗能,故 Ψ 随 Δ'_v 增大而增大.当 Δ'_v 较小时, Ψ 仅有一个峰值;当 Δ'_v 较大时, Ψ 具有两个峰值,这与实验结果一致.

4 结论

本文利用所发展的 DEM 法对二维颗粒阻尼进行了数值模拟,数值模拟与实验结果吻合较好,得到如下结论:

1) 高度非线性的颗粒阻尼能够明显地抑制结构振动,其值至少比结构材料阻尼大一个数量级.

2) 当 $\Gamma < 1$ 时,颗粒因不能克服重力加速度而随空腔一起运动,阻尼值接近 0;而当 $\Gamma > 1$ 时,颗粒阻尼随无量纲碰撞间隙的增加先增加后减

小,即存在临界无量纲加速度使得阻尼最大。

3) 颗粒阻尼随空腔尺寸增大而增大。空腔尺寸较小时,颗粒阻尼仅有一个峰值;空腔尺寸较大时,仅当 Γ 也较大时,颗粒才能同时与上下内壁面发生碰撞,此时颗粒阻尼具有两个大小不同的峰值。当 $\Gamma > \Gamma_{cr}$ 时,颗粒阻尼随水平无量纲碰撞间隙 Δ'_h 的增加而减小,且阻尼峰值向 Γ 减小的方向略微偏移;随垂直无量纲碰撞间隙 Δ'_v 的增加,颗粒阻尼增大,阻尼峰值却明显地向 Γ 增大的方向偏移。

参考文献:

- [1] 张锦,刘晓平. 叶轮机械振动模态分析理论及数值方法[M]. 北京:国防工业出版社,2001.
- [2] Hollkamp J J, Gordon R W. Experiment with particle damping[C]// Proceedings of SPIE Conference on Smart Structures and Materials: Passive Damping and Isolation. San Diego, CA: SPIE, 1998, 3327: 2-12.
- [3] Panossian H V. An overview of NOPD: a passive damping technique[J]. Shock and Vibration, 1991, 1(6): 4-10.
- [4] Kielb R, Macri F, Oeth D, et al. Advanced damping system for fan and compressor blisk[R] AIAA-98-3863, 1998.
- [5] Fowler B L. Multiparticle impact damping (MPID) design methodology for extreme environments [D]. Mountain View, CA: CAS Engineering Inc., 2003.
- [6] Flint E M. Experimental measurements of the particle damping effectiveness under centrifugal loads[C]// Proceedings of the 4th National Turbine Engine High Cycle Fatigue Conference. Los Angeles, CA: [s. n.], 1999, 61: 1-6.
- [7] Friend R D, Kinra V K. Particle impact damping[J]. Journal of Sound and Vibration, 2000, 233(1): 93-118.
- [8] Bhatti R A, WANG Yanrong, WANG Zhoucheng. Particle impact damping in two dimensions[J]. Journal of Key Engineering Materials, 2009, 413-414: 415-422.
- [9] Saeki M. Impact damping with granular material in a horizontally vibrating system[J]. Journal of Sound and Vibration, 2002, 251(1): 153-161.
- [10] Saeki M. Analytical study of multi-particle damping[J]. Journal of Sound and Vibration, 2005, 281(3-5): 1133-1144.
- [11] Bai X M, Shah B, Keer L M, et al. Particle dynamics simulations of a piston-based particle damper[J]. Powder Technology, 2009, 189(1): 115-125.
- [12] Bai X M, Keer L M, Wang Q J, et al. Investigation of particle damping mechanism via particle dynamics simulations [J]. Granular Matter, 2009, 11(6): 417-429.
- [13] CHEN Tianning, MAO Kuanmin, HUANG Xieqing, et al. Dissipation mechanisms of non-obstructive particle damping using discrete element method [C] // Proceedings of SPIE International Symposium on Smart Structures and Materials: Damping and Isolation. Newport Beach, CA: SPIE, 2001, 4331: 294-301.
- [14] XU Zhiwei, WANG Yu, CHEN Tianning. Particle damping for passive vibration suppression: numerical modeling and experimental investigation[J]. Journal of Sound and Vibration, 2005, 279(3-5): 1097-1120.
- [15] MAO Kuanmin, Wang Y M, XU Zhiwei, et al. DEM simulation of particle damping[J]. Powder Technology, 2004, 142(2-3): 154-165.
- [16] Tsuji Y, Tanaka T, Ishida T. Lagrangian numerical simulation of plug-flow of cohesionless particle in a horizontal pipe[J]. Powder Technology, 1992, 71(3): 239-250.
- [17] Kruggel-Emden H, Sturm M, Wirtz S, et al. Selection of an appropriate time integration scheme for the discrete element method (DEM) [J]. Computer and Chemical Engineering, 2008, 32(10): 2263-2279.
- [18] Yao Z H, Cheng M, Wang J S. New O(N) neighbor list method for molecular dynamics [R]. Pist, Italy: URSI EMTS, 2004.
- [19] Fang X, Tang J. A highly efficient discrete element approach for granular damping analysis[C]// Proceedings of SPIE Conference on Smart Structures and Materials: Damping and Isolation. San Diego, AC, USA: SPIE, 2006, 6169: 205-214.