

DOI: 10.19344/j.cnki.issn1671-5276.2026.03.005

颗粒阻尼双层隔振系统特性分析

杨正奇, 吉敏, 田艺卓

(江苏科技大学 能源与动力学院, 江苏 镇江 212003)

摘要:针对双层隔振系统在低频段隔振效果有限的问题,提出一种在中间质量块填充颗粒的颗粒阻尼双层隔振结构。通过建立双层隔振系统动力学模型,基于多体动力学和离散元法进行耦合仿真分析,对颗粒阻尼双层隔振系统的隔振效果进行计算,并探究隔振性能的影响参数,分析激励幅值和颗粒粒径对于该结构隔振效果的影响规律。研究结果表明:施加颗粒阻尼后,双层隔振系统的隔振效果在低频段有了较大提升,振级落差提升量最大可达 4.9 dB。该研究为推动颗粒阻尼双层隔振系统在工程中的应用奠定了基础。

关键词:颗粒阻尼; 双层隔振; 多体动力学; 离散元法; 振级落差

中图分类号: TB535⁺.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-5276(2026)03-0020-06

Analysis of Properties of Double-layer Vibration Isolation System with Particle Damping

YANG Zhengqi, JI Min, TIAN Yizhuo

(School of Energy and Power, Jiangsu University of Science and Technology, Zhenjiang 212003, China)

Abstract: Aiming at the problem of limited effect of double-layer vibration isolation system in low frequency band, this paper proposes a particle damped double-layer vibration isolation structure with intermediate particles-filled mass blocks. By establishing the dynamic model of the double-layer vibration isolation system, this research conducts coupling simulation analysis based on multi-body dynamics and discrete element method, calculation of the vibration isolation effect of the particle-damped double-layer vibration isolation system, and the exploration for the influence parameters of the vibration isolation performance, and analyzes the influence patterns of excitation amplitude and particle size on the vibration isolation effect of the structure. The results show that after particle damping is applied, the vibration isolation effect of the double-layer vibration isolation system is greatly improved in the low frequency band, and the increase of the vibration level difference can reach the maximum of 4.9 dB. This study lays a foundation for promoting the application of particle damped two-layer vibration isolation system in engineering.

Keywords: particle damping; double-layer vibration isolation; multi-body dynamics; discrete element method; vibration level difference

0 引言

双层隔振是一种动力设备常用的隔振方式,与单层隔振相比,其具有更好的隔振效果,解决了单层隔振稳定性差的问题^[1],被广泛应用于船舶、土木、机械等领域^[2-6]。双层隔振作为一种被动隔振技术,对高频振动有较好的隔振效果,但在低频段的隔振效果有限^[7-8],对低频振动的隔离的研究一直是研究的重点和难点。

颗粒阻尼是一种新兴的被动阻尼技术,在振动体中的有限封闭空间内填充颗粒,通过颗粒间的摩擦与冲击作用消耗系统的振动能量,以达到减振的目的,其具有耐高温、抗老化、结构简单等

优点,目前已广泛应用于航空、汽车等领域^[9-12]。颗粒阻尼技术的应用可以在一定程度上弥补传统减振结构的劣势,提高结构对低频振动的隔振效果^[13]。

本文通过建立双层隔振系统动力学模型,基于多体动力学和离散元法进行耦合仿真计算,分析颗粒阻尼对于双层隔振系统隔振效果的影响。

1 双层隔振系统理论模型

双层隔振系统如图 1 所示,图 1 中 m_1 、 m_2 、 m_3 分别为基座等效质量、中间质量块和上层质量; k_1 、 k_2 、 k_3 分别为基座等效刚度系数、连接基座和中间质量的隔振器刚度系数以及连接中间质量和上

基金项目: 热能动力技术重点实验室开放基金资助项目(TPL2020A03)

第一作者简介: 杨正奇(1997—),男,江苏南京人,硕士研究生,研究方向为噪声与振动控制,yoseiki1997@163.com。

层质量的隔振器刚度系数; c_1 、 c_2 、 c_3 分别为基座等效阻尼系数、连接基座和中间质量的隔振器阻尼系数以及连接中间质量和上层质量的隔振器阻尼系数。

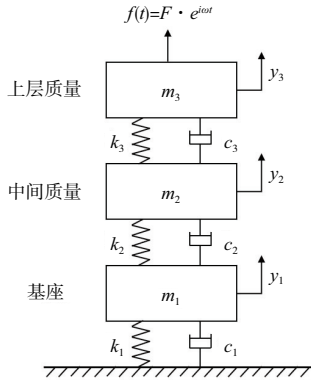


图1 双层隔振系统

上层质量上作用有激励力 $f(t)$, 可得双层隔振系统的强迫振动方程为

$$\begin{cases} m_3 \ddot{y}_3 = f(t) + k_3(y_2 - y_3) + c_3(\dot{y}_2 - \dot{y}_3) \\ m_2 \ddot{y}_2 = -k_3(y_2 - y_3) + k_2(y_1 - y_2) - c_3(\dot{y}_2 - \dot{y}_3) + c_2(\dot{y}_1 - \dot{y}_2) \\ m_1 \ddot{y}_1 = -k_2(y_1 - y_2) - k_1 y_1 - c_2(\dot{y}_1 - \dot{y}_2) - c_1 \dot{y}_1 \end{cases} \quad (1)$$

设该方程的3个解为

$$y_1 = Y_1 e^{i\omega t}, y_2 = Y_2 e^{i\omega t}, y_3 = Y_3 e^{i\omega t} \quad (2)$$

将式(2)代入式(1)中可得

$$\begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & 0 \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ 0 & a_{32} & a_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Y_1 \\ Y_2 \\ Y_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ F \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中

$$\begin{cases} a_{11} = k_1 + k_2 + i\omega(c_1 + c_2) - m_1 \omega^2 \\ a_{22} = k_2 + k_3 + i\omega(c_2 + c_3) - m_2 \omega^2 \\ a_{33} = k_3 + i\omega c_3 - m_3 \omega^2 \\ a_{12} = a_{21} = -k_2 - i\omega c_2 \\ a_{23} = a_{32} = -k_3 - i\omega c_3 \end{cases} \quad (4)$$

可得双层隔振系统的强迫振动方程的解为

$$\begin{cases} Y_1 = \frac{a_{12} a_{23} F}{\Delta} \\ Y_2 = -\frac{a_{11} a_{23} F}{\Delta} \\ Y_3 = \frac{(a_{11} a_{22} - a_{12} a_{21}) F}{\Delta} \end{cases} \quad (5)$$

式中 Δ 为系统的特征多项式, 其表达式为

$$\Delta = a_{11} a_{22} a_{33} - a_{11} a_{23} a_{32} - a_{12} a_{21} a_{33} \quad (6)$$

双层隔振系统上层质量与基座之间的振级落差为

$$D = 20 \lg \left\{ \operatorname{Re} \left[\frac{Y_3}{Y_1} \right] \right\} \quad (7)$$

中间质量块的速度振幅为

$$V_2 = \sqrt{\operatorname{Re} [\omega Y_2]^2 + \operatorname{Re} [i\omega Y_2]^2} \quad (8)$$

2 颗粒阻尼双层隔振系统仿真分析

2.1 颗粒阻尼力学模型

离散元法是一种基于颗粒动力学的数值模拟方法, 也是目前颗粒阻尼主要的理论分析方法。

在离散元法中, 颗粒系统被建模为由若干个体颗粒组成的集合体, 每个颗粒都有自己的质量、速度和位置, 并可以通过与其他颗粒或壁面的相互作用来传递力, 从而模拟颗粒系统在不同条件下的行为, 例如碰撞、滚动、流动等。

本文采用 Hertz-Mindlin 接触模型进行离散元仿真计算, 将颗粒受到的力简化为法向力和切向力及其阻尼分量, 颗粒接触模型如图2所示。

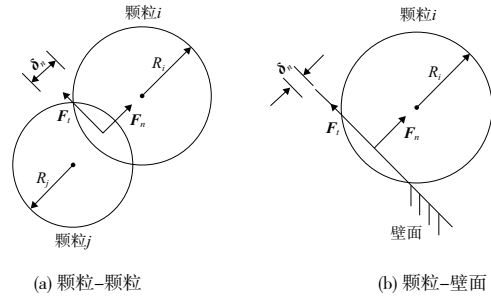


图2 颗粒接触模型

法向接触力及其阻尼分量可表示为

$$F_n = \frac{4}{3} E^* \sqrt{R^*} \delta_n^{\frac{3}{2}} \quad (9)$$

$$F_n^d = \ln e^2 \sqrt{\frac{5S_n m^*}{6(\ln^2 e + \pi^2)}} \mathbf{v}_n^{rel} \quad (10)$$

切向接触力及其阻尼分量可表示为

$$F_t = -S_t \delta_t \quad (11)$$

$$F_t^d = \ln e^2 \sqrt{\frac{5S_t m^*}{6(\ln^2 e + \pi^2)}} \mathbf{v}_t^{rel} \quad (12)$$

式中: E^* 为等效弹性模量; R^* 为等效半径; m^* 为等效质量; e 为恢复系数; δ_n 和 δ_t 分别为法向重叠量和切向重叠量; S_n 和 S_t 分别为法向刚度和切向刚度; \mathbf{v}_n^{rel} 和 \mathbf{v}_t^{rel} 分别为相对速度的法向分量和切向分量。

根据库仑摩擦定律, 两个接触球体之间存在

切向摩擦力,切向力的最大值受切向摩擦力控制,即

$$F_t^* = \begin{cases} F_t + F_t^d & |F_t| \leq \mu_s F_n \\ \mu_s F_n & |F_t| > \mu_s F_n \end{cases} \quad (13)$$

式中, μ_s 是两个接触球体之间的静摩擦因数。当切向力的大小超过最大静摩擦力时,两接触球体之间发生滑动摩擦,该过程可以将颗粒的动能耗散,实现颗粒阻尼的作用效果。

2.2 分析模型

颗粒阻尼双层隔振仿真模型如图 3 所示,基座等效质量为 $m_1 = 0.08 \text{ kg}$, 中间质量块的质量 $m_2 = 0.43 \text{ kg}$, 上层质量 $m_3 = 1.07 \text{ kg}$; 基座等效刚度系数 $k_1 = 20\ 000 \text{ N/m}$, 中间质量和基座之间隔振器刚度系数 $k_2 = 5\ 000 \text{ N/m}$, 上层质量和中间质量之间隔振器刚度系数 $k_3 = 3\ 000 \text{ N/m}$, 基座等效阻尼系数 $c_1 = 10\ 000 \text{ N/(m/s)}$, 中间质量和基座之间隔振器阻尼系数 $c_2 = 10\ 000 \text{ N/(m/s)}$, 上层质量和中间质量之间隔振器阻尼系数 $c_3 = 10\ 000 \text{ N/(m/s)}$ 。上层质量上作用有正弦激励 $f(t)$ 。

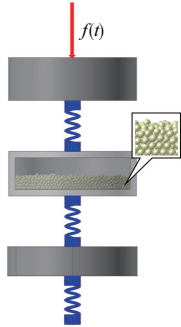


图 3 颗粒阻尼双层隔振仿真模型

中间质量块内部设置圆柱形空腔用于填充颗粒,空腔高 20 mm, 直径 72 mm, 材料为 Q235 碳钢, 密度为 $7\ 850 \text{ kg/m}^3$, 弹性模量为 200 GPa, 泊松比值为 0.285。

将仿真参数代入式(7)中, 可得未施加颗粒阻尼的双层隔振系统的振级落差随频率变化的曲线如图 4 所示。

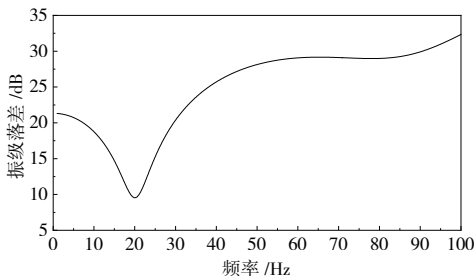


图 4 双层隔振系统的振级落差

当激励幅值为 20 N 时, 根据式(8)可得未施加颗粒阻尼的中间质量的速度幅值随频率变化的曲线如图 5 所示。

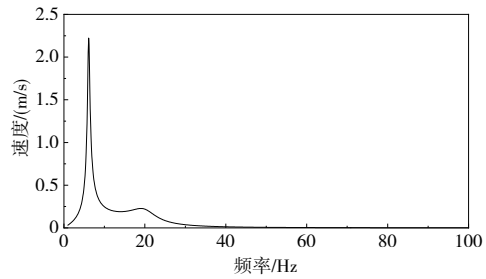


图 5 中间质量的速度幅值

从图 4 和图 5 中可以看出, 该双层隔振结构对于低频振动的隔离效果不佳, 振级落差在 20 Hz 左右出现明显降低, 中间质量块的速度振幅在 50 Hz 后接近 0, 由于颗粒阻尼是一种振幅敏感型的被动减振结构, 本文主要研究 0~50 Hz 频段内颗粒阻尼对双层隔振系统的作用效果。

2.3 颗粒阻尼减振特性分析

在中间质量块中填充球形颗粒, 使颗粒均匀堆积在空腔底部, 颗粒总质量为 0.15 kg, 约占上层质量和中间质量之和的 10%, 颗粒阻尼参数如表 1 所示。

表 1 颗粒阻尼参数

参数	数值
密度/(kg/m^3)	7 850
弹性模量/GPa	200
泊松比	0.285
颗粒-颗粒恢复系数	0.67
颗粒-壁面恢复系数	0.67
静摩擦因数	0.2
滚动摩擦因数	0.01

当激励幅值为 20 N, 颗粒粒径为 4 mm 时, 施加颗粒阻尼前后不同频率下双层隔振系统的振级落差如图 6 所示。

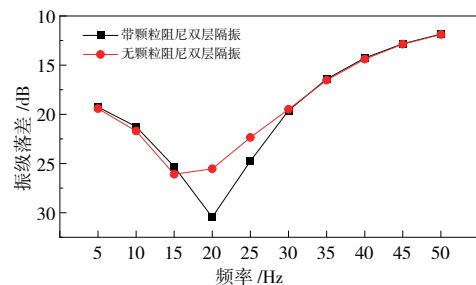


图 6 施加颗粒阻尼前后双层隔振系统的振级落差

从图 6 中可以看出,施加颗粒阻尼后,双层隔振系统的振级落差在 15~30 Hz 频段内有了显著提高,在 20 Hz 时,提升幅度最大,达到 4.9 dB。

3 颗粒阻尼双层隔振系统隔振效果影响参数

3.1 激励幅值对隔振效果的影响

当激励频率为 20 Hz,颗粒粒径为 4 mm 时,不同激励幅值时,双层隔振系统的振级落差如图 7 所示。

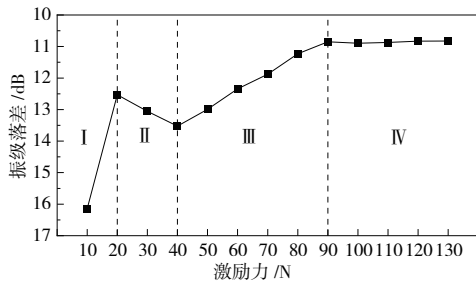


图 7 激励幅值对双层隔振系统振级落差的影响

从图 7 中可以看出,双层隔振系统的振级落差随着激励力的增大,先增大后减小再增大,最后趋于稳定,并非正相关。

根据振级落差的变化趋势,将结果划分为 4 块区域:

1) 区域 I

激励大小为 10 N 和 20 N 时颗粒对结构的作用力,如图 8 和图 9 所示。当激励很小时,颗粒与空腔几乎不发生碰撞,此时颗粒对空腔的作用力

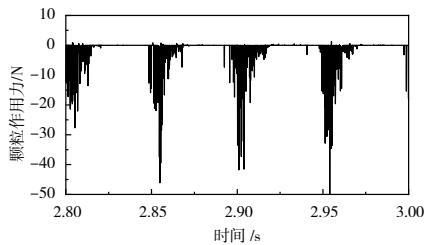


图 10 激励幅值为 30 N 时的颗粒作用力

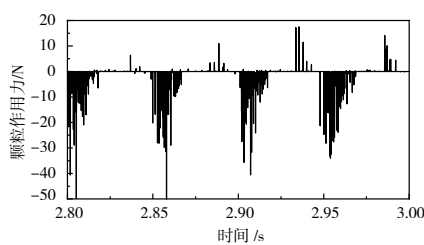


图 11 激励幅值为 40 N 时的颗粒作用力

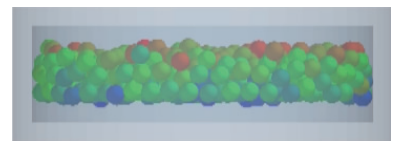


图 12 颗粒的“滞空”状态

3) 区域 III

激励幅值为 50 N 和 60 N 时颗粒对结构的作用力,如图 13 和图 14 所示。在区域 III 内,随着激励的增大,颗粒与空腔上表面碰撞产生的作用力逐渐增大,颗粒阻尼的作用效果越来越好。

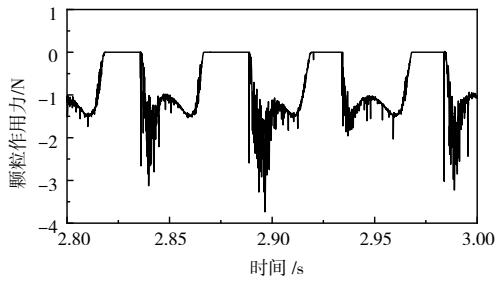


图 8 激励幅值为 10 N 时的颗粒作用力

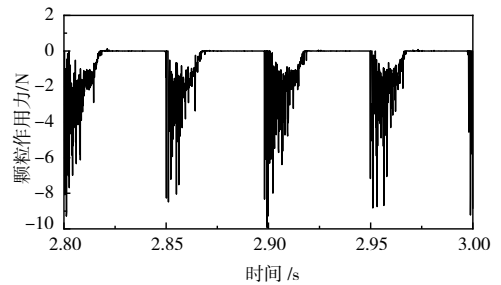


图 9 激励幅值为 20 N 时的颗粒作用力

2) 区域 II

激励幅值为 30 N 和 40 N 时颗粒对结构的作用力,如图 10 和图 11 所示。随着激励的进一步增大,颗粒开始出现较长时间的“滞空”状态,即与空腔上下表面均不发生碰撞,如图 12 所示,此状态下颗粒对结构几乎没有作用力。在区域 II 内,颗粒阻尼作用效果随着激励的增大而变差。

4) 区域 IV

激励大小为 100 N 时颗粒对结构的作用力,如图 15 所示。在区域 IV 内,颗粒与空腔上下表面碰撞产生的作用力幅值几乎相同,颗粒阻尼作用效果趋于稳定。

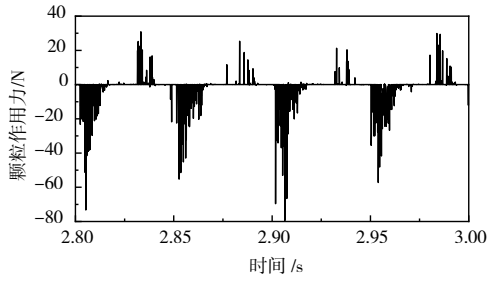


图 13 激励幅值为 50 N 时的颗粒作用力

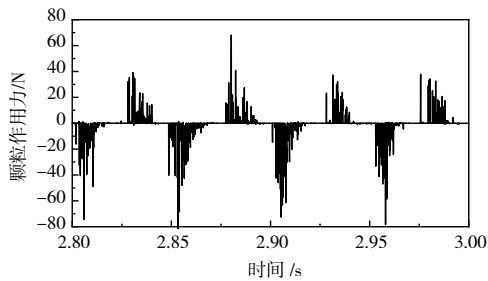


图 14 激励幅值为 60 N 时的颗粒作用力

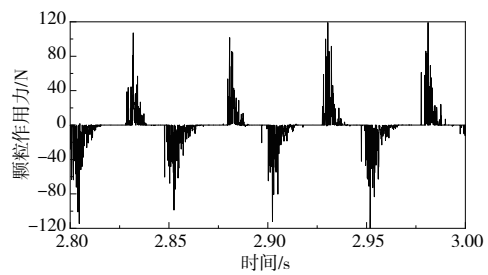


图 15 激励幅值为 100 N 时的颗粒作用力

3.2 颗粒粒径对隔振效果的影响

当激励幅值为 20 N, 频率为 20 Hz 时, 保证颗粒总质量均为 0.15 kg, 不同颗粒粒径下双层隔振系统的振级落差如图 16 所示。

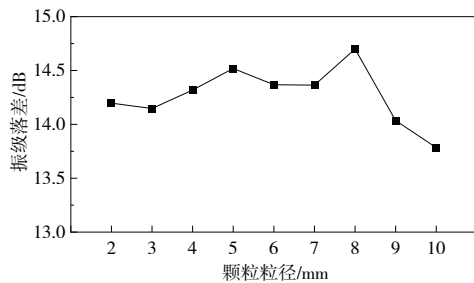


图 16 颗粒粒径对双层隔振系统振级落差的影响

从图 16 中可以看出, 当颗粒粒径为 2~7 mm

时, 颗粒粒径对颗粒阻尼作用效果的影响较小, 偏差值在 0.3 dB 范围内; 当颗粒粒径为 8 mm 时, 颗粒阻尼的作用效果最好, 与 3 mm 时的结果相比, 提升了 0.5 dB; 当颗粒粒径为 9~10 mm 时, 随着粒径的增加, 颗粒阻尼作用效果变差较为明显, 与 8 mm 时的结果相比, 振级落差下降了 0.9 dB。

粒径大小直接影响到颗粒在空腔内的堆积情况, 可能是影响颗粒阻尼作用效果的因素之一。图 17 为颗粒堆积高度示意图。提取不同粒径下颗粒的堆积高度, 如图 18 所示。

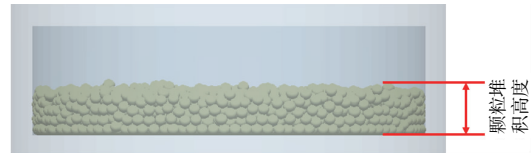


图 17 颗粒堆积高度示意图

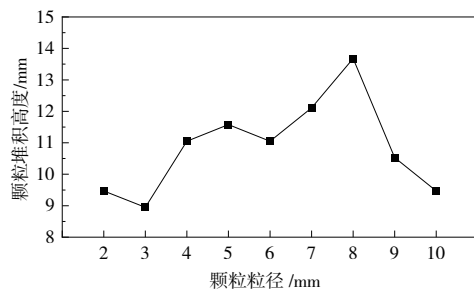


图 18 不同粒径下的颗粒堆积高度

对比分析图 17 和图 18, 可以看出, 当颗粒总质量不变时, 较高的颗粒堆积高度可以有效提升颗粒阻尼的作用效果。

4 结语

1) 颗粒阻尼技术可以有效提高双层隔振系统在低频段的隔振效果, 在 15~30 Hz 频段内, 振级落差提升了最大 4.9 dB;

2) 激励幅值对颗粒阻尼双层隔振系统的隔振效果有较大影响, 但并非正相关, 可以根据颗粒在空腔内的运动情况及空腔上下表面的受力情况, 将颗粒阻尼的作用效果划分为 4 个阶段;

3) 颗粒粒径对颗粒阻尼双层隔振系统的隔振效果也有一定影响, 测量了不同粒径时颗粒在空腔内的堆积高度, 发现颗粒堆积高度较高时, 颗粒阻尼的作用效果较好。

参考文献:

[1] 张秀芹, 杨波, 杨海琴, 等. 厢式货车双层隔振仿真研

- 究[J]. 汽车工程学报,2011,1(1):69-75.
- [2] 金丽琼,邢志胜,朱宝庆,等. 基于双层隔振的船用空压机系统振动建模研究[J]. 中国设备工程,2019(13):216-218.
- [3] 张皓宇,韩保红,程兆刚,等. 一种适用于弹药公路运输的双层隔振器设计及性能分析[J]. 机械强度,2022,44(5):1039-1048.
- [4] 邱元燃,徐伟,胡泽超,等. 机械设备轻量化中间质量双层隔振技术研究[J]. 船舶力学,2022,26(9):1373-1384.
- [5] 牛昊轩,闫兵,吴潇. 动力机组双层隔振系统新型隔振器设计及研究[J]. 机械制造与自动化,2019,48(5):110-114,130.
- [6] WANG M T, CHAI K, LIU S Y, et al. Dynamic characteristics and experimental study of double layer vibration isolation system [J]. Journal of Mechanical Science and Technology,2023,37(4):1699-1709.
- [7] 徐伟,邱元燃,胡泽超. 不同中间质量形式的双层隔振系统对比研究[J]. 海军工程大学学报,2021,33(3):62-66,105.
- [8] 江国和. 舰船机械设备隔振技术的发展[C]// 第十届船舶水下噪声学术讨论会,2007.
- [9] 肖望强,陈辉,许展豪,等. 基于颗粒阻尼的内燃动车组动力包构架多工况减振研究[J]. 机械工程学报,2022,58(4):250-257.
- [10] 鲁正,周超杰,严德裕,等. 附加增强型颗粒惯容装置的钢框架结构振动台试验研究[J]. 建筑结构学报,2023,44(增刊1):48-55.
- [11] 和东平,徐慧东,刘元铭,等. 基于颗粒阻尼吸振的波纹辊轧机非线性垂振控制[J]. 钢铁,2023,58(8):129-137.
- [12] EHLERS T, TATZKO S, WALLASCHEK J, et al. Design of particle dampers for additive manufacturing[J]. Additive Manufacturing,2021,38:101752.
- [13] 段东平,高扬,张晓冬,等. 一种基于颗粒阻尼减振的硬岩掘进机及其阻尼减振设计方法:CN115419417B[P]. 2025-02-07.

收稿日期:2024-01-22

(上接第11页)

对比不同扫描策略制备的单孔疲劳试件的疲劳试验结果,可知 SLM 成形的 TC4ELI 钛合金带孔试样具有明显的疲劳性能各向异性。在实际打印制造零件时可根据零件的实际工况安排扫描策略,使受力方向基本平行于来回扫描的轨迹方向,可提升零件的疲劳性能。

3 结语

1) 在 SLM 成形过程中,激光功率和扫描速度是影响其成形质量的重要因素。在激光功率 $P=250\text{ W}$,扫描速度 $v=600\text{ mm/s}$ 时,SLM 成形的 TC4ELI 构件的总体力学性能表现最好。

2) 在激光能量密度较低时,SLM 成形 TC4ELI 钛合金构件会出现不完全熔化产生的孔隙,降低了构件的强度和塑性。适当提高激光功率有利于钛合金粉末的充分熔合,改善了成形质量;但当激光能量密度过大时会引起钛合金元素过烧和晶粒粗大,导致钛合金成形构件的强度和塑性均有所降低。

3) SLM 成形的 TC4ELI 钛合金带孔试样具有明显的疲劳性能各向异性,与传统的层间旋转的扫描策略相比,固定扫描方向的扫描策略可以有效提升构件受平行于扫描轨迹方向载荷时的疲劳性能。

参考文献:

- [1] 姚梦,刘勇,朱景川. TC11 钛合金双重热处理工艺设计[J]. 热处理技术与装备,2016,37(5):65-70.
- [2] 史小云,郝芳,张晓园,等. 变量量对 TC25 钛合金饼坯组织和力学性能的影响[J]. 材料开发与应用,2017,32(5):28-32.
- [3] 张颖,赖长亮,和卫平,等. 潜水器耐压壳结构选材应用综述[J]. 舰船科学技术,2022,44(5):1-6.
- [4] BOURELL D, KRUTH J P, LEU M, et al. Materials for additive manufacturing[J]. CIRP Annals,2017,66(2):659-681.
- [5] 张凤明,程崇旗,范立成,等. 激光功率对选区激光熔化 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{ZrO}_2(\text{Y}_2\text{O}_3)$ 缺陷与力学性能分析[J]. 机械制造与自动化,2023,52(3):33-36.
- [6] SHEN L C, YANG X H, HO J R, et al. Effects of build direction on the mechanical properties of a martensitic stainless steel fabricated by selective laser melting[J]. Materials,2020,13(22):5142.
- [7] 姚晨光,安志斌,杨竹芳. Inconel718 合金增材制造残余应力分布与数值模拟分析[J]. 机械制造与自动化,2019,48(4):134-136,179.
- [8] 辛如意,兰亮,何博. 选区激光熔化增材制造钛合金的疲劳性能研究进展[J]. 材料科学与工程学报,2022,40(4):706-716.

收稿日期:2024-03-29