



航天器环境工程

SPACECRAFT ENVIRONMENT ENGINEERING

——· 中国科技核心期刊

微重力环境的混合悬浮模拟及其熔炼加工应用

朱尧舜 魏强 刘月 杨亚伟 侯恒博 席振华

Mixed levitation simulation in microgravity environment and its application to melting processing

ZHU Yaoshun, WEI Qiang, LIU Yue, YANG Yawei, HOU Hengbo, XI Zhenhua

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12126/see.2024039>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

微重力条件下上面级贮箱液体推进剂自由界面变形数值模拟研究

Numerical simulation of free interface deformation of liquid propellant in upper stage tank under microgravity condition
航天器环境工程. 2020, 37(2): 115–119 <https://doi.org/10.12126/see.2020.02.002>

基于微重力模拟实验的在轨维修时间预计修正方法

A method for correction of predicting on-orbit maintenance time based on simulated microgravity experiment
航天器环境工程. 2023, 40(5): 550–558 <https://doi.org/10.12126/see.2023072>

基于重力梯度被动稳定的空间站微重力伴飞实验舱方案

A scheme for China Space Station microgravity accompanying flight experimental module based on gravity gradient passive stabilization
航天器环境工程. 2024, 41(3): 270–276 <https://doi.org/10.12126/see.2023137>

空间飞行器重力卸载用弹力绳特性试验研究

Test study on the characteristics of flexible rope for gravity unloading of spacecraft
航天器环境工程. 2024, 41(5): 644–651 <https://doi.org/10.12126/see.2024017>

基于有限元法的水下绝缘体小目标电磁场探测方法仿真研究

Simulation of detecting small underwater insulative target through electromagnetic field based on finite element method
航天器环境工程. 2022, 39(3): 293–297 <https://doi.org/10.12126/see.2022.03.012>

空间环境下航天器含间隙机构动力学研究进展

Research progress of spacecraft mechanism dynamics with clearance in space environment
航天器环境工程. 2023, 40(3): 309–318 <https://doi.org/10.12126/see.2022138>

微重力环境的混合悬浮模拟及其熔炼加工应用

朱尧舜¹, 魏强^{1,2,3*}, 刘月¹, 杨亚伟¹, 侯恒博¹, 席振华³

(1. 河北工业大学 机械工程学院; 2. 河北省跨尺度智能装备技术实验室;

3. 河北工业大学 材料科学与工程学院; 天津 300401)

摘要: 为解决单一悬浮法在模拟微重力环境时样品不稳定的问题, 提出一种气悬浮结合超声驻波悬浮的混合悬浮系统。该系统利用气浮支撑力抵消竖直方向上的重力作用, 通过超声驻波场的声辐射压力维持样品在垂直于重力方向上的稳定。通过有限元分析法研究系统关键构件的结构参数对轴向气浮支撑力和超声驻波场中最大声压的影响, 结果发现: 锥角扩散型喷嘴提供的轴向气浮支撑力随球喉直径比的增大而减小, 随喷嘴扩散角的增大先迅速增强后趋于稳定; 超声驻波场的最大声压随反射端直径和凹球面半径的增大先升高后降低。混合悬浮下的熔炼加工实验表明, 该系统能够较好维持样品悬浮状态下的稳定性。

关键词: 微重力; 气悬浮; 超声驻波悬浮; 混合悬浮; 有限元分析

中图分类号: O35; TG146.2

文献标志码: A

文章编号: 1673-1379(2024)06-0751-09

DOI: 10.12126/see.2024039

Mixed levitation simulation in microgravity environment and its application to melting processing

ZHU Yaoshun¹, WEI Qiang^{1,2,3*}, LIU Yue¹, YANG Yawei¹, HOU Hengbo¹, XI Zhenhua³

(1. School of Mechanical Engineering, Hebei University of Technology;

2. Hebei Trans-scale Intelligent Equipment Technology Laboratory;

3. School of Materials Science and Engineering, Hebei University of Technology; Tianjin 300401, China)

Abstract: To address the issue of sample instability in single levitation methods used to simulate microgravity environments, this paper introduced a mixed levitation system that combined air levitation with ultrasonic standing wave levitation. The system employed air levitation to counteract gravitational forces in the vertical direction and utilized the acoustic radiation pressure of an ultrasonic standing wave field to ensure stability perpendicular to gravity. Finite element analysis was conducted to investigate the impact of key component structural parameters on the axial air-bearing support force and the maximum acoustic pressure within the ultrasonic standing wave field. The analysis revealed that the axial air float support force, provided by a cone-angle diffusion nozzle, decreases with increasing spherical throat diameter ratio and increases rapidly before stabilizing with larger nozzle diffusion angles. The maximum acoustic pressure in the ultrasonic standing wave field initially increases with the diameter of the reflection end and the radius of the concave spherical surface, followed by a decrease. Melting process experiments under mixed suspension demonstrate the system's effectiveness in maintaining sample stability.

Keywords: microgravity; air levitation; ultrasound standing wave levitation; mixed levitation; finite element analysis

收稿日期: 2024-04-09; 修回日期: 2024-11-27

基金项目: 天津市应用基础研究多元投入基金项目 (编号: 21JCZDJC00710)

引用格式: 朱尧舜, 魏强, 刘月, 等. 微重力环境的混合悬浮模拟及其熔炼加工应用[J]. 航天器环境工程, 2024, 41(6): 751-759
ZHU Y S, WEI Q, LIU Y, et al. Mixed levitation simulation in microgravity environment and its application to melting processing[J].
Spacecraft Environment Engineering, 2024, 41(6): 751-759

0 引言

随着航天技术的飞速发展,太空探索活动不断深入,给后勤运输带来巨大挑战^[1]。为了降低后勤运输成本,美国航空航天局(NASA)率先提出太空制造的概念,即在太空环境原位完成所需产品的加工制造^[2-3]。然而,太空原位制造的实现需要克服复杂空间环境带来的不利影响,有研究指出,在诸多空间环境因素中,微重力是太空原位制造面临的主要挑战之一^[4-5]。

早期关于微重力对材料加工影响的研究大多在真实的太空环境中进行^[6-7]。受限于当时的航天技术,不仅实验成本高昂,而且周期长,严重制约了研究进展。21世纪以来,尽管航天技术得到跨越式发展,但在真实太空环境中进行实验的机会仍然有限。鉴于此,国内外众多研究人员提出在地面条件下模拟微重力环境,旨在以较低成本复现太空实验。

根据原理的不同,现有的微重力模拟技术可分为加速度控制、物理支撑以及悬浮法3类。加速度控制技术通过控制实验平台的运动,产生与重力方向相反的加速度,可实现微重力环境的模拟。以落塔^[8]和抛物线飞行^[9]为代表的加速度控制技术,虽然可以较为真实地模拟微重力状态,但这种状态无法长时间保持,且实验成本较高,限制了该技术的广泛应用。物理支撑技术^[10-11]包括悬吊法与水浮法,即通过选用一定的物理支撑实现对目标的精确力学干预,以有效减轻或抵消重力作用。物理支撑技术虽为微重力研究提供了有效途径,但其不可避免地涉及与实验样品的直接接触,存在潜在的样品污染风险。与以上2种微重力模拟技术相比,悬浮法因能获得较长时间的微重力状态且可避免样品污染风险,发展最为迅速。

悬浮法利用某些物理场代替传统的实体容器,以实现样品的非接触支撑,进而完成对微重力效果的模拟。按照物理场的不同,悬浮法主要分为气悬浮^[12]、超声驻波悬浮^[13]、电磁悬浮^[14]以及静电悬浮^[15]。其中,气悬浮与超声驻波悬浮虽然不适用于真空环境,但不受材料种类的限制且系统结构简单,应用最为广泛。在实际应用过程中,样品的稳定性(即悬浮过程中未产生较大程度晃动而导致样品掉落)是衡量悬浮效果的重要指标之一。采用单

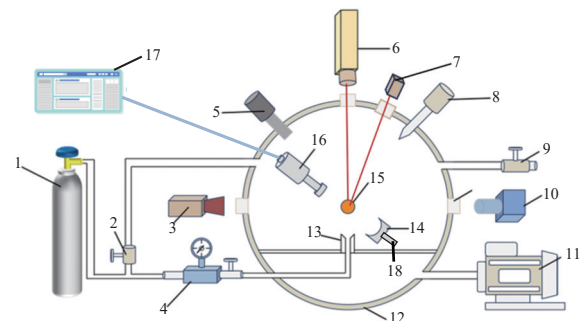
一的气悬浮或超声驻波悬浮时,样品都存在不稳定性。为保证悬浮过程中样品的稳定性,气悬浮与三轴式超声悬浮结合的混合悬浮系统被提出^[16-17]。但该系统结构复杂,且由于气浮喷嘴采用了传统的圆柱形喷嘴,在启动过程中样品易掉落。

为简化混合悬浮系统结构,并保证样品的悬浮稳定性,本文提出将气悬浮与单轴式超声驻波悬浮相结合的微重力模拟系统。样品悬浮过程中,由竖直方向(后文简称轴向)上的气浮支撑力抵消重力的作用,通过超声驻波场的声辐射压力维持样品在垂直于重力方向(后文简称径向)上的稳定;并通过有限元分析法研究系统关键构件的结构参数对轴向气浮支撑力和超声驻波场中最大声压的影响。该系统主要应用于模拟微重力环境下对包括金属、陶瓷在内的多种材料进行熔炼加工。现阶段,通过模拟微重力环境进行熔炼加工,可以有效抑制异质形核的产生并显著减弱自然对流的影响,被广泛应用于制备高纯与高性能材料^[18-19]。但在熔炼过程中,由于温度的急剧变化,气体的压力与密度并非保持恒定,导致气悬浮力处于动态变化中^[20],会加剧样品的晃动并增大掉落风险。在本文研究中以直径3 mm的6061铝合金球为原材料,通过观察样品在悬浮熔炼过程中是否发生掉落来评估系统的悬浮稳定性。

1 系统组成与工作原理

1.1 系统组成

微重力模拟混合悬浮系统由洗气、悬浮支撑以及加工等关键模块组成,具体如图1所示。



1—氩气瓶;2—高真空挡板阀;3—红外热像仪;4—高精度氩气流量控制阀;5—电阻规;6—激光器;7—红外测温仪;8—电离规;9—排气阀;10—高清摄像机;11—高真空排气台;12—真空罐;13—喷嘴;14—反射端;15—样品;16—超声波换能器;17—超声波发生器;18—调谐台。

图1 混合悬浮系统组成

Fig. 1 Configuration of the mixed levitation system

洗气模块由氩气瓶、高真空挡板阀、高精度氩气流量控制阀以及高真空排气台组成, 在悬浮前期通过抽真空并通入高纯氩气的方式, 保证系统内部处于惰性气体氛围中; 悬浮支撑模块由喷嘴、超声波发生器、超声波换能器、反射端以及调谐台组成, 用于提供样品所需的悬浮支撑力; 加工模块由激光器、红外热像仪以及红外测温仪组成, 激光器用于加热样品, 红外热像仪和红外测温仪用于样品温度的测量。

1.2 工作原理

混合悬浮系统的工作原理是: 先利用氩气喷嘴提供的气浮支撑力, 平衡样品在轴向上受到的重力; 待样品在气浮支撑力作用下保持悬浮状态时, 通过超声波换能器与反射端间形成的驻波声场, 为样品添加声辐射压力, 使之在径向上维持稳定。该系统可同时用于模拟微重力环境下对材料进行熔炼加工, 加工过程中: 先通过洗气模块保证加工区域处于惰性气体氛围中, 避免样品被污染; 再利用激光器对悬浮状态的样品进行快速加热, 使其温度到达熔点并完全熔化; 关闭激光器后, 失去热源的样品温度急剧下降至凝固点以下, 从而完成熔炼加工。

2 轴向气浮支撑力分析

混合悬浮技术的研究旨在提高系统的悬浮力和稳定性, 而轴向气浮支撑力作为关键因素之一, 对样品的悬浮效果至关重要。现有的研究指出, 当氩气通过喷嘴在较低流量(低于 4.4 L/min)下可以提供较大的气浮支撑力时, 悬浮状态最为稳定^[21]。这是因为在低流量下, 气流作用在样品上的剪切力较小, 样品受到的扰动也最小。喷嘴的结构将直接影响气浮支撑力的大小, 为了保证样品在气悬浮状态下的稳定性, 本章对喷嘴结构参数与轴向气浮支撑力之间的关系展开讨论。

2.1 喷嘴结构分析

常见的喷嘴结构有锥角扩散型、多孔射流型、等截面扩散型以及收敛扩散型 4 种^[20], 如图 2 所示。其中应用最为广泛的是锥角扩散型喷嘴, 其出口处采用锥形结构来扩宽气流通道, 悬浮过程中样品与锥角内壁间会产生变化的压力区, 可在样品发生偏移时提供回复力维持样品的稳定^[21]。这使得锥

角扩散型喷嘴既能提供较大的轴向支撑力, 也能在一定程度上保证样品悬浮时径向的稳定性。

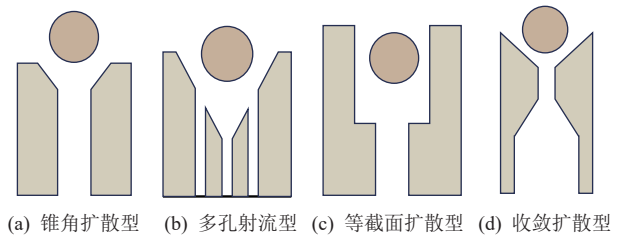


图 2 常见喷嘴结构

Fig. 2 Common nozzle structures

锥角扩散型喷嘴的结构参数中, 喷嘴扩散角 θ 以及球喉直径比 D/d (如图 3 所示) 被证明是影响轴向气浮支撑力的关键因素^[21]。但关于这两个参数对轴向气浮支撑力的具体影响, 在已查询到的公开文献中尚未被详细提及。

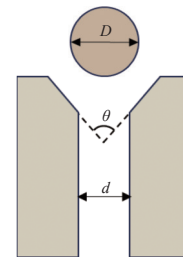


图 3 锥角扩散型喷嘴的主要结构参数

Fig. 3 Main structural parameters of the cone-angle diffusion nozzle

2.2 轴向气浮支撑力求解

为求解喷嘴扩散角以及球喉直径比对轴向气浮支撑力的影响, 下面采用控制变量的方法进行研究: 在分析某一结构参数对轴向气浮支撑力的影响时, 保持其他因素恒定, 不断调整该变量的值, 并依次计算轴向气浮支撑力的大小。

在计算轴向气浮支撑力时, 需要先对气流场的流速进行求解。这是因为轴向气浮支撑力来源于气流掠过悬浮物时轴向上动量的减小。在实际悬浮状态下, 气流场非常复杂, 常规的理论求解较为困难, 因此采用有限元法对气流场进行仿真模拟。

采用 COMSOL 软件进行气悬浮状态下气流场的有限元仿真。为简化计算复杂程度, 考虑到气浮支撑喷嘴与悬浮物均为旋转对称体, 选用二维轴对称维度进行仿真。在流体力学模块中, 根据实际结构尺寸完成气流场的几何建模, 选用氩气的物理参数对流体材料进行定义, 具体的边界条件如图 4(a) 所示。在该有限元模型进行网格划分时, 选用自

由三角形网格, 这样可以根据流体流动中的梯度和边界条件自适应地调整网格大小和形状, 使得关键区域拥有更高的网格密度, 提高模拟结果的准确性, 并节省计算资源。具体网格划分如图 4(b) 所示: 悬浮物与喷嘴壁处的网格较细密, 这是因为在气流场中, 气体与固体接触界面位置的流速梯度会发生剧烈变化, 通过在这些区域使用更密集的网格, 可以避免数值的不稳定(振荡或数值耗散等)。研究中, 设定气流量为 3.0 L/min, 悬浮物为直径 3 mm 的球体, 悬浮高度为 8.0 mm, 以上参数恒定不变。

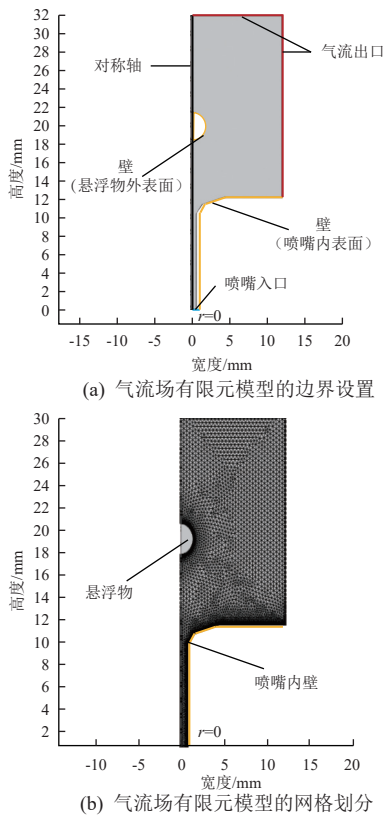


图 4 气流场的有限元建模
Fig. 4 Finite element modeling of airflow fields

轴向气浮支撑力的大小可以通过 COMSOL 软件内置的气流作用力函数求解。气流作用在物体上的力包括因表面压差产生的压力以及气流与物体摩擦产生的黏性力。压力的大小可以通过压强乘以表面法向量沿重力方向的分量求解; 而黏性力的大小等于样品外壁上黏性应力的积分。在 COMSOL 软件流体力学后处理模块中, 压力与黏性力的合力被定义为总应力, 因此轴向气浮支撑力 F_s 的表达式为

$$F_s = -\text{spf.T_stressz}, \quad (1)$$

式中, spf.T 表示流体场中的应力张量, stressz 表示轴向上压力的分量。

有限元仿真求解得到锥角扩散型喷嘴的球喉直径比及喷嘴扩散角对轴向气浮支撑力的影响如图 5 所示。

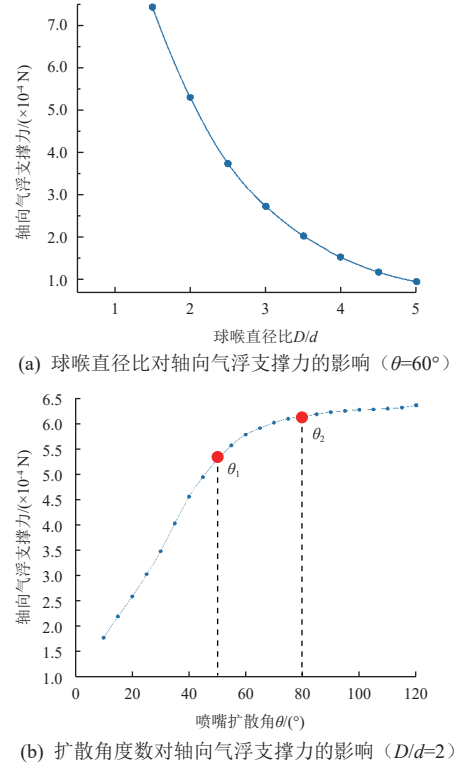


图 5 喷嘴结构参数对轴向气浮支撑力的影响
Fig. 5 Influence of nozzle structural parameters on axial air float support

从图 5(a) 可以看出, 轴向气浮支撑力随球喉直径比的增大而减小, 特别是当球喉直径比小于 3 时减速较快, 球喉直径比超过 3 后减速放缓。这一现象可以用气体动力学进行解释: 球喉直径比较小时, 喷嘴喉道孔的直径较大, 气体流过喉道孔时阻碍较小, 这意味着气体的动量损失较小, 更多的动量能够传递给球体, 从而产生更大的气浮支撑力; 相反, 在球喉直径比较大, 即喉道孔直径较小的情况下, 气体在流过喉道孔时会有较大的动量损失, 减少了传递给球体的动量, 从而降低了气浮支撑力; 而当球喉直径比超过 3 时, 增大球喉直径比只会造成喉道孔直径的小幅减小, 气流在通道中动量的损失也较小。

从图 5(b) 可以看出, 轴向气浮支撑力随喷嘴扩散角的增大而增大, 但曲线上存在 2 个节点 θ_1 和 θ_2 (分别对应扩散角为 50° 和 80°)。当 $\theta < \theta_1$ 时, 气浮支撑力随扩散角的增大而迅速增大; 当 $\theta_1 < \theta < \theta_2$ 时, 增速明显放缓; 当 $\theta > \theta_2$ 时, 增速更加缓慢, 几乎与扩散角无关。这是因为扩散角在小于 50° 的

范围内增加时，扩散段内气体流速增大，同时气流在喷嘴出口处受到了较大的约束，使得其扩散程度有限，因而轴向气浮支撑力增速较快；扩散角在 $50^{\circ}\sim 80^{\circ}$ 时，气流的扩散程度增加，在出口处得到发散，因此轴向气浮支撑力的增速减缓；随着扩散角的进一步增大，气流已经充分扩散，流速趋于稳定，轴向气浮支撑力也趋于稳定状态。

2.3 模型验证

气流场有限元模型的准确性可以通过样品的气浮支撑实验进行验证：在气悬浮状态下，样品所受重力大小等于轴向气浮支撑力的大小；故可通过比较样品重力大小与 COMSOL 软件计算出的气浮支撑力解析值来验证模型的准确性。图 6(a) 为实验采用的喷嘴实物，其扩散角为 50° ，喉道直径为 1.5 mm。使用该喷嘴完成了包含金属和陶瓷在内的多种材料样品的悬浮实验，如图 6(b)~(f) 所示。图 6(b)~(f) 中的钢尺仅用于在样品悬浮起始阶段对悬浮高度进行测量，以便及时粗调气体流量使样品悬浮在目标高度附近。实验过程中，样品悬浮高度 h 由激光测距仪进行测量，如图 6(g) 所示：依次测量悬浮前/后样品距传感器的距离 l_1 和 l_2 ，可计算出 $h=l_1-l_2$ 。

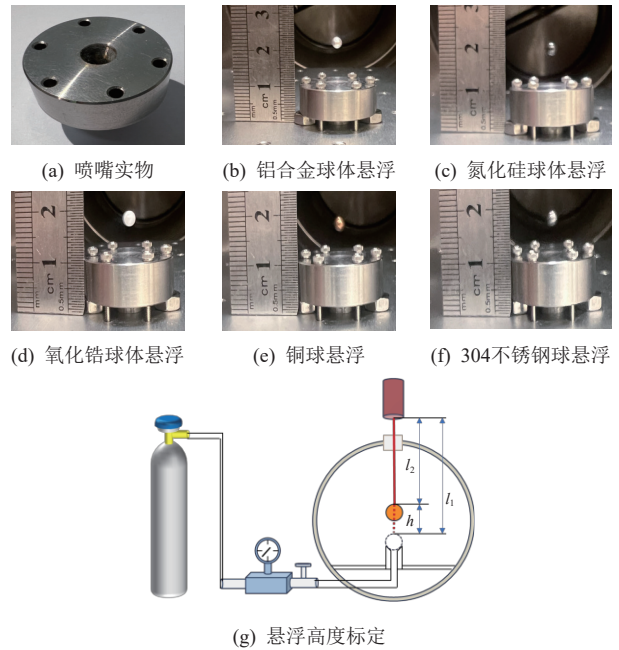


图 6 气浮支撑的实验验证

Fig. 6 Experimental validation of air float support

表 1 比较了轴向气浮支撑力的实际值与解析值。多次实验的计算结果显示，轴向气浮支撑力实际值(重力值)与解析值的最大相对误差仅为 3.67%。实际研究中，一般需要保证模型的求解精度在 5% 的范围内。可见，本文所建的气流场有限元模型的准确性达标，也进一步验证了前期研究结果的可信性。

表 1 轴向气浮支撑力的实际值与解析值比较

Table 1 Comparison of actual and analytical values of axial air float support force

样品材料	球体直径/mm	气体流量/(L·min ⁻¹)	悬浮高度/mm	重力/($\times 10^{-4}$ N)	解析值/($\times 10^{-4}$ N)	相对误差/%
铝合金	3	2.72	12.2	3.865	3.957	2.38
氮化硅	3	2.83	10.1	4.447	4.542	2.14
氧化锆	3	3.93	7.7	8.413	8.722	3.67
铜	3	4.63	7.5	11.685	11.735	0.43
不锈钢	3	4.56	7.3	11.068	11.400	2.30

3 径向驻波声辐射压力分析

在悬浮状态下，径向上的回复力是维持样品稳定的关键。在本文提出的混合悬浮系统中，径向回复力主要来源于超声驻波场提供的声辐射压力。超声驻波场是由发射端和反射端之间的超声波相互干涉形成的，其结构组成如图 7 所示：工作时超声波发生器发出特定频率的电信号，由换能器将电信号转换为机械振动，再经过变幅杆的放大后，在发射端与反射端间形成驻波^[22]。现有研究表明，反射端的几何形状对于驻波场的最大声压具有决定性作用，进而直接影响到声辐射压力的大小^[23]。本章

研究反射端的结构参数对驻波场最大声压的影响，以保证样品悬浮时的径向稳定。

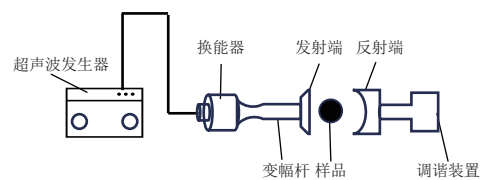


图 7 超声驻波场的结构组成

Fig. 7 Structural composition of the ultrasonic standing wave field

3.1 反射端形状

常见的反射端形状主要有平面、凹球面、旋转抛物面及旋转双曲面^[23]。其中凹球面反射端的截面形

状如图 8 所示。凹球面反射端凭借其独特的曲面设计,可以高效地将超声波能量集中到球面的几何中心,从而显著提升驻波场内的声压;而且这种凹球面结构的加工难度相对较低,应用最为广泛。凹球面反射端直径 D_0 以及凹球面半径 R_0 是反射端的关键结构尺寸,并且决定超声驻波场最大声压的大小。

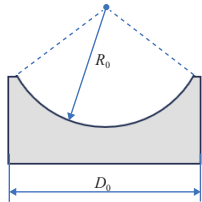
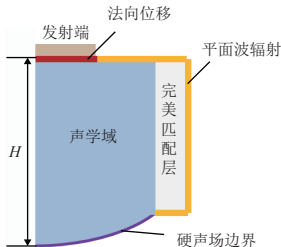


图 8 凹球面反射端截面形状

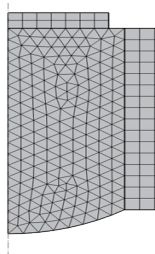
Fig. 8 Cross-section of concave spherical type reflection end

3.2 超声驻波场的有限元建模

为使驻波场具有较大的声辐射压力,维持悬浮状态下样品的径向稳定,本节使用 COMSOL 软件仿真研究反射端直径与凹球面半径对驻波场最大声压的影响。仿真分析中,根据凹球面反射端的形状,结合现有发射端为直径 19 mm 的圆盘,在压力声学模块建立了二维轴对称模型,并采用完美匹配层作为声学域与外界环境的过渡,具体的边界条件与网格划分如图 9 所示。



(a) 超声驻波场模型的边界条件



(b) 超声驻波场模型的网格划分

图 9 超声驻波场有限元建模

Fig. 9 Finite element modeling of the ultrasonic standing wave field

3.3 计算结果

在超声驻波场的计算过程中,合理确定谐振距离是保证结果准确性的先决条件。谐振距离特指发

射端到反射端最低点的最短直线距离,即图 9(a) 中的长度 H 。在超声驻波场的仿真中,通常选择 2~4 个半波长距离作为初始值,计算此值附近范围内的最大声压,以避免谐振距离对结果的影响。本节选择在 3 个半波长距离的附近范围内求解。

考虑到现有研究已经证明反射端直径须大于发射端的直径才能获得较好的声压分布^[24],在计算不同反射端直径下的最大声压时,将反射端直径取值范围定为 28~44 mm,同时将谐振距离取值范围定为 26.5~30 mm,发射端振幅恒定为 10 μm ,计算结果如图 10 所示。可以看出,当反射端直径小于 40 mm 时,最大声压随反射端直径的增大持续上升;当反射端直径超过 40 mm 时,最大声压开始下降。

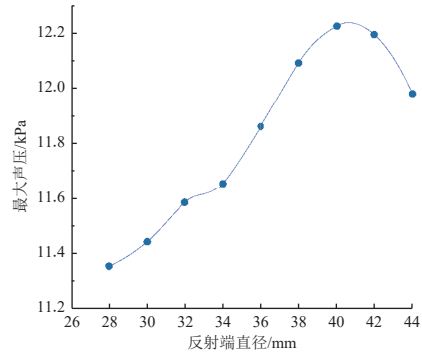


图 10 最大声压随反射端直径的变化

Fig. 10 Variations of maximum sound pressure with diameter of reflection end

在反射端直径为 40 mm 的条件下,计算不同凹球面半径下的最大声压,将凹球面半径取值范围定为 24~32 mm,将谐振距离取值范围定为 26.5~30 mm,计算结果如图 11 所示。可以看出,驻波场的最大声压值随着凹球面半径的增大先变大后减小。对于直径为 40 mm 的反射端,当凹球面半径为 27 mm 时,超声驻波场的声压值最大。

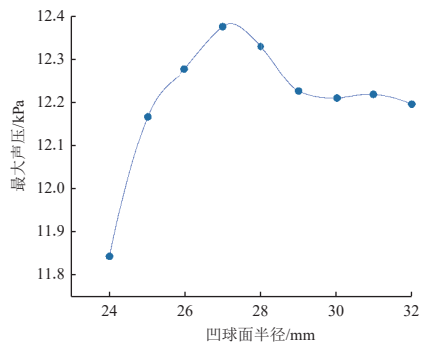


图 11 最大声压随凹球面半径的变化

Fig. 11 Variations of maximum sound pressure with concave sphere radius

4 混合悬浮系统的熔炼加工应用

4.1 悬浮位置求解

混合悬浮系统的技术难点之一是保证超声驻波场的声压节点与气浮支撑下样品的悬浮位置一致,这样才能保证驻波声辐射压力作用在样品上,维持样品的径向稳定。超声驻波场的声压节点位于相对时间平均势的极小值点,相对时间平均势 \bar{U} 的求解式为

$$\bar{U} = \frac{\overline{p^2}}{3\rho c^2} - \frac{\rho \overline{v^2}}{2} \quad (2)$$

式中: $\overline{p^2}$ 为声压的均方值; ρ 为介质密度; $\overline{v^2}$ 为质点运动速度的均方值; c 为氩气中的声速。根据 3.2 节中建立的超声驻波场有限元模型,对相对时间平均势进行求解,结果见图 12,图中“×”标记处为相对时间平均势的极小值,即声压节点。

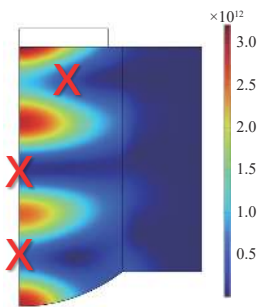
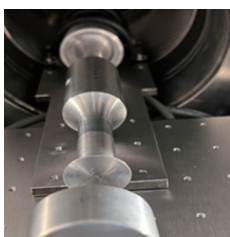


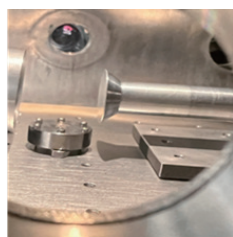
图 12 超声驻波场的相对时间平均势求解

Fig. 12 Solving for the relative time-averaged potential of an ultrasonic standing wave field

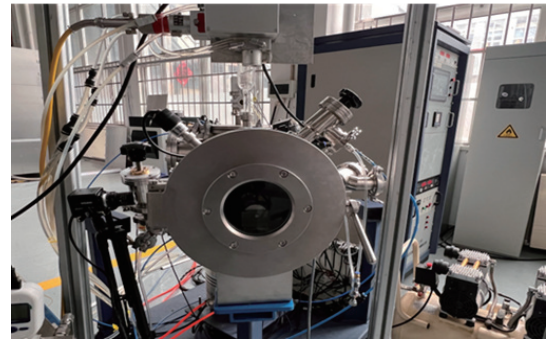
图 12 显示,在当前的谐振距离下,超声驻波场中存在 3 个声压节点。其中最接近发射端的节点发生了明显偏移,这与解文军^[23]观察到的实验现象一致,也验证了本文所建超声驻波声场模型的准确性。在实际应用中,由于该点声辐射压力的稳定性较差,一般不在此位置进行悬浮实验;另外,考虑到本文研究是在气浮支撑条件下,若采用最接近反射端的声压节点,反射端极易对气流场造成较大扰动。因此,本文选择在中间的声压节点位置进行混合悬浮实验,该点距离发射端的距离为 14.1 mm。混合悬浮系统实物如图 13 所示。



(a) 系统内部构造



(b) 悬浮区域近照



(c) 外部整体构造

图 13 混合悬浮系统实物

Fig. 13 The mixed levitation system

4.2 熔炼加工应用

本节通过熔炼加工实验对混合悬浮系统的稳定性进行评估。选用直径为 3 mm 的 6061 铝合金球作为原材料,在混合悬浮系统中进行熔炼加工实验。实验中,氩气流量 Q_s 设置为 3.62 L/min,超声振幅 A_s 设置为 10 μm 。图 14 为熔炼加工过程中的实拍图片,此时样品处于气浮支撑力与驻波声辐射压力作用下的混合悬浮状态。实验过程中,样品的悬浮较为稳定,未发生掉落与明显晃动。



图 14 混合悬浮熔炼过程实拍

Fig. 14 Mixed levitation melting process

熔炼加工过程中,采用红外热像仪对样品的温度进行测量,结果如图 15 所示。可以看到,样品温度超过 900 $^{\circ}\text{C}$,而 6061 铝合金的熔点为 582 $^{\circ}\text{C}$,表明加工过程中样品已完全熔化。

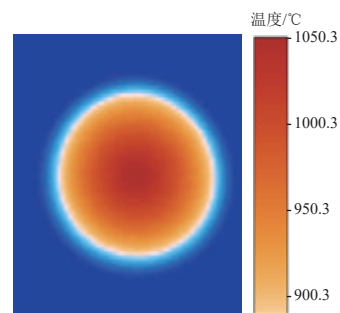


图 15 混合悬浮熔炼过程中的样品温度测定结果

Fig. 15 Measured results of sample's temperature during mixed levitation melting process

混合悬浮熔炼后的样品形状如图16所示,可以看出样品较熔炼前发生了明显变化:其整体形状从圆球形变为扁球形,并且底部出现一条椭圆弧状凹槽。从流体力学和表面张力的角度分析,样品整体形状变为扁球形是驻波声辐射压力的作用造成的,而非重力与气浮支撑力相平衡产生的拉伸作用导致。这是因为样品的实际形状表现为沿轴向拉伸、径向压缩,而重力与气浮支撑力平衡产生的拉伸作用则会使样品形状的拉伸呈现在轴向上。超声驻波场中的声压具有周期性高压和低压的特征,使样品在加工过程中受到非均匀分布力的作用。这种非均匀分布的声辐射力导致样品形状在径向上表现为压缩,在轴向上呈现拉伸效果。因此,样品底部的椭圆弧状凹槽源于气流冲击压力、声辐射压力与表面张力的共同作用效果。由于喷嘴中心存在压力尖峰^[25],液态样品底部受到的冲击压力使样品表面原有的平衡状态被打破。最终,在气流冲击压力、声辐射压力与表面张力的共同作用下,样品表面在新的形状下重新维持平衡状态。



图16 混合悬浮熔炼后的样品形状
Fig. 16 Sample shape after mixed levitation melting

5 结束语

为解决单一悬浮法在模拟微重力环境时样品不稳定的问题,本文提出了一种气悬浮与单轴超声驻波悬浮相结合的混合悬浮系统。通过有限元分析方法研究,揭示了系统关键结构参数对轴向气浮支撑力及径向驻波声辐射压力的影响,优化了气浮喷嘴与超声驻波反射端的结构尺寸,有效增强了支撑力与声压。以铝合金球作为原材料,在该悬浮系统中进行了熔炼加工实验,验证了混合悬浮系统的稳定性。实验结果表明,气悬浮熔融态样品耦合单轴超声驻波场可实现物体形状调控。这将为模拟微重力下多场耦合加工技术提供参考。

参考文献 (References)

- [1] COOPER K G, MCLEMORE C, ANDERSON T T. Cases for additive manufacturing on the International Space Station[C]//50th AIAA Aerospace Sciences Meeting. Nashville, TN, USA, 2012: 1-3
 - [2] CILLIERS J, HADLER K, RASERA J. Toward the utilisation of resources in space: knowledge gaps, open questions, and priorities[J]. *Microgravity*, 2023, 9(1): 22
 - [3] NEAL C R. The moon 35 years after Apollo: what's left to learn?[J]. *Chemie der Erde-Geochemistry*, 2009, 69(1): 3-43
 - [4] ZHANG Q, WANG G, DING X, et al. Advanced metal-wire laser additive manufacturing in-space[J]. *Proceedings of the SPIE*, 2019, 10842: 108420L-1
 - [5] SACCO E, MOON S K. Additive manufacturing for space: status and promises[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2019, 105: 4123-4146
 - [6] BEWERSDORFF A, GÖRLER G P, OTTO G, et al. Solidification of silver-germanium alloys in an amorphous matrix aboard the space station Mir[J]. *Acta Astronaut*, 1993, 29: 547-552
 - [7] JULES K, MCPHERSON K, HROVAT K, et al. A status report on the characterization of the microgravity environment of the International Space Station[J]. *Acta Astronaut*, 2004, 55: 335-364
 - [8] REITZ B, LOTZ C, GERDES N, et al. Additive manufacturing under lunar gravity and microgravity[J]. *Microgravity Science and Technology*, 2021, 33: 1-12
 - [9] SHELHAMER M. Parabolic flight as a spaceflight analog[J]. *Journal of Applied Physiology*, 2016, 120(12): 1442-1448
 - [10] MEDZMARIASHVILI N, MEDZMARIASHVILI E, TSIGNADZE N, et al. Possible options for jointly deploying a ring provided with V-fold bars and a flexible pre-stressed center[J]. *CEAS Space Journal*, 2013, 5: 203-210
 - [11] YOSHIDA K. Experimental study on the dynamics and control of a space robot with experimental free-floating robot satellite[J]. *Advanced Robotics*, 1994, 9(6): 583-602
 - [12] 冯少尉, 张英, 郭永昶, 等. 无容器凝固制备 $Ce^{3+}:Y_3Al_5O_{12}-Al_2O_3$ 纳米荧光陶瓷及其在激光照明中的应用[J]. *发光学报*, 2021, 42(10): 1510-1519
- FENG S W, ZHANG Y, GUO Y C, et al. Preparation of $Ce^{3+}:Y_3Al_5O_{12}-Al_2O_3$ nano ceramics by aerodynamic suspension solidification for LDs-driven lighting application[J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2021, 42(10): 1510-1519

- [13] 张泽辉, 刘康祺, 邸文丽, 等. 基于超声悬浮的液滴非接触操控及其动力学[J]. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2020, 50(10): 113-144
ZHANG Z H, LIU K Q, DI W L, et al. Non-contact droplet manipulation and its dynamics based on acoustic levitation[J]. SCIENTIA SINICA Physica, Mechanica & Astronomica, 2020, 50(10): 113-144
- [14] 王正军. 真空感应电磁悬浮熔炼对 A356 铝合金组织和性能的影响[J]. 材料导报, 2019, 33(22): 3801-3805
WANG Z J. Impact of vacuum induction electromagnetic levitation melting on microstructure and properties of A356 alloy[J]. Materials Reports, 2019, 33(22): 3801-3805
- [15] MOUSAVI M, ALZGOOL M, TOWFIGHIAN S. Electrostatic levitation: an elegant method to control MEMS switching operation[J]. Nonlinear Dynamics, 2021, 104(4): 3139-3155
- [16] TELLE R, GREFFRATH F, PRIELER R. Direct observation of the liquid miscibility gap in the zirconia-silica system[J]. Journal of the European Ceramic Society, 2015, 35(14): 3995-4004
- [17] STEPHENS T L, BUDWIG R S. Three-axis acoustic device for levitation of droplets in an open gas stream and its application to examine sulfur dioxide absorption by water droplets[J]. Review of Scientific Instruments, 2007, 78(1): 014901
- [18] DUFFAR T, DUSSERRE P, ABADIE J. Crucible-semiconductor interactions during crystal growth from the melt in space[J]. Advances in Space Research, 1995, 16(7): 199-203
- [19] LI W, JIANG H, ZHANG L, et al. Solidification of Al-Bi-Sn immiscible alloy under microgravity conditions of space[J]. Scripta Materialia, 2019, 162: 426-431
- [20] NORDINE P C, ATKINS R M. Aerodynamic levitation of laser-heated solids in gas jets[J]. Review of Scientific Instruments, 1982, 53(9): 1456-146
- [21] PARADIS P F, BABIN F, GAGNE J M. Study of the aerodynamic trap for containerless laser materials processing in microgravity[J]. Review of Scientific Instruments, 1996, 67(1): 262-270
- [22] 李新波, 王英伟, 王宇昆, 等. 凹球面双发射极超声阵列悬浮能力研究[J]. 西安交通大学学报, 2018, 52(11): 106-111
LI X B, WANG Y W, WANG Y K, et al. Study on the suspension capacity of concave spherical double emitter ultrasonic array[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2018, 52(11): 106-111
- [23] 解文军. 声悬浮优化设计理论及其应用研究[D]. 西安: 西北工业大学, 2002: 31-55
- [24] 郭木铎. 超声驻波声悬浮能力及其稳定性仿真与实验[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2014: 23-29
- [25] 钟伟, 刘昊, 陶国良, 等. 多孔质气悬浮气膜压力特性建模及试验研究[J]. 浙江大学学报(工学版), 2012, 46(4): 616-621
ZHONG W, LIU H, TAO G L, et al. Theoretical and experimental study on pressure characteristics of air film for levitation using porous media[J]. Journal of Zhejiang University: Engineering Science, 2012, 46(4): 616-621

(编辑: 张艳艳)

一作简介: 朱尧舜, 硕士研究生, 研究方向为微重力环境模拟与材料加工。

*通信作者: 魏强, 教授, 博士生导师, 主要从事航天器环境工程研究。