



中国空间站超高温液态合金密度测定方法研究

马德志, 常健, 王彦博, 王海鹏, 魏炳波*

西北工业大学物理科学与技术学院, 西安 710072

* E-mail: bbwei@nwpu.edu.cn

收稿日期: 2025-09-22; 接受日期: 2025-11-17; 网络版发表日期: 2025-12-15

国家自然科学基金基础科学中心项目(批准号: 52088101)、中国载人航天工程空间应用系统项目(编号: KJZ-YY-NCL02, KJZ-YY-NCL0501)、国家重点研发计划(编号: 2021YFA0716301)和陕西省自然科学基金基础研究计划重点项目(编号: 2024JC-ZDXM-24)资助

摘要 超高温液态合金密度的精确测定对于材料科学基础研究与工程应用至关重要, 中国空间站微重力环境能够使合金液滴保持在地面环境中难以达到的高球形度, 提供无可比拟的本征密度测定条件. 本研究依托中国空间站无容器液态合金密度测定实验, 分析了样品球形度 S_r^2 对液态合金密度测定的影响, 表明了空间实验具有提高密度测定准确性, 体现材料本征性质的关键作用; 建立了平行光投影计算模型, 阐明了液滴投影轮廓的成像机理, 为边缘检测算法的可靠性提供了理论支撑; 揭示了实验腔观察窗镜片污染对测定精度的影响机制, 发现镜片污染会导致拍摄的图像轮廓点发生系统性偏移, 此发现为修正投影图像提供了依据, 有助于提升轮廓识别和密度测定的准确性; 应用高精度液态合金密度测定方法, 在中国空间站成功测定了 $\text{Nb}_{84.1}\text{Si}_{15.9}$, $\text{Zr}_{57}\text{V}_{43}$, $\text{Ti}_{47.5}\text{Ni}_{47.5}\text{V}_5$ 三种难熔合金在1860~2385, 1407~1788, 1326~1800 K的液态密度数据. 本研究不仅为液态合金研究提供了基准级的实验数据, 还为空间材料科学实验数据可靠性提升提供了新思路.

关键词 微重力, 难熔合金, 液态密度, 无容器实验, 中国空间站

1 引言

密度作为液态合金基本的热物理性质, 其精确测定对材料科学基础研究与工程应用具有至关重要的意义. 液态合金的密度不仅直接反映了液体内部的原子堆积效率、短程有序结构及键合特性, 还是开展液态合金流动模拟、铸造成形分析以及新材料设计的关键参数^[1~5]. 固态材料可以通过几何测量法、排液法等便捷地测定出精确密度, 而液态合金高温、高化学活性的特性使其密度测定十分困难, 需要采用特殊的技术手

段. 若将液态合金盛于容器中测定(如量液法测定体积), 容器壁容易与液态合金产生化学反应, 从而导致样品污染; 再者, 容器壁的异质形核作用难以使液态合金达到深过冷, 并且难以保证精确控温与测定. 因此, 必须发展新的测定方法来克服这些难题, 如无容器技术.

对液态合金密度进行高精度无容器测定的关键是准确测定其体积. 目前测定悬浮液滴体积的有效方法是拍摄液滴的正投影照片, 利用投影形状计算其体积^[6]. 对于轴对称且无凹陷和孔洞的物体, 需要由平行

引用格式: 马德志, 常健, 王彦博, 等. 中国空间站超高温液态合金密度测定方法研究. 中国科学: 技术科学, 2025, 55: 2088–2100

Ma D Z, Chang J, Wang Y B, et al. Density measurement strategy for liquid alloys at ultrahigh temperatures aboard China Space Station (in Chinese). Sci Sin Tech, 2025, 55: 2088–2100, doi: [10.1360/SST-2025-0277](https://doi.org/10.1360/SST-2025-0277)

于其对称轴的正投影图像面积通过旋转积分计算体积; 如果被测物体形状未知且投影方向不确定, 即使同时获得多个方向的投影图像, 也难以反演出三维形状^[7], 无法通过实验拍摄投影图像获得准确密度. 理想状态下, 只有标准球体才能从任意方向的二维正投影图像准确计算出三维体积, 且不会被样品旋转、位移等因素影响. 现实情况下, 液滴越接近于球形, 体积测量则越准确, 因此高精度密度测定需要使液滴保持高球形度. 虽然悬浮液滴由于自身表面张力的作用, 具有自发变形为近球形的特性, 但液滴实际的球形度还受到重力场等外场的影响, 外场作用越大, 球形度会越低.

在空间材料科学领域, 研究人员已开发出静电悬浮、电磁悬浮、声悬浮、气动悬浮等悬浮无容器技术, 使得样品能够在外力的作用下平衡重力悬浮起来, 并实现了液态合金在无容器状态下的实验和观测^[8-12]. 其中静电悬浮中液滴受到的是库仑力, 主要作用于液滴表面, 不会产生其他悬浮方法中由电磁涡流、声压、气流等作用产生的明显形变, 并且静电悬浮实验中的液滴在真空环境下由加热激光控制温度, 悬浮与加热互不影响, 因此静电悬浮实验中液滴球形度更高, 温度控制更精准, 是用于液态合金密度无容器测定最佳的悬浮技术^[13-16]. 然而, 地面静电悬浮实验中需施加较强的静电场以克服重力作用, 使液滴仍然存在形变, 且液滴尺寸越大则形变越大, 这必然造成更大的实验误差, 这是在重力环境下不可避免的问题, 若能在微重力环境下进行实验, 则能够有效解决这一难题.

随着空间材料科学技术的发展, 包括国际空间站上的静电悬浮、电磁悬浮装置等在内的空间微重力实验装置为研究液态合金的热物理性质提供了更优良的技术手段^[17-23]. 在轨运行的中国空间站上, 重力加速度可以降低到地面的万分之一, 静电悬浮所需的控制力大幅减小, 液滴可保持稳定的高球形度状态, 并且内部流动速度为 10^{-4} m/s量级, 流动与形变对实验的干扰程度极大减弱, 这为高精度的本征液体密度测定创造了理想条件^[24,25]. 中国空间站上安装的用于材料科学研究的无容器实验柜具有静电悬浮位控、稳定激光加热、高精度数据探测、高真空等先进实验条件, 为微重力下超高温液态合金的密度测定提供了优异的实验平台^[26-30].

如前文所述, 液态合金密度测定的关键是测定液

滴的体积, 为此本文主要讨论和解决以下问题: (1) 提高对投影照片的图像处理精度, 重点检验液滴投影轮廓检测方法的准确性, 这决定了体积和密度结果的可靠性; (2) 探究实验中挥发性物质在实验腔观察窗镜片表面沉积污染对样品投影图像的影响, 这会导致样品投影照片图像灰度和灰度梯度数值产生变化, 使得对投影图像的识别产生偏差, 影响密度结果的准确性; (3) 选用高精度的数据处理方法通过在空间站原位测量的实验数据获得最终的密度结果. 针对这些关键问题, 本文围绕中国空间站液态合金密度测定实验, 开展了以下研究: 首先, 通过建立平行光的几何光学投影仿真计算模型, 定量研究了液滴在平行光照射下的投影成像机制, 阐明了投影边缘亮度过渡区的图像性质及其形成机制, 验证了边缘检测算法的科学性; 其次, 通过图像处理方法量化分析了在轨实验过程中观察窗镜片污染对密度照片的灰度梯度分布、轮廓提取分析和密度测定精度的具体影响; 最后, 综合运用空间站实验数据与高精度计算处理方法, 在中国空间站微重力环境下测定了Nb-Si、Zr-V、Ti-Ni-V等难熔合金的液态密度, 实验过程中液滴球形度高、外场扰动低, 研究结果具有地面研究无法达到的科学价值, 为相关材料的科学研究和工程应用提供了高水平的基础数据.

2 研究方法

2.1 中国空间站液态合金密度测定实验方法

本研究在中国空间站无容器材料科学实验柜完成, 该实验装置能够测定的物体密度范围为 $0.3\sim 20$ g/cm³. 在真空度为 10^{-3} Pa的环境中, 通过三组相互垂直的电极产生的库仑力将直径约为2.7 mm的带电样品定位在实验腔体中心的平衡点位里, 便于加热和实验数据探测. 当实验样品被精准、稳定地控制在平衡点位后, 四束分布在以该平衡点为中心的“正四面体顶点”位置、功率可调的加热激光同时照射样品, 对其进行均匀、高效地加热(图1(a)), 激光波长为915 nm, 单束激光功率最高可达75 W. 由于在加热的同时金属会通过强烈的热辐射释放热量, 且温度越高辐射强度越大, 所以在固定的激光功率下, 样品会逐渐升高到加热与辐射相平衡的稳定温度, 该温度与加热激光功率正相关, 通过控制激光功率, 可精确控制样品温度^[31]. 整个实验过程中位控系统、检测摄像头、红外测温计等仪

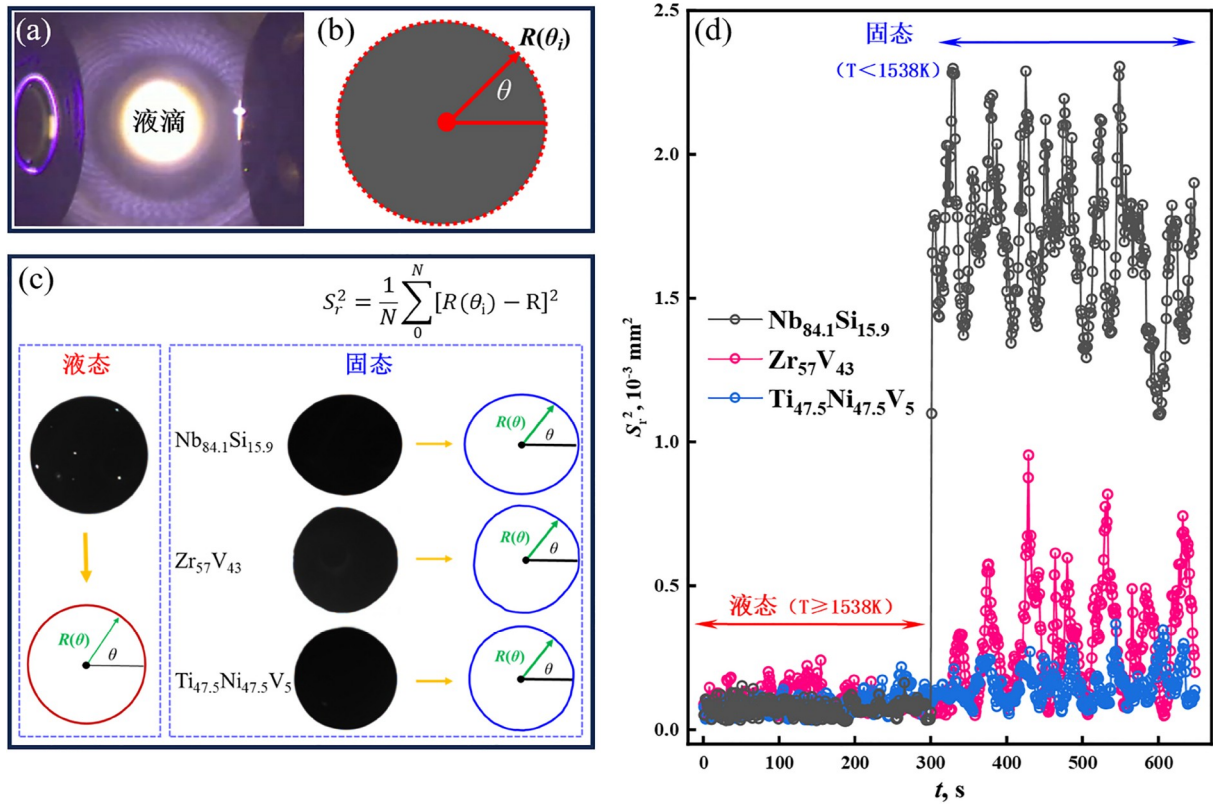


图1 中国空间站无容器实验测定液态合金密度及球形度方法: (a) 在轨实验过程中的合金液滴; (b) 对投影图像轮廓拟合; (c) 球形度计算方法; (d) 中国空间站无容器实验柜得到的 $\text{Nb}_{84.1}\text{Si}_{15.9}$ 、 $\text{Zr}_{57}\text{V}_{43}$ 、 $\text{Ti}_{47.5}\text{Ni}_{47.5}\text{V}_5$ 合金液态和固态球形度数据

Figure 1 Method for measuring liquid alloy density and sphericity in containerless experiments conducted on the China Space Station: (a) alloy droplet during the in-orbit experiment; (b) contour fitting of the projection image; (c) sphericity calculation method; (d) liquid and solid sphericity data of $\text{Nb}_{84.1}\text{Si}_{15.9}$, $\text{Zr}_{57}\text{V}_{43}$, and $\text{Ti}_{47.5}\text{Ni}_{47.5}\text{V}_5$ alloys obtained from the containerless experiment cabinet aboard the China Space Station.

器全程开启, 对样品进行全面的原位实验记录. 待样品完全熔化并在液相线温度以上保温一段时间后, 关闭加热激光, 样品在辐射散热的作用下迅速冷却, 实现深过冷快速凝固. 在此过程中, 高速CCD相机以每秒100帧的速率拍摄样品在背景光照射下的正投影照片, 背景光的波长为405 nm^[32], 相机位于实验腔体外, 透过腔体的玻璃观察窗进行拍摄. 得到密度照片后, 可通过同步时间戳, 将每一帧图像与红外测温仪记录的温度数据对应, 即可获得液态合金在不同温度下的投影图像, 进而对图像进行处理分析得到样品不同温度下的液态密度.

2.2 图像处理与密度计算算法

空间站拍摄的样品投影照片通常是8位256级黑白灰度值图片(BMP格式), 在后续的图像处理分析中, 黑白图片只需读取像素点的灰度值^[33]. 如果照片是RGB

彩色图片(一般是24位、BMP格式), 需先将RGB彩色图片转化为灰度图片以方便处理和分析, 既可以用专业的图像处理软件进行, 也可以在处理程序中使用如下方法进行转换:

$$G = 0.299 \times \text{Red} + 0.587 \times \text{Green} + 0.114 \times \text{Blue}, \quad (1)$$

其中Red, Green, Blue分别为像素点的红、绿、蓝分量值. 该转化方程采用的是国际标准ITU-R BT. 601规定的系数^[34], 这样处理既不会丢失原图的明暗对比信息, 也符合人眼对彩色和黑白色的视觉感知. 得到灰度值后, 再由像素点水平方向和竖直方向上相邻像素点间的灰度差计算每个像素点的灰度梯度值:

$$G'(x_i, y_i) = \frac{1}{2} \times \sqrt{((G(x_{i+1}, y_i) - G(x_{i-1}, y_i)))^2 + (G(x_i, y_{i+1}) - G(x_i, y_{i-1})))^2}, \quad (2)$$

其中 $G(x_{i+1}, y_i)$ 和 $G(x_{i-1}, y_i)$ 分别是点 (x_i, y_i) 右边和左边相邻的像素点灰度值, $G(x_i, y_{i+1})$ 和 $G(x_i, y_{i-1})$ 分别是点 (x_i, y_i) 上边和下边相邻的像素点灰度值. 由水平和竖直的灰度梯度分量, 得到每个像素点的梯度方向角

$$\alpha(x_i, y_i) = \arctan2(G(x_i, y_{i+1}) - G(x_i, y_{i-1}), G(x_{i+1}, y_i) - G(x_{i-1}, y_i)). \quad (3)$$

梯度方向角范围 $\alpha \in [0, 2\pi)$.

得到每个点的梯度方向后, 首先进行非极大值抑制: 通过插值得到每个点沿其梯度方向的两个相邻点的梯度值, 若该点梯度值大于等于这两个插值点的梯度值, 则暂时保留该梯度值, 否则将其抑制为零. 将所有不为0的灰度梯度数值由小到大排序, 设 $P(G')$ 为灰度梯度为 G' 的像素点数目所占的比例(概率密度函数), 则灰度梯度的累积分布函数 $H(G')$ 为

$$H(G') = \int_0^{G'} P(x) dx. \quad (4)$$

设定累积分布函数大于70%(按灰度梯度由小到大累积像素数量超过总像素数的70%)的最小灰度梯度为高阈值:

$$T_{\text{High}} = \min\{G' \in [0, G'_{\text{max}}] \mid H(G') > 0.7\}, \quad (5)$$

低阈值设为高阈值的40%:

$$T_{\text{Low}} = 0.4 \times T_{\text{High}}. \quad (6)$$

若某点的梯度值大于高阈值, 则认定其为强轮廓点(确定的轮廓点); 若某点的梯度值小于低阈值, 则认定为非轮廓点. 对于梯度值小于高阈值但大于低阈值的点, 若它们与强轮廓点相邻, 则认定为轮廓点, 若它们不与强轮廓点相邻, 则认定为非轮廓点^[35].

识别出样品图像的全部轮廓点后, 计算所有轮廓点坐标的平均值获得样品图像几何中心的坐标 (x_0, y_0) , 并且对所有的轮廓点进行拟合得到轮廓线方程(图1(b)). 勒让德多项式是在球坐标系下的正交基函数, 非常适合于描述球对称或近球对称的几何形状, 所以采用6阶勒让德多项式来拟合每个轮廓点与中心的距离 $R(\theta)$ ^[36]:

$$R(\theta) = \sum_{n=0}^6 c_n P_n(\cos\theta), \quad (7)$$

其中 $P_n(\cos(\theta))$ 为 n 阶勒让德多项式, c_n 为待求的拟合系

数. 为进行拟合, 需先将图像中的轮廓点坐标 (x_i, y_i) 转化为极坐标 (R_i, θ_i) ,

$$R_i = [(x_i - x_0)^2 + (y_i - y_0)^2]^{1/2} L, \quad (8)$$

$$\theta_i = \sin^{-1} \left[\frac{(x_i - x_0)L}{R_i} \right], \quad (9)$$

其中 L 为相机CMOS传感器的像素尺寸(单位: mm/pixel). 之后再通过最小二乘法拟合出 c_n 的值, 目标函数 $F(x_0, y_0, c_0, c_1, c_2, c_3, c_4, c_5, c_6)$ 为拟合轮廓与真实轮廓点的偏差平方和,

$$F(x_0, y_0, c_0, c_1, c_2, c_3, c_4, c_5, c_6) = \sum_{i=1}^N [R_i - R(\theta)]^2. \quad (10)$$

将轮廓点坐标代入上式, 使目标函数取最小值, 便得到 c_n . 由最优的拟合轮廓方程计算得到投影图像的面积

$$S = \frac{1}{2} \int_0^{2\pi} R(\theta)^2 d\theta. \quad (11)$$

进而得到以 (x_0, y_0) 为圆心的与拟合轮廓面积相等的等效圆的半径 R_0 :

$$R_0 = \sqrt{\frac{S}{\pi}}. \quad (12)$$

根据投影轮廓的等效半径的离散程度, 计算出投影图像轮廓与标准圆半径差的均方根作为二维投影图像的球形度 S_r^2 (图1(c)):

$$S_r^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [R(\theta_i) - R_0]^2, \quad (13)$$

其中 N 为识别出的轮廓点数量. S_r^2 值越小, 说明图像的等效半径离散程度越小, 投影的形状越接近于标准圆, 由于实验过程中液滴往往在不停旋转, 所以不同时刻拍摄的照片相当于是从不同方向得到的样品投影, S_r^2 数值越小并且数值波动越小, 说明液滴形状越接近于理想球形.

本文用到了 $\text{Nb}_{84.1}\text{Si}_{15.9}$, $\text{Zr}_{57}\text{V}_{43}$, $\text{Ti}_{47.5}\text{Ni}_{47.5}\text{V}_5$ 合金的空间实验原位实验数据和照片, 分别计算得到了三种合金在液态和固态下的球形度(图1(d)). 液态下三者球形度均非常高($S_r^2 < 2.5 \times 10^{-4} \text{ mm}^2$), 形状十分接近标准球体, 说明空间站无容器实验柜实验条件优异, 相对于地面上进行的研究, 通过空间实验数据得到的合金液态体积与密度更加可靠, 能够反映材料的本征性

质. 合金凝固后, 由于不同合金的凝固速度、路径、形式、性质等不同, 凝固过程中相对于液态发生不同程度的形变, 不同合金的固态形状相较于液态下一致的高球形度有不同程度的偏离, 其中固态 $\text{Ti}_{47.5}\text{Ni}_{47.5}\text{V}_5$ 合金球形度最高, S_r^2 数值波动相对较小, $\text{Zr}_{57}\text{V}_{43}$ 合金的 S_r^2 数值和波动大于 $\text{Ti}_{47.5}\text{Ni}_{47.5}\text{V}_5$ 合金, 小于 $\text{Nb}_{84.1}\text{Si}_{15.9}$ 合金, $\text{Nb}_{84.1}\text{Si}_{15.9}$ 合金则呈两头尖的橄榄状, 形变最大, 球形度最低. 与地面研究情况类似, 由于温度、形状等因素的限制, 用投影法难以得到准确的固态合金密度.

在空间微重力环境下, 液态合金液滴具有很高的旋转对称性, 对每张照片得到的拟合轮廓半径进行旋转积分得到样品的体积:

$$V = \frac{2\pi}{3} \int_0^\pi R(\theta)^3 \sin\theta d\theta. \quad (14)$$

进而由样品质量得到每张照片对应的温度点的液态密度:

$$\rho = \frac{m}{V}. \quad (15)$$

2.3 平行光投影计算

为深入探究空间站无容器实验超高温液态合金液滴的光学投影特性, 本研究建立了其平行光投影计算

模型, 对球体在多束平行光照射下的投影进行模拟分析, 揭示液滴投影图像的亮度分布规律, 为实验中的轮廓精确提取与密度反演计算提供理论依据.

样品密度照片拍摄的是黑色样品、白色背景的投影图像, 样品图像边缘并不是锐利的, 而是存在厚度 0.1 mm 左右的“模糊区”, 图像的实际轮廓线就在这个区域. 若能模拟出这种“投影模糊”并对其分析便有助于检验图像的轮廓识别方法的可靠性, 为提高密度测算的准确性提供依据. 由于实际生产出的背景光仪器无法产生理想的、绝对准直的背景光, 并且实验中存在其他杂光, 加之腔体内各个实验器件对光的反射、折射等作用, 使得照射到样品的光并不是完全垂直于投影面的, 而是可以看作由多束方向接近垂直于投影面的光组成的. 在所有投影图像轮廓点附近都存在部分斜射光会照到投影轮廓以内的区域, 还会有部分斜射光投射的样品阴影会偏出轮廓区, 使得投影边缘存在没有被完全照射也没有被完全遮挡的灰色“过渡区”. 样品的投影可看作是很多束不同方向的背景光照射出的阴影叠加而成的图形. 本团队据此构建的模型为一个标准球体经过多束不同方向的背景光照射, 在投影平面上形成一个与样品照片中样品图像相似的投影图像(图2(a)), 考虑到自然光与实验光源以平面光为

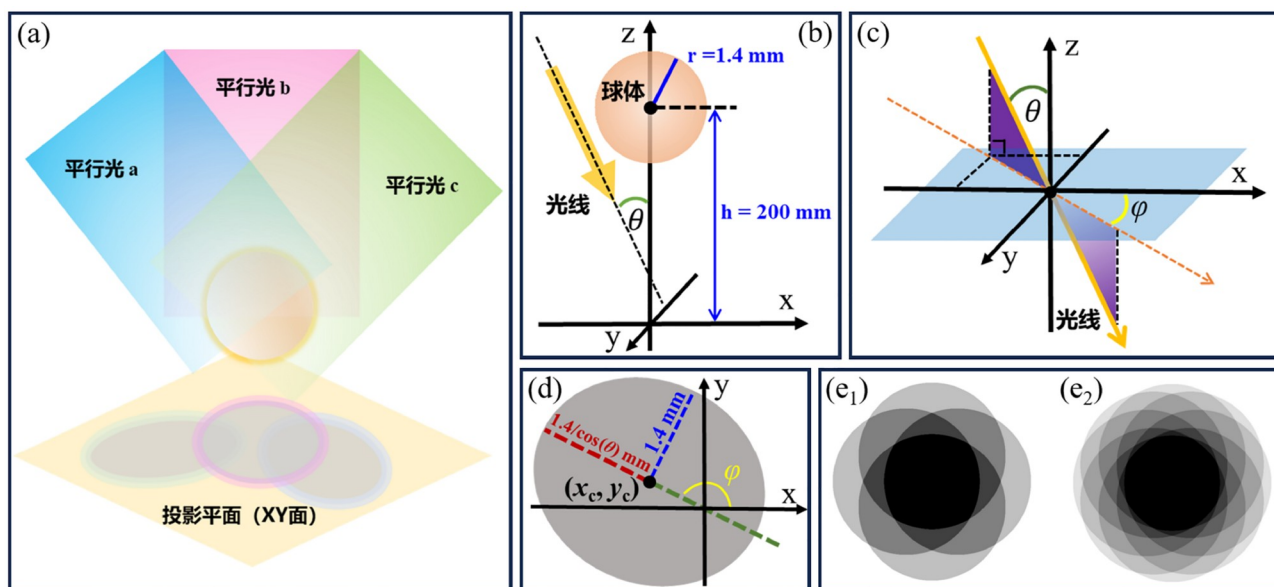


图2 平行光几何投影模拟示意图: (a) 模拟场景示意图; (b) 模拟球体参数; (c) 光线方向设置; (d) 单束光投影示意图; (e₁) 4束光投影; (e₂) 8束光投影

Figure 2 Schematic diagram of parallel light geometric projection simulation: (a) simulated scene diagram; (b) simulated sphere parameters; (c) light direction setting; (d) single light projection diagram; (e₁) 4 light projection; (e₂) 8 light projection.

主, 本模型只涉及平行光的几何光学投影.

为模拟现实中的投影情形, 需选择贴近实际实验的预设参数. 本模拟中的正球体液滴半径设置为 1.4 mm, 球心位于 z 轴正半轴, 球心至投影面(XY 面)的距离对应实验中液滴到密度相机的距离, 设置为 200 mm (图2(b)). 多束平面光以不同的角度从上到下照射球体, 在 XY 面产生投影. 光源入射角 θ (光线与 z 轴负方向的夹角) 服从均值为 μ , 标准差为 σ 的高斯分布, 分布函数为

$$f(\theta) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(\theta-\mu)^2}{2\sigma^2}\right]. \quad (16)$$

本次模拟中 $\mu=0$, $\theta \in [0, \theta_{\max}]$, $\sigma=\theta_{\max}/4$, $\theta_{\max}$ 为设置的平行光最大入射角. θ 遵循高斯分布能够保证绝大部分平行光入射角较小, 接近垂直于投影面, 同时存在少量倾斜角度较大的光线. 模拟中每束光强度均设为 1, 从而入射角为 θ_i 的平行光光照强度之和便是入射角为 θ_i 的平行光数量, 服从同样参数的高斯分布, 这与实际实验中接近垂直的入射光强占主导、倾斜角度较大的光强占比较小的情况相符.

对于每个入射角 θ_i 在 $[0, 2\pi]$ 内均匀生成 M_φ 个方位角 φ (光线在 XY 面的投影与 x 轴的夹角), 使得平行光方向、数量关于 z 轴旋转对称并且分布均匀(图2(c)):

$$\varphi_j = \frac{2\pi j}{M_\varphi} \quad (j = 1, 2, 3, \dots, M_\varphi), \quad (17)$$

本次模拟中 $M_\varphi = 200$. 由 (θ, φ) 可唯一确定平行光的方向, 按照此方式生成的每束平行光方向 (θ_i, φ_i) 都是唯一的.

完全垂直于投影面的平行光的几何投影为半径 1.4 mm 的圆面, 非严格垂直于投影面(入射角 θ 不为 0)的平行光照射球体则会形成一个椭圆形阴影, 椭圆中心坐标 (x_c, y_c) 由 h, θ, φ 确定(图2(d)):

$$x_c = h \cdot \tan\theta \cdot \cos\varphi, \quad (18)$$

$$y_c = h \cdot \tan\theta \cdot \sin\varphi. \quad (19)$$

(x_c, y_c) 到投影面坐标原点(球心正投影点)的距离与 h 和 θ 正相关, h 和 θ 越大, 投影位置越偏离正投影位置. 根据投影几何关系, 椭圆形状由入射角 θ 决定, 椭圆长半轴: $a = 1.4/\cos(\theta)$ mm, 短半轴为定值: $b = 1.4$ mm; 椭圆长轴所在的直线经过原点, 且与 x 轴的夹角为 φ . 由以上参数便可唯一确定每束平行光在投影面上得到的投影

图形.

所有生成的椭圆形阴影在投影面上堆叠出完整的投影图像, 通过计算每束平行光在投影平面形成的椭圆阴影范围, 将投影平面分割成分度值为 0.01 mm 的平面直角坐标网格. 对于每个网格点, 判断其是否位于某束光照射下的投影范围内, 若在投影范围内, 则该点亮度值+0, 若不在投影范围内, 则该点亮度值+1, 最终亮度值为所有照射到该点的平行光数量之和. 模拟完成后, 将所有网格点的亮度值除以总平行光数量, 最终得到归一化的投影面亮度分布数据, 生成高分辨率的投影亮度分布图. 图2(e₁)和(e₂)分别是 $h = 200$ mm、球体半径 $r = 1.4$ mm、 θ 固定为 15° 、 φ 在 $[0, 2\pi]$ 内均匀分布模拟得到的 4 和 8 束平行光投影图. 该模拟方法能够通过计算不同参数组合对投影轮廓的影响, 预测球体投影的亮度分布特征, 揭示实验图像中轮廓边缘的厚度、亮度、亮度梯度等性质, 为液滴投影图像的精确处理提供参考.

3 结果与讨论

图3(a₁)~(a₉)展示了不同平行光最大入射角 $\theta_{\max}$ ($0.02^\circ \sim 0.1^\circ$) 计算得到的球体(球心位于投影面上方 200 mm 处)模拟投影图像. 图中最大亮度为 1, 最小亮度为 0. 每一幅投影图像中均添加了一条圆心在坐标原点、直径为 1.4 mm 的红色虚线圆, 用以标示球体投影的实际几何轮廓, 作为投影图像的对比. 可以明显观察到, 在样品位置固定的情况下, 随着 $\theta_{\max}$ 的减小, 投影图像的边缘锐度显著提高, 亮度值由低到高的过渡区域收窄, 且更加贴近红色虚线所代表的实际轮廓线.

图3(b)给出了球心位于投影面上方 200 mm 处、 $\theta_{\max}$ 分别为 $0.02^\circ \sim 0.1^\circ$ 所得到的模拟投影图像沿径向坐标 R 在 1~1.8 mm 的亮度值分布曲线. 该曲线显示, 在所有模拟条件下, 投影边缘均存在一个亮度从 0 单调上升到 1 的“过渡区”, 对应于图3(a₁)~(a₉)中的黑-白渐变区域. 这个区域的点位可以被部分光照射到, 并且 $\theta_{\max}$ 越小, 边缘处的亮度曲线越陡峭, 边缘区域越窄. 在该“过渡区”以内的点位不会被任何光照射到, 亮度值均为 0; 在该“过渡区”以外的点位能够被所有光照射到, 亮度值均为 1. 该过渡区对应实际实验中样品图像边缘的模糊效应, 本模拟中该“过渡区”的宽度随 $\theta_{\max}$ 的增大

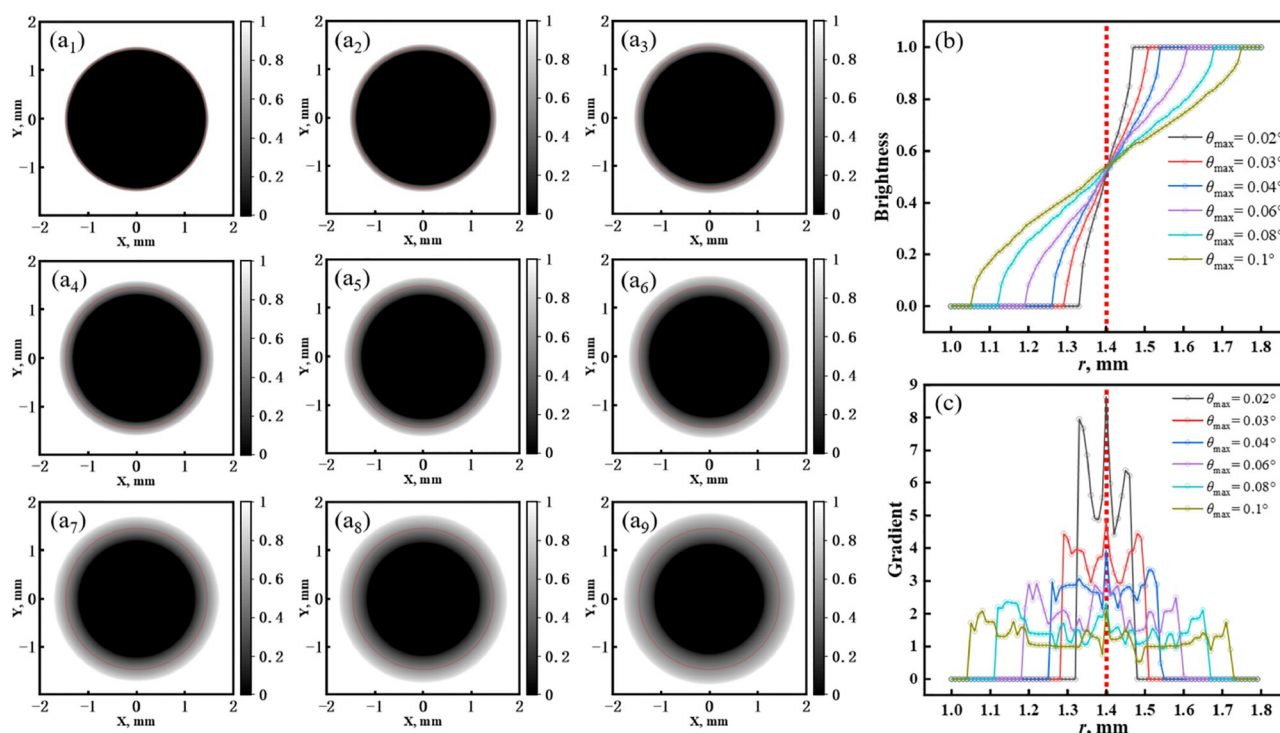


图 3 不同平行光角度范围的模拟结果: (a₁) 0°~0.02°, (a₂) 0°~0.03°, (a₃) 0°~0.04°, (a₄) 0°~0.05°, (a₅) 0°~0.06°, (a₆) 0°~0.07°, (a₇) 0°~0.08°, (a₈) 0°~0.09°, (a₉) 0°~0.1°; (b) 边缘处亮度值; (c) 亮度梯度

Figure 3 Simulation results for different parallel light angle ranges: (a₁) 0°~0.02°, (a₂) 0°~0.03°, (a₃) 0°~0.04°, (a₄) 0°~0.05°, (a₅) 0°~0.06°, (a₆) 0°~0.07°, (a₇) 0°~0.08°, (a₈) 0°~0.09°, (a₉) 0°~0.1°; (b) brightness values at the edge; (c) brightness gradient.

而明显增大, 且显著大于实验照片中图像的“过渡区”的宽度, 说明中国空间站无容器材料实验柜用于密度测定的背景光准直性极高、实验条件优异。

在理想情况下, 由于模拟光线方向的对称性, 物体的平直轮廓在照射面积充足、方向对称的平行光照射下投影的边缘亮度在理论轮廓位置处(对应于本模拟中 $r = 1.4$ mm)应接近总亮度的50% (0.5), 即该位置上的每一点恰好被一半的平行光照射, 另外一半方向与之面对称的平行光则被物体遮挡而无法照射到该点。而本研究中的液滴为球体, 由于球面是具有弧形、凸出的结构, 能够照射到实际投影轮廓位置的有效光线数量相较于平直轮廓更多, 因此该位置的亮度值应大于0.5。实际的模拟结果与这一物理机制相符: 在设置的不同 $\theta_{\max}$ 下, 所有投影的边缘亮度曲线在 $r = 1.4$ mm处的数值均在0.53附近, 略大于理想平直轮廓投影数值, 说明本文开发的仿真投影模型能够模拟出真实的物理过程。

图3(c)展示了图3(a)和(b)相应条件下投影面中距

原点1~1.8 mm的亮度梯度分布。边缘亮度梯度随径向 r 的增加总体呈现先增大后减小的趋势, 与空间站实验所拍摄图像中的边缘灰度梯度分布一致。同时, 部分模拟梯度曲线还有“先减小、后增大、再减小、最后又增大”的数值波动, 这是因为模拟中设置的平行光方向是离散的, 且每一束平行光得到的是一个边界锐利的二值(1和0)椭圆投影, 而实际实验中投影光方向是连续的, 所以模拟得到的边缘处亮度梯度存在不规则波动。另外, 几乎所有模拟图像的边缘亮度梯度均在 $r = 1.4$ mm附近取得全局最大值, 这说明在小角度投影光占主导的平行光投影中, 灰度梯度(亮度梯度)最大值点十分接近球体的实际投影轮廓。模拟结果说明了平行光投影下灰度梯度最大值点就是投影轮廓点, 验证了空间站实验中所用到的将图像的边缘灰度梯度最大点作为轮廓点的边缘检测程序是可靠的。

在轨实验过程中, 实验腔观察窗镜片可能因挥发性物质沉积而形成污染层, 引起透光率下降、光线的非均匀折射及局部遮挡, 从而影响样品投影照片拍摄

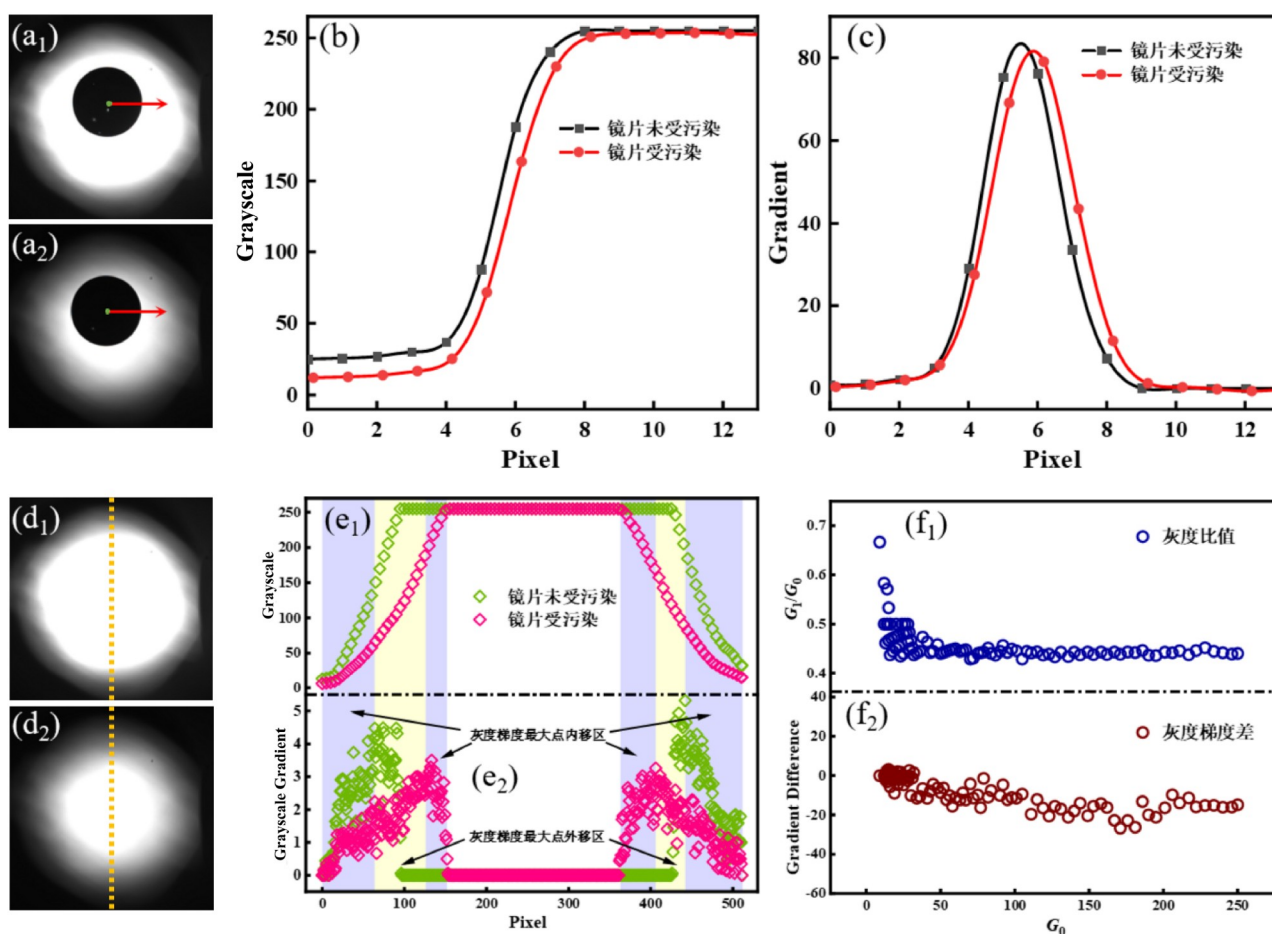


图4 空间站观察窗镜片污染对密度测定的影响: (a) 空间站实验样品投影照片; (b) (a₁)与(a₂)中样品投影最右侧边缘附近的灰度值; (c) (a₁)与(a₂)中样品投影最右侧边缘附近的灰度梯度; (d) 空间站实验无样品背景照片; (e₁) (d₁)与(d₂)中黄色线段上像素点的灰度值, (e₂) (d₁)与(d₂)中黄色线段上像素点的灰度梯度; (f₁) 污染后像素点灰度与原像素点灰度的比值, (f₂) 污染后像素点灰度梯度与原像素点灰度梯度的差值

Figure 4 Impact of space station observation window lens contamination on density measurements: (a) projected images of experimental samples from the space station; (b) gray values near the rightmost edge of the sample projection in (a₁) and (a₂); (c) gray gradients near the rightmost edge of the sample projection in (a₁) and (a₂); (d) background images without samples from the space station experiment; (e₁) gray values of pixels on the yellow line segment in (d₁) and (d₂); (e₂) gray gradients of pixels on the yellow line segment in (d₁) and (d₂); (f₁) ratio of contaminated pixel gray value to original pixel gray value; (f₂) difference between contaminated pixel gray gradient and original pixel gray gradient.

成像和密度测定。图4(a₁)和(a₂)分别是在相同实验条件下, 观察窗镜片未污染与被污染后拍摄的同一液态样品的投影图像; 作为对照, 图4(d₁)和(d₂)分别为对应状态下无样品时拍摄的背景图像。可明显观察到, 镜片污染后所拍摄的图像整体亮度下降, 明亮区域面积减小, 这一变化将对后续图像处理与密度计算的准确性造成影响。为定量评估镜片污染对密度测定的具体影响, 分别提取了图4(a₁)和(a₂)中样品图像的轮廓点坐标(坐标为整数像素), 计算轮廓点的算术平均值求得其几何中

心坐标。以此中心为原点, 沿水平向右方向提取射线上各像素的灰度值(图中红色箭头所示), 进一步获取镜片污染前后样品最右侧边缘附近的灰度分布(图4(b))与灰度梯度分布(图4(c)), 横坐标为射线上像素点序号(单位: pixel)。结果显示, 镜片污染后所拍摄的图像边缘附近灰度值整体降低、边缘像素点与中心之间的距离略微增加、灰度梯度的极值点向外偏移了约0.5个像素宽度。这些变化会导致程序识别的轮廓线产生系统性偏移(轮廓半径增大约0.5%~1%), 进而造成反演

计算的密度值偏低约1%~2%.

为什么污染会使轮廓点偏移呢? 通过分析污染前后的空白样品照片(图4(d₁)和(d₂))中相同位置线段(黄色线)上的灰度值(图4(e₁))与灰度梯度(图4(e₂)), 发现实验观察窗污染前后拍摄的照片由中心向四周的灰度梯度均先增大后减小, 但灰度梯度最大值位置不同且数值变化速率不同. 镜片污染后拍摄的照片灰度梯度最大点更靠近中心并且灰度梯度变化幅度更小, 透过未污染的观察窗镜片拍摄的灰度梯度最大点更靠外且灰度梯度变化幅度更大. 这会使得污染后拍摄的照片与镜片未污染所拍摄的照片相同点位的灰度梯度差值由中心向四周会增大或减小, 导致拍摄的样品投影边缘附近灰度梯度最大点产生偏移. 污染前后的照片中像素点灰度梯度差在两者均为纯白色的中央区域为0, 再向外会先增大, 再减小, 然后再增大.

由于在图像边缘附近背景照片和图像照片的灰度梯度方向相反, 所以灰度梯度差值增大会使检测到的轮廓内移, 灰度梯度差值减小会使检测到的轮廓外移, 因此污染后拍摄的照片边缘会出现2个“轮廓内移区”和1个“轮廓外移区”. 如果照片中液滴的边缘处在灰度梯度差值减小的区域, 那么镜片污染后拍摄的照片中, 检测到的轮廓就会外移, 导致识别轮廓直径偏大, 投影面积偏大, 液滴体积计算偏大, 密度值偏小. 透过未受污染的镜片拍摄的样品图像中灰度梯度最大的像素点更符合样品的实际边缘, 得到的实验结果更可靠, 镜片受污染程度越小, 测定结果越精确. 另外, 通过对比镜片污染前后所拍摄照片相同点位的灰度值比值(图4(f₁))与灰度梯度差值(图4(f₂)), 发现污染后拍摄的照片灰度和灰度梯度均会减小, 并且未污染照片中亮度越大的点位灰度和灰度梯度的减小程度越大, 说明镜片污染对镜片透光率和像素成像亮度的影响并不均匀, 这可能与相机像素点的感光动态范围、灵敏度、进光量、光照角度和镜片的实际污染情况等因素有关. 实际实验中若发现此等程度的镜片污染需及时更换镜片.

本团队基于系统性的密度测定方法, 在中国空间站无容器材料科学实验柜中, 成功对Nb_{84.1}Si_{15.9}, Zr₅₇V₄₃, Ti_{47.5}Ni_{47.5}V₅三种难熔合金开展了液态密度的高精度原位测定实验. 实验全过程在维持10⁻³ Pa量级的高真空环境中进行, 有效抑制了样品氧化与污染. 通过四束分布于“正四面体顶点”位置的加热激光对样品进行均匀加热, 使其温度升至液相线以上超过140 K, 待

样品充分熔化并保温足够长时间后停止加热, 使得液滴冷却并凝固. Nb_{84.1}Si_{15.9}和Zr₅₇V₄₃合金采用的是四束激光同时关闭, 依靠辐射散热迅速冷却的降温方式; Ti_{47.5}Ni_{47.5}V₅合金则采用关闭三束、保留一束激光的控温冷却方式, 因而冷却速率相对较缓. 三种合金均成功实现深过冷凝固, 过冷度分别达到402, 131和257 K (图5(a₁)~(a₃)).

通过将原位采集的温度曲线与密度相机投影图像测算的密度值进行对应, 成功获得了三种合金在整个冷却过程中不同温度下的液态密度数据(图5(b)~(d)). 所有合金的液态密度 $\rho(T)$ 与温度 T 均为良好的线性递减关系:

$$\rho(T) = \rho_L + k(T - T_L), \quad (20)$$

其中 ρ_L 为合金的液相线密度, T_L 为合金的液相线温度, k 为密度-温度系数($k < 0$). 经过地面测定与空间实验, 三种合金的液相线温度分别为2262, 1538和1583 K; 所测定的液相线密度分别为7.28, 6.12和5.93 g/cm³; 密度-温度系数分别为 -2.74×10^{-4} , -2.91×10^{-4} 和 -8.23×10^{-5} g/(cm³ K).

本研究结果充分验证了在微重力环境下, 基于无容器投影技术的密度测定方法具备高度的可靠性与准确性. 所获取的高精度液态密度数据, 不仅填补了难熔合金热物性数据库的空白, 也为相关材料的理论建模、凝固过程模拟、铸造工艺优化等深入研究提供了重要的基础参数.

4 结论

本文基于中国空间站无容器实验平台, 通过模拟计算与实验数据分析, 对微重力环境下超高温液态合金密度高精度测定方法的理论依据、实验方法、数据处理、误差分析等方面进行了研究, 取得了以下成果.

(1) 建立了平行光投影计算模型, 揭示了液滴在平行光照射下的投影成像机理, 明确了投影边缘亮度过渡区的形成机制, 发现了投影亮度与亮度梯度数值的分布规律, 为图像边缘检测算法的可靠性提供了理论支撑.

(2) 通过对实验投影照片进行图像处理, 量化分析了实验中镜片污染对所拍摄的液滴投影成像及轮廓识别的影响机理, 揭示了污染会导致轮廓点产生系统性

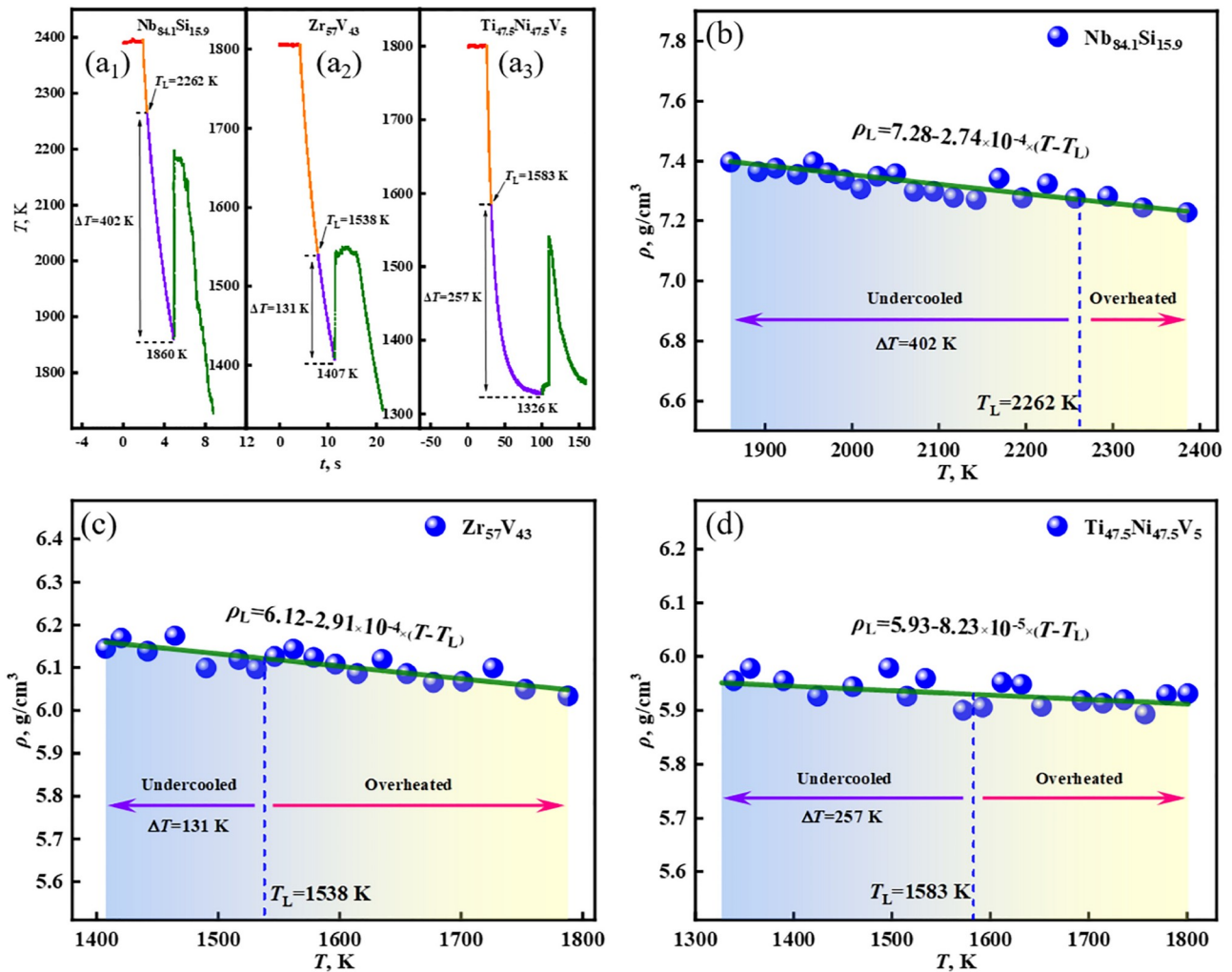


图 5 中国空间站无容器实验装置测得的难熔合金液态密度: (a) 三种合金的密度数据对应的冷却曲线; (b) Nb_{84.1}Si_{15.9} 液态密度; (c) Zr₅₇V₄₃ 液态密度; (d) Ti_{47.5}Ni_{47.5}V₅ 液态密度

Figure 5 Liquid density of refractory alloys measured by the containerless experimental facility on the China Space Station: (a) cooling curves corresponding to the density data of three alloys; (b) liquid density of Nb_{84.1}Si_{15.9}; (c) liquid density of Zr₅₇V₄₃; (d) liquid density of Ti_{47.5}Ni_{47.5}V₅.

偏移,造成测算出的密度值产生偏差,此发现为该类误差的识别与校正提供了依据。

(3) 利用中国空间站无容器实验装置成功原位测定了Nb_{84.1}Si_{15.9}、Zr₅₇V₄₃和Ti_{47.5}Ni_{47.5}V₅三种难熔合金在宽广温度范围的液态密度数据,实验过程中受到外场影响小,合金液滴呈现出近乎完美的球形,实验数

据具有地面条件下达不到的精度,并且更能够反映材料的本征物理性质,具有极高的参考价值。

本研究不仅填补了多种难熔合金高精度本征液态密度数据的空白,也为空间材料科学实验的数据处理、误差控制与精度分析提供了参考,为未来开展更多前沿材料物性研究奠定了方法基础。

致谢 空间实验过程中得到了中国科学院空间应用工程与技术中心的大力支持,感谢顾逸东院士对该研究工作的长期支持,感谢李明星博士、郑晨辉博士以及廖晖、刘丁楠、李浩哲等博士生对本工作的帮助,在此深表谢忱。

参考文献

- 1 Crawley A F. Densities of liquid metals and alloys. *Int Mat Rev*, 1974, 19: 32–48
- 2 Cao S, Xia M, Jakse N, et al. Influence of Zr element on the atomic structure of Al-Cu alloy liquid. *Scripta Mater*, 2024, 248: 116143
- 3 Zhang L, Yang L, Zhao J, et al. Selection of a micro-alloying interface active component to stabilize the interface between droplets and liquid matrix in monotectic alloys. *Acta Mater*, 2023, 250: 118823
- 4 Hu L, Xie W J, Wan Z X, et al. Space station based experimental research on thermophysical properties and solidification mechanisms of Fe-19% Si alloy. *Rev Mater Res*, 2025, 1: 100005
- 5 Zhao J F, Wang H P. Twin interface structures and formation mechanisms of the topologically close-packed phase within refractory Nb-Ni binary alloy. *Trans Mater Res*, 2025, 1: 100070
- 6 Egly I, Brillo J. Surface tension and density of liquid metallic alloys measured by electromagnetic levitation. *J Chem Eng Data*, 2009, 54: 2347–2352
- 7 Gardner R J, McMullen P. On hammer's X-ray problem. *J London Math Soc*, 1980, s2-21: 171–175
- 8 Hu L, Wang H P, Xie W J, et al. Electrostatic levitation under the single-axis feedback control condition (in Chinese). *Sci Sin-Phys Mech Astron*, 2010, 40: 722–728 [胡亮, 王海鹏, 解文军, 等. 单轴反馈控制条件下的静电悬浮研究. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2010, 40: 722–728]
- 9 Xie W J, Cao C D, Lü Y J, et al. Acoustic method for levitation of small living animals. *Appl Phys Lett*, 2006, 89: 214102
- 10 Wang H P, Chang J, Wei B. Measurement and calculation of surface tension for undercooled liquid nickel and its alloy. *J Appl Phys*, 2009, 106: 033506
- 11 Egly I, Lohöfer G, Sauerland S. Measurements of thermophysical properties of liquid metals by noncontact techniques. *Int J Thermophys*, 1993, 14: 573–584
- 12 Ruan Y, Hu L, Yan N, et al. Recent advances and future perspectives of space materials science (in Chinese). *Sci Sin Tech*, 2020, 50: 603–649 [阮莹, 胡亮, 闫娜, 等. 空间材料科学研究进展与未来趋势. 中国科学: 技术科学, 2020, 50: 603–649]
- 13 Racz L M, Egly I. Advances in the measurement of density and thermal expansion of undercooled liquid metals. *Rev Sci Instrum*, 1995, 66: 4254–4258
- 14 Rhim W K, Chung S K, Barber D, et al. An electrostatic levitator for high-temperature containerless materials processing in 1-g. *Rev Sci Instrum*, 1993, 64: 2961–2970
- 15 Jacobs G, Egly I, Gorges E, et al. Measurement of density and structural short-range order of levitated liquid metals. *Int J Thermophysics*, 1998, 19: 895–903
- 16 Hu L, Wang L, Lin M J, et al. Single crystal growth and chemical disorder trapping of refractory MoNbReTaW high-entropy alloy solidified under electrostatic levitation state. *Metall Mater Trans A*, 2021, 52: 167–180
- 17 Ishikawa T, Oda H, Koyama C, et al. Density of a molten stainless steel-B₄C alloy measured in the electrostatic levitation furnace onboard the International Space Station. *Int J Microgravity Sci Appl*, 2025, 42: 420202
- 18 Oda H, Koyama C, Ohshio M, et al. Density of molten zirconium-oxygen system measured with an electrostatic levitation furnace in the International Space Station. *Int J Microgravity Sci Appl*, 2020, 37: 370302
- 19 Champdoizeau Q, Valloton J, Henein H. Thermophysical properties measurement of Al-22.5 wt pctCu in reduced gravity using the ISS-EML. *Metall Mater Trans A*, 2023, 54: 4151–4158
- 20 Luo Y, Damaschke B, Lohöfer G, et al. Thermophysical properties of a Si₅₀Ge₅₀ melt measured on board the International Space Station. *npj Microgravity*, 2020, 6: 10
- 21 Seimiya Y, Kobatake H, Tono-oka K, et al. Thermophysical properties of molten Fe-Cu alloy measured using the electrostatic levitation furnace aboard the International Space Station (ISS-ELF) under microgravity conditions. *ISIJ Int*, 2024, 64: 2253–2261
- 22 Nawer J, Ishikawa T, Oda H, et al. Uncertainty analysis and performance evaluation of thermophysical property measurement of liquid Au in microgravity. *npj Microgravity*, 2023, 9: 38
- 23 Mohr M, Dong Y, Bracker G P, et al. Electromagnetic levitation containerless processing of metallic materials in microgravity: Thermophysical properties. *npj Microgravity*, 2023, 9: 34
- 24 Gu Y, Gao M, Zhao G, et al. Recent progress in space science and applications on Chinese Space Station in 2022–2024. *Chin J Spac Sci*, 2024,

44: 607–621

- 25 Yu J, Zhang W, Yang S, et al. Recent advances and future prospects of Space Materials Science. *Rev Mater Res*, 2025, 1: 100065
- 26 Wang H, Li H, Zheng C, et al. Eutectic growth kinetics and microscopic mechanical property of refractory $Zr_{57}V_{43}$ alloy under space and ground conditions. *Acta Mater*, 2025, 295: 121213
- 27 Wang H, Liao H, Hu L, et al. Freezing shrinkage dynamics and surface dendritic growth of floating refractory alloy droplets in outer space. *Adv Mater*, 2024, 36: 2313162
- 28 Wang H, Hu L, Xie W, et al. Metastable liquid properties and surface flow patterns of ultrahigh temperature alloys explored in outer space. *Angew Chem Int Ed*, 2024, 63: e202400312
- 29 Chang J, Wang H P, Liao H, et al. Remarkable undercooling capability and metastable thermophysical properties of liquid $Nb_{84.1}Si_{15.9}$ alloy revealed by electrostatic levitation in outer space. *Rev Sci Instrum*, 2024, 95: 034501
- 30 Wang H, Liu D, Zheng C, et al. Spiral eutectic growth dynamics facilitated by space Marangoni convection and liquid surface wave. *Phys Fluids*, 2024, 36: 047137
- 31 Li M X, Wang H P, Wei B. Numerical analysis and experimental verification for heat transfer process of electrostatically levitated alloy droplets. *Int J Heat Mass Transfer*, 2019, 138: 109–116
- 32 Zhong Q, Yang L, Tao Y, et al. Non-destructive investigation of thermophysical properties on the China's space station: In-orbit experiment measurements and analysis. *NDT E Int*, 2024, 143: 103046
- 33 Twogood R E, Sommer F G. Digital image processing. *IEEE Trans Nucl Sci*, 1982, 29: 1075–1086
- 34 Canny J. A computational approach to edge detection. *IEEE Trans Pattern Anal Mach Intell*, 1986, PAMI-8: 679–698
- 35 International Telecommunication Union-Radiocommunication Sector. Studio encoding parameters of digital television for standard 4:3 and wide-screen 16:9 aspect ratios. ITU-R BT601-7. <https://www.itu.int/rec/R-REC-BT.601-7-201103-I/en>
- 36 Chung S K, Thiessen D B, Rhim W K. A noncontact measurement technique for the density and thermal expansion coefficient of solid and liquid materials. *Rev Sci Instrum*, 1996, 67: 3175–3181

Density measurement strategy for liquid alloys at ultrahigh temperatures aboard China Space Station

MA DeZhi, CHANG Jian, WANG YanBo, WANG HaiPeng & WEI BingBo

School of Physical Science and Technology, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China

Precise determination of ultrahigh-temperature liquid alloy density is crucial for fundamental materials science research and engineering applications. The microgravity environment of the China Space Station enables alloy droplets to maintain a sphericity difficult to achieve in ground-based environments, providing unparalleled conditions for intrinsic density measurement. Based on the containerless liquid alloy density measurement experiment on the China Space Station, this study analyzed the influence of sample sphericity S_r^2 on the density measurement of liquid alloys, which shows that space experiments play a key role in improving the accuracy of density measurement and reflecting the intrinsic properties of materials and established a parallel light projection simulation model, elucidating the imaging mechanism of droplet projection profiles and providing theoretical support for the reliability of edge detection algorithms. It also revealed the impact mechanism of observation window lens contamination on measurement accuracy, finding that lens contamination leads to systematic deviations in the captured image profile points. This discovery provides a reference for projection image correction, helping to improve the accuracy of profile recognition and density measurement. Using high-precision liquid alloy density measurement methods, the liquid densities of three refractory alloys— $\text{Nb}_{84.1}\text{Si}_{15.9}$, $\text{Zr}_{57}\text{V}_{43}$, and $\text{Ti}_{47.5}\text{Ni}_{47.5}\text{V}_5$ —were successfully measured *in situ* via containerless experiments on the China Space Station at 1860–2385, 1407–1788, and 1326–1800 K, respectively. This study not only provides benchmark-level experimental data for liquid alloy research but also offers new insights for improving the reliability of space materials science experimental data.

microgravity, refractory alloys, liquid density, containerless experiment, China Space Station

doi: [10.1360/SST-2025-0277](https://doi.org/10.1360/SST-2025-0277)