

文章编号:1000-8055(2011)03-0628-07

二维振动结构的颗粒阻尼实验

唐 伟, 王延荣, 王周成, 巴 蒂

(北京航空航天大学 能源与动力工程学院, 北京 100191)

摘 要: 采用非接触式激光测振仪对自由端附有空腔的 L 型悬臂梁进行了颗粒阻尼减振实验, 考查了空腔尺寸对颗粒阻尼的影响规律, 得到了二维颗粒阻尼的相关特性. 结果表明: ①非线性的颗粒阻尼能够显著地抑制结构振动, 且阻尼值至少比金属材料阻尼大一个数量级; ②二维颗粒阻尼在各个方向上具有相似的阻尼特性, 随无量纲加速度的增加, 颗粒阻尼先增大后减小, 即存在临界无量纲加速度使得颗粒阻尼最大; ③随着二维空腔尺寸的增加, 颗粒阻尼呈现增加趋势, 且阻尼峰值向无量纲加速度增大的方向偏移. 该实验研究结果可为二维颗粒阻尼的数值仿真提供可靠依据.

关 键 词: 颗粒阻尼; 减振; 二维振动; 空腔尺寸; L 型梁

中图分类号: V231.92

文献标识码: A

Experimental study of particle damping for a two-dimensional vibrating structure

TANG Wei, WANG Yan-rong, WANG Zhou-cheng, Bhatti Riaz Ahmad

(School of Jet Propulsion,

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

Abstract: By use of a non-contact laser vibrometer, experiments were made on an L-shaped beam with a cavity attached to the free end, so as to investigate the damping properties of particle damping for a two-dimensional vibrating structure under different cavity sizes. The experimental results show that: (1) the 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) The features of two-dimensional particle damping are almost the same in each direction; with the increasing of dimensionless acceleration amplitude, particle damping firstly increases and then decreases, meaning that there is a critical dimensionless acceleration amplitude causing the highest damping. (3) Particle damping as well as the critical dimensionless acceleration amplitude corresponding to the damping peak increases with the cavity sizes. The experimental results could provide a reliable basis for numerical simulation of particle damping in two-dimensions.

Key words: particle damping; vibration suppression; two-dimensional vibration; cavity sizes; L-shaped beam

随着航空发动机性能的提高, 发动机振动故障日益突出, 据统计振动故障率占发动机总故障率的 60% 以上^[1], 因此对发动机各部件的振动抑

制显得尤其重要.

航空发动机的某些部件除了承受较高的温度外, 还得承受很大的离心载荷, 在这种极端环境

收稿日期: 2010-01-27; 修订日期: 2010-06-05

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、振动及可靠性研究.

下,使用干摩擦、黏弹性材料等传统的阻尼技术难以持续地达到良好的减振效果;然而颗粒阻尼减振却显示了极大的优势,它将装有金属或陶瓷材料等颗粒的空腔附着在结构振幅较大的区域,通过颗粒与颗粒以及颗粒与空腔壁面之间的非弹性碰撞和摩擦将结构的动能转化为热能,从而达到减振目的。颗粒阻尼是能够达到较高机械阻尼的一种被动减振技术,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。

近年来,许多研究人员对颗粒阻尼减振技术进行了理论和实验研究。美国的 GEAE (General Electric Aircraft Engines) 等公司^[2]对 XTE-45 整体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。Papalou 和 Masri^[3-4]研究了水平振动的单自由度系统受较宽范围内任意激励时的颗粒阻尼,同时考查了质量率、盒子尺寸以及激励水平对颗粒阻尼的影响。Fowler^[5]针对航天结构,进行了颗粒阻尼的理论及实验研究,通过悬臂梁和组合结构实验验证了其理论分析结果,实验表明颗粒阻尼与空腔内部尺寸有关,尤其与振动方向一致的空腔尺寸相关。Saeki^[6-7]采用离散单元法 (DEM) 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理论及实验研究,发现随阻尼器数目增加,最佳空腔尺寸减小。Flint^[8]对 0~5000 g 离心载荷范围内的颗粒阻尼进行了实验研究,先后对九种不同实验配置进行了测试,分别考查了填充率、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然具有很好的减振效果。

此外,国内的徐志伟、毛宽民、陈天宁等^[9-12]利用 DEM 对颗粒阻尼进行了数值模拟研究,分析了颗粒阻尼的能量耗散机理,并进行了大量实验以验证其理论模型的正确性。

然而,到目前为止,国内外对颗粒阻尼的理论和实验研究大多局限在单自由度振动系统上,因此,为了考查在多自由度振动系统上的颗粒阻尼特性,尤其是二维空腔尺寸对颗粒阻尼的影响规律,本文对自由端附有矩形空腔的 L 型悬臂梁进行了二维颗粒阻尼的减振实验研究。

1 实验装置与模型

1.1 实验模型

如图 1 所示,实验采用的颗粒阻尼装置是由

自由端焊有矩形空腔的等截面 L 型悬臂梁、空腔盖、直径为 1.0 mm 的金属球形颗粒以及非接触式高速扫描激光测振仪(图 1 中未画出)等组成。



图 1 颗粒阻尼装置的组成

Fig. 1 Setup of particle damping device

等截面的 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的长、宽分别为 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 。

图 2 为实验装置与模型示意图。因为 L 型梁是一个连续体,所以空腔在垂直和水平方向上的运动可用具有相同振动参数的二自由度系统来描述,如图 2(b)所示。空腔在平面内作二维振动,而颗粒作三维空间运动并与空腔内壁面发生碰撞,因此,空腔的运动方程可表示如下:

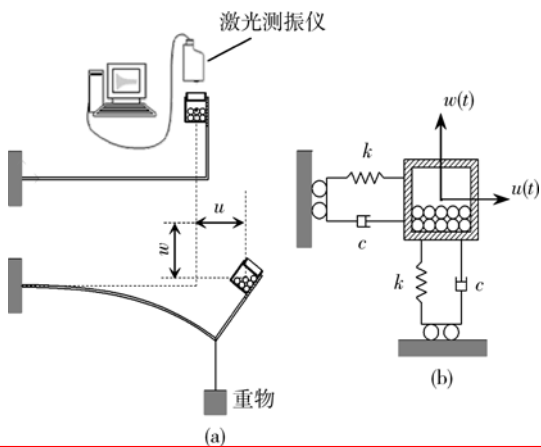


图 2 实验装置与模型

Fig. 2 Schematic of experimental apparatus and configuration

$$\begin{bmatrix} m & 0 \\ 0 & m \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{u} \\ \ddot{w} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} c & 0 \\ 0 & c \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{u} \\ \dot{w} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} k & 0 \\ 0 & k \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u \\ w \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_{pu} \\ f_{pw} \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中“ $\cdot$ ”“ $\ddot{\cdot}$ ”表示对时间求一阶、二阶导数； m, k, c 分别表示L型梁振动的等效质量，等效刚度和等效阻尼系数； f_{pu}, f_{pw} 分别为颗粒与空腔内壁面的相互作用力在水平和垂直方向上的分量。由式(1)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具有一定耦合性的。

1.2 测试系统

实验曾采用YD-300型加速度计对空腔的振动进行测量，但所获数据噪声较大，空腔振动的速度衰减曲线不理想。因此，实验采用非接触测量方式进行，测试系统主要是由德国的Polytec 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。激光测振仪的采样频率设置为5.12 kHz(以保证每个振动周期内的采样点数不低于300个)，在三种不同空腔尺寸下对颗粒阻尼减振进行了测试，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的最终结果。

1.3 操作流程

实验主要操作流程包括：①取一定质量的颗粒装入空腔中，根据碰撞间隙的要求选取合适的盖子，由螺钉将盖子与L型梁固连组成颗粒阻尼装置，并在测试面贴上激光纸以减小因测量面的粗糙而引起的测量误差；②将激光测振仪的激光束调整到被测测试面上，在振动过程中要始终保证激光点位于被测测试面内；③通过悬挂重物的方法来施加定量的初始条件，在 $t=0$ s时，剪断悬挂重物的绳子，测量并记录空腔振动的速度衰减曲线。

2 相关参数的定义

为了方便地研究颗粒阻尼特性，需定义以下相关参数。

2.1 无量纲参数

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，空腔内部尺寸与颗

粒层总高度之差。

无量纲碰撞间隙可表示为

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

式中 ω_h 为结构(空腔)的固有振动频率， g 为重力加速度。

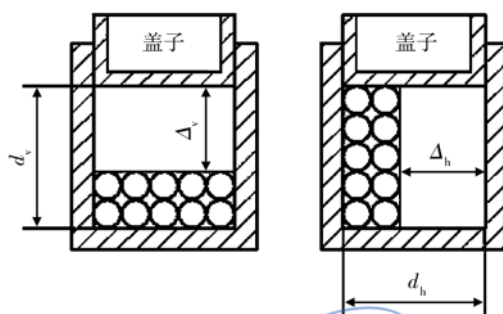


图3 碰撞间隙的定义

Fig. 3 Definition of the clearances

实验主要考查空腔尺寸对颗粒阻尼的影响规律，在同一组实验配置中，颗粒团的质量和总体积守恒，由定义1可得

$$d_h(d_v - \Delta_v) = d_v(d_h - \Delta_h) \quad (3)$$

所以，垂直方向上碰撞间隙 Δ_v 的改变可通过改变盖子尺寸来实现，而水平方向上碰撞间隙 Δ_h 的改变则由式(3)决定，即 Δ_h 的改变是通过 Δ_v 的改变而间接实现的。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。

相应地，无量纲加速度可以表示为

$$\Gamma = \frac{x \cdot \omega_h^2}{g} = \frac{v \cdot \omega_h}{g} \quad (4)$$

式中 x, v 分别为空腔振动的位移和速度的幅值。

实验采用的三种碰撞间隙列于表1。

表1 三种二维碰撞间隙

Table 1 Three kinds of two-dimensional clearances

N	$(\Delta_h, \Delta_v)/\text{mm}$	(Δ'_h, Δ'_v)
Δ_1	(1.02, 1.12)	(1.06, 1.17)
Δ_2	(6.23, 3.60)	(6.49, 3.75)
Δ_3	(9.93, 7.61)	(10.35, 7.93)

2.2 颗粒阻尼

实验采用Friend和Kinra^[13]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

$$\Psi_i = \frac{\Delta T_i}{T_i} \quad (5)$$

式中 ΔT_i 为第 i 个振动周期内由碰撞和摩擦所消耗掉系统的动能, T_i 为系统在该周期内的最大动能.

如果在一个周期内颗粒在空腔的两个速度峰值 V_i 和 V_{i+1} 处均与空腔内壁接触, 则

$$\Delta T_i = \frac{1}{2} M(V_i^2 - V_{i+1}^2) \quad (6)$$

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, 而

$$T_i = \frac{1}{2} M V_i^2 \quad (7)$$

因此, 颗粒阻尼可表示为

$$\Psi_i = \frac{V_i^2 - V_{i+1}^2}{V_i^2} \quad (8)$$

3 实验结果及分析

在 L 型梁上进行的颗粒阻尼减振实验, 考查了两个方向上的空腔尺寸对颗粒阻尼特性的影响, 并获得了颗粒阻尼随无量纲加速度的变化规律.

图 4 给出了有无颗粒阻尼两种情况下的空腔速度响应随时间的衰减曲线. 可以看出, 当不存在颗粒时, 在较长时间范围内空腔振动的衰减很慢, 这是因为 L 型梁自身的结构阻尼非常小; 当存在颗粒时, 空腔振动衰减很快, 说明颗粒阻尼能够对结构的振动起到明显的抑制作用.

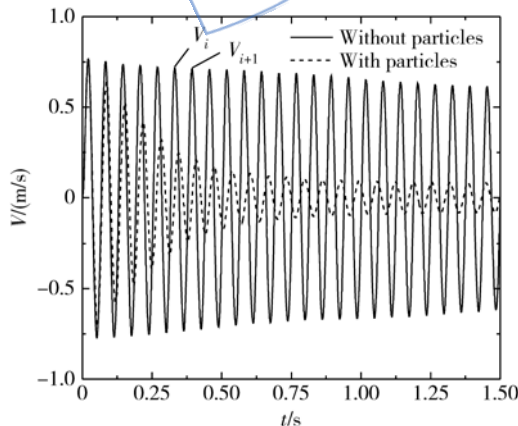


图 4 空腔速度响应随时间的变化

Fig. 4 Velocity response of cavity versus time

针对三种不同的空腔尺寸, 有无颗粒时结构阻尼随无量纲加速度的变化, 如图 5 所示. 图中的每个点代表了速度衰减曲线上相应周期内的颗粒

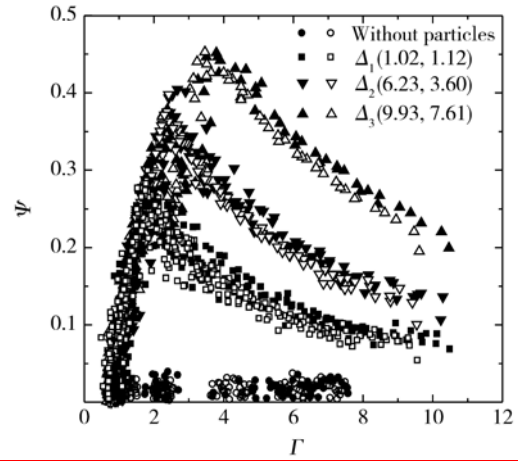


图 5 总的颗粒阻尼与垂直方向上颗粒阻尼的对比

Fig. 5 Comparison of the total particle damping and the particle damping only in vertical direction

阻尼, 其中实心点表示按空腔在水平和垂直方向上的合成速度 $v = \sqrt{\dot{u}^2 + \dot{w}^2}$ 来计算的颗粒阻尼, 而空心点则表示仅按垂直方向上的速度来计算的颗粒阻尼. 可以看出, 图中各点的分布规律是呈非线性变化的, 由定义 2 可知, 颗粒阻尼在各个周期内所消耗的振动能量随无量纲加速度的增加也呈非线性变化, 故颗粒阻尼具有非线性特征. 由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; 而存在颗粒时, 结构最大阻尼可达 0.433, 约为前者的 29 倍, 这说明颗粒阻尼能够显著增大机械阻尼. 另外, 仅按垂直方向速度所计算的颗粒阻尼几乎可以代表结构总阻尼. 如果忽略结构材料阻尼、安装阻尼等因素, 可认为垂直方向上的颗粒阻尼与结构总的颗粒阻尼近似相等, 即

$$\Psi_{\text{total}} \approx \Psi_v \quad (9)$$

结合颗粒阻尼的定义, 式(9)可写为

$$\frac{(\sqrt{\dot{u}_i^2 + \dot{w}_i^2})^2 - (\sqrt{\dot{u}_{i+1}^2 + \dot{w}_{i+1}^2})^2}{(\sqrt{\dot{u}_i^2 + \dot{w}_i^2})^2} \approx \frac{\dot{u}_i^2 - \dot{u}_{i+1}^2}{\dot{u}_i^2} \quad (10)$$

即

$$\dot{w}_{i+1}^2 \approx \frac{\dot{u}_{i+1}^2 \dot{w}_i^2}{\dot{u}_i^2} \quad (11)$$

因此, 水平方向上的颗粒阻尼可表示为

$$\Psi_h = \frac{\dot{w}_i^2 - \dot{w}_{i+1}^2}{\dot{w}_i^2} \approx \frac{\dot{w}_i^2 - \frac{\dot{u}_{i+1}^2 \dot{w}_i^2}{\dot{u}_i^2}}{\dot{w}_i^2} = \frac{\dot{u}_i^2 - \dot{u}_{i+1}^2}{\dot{u}_i^2} = \Psi_v \quad (12)$$

可见,颗粒阻尼在水平和垂直两个方向上的分量近似相等,这是由于L型梁按固有模态振动,在两个方向上具有相等的振动参数.因此,为了方便,后面的分析仅涉及垂直方向上的颗粒阻尼.

图6给出了三种不同空腔尺寸下的颗粒阻尼随无量纲加速度的变化规律.其中,实心点表示在16种不同初始条件下,空腔速度衰减曲线在第一个周期内的颗粒阻尼,空心点表示在所有初始条件下所有振动周期内的颗粒阻尼.从图中可以看出,二维颗粒阻尼与一维颗粒阻尼具有相似的特征,第一个周期内 Ψ 的变化趋势与整个曲线的一致,即当 $\Gamma < 1$ 时, Ψ 极小;当 $\Gamma > 1$ 时,随 Γ 增大, Ψ 呈现出先增大后减小的趋势,即存在临界的 Γ^{cr} 使得 Ψ 取极值.这说明当 $\Gamma < 1$ 时,空腔的振动加速度小于 g ,颗粒始终处于空腔底部,并与之一起运动,几乎没有碰撞发生,但颗粒间的摩擦仍能消耗能量,因而此时仍存在较小的颗粒阻尼;而当 $\Gamma > 1$ 时,随 Γ 增大,颗粒与空腔之间碰撞的强度和次数均增加,所以 Ψ 会不断增加.然而,当 Γ 超过 Γ^{cr} 后,由碰撞和摩擦消耗的能量又将逐渐减小.

当空腔尺寸较小时, Ψ 只有一个极值,当空腔尺寸较大时, Ψ 具有两个大小不同的极值.如图7所示,在空腔尺寸较小时,即使 Γ 较小,颗粒也能与空腔上下内壁面发生碰撞;而在空腔尺寸较大时,只有当 Γ 较大时,颗粒才能与空腔上下内壁面发生碰撞,所以此时 Ψ 曲线会出现两个峰值.

图8是三种空腔尺寸下,颗粒阻尼峰值随临界无量纲加速度的变化.可以看出,随临界无量纲加速度的增加,颗粒阻尼峰值呈现出增大趋势,且增大的趋势逐渐趋于平缓.因实验所用空腔盖数目的限制,本实验仅得到了三种空腔尺寸下的颗粒阻尼峰值.虽然数据量有限,但从图中三点的变化趋势可以看出,随空腔尺寸的增大,颗粒阻尼峰值的增加具有一定的放缓趋势,这将通过后续的数值仿真来加以验证.另外,若空腔尺寸足够大而颗粒对结构的质量率保持不变,以致颗粒只能在空腔内壁面上平铺一层,即与空腔内壁接触的颗粒数达到最大值.显然,如果此时再增大空腔尺寸,与空腔内壁面碰撞的颗粒总数目并不会增大,所以当空腔的尺寸增大到一定程度时,颗粒阻尼增大的趋势会更趋于平缓.

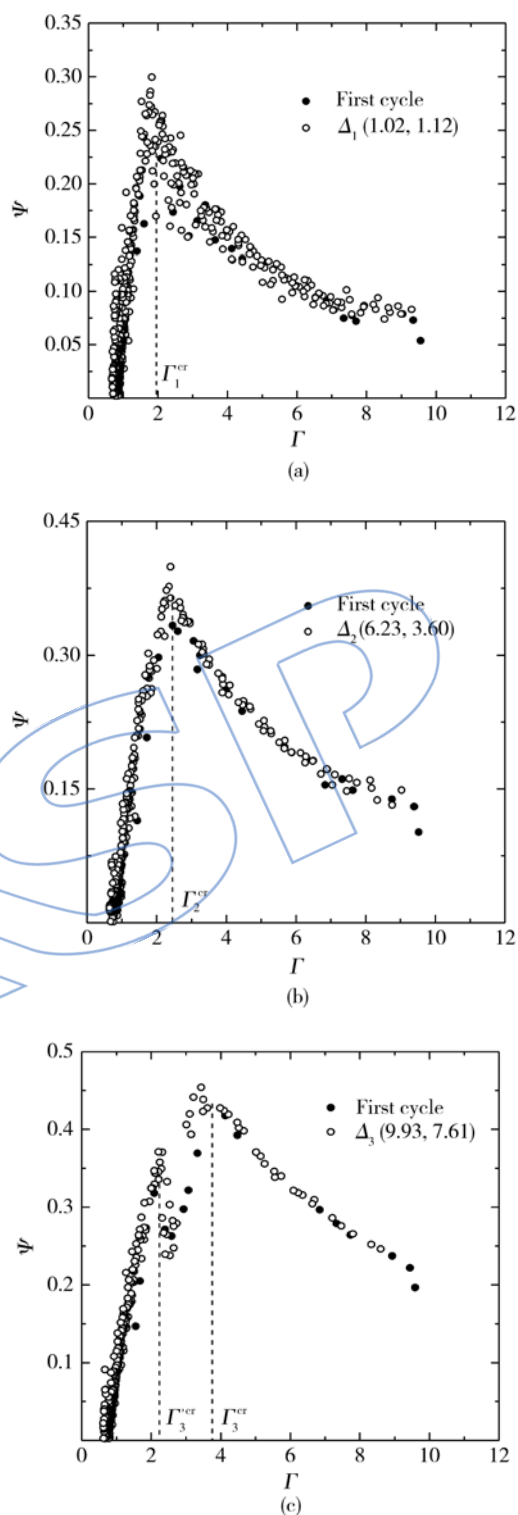


图6 三种空腔尺寸下颗粒阻尼随无量纲加速度的变化

Fig. 6 Particle damping versus dimensionless acceleration amplitude under three kinds of cavity sizes

图9给出了相同初始条件下,三种空腔对应的速度衰减曲线上, Ψ 随 Γ 的变化情况.可以看

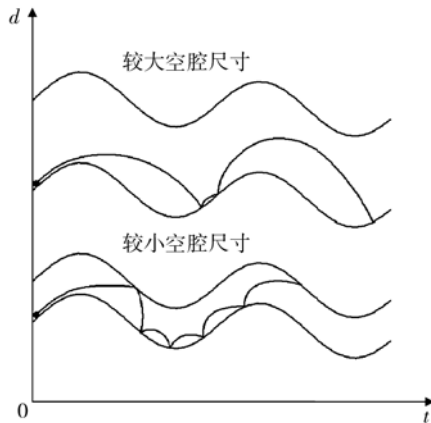


图7 颗粒与空腔的运动轨迹示意图

Fig. 7 Sketch for tracks of particle and cavity

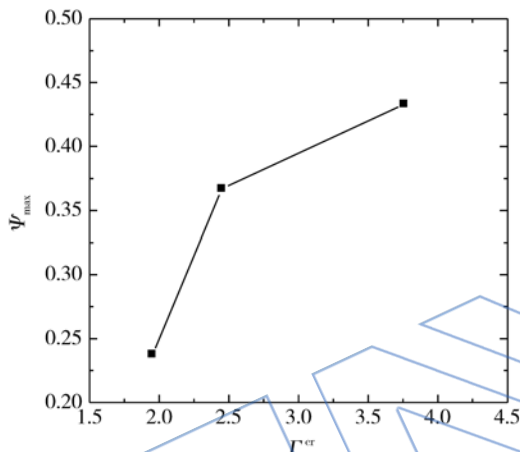


图8 阻尼峰值随临界无量纲加速度的变化

Fig. 8 Peak values of particle damping versus critical dimensionless acceleration amplitude

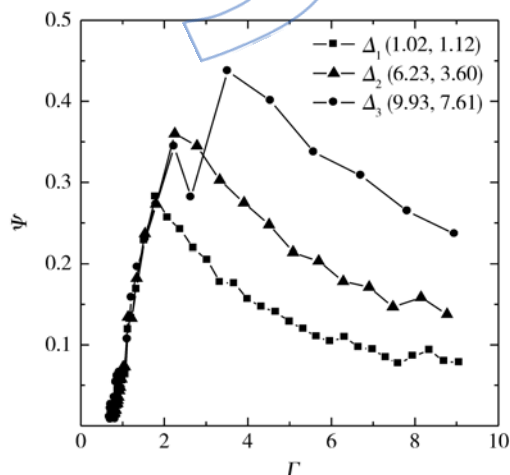


图9 速度衰减曲线对应的颗粒阻尼随无量纲加速度的变化

Fig. 9 Particle damping extracted from velocity decaying versus dimensionless acceleration amplitude

出,三条曲线的变化规律与图6的相同,说明颗粒阻尼是无量纲加速度的函数,可用无量纲加速度来表示不同的初始条件,从而有效地减少实验次数,这与文献[13-14]的分析结果相吻合。

4 结 论

通过二维振动结构的颗粒阻尼实验,可得到如下结论:

1) 颗粒阻尼能够明显地抑制结构振动,具有一定的非线性特征,其阻尼值至少比金属材料阻尼大一个数量级。

2) 二维颗粒阻尼与一维颗粒阻尼具有相似的特征。当 $\Gamma < 1$ 时,颗粒阻尼极小;当 $\Gamma > 1$ 时,颗粒阻尼随 Γ 增加呈现先增大后减小的趋势,且存在临界 Γ^* 使得颗粒阻尼最大。

3) 当结构按固有模态振动时,二维颗粒阻尼在各个方向上具有几乎相同的阻尼特性,且两个分量均与结构总阻尼近似相等。

4) 随空腔尺寸增大,颗粒阻尼增大,且阻尼峰值对应的临界无量纲加速度也增大。当空腔尺寸较小时,颗粒阻尼仅有一个峰值;当空腔尺寸较大时,只有当 Γ 也较大时,颗粒才能同时与空腔两个内壁面发生碰撞,此时颗粒阻尼出现两个大小不同的峰值。

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.
ZHANG Jin, LIU Xiaoping. Principle and numerical methods of modal analysis to turbomachines[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2001. (in Chinese)
- [2] Kielb R, Macri F G, Oeth D, et al. Advanced damping system for fan and compressor blisks[R]. AIAA 98-3863, 1998.
- [3] Papalou A, Masri S F. Response of impact dampers with granular materials under random excitation[J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 1996, 25(3): 253-267.
- [4] Papalou A, Masri S F. Performance of particle dampers under random excitation[J]. Journal of Vibration and Acoustics, 1996, 118(4): 614-621.
- [5] Fowler B L. Multiparticle impact damping (MPID) design methodology for extreme environments[R]. Mountain View, CA: CAS Engineering Inc., 2003.
- [6] Saeki M. Impact damping with granular material in a horizontally vibrating system[J]. Journal of Sound and Vibration, 2002, 251(1): 153-161.
- [7] Saeki M. Analytical study of multi-particle damping[J].

- Journal of Sound and Vibration, 2005, 281 (3-5): 1133-1144.
- [8] 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. Monterey, CA: [s. n.], 1999.
- [9] 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.
- [10] 徐志伟, 陶宝祺, 黄协清. NOPD 颗粒阻尼减振机理的理论及实验研究[J]. 航空学报, 2001, 22(4): 347-350.
- XU Zhiwei, TAO Baoqi, HUANG Xieqing. Theoretical and experimental research on vibration absorption mechanisms of NOPD particles[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2001, 22(4): 347-350. (in Chinese)
- [11] MAO Kuanmin, WANG Yu, XU Zhiwei, et al. DEM simulation of particle damping[J]. Powder Technology, 2004, 142(2-3): 154-165.
- [12] CHEN Tianning, MAO Kuanmin, HUANG Xieqing, et al. Dissipation mechanisms of non-obstructive particle damping using discrete element method[C]// Proceedings of SPIE Conference on Smart Structures and Materials: Damping and Isolation. Newport Beach, CA, USA: SPIE Digital Library, 2001, 4331: 294-301.
- [13] Friend R D, Kinra V K. Particle impact damping[J]. Journal of Sound and Vibration, 2000, 233(1): 93-118.
- [14] 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.

JAS SP