

文章编号: 1000-8055(2007)10-1737-05

基于悬臂梁的颗粒阻尼实验

夏兆旺, 单颖春, 刘献栋
(北京航空航天大学 汽车工程系, 北京 100083)

摘 要: 以填充颗粒的悬臂梁为研究对象, 研究了结构阻尼随颗粒各参数呈非线性变化的特性; 同时, 还系统研究了颗粒参数和结构参数的变化对结构减振效果的影响规律。研究结果表明: 颗粒阻尼可以使得梁的阻尼比最大增加到 492%; 颗粒密度越大减振效果越好; 在填充率为 70% 左右时系统的阻尼比最大; 在振幅较大的位置打孔洞填入颗粒材料时, 颗粒减振效果较好。

关 键 词: 航空、航天推进系统; 悬臂梁; 颗粒阻尼; 减振; 非线性;
中图分类号: O328; TB53 **文献标识码:** A

Experimental research on particle damping of cantilever beam

XIA Zhao-wang, SHAN Ying-chun, LIU Xian-dong
(Department of Automobile Engineering, Beijing University of
Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

Abstract: The nonlinear change characteristics of dampers dependently from particle parameters were analyzed based on the cantilever beam with filling particles. And, the influence of changing parameters of particles and structures on the damping effect was also studied systematically. The results show: particle damper enables the damping ratio to reach up to 492%; the damping effect improves with the growing density of particles; the best damping ratio occur at the filling ratio of 70%; the particle damping effect is improved when particles are embedded into holes with higher amplitude of vibration.

Key words: aerospace propulsion system; cantilever beam; particle damping; vibration absorption; nonlinear

颗粒阻尼器是在振动结构体上加工一定数量的孔洞, 在其中填充适当数量的金属、非金属颗粒。当结构发生振动时, 颗粒之间及颗粒与孔壁之间发生摩擦、碰撞, 从而进行能量耗散与转换, 于是降低了结构的振动幅值。颗粒阻尼器具有减振频带宽、冲击力小、噪声小等优点。同时, 这种阻尼器具有结构简单、耐高温、抗老化, 特别适用于工作环境恶劣的场合。从 80 年代末 Panossian H. V. 对非阻塞性颗粒阻尼 (粉体颗粒) 进行了大量的试验研究^[1-3]。

在航空领域, 由于采用整体叶盘、无凸肩设计是航空发动机叶片的发展趋势, 届时目前应用广

泛的缘板阻尼器、凸肩结构等干摩擦阻尼结构将不再适用。而由于粘弹性阻尼材料的应用温度范围均低于 250 °C, 故颗粒阻尼减振是一种很有前途的阻尼形式, 因此许多学者对颗粒阻尼减振应用于航空发动机叶片上做了大量的实验研究。美国 GE aircraft engines 和 Rocketdyne division of Boeing 对 XTE45 风扇叶片采用微颗粒阻尼减振进行减振研究, 初步实验表明阻尼比可达到 0.01 左右^[4]。Eric^[5]对旋转状态下颗粒阻尼减振器的减振效果进行了实验, 实验表明, 颗粒阻尼减振器在离心加速度达到 5 000 m/s² 的情况下仍然能够起到减振效果。

收稿日期: 2006-09-22; 修订日期: 2006-12-26

作者简介: 夏兆旺(1981-), 男, 安徽凤阳人, 博士生, 主要从事振动控制方面的研究。

本文以填充颗粒的悬臂梁为对象,结合大量的实验深入地研究了颗粒阻尼的减振特性,研究了结构阻尼随颗粒各参数呈非线性变化的特性;同时,还系统研究了颗粒参数和结构参数的变化对结构减振效果的影响规律,为后继研究奠定了基础,以后工作将以梁的研究为基础,进一步研究填充颗粒的平板叶片的减振特性,进而对填充颗粒的真实叶片的减振机理进行实验和分析。

1 颗粒阻尼减振特性实验

实验研究采用图 1 所示的装置,给悬臂梁一定的初始位移使金属盒中的颗粒发生摩擦和碰撞作用。悬臂梁的材料为铸钢,其密度为 $7\,800\text{ kg/m}^3$,弹性模量为 $1.75 \times 10^{11}\text{ Pa}$,尺寸为:长 300 mm ,宽 25 mm ,厚 4 mm 。金属盒填充颗粒密封后,用磁吸座将其吸附在悬臂梁上的确定位置。加速度传感器为 YD-39 型,灵敏度为 $1.22\text{ Pc/m} \cdot \text{s}^2$ 。实验系统等效为图 2 所示的模型(x, y 分别表示主系统与颗粒的运动坐标),主系统的等效质量为 372 g ,包括悬臂梁、金属盒和加速度传感器的质量。等效刚度为 $K = 3EI/l^3$ 。 I 为悬臂梁的弯曲截面惯性矩。实验测得其一阶固有频率为 30.2 Hz 与 Ansys 计算的结果 30.9 Hz 很接近,说明此实验的夹紧方案是可行的。

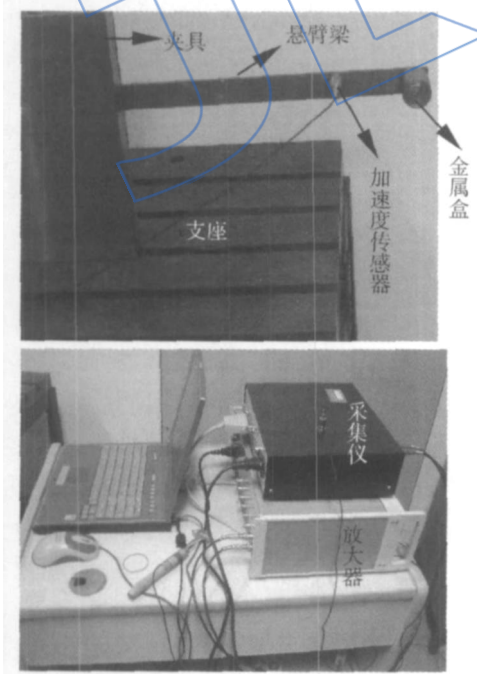


图 1 实验测试系统及实验装置
Fig. 1 Installation of experiment

实验过程中在金属盒中填充一定填充率的颗粒后吸附在悬臂梁的确定位置。为了能在给悬臂

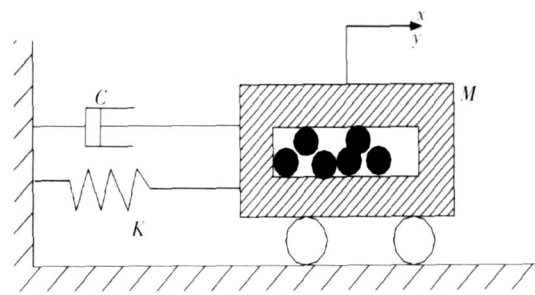


图 2 颗粒阻尼器的力学模型
Fig. 2 Dynamics model of particle damping

梁初始位移后突然去掉约束让其自由振动,先用绳子将悬臂梁拉到一定的位移,然后用剪刀将绳子突然剪断,就可以使得悬臂梁在给定的初始位移下自由振动。进而测试其振动的加速度时间历程并分析结构的阻尼比变化情况。

本文主要研究结构参数和颗粒参数(悬臂梁的初始位置、金属盒的位置以及颗粒的填充率、材料和粒径)对阻尼性能的影响。测试内容为:

- 悬臂梁初始位移为 $3, 6, 8\text{ mm}$;
- 颗粒种类包括 40 目的钛合金、直径分别为 $2, 3, 4, 5\text{ mm}$ 的钢球和 20 目碳化钨颗粒,如图 3 所示;

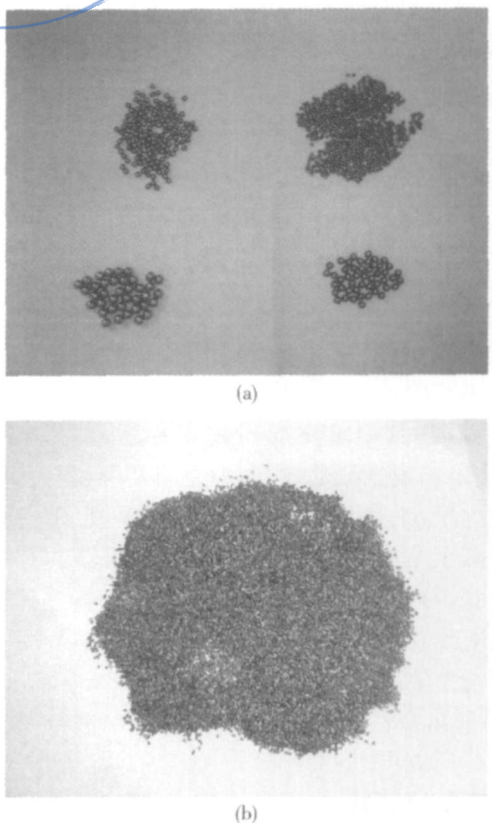


图 3 钢球(a)和碳化钨(b)
Fig. 3 Steel particles and tungstencarbide

金属盒与悬臂梁固定端的距离分别为 100, 200, 300 mm;
金属盒的填充率为 0 %, 30 %, 50 %, 70 %, 90 %和 100 %.

2 实验数据处理

限于篇幅,仅给出初始振幅为 8 mm,直径为

2 mm 的钢球在不同的填充率下的加速度时间历程(图 4). 梁的模态阻尼比的计算有两种方法:半功率点法和时域信号衰减法. 这里主要采用时域信号衰减法得到梁的模态阻尼比.
时域信号衰减法是当系统受到初始位移后突然去掉约束,根据其时域内的衰减信号求得系统的阻尼比.

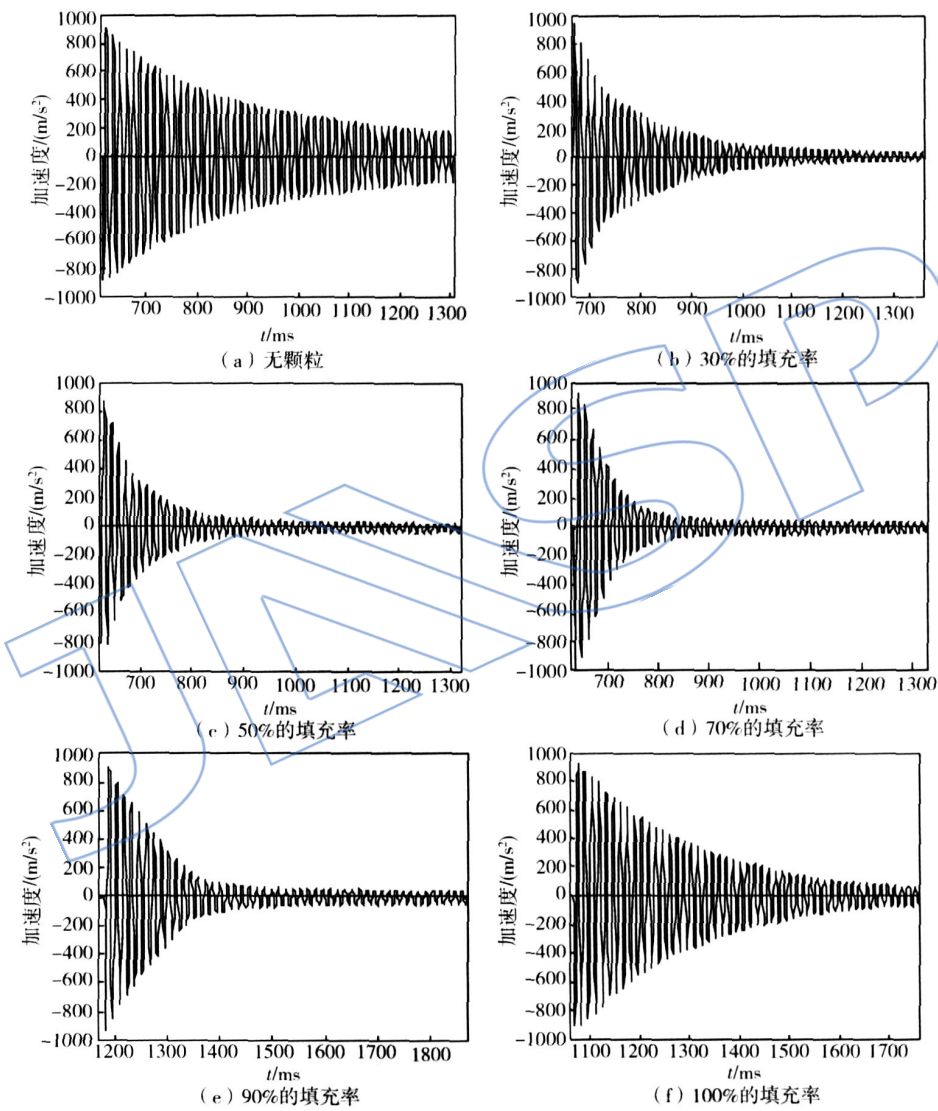


图 4 填充率对阻尼比的影响
Fig. 4 Affection of packing ratio

首先求得其对数衰减率
$$\delta = \frac{1}{j} \ln \frac{A_i}{A_{i+j}} = \zeta \omega_n \frac{2\pi}{\omega_b} = \frac{2\pi\zeta}{\sqrt{1-\zeta^2}} \quad (1)$$
其中 A_i 为振幅衰减曲线的第 i 个峰值, j 为所间隔的振动周期数.
当 ζ 较小 ($\zeta < 0.2$) 时,上式可近似为 $\delta = 2\pi\zeta$.

从而得到:
$$\zeta = \delta / 2\pi \quad (2)$$
本文采用时域信号衰减法计算梁的阻尼比. 因为本文实验的悬臂梁系统阻尼比远小于 20 %, 所以可以用公式(2). 在每个幅值点取三个周期计算对数衰减率的平均值,然后求得其阻尼比. 得到

阻尼比随各参数的变化关系.在利用时域内的衰减信号计算系统的阻尼时发现:时域信号在最初的几个周期内的衰减速度很快,随着振幅的降低,衰减速度越来越慢,当振幅降低到一定程度后,其衰减曲线与无颗粒梁的衰减曲线非常相似(如图 4(a)).从阻尼的计算来看二者数值非常接近.这说明,在振幅衰减的初始阶段,大部分甚至全部的颗粒都参与了振动,消耗的大量的振动能量.由于颗粒的碰撞与摩擦作用消耗的能量比梁自身消耗的能量大的多,随着时间的推移振幅降低,参与振动的颗粒数量越来越少,所以衰减的程度降低.当系统的振幅衰减到一定程度后,几乎所有的颗粒都停止了振动,梁仅依靠自身的阻尼比在衰减,因此在最后衰减阶段梁的阻尼比与无颗粒梁的阻尼比很接近.整个过程有很明显的非线性特征.因此在计算梁的模式阻尼比时根据具体的信号取其衰减速度较快的初始阶段计算梁的阻尼比.

图 5(a)为填充率为 70 %,初始位移为 8 mm 时,在不同的材料下的阻尼比随位移的变化.图 5 b 为初始位移为 8 mm,直径为 2 mm 的钢球在不同的填充率下的阻尼比随位移的变化.

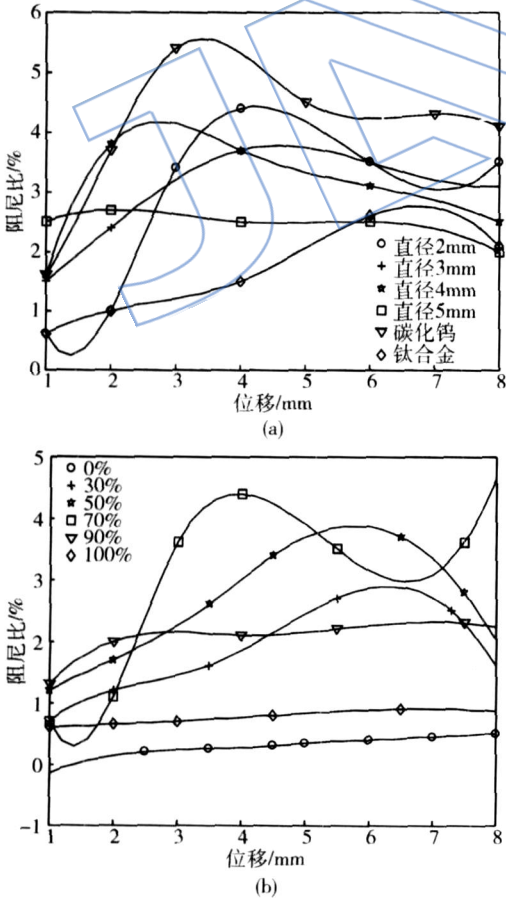


图 5 阻尼比随位移的变化

Fig. 5 Effect of displacement on damping

图 6 是阻尼比随填充率的变化情况,得到了不同材料的填充率与阻尼比的关系.

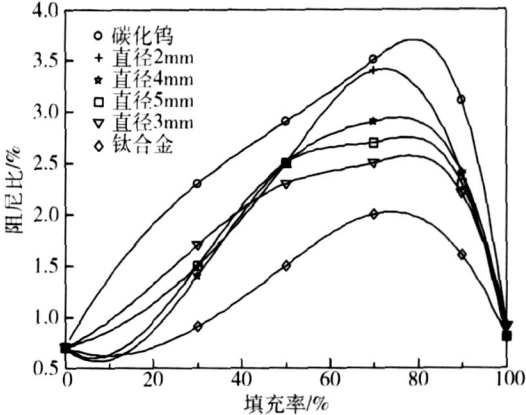


图 6 阻尼比填充率的变化

Fig. 6 Effect of ratio damping

从以上图中可以看出:

(1) 颗粒填充率对系统阻尼比的影响:从图中可以看出 70 %的填充率效果最好. 因为 $\zeta = c / c_{cr} = c / 2 \sqrt{KM}$, 所以增加颗粒填充率, 既增加了系统的质量, 阻尼比应该减小. 如当增加 30 %的填充率时, 钢球的阻尼比应减少 1.06 %; 碳化钨的阻尼比应减少 1.96 %. 但实验结果却表明系统的阻尼比大大增加了. 在初始位移为 8 mm, 装颗粒的小盒子在放在距悬臂梁确定端 300 mm 处, 70 %的填充率下直径分别为 2, 3, 4, 5mm 的钢球, 20 目碳化钨颗粒和 40 目的钛合金分别使其阻尼比增大到了 492 %, 431 %, 450 %, 371 %, 484 %, 285 %. 在填充率较大时 (90 %, 100 %) , 颗粒运动因受到金属盒的限制而不能充分发挥其冲击减振作用, 在 100 %的填充率尤为明显其阻尼比大大降低; 在颗粒填充率较小时 (30 %, 50 %) , 因颗粒的质量很小, 颗粒相互间的摩擦作用大大降低, 所以减振效果也不是很好.

(2) 颗粒的粒径大小对系统阻尼比的影响:图 4 是直径分别为 2, 3, 4, 5 mm 的四种不同的钢球在不同填充率下得到的阻尼比, 从中可以看出在初始位移较小时 (3 mm) 直径为 5 mm 的减振效果最好, 在初始位移较大时 (8 mm) 直径为 2 mm 的减振效果最好.

(3) 不同密度的颗粒材料对系统阻尼比的影响:从图中可以看出密度最大的碳化钨的效果最好, 而密度最小的钛合金减振效果最差. 因为密度越大, 摩擦耗能就越大; 同时密度越大, 产生的冲击作用越大, 所以减振效果就越好.

(4) 初始位移对系统阻尼比的影响:初始位移

越大减振效果越好,因为初始位移大就可以使得颗粒充分的碰撞和摩擦.

(5) 金属盒的位置对系统阻尼比的影响:从实验结果可以得到当金属盒在距确定端 300 mm 时的减振效果最好.因为在振动过程中此点的振幅最大,颗粒的碰撞、摩擦效果明显.

3 结 论

(1) 实验证明颗粒阻尼减振对于提高悬臂梁阻尼特性是行之有效的,可以使得梁的阻尼比最大增加到 492 %.

(2) 颗粒阻尼是一种随振动幅值因素呈非线性变化的阻尼,且振幅对阻尼的影响有临界值.

(3) 系统阻尼受诸多参数影响,其中颗粒材料、填充率和金属盒的位置对系统阻尼影响较大.在工程应用中,颗粒阻尼参数的选取应遵从下列原则:①颗粒要选择密度大的材料,如碳化钨、铅粉;②填充率应选择 70 %左右的填充率;③金属盒的位置应放在系统振幅较大的位置或在振幅较

大的位置打适当大小的孔洞填入颗粒材料.

参考文献:

- [1] Panossian H V. Non-obstructive impact damping applications for cryogenic environment[C] //Proceeding of Damping. Orlando:FL,1989:1-9.
- [2] Panossian H V. Non-obstructive particle damping tests on aluminum beams[C] // Proceedings of the Damping 91 Conference. San Diego:CA, February,1991:13-15.
- [3] Panossian H V. Non-obstructive particle damping performance under compaction forces[J]. Machinery Dynamics and Element Vibrations, 1991, 36:44-48.
- [4] Kielb R, Macri F, Oeth D, et al. Advanced damping systems for fan and compressor blisks[C] //34th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit. Cleveland:OH,1998,7:13-15.
- [5] 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 HCF 99 Monterey. California:February 1999:9-11.