

基于激光闪射法测量 3D 打印铝合金的热物性参数

Measurement of Thermal Properties of 3D Printed Aluminum Alloy Based on Laser Flash Method

供稿|徐亮¹, 梁永仁¹, 叶梦元² / XU Liang¹, LIANG Yongren¹, YE Mengyuan²

内容导读

热管理是许多高科技设备的关键。本文使用激光闪射法测量 3D 打印铝合金在高温下的关键“热能力”——包括它传递热量的快慢（热扩散系数）、储存热量的多少（比热容）以及综合的导热性能（导热系数）。研究发现：（1）选对“尺子”很重要：在测量时，使用石墨作为参考样品（标样）得到的结果最接近铝合金的真实导热能力，比用铜或不锈钢更准确；（2）选择石墨标样，温度越高，导热能力越强：随着温度从室温升高到 500 °C，这种 3D 打印铝合金传递热量的能力（热扩散系数和导热系数）都逐渐变强了；（3）方向有影响：在 3D 打印过程中层层堆叠的特性，使得材料在水平方向（横向）传递热量比竖直方向（竖向）更快（热扩散系数和导热系数横向更高）。相反，材料在竖直方向储存热量的能力（比热容）略高于水平方向。这些“热能力”数据对于 3D 打印铝合金在需要良好散热的领域（比如航空航天中的火箭喷嘴、汽车制造中的发动机部件、船舶中的复杂零件）的设计和应用至关重要。了解材料在不同温度和方向上的导热表现，能帮助工程师设计出性能更好、更可靠的部件。本研究为 3D 打印高性能铝合金零件的热管理设计提供了重要的基础数据。

近年来，随着科技的进步，铝合金产业对产品质量提出了更高的要求，推动了铝合金制备技术的创新与优化^[1-2]。3D 打印技术对复杂零件的制造具有独特的创新性和潜力，因此在铝合金产业领域展现出广阔的发展前景，有望成为高质量铝合金制造领域的主流趋势。相较于传统的铝合金制备技术，3D 打印技术工艺灵活，既能降低制造成本，又能满足复杂形状零部件的制造要求，可以实现铝合金铸

件的快速、小批量及定制化生产^[3]。我国国产 3D 打印铝合金的拉伸强度和屈服强度等均较高，其性能已与国外空中客车公司研发的高强铝合金粉末产品相当，目前已在航空航天领域得到广泛应用^[4]。研究发现，采用大型整体式铝合金构件不仅能提高构件的寿命和可靠性，还能使构件质量减轻 15%~20%，这展现出高强铝合金在航空领域的重要地位，为航空工业的发展提供了关键支撑^[5-7]。采用高强度铝合

作者单位：1. 西安宝德九土新材料有限公司，陕西 西安 710200；2. 西安汉唐分析检测有限公司，陕西 西安 710200

金制造的船只,不仅降低了自身质量、提高了行驶速度,还增强了抵御海水侵蚀的能力,显著改善船舶性能。3D 打印技术能够高质量地制备出多种复杂的船舶零件,如气缸体、水泵导管、船体外壳、减速箱外壳、泵壳体、涡轮叶片、高压阀件、机座支架及管道等。这些零件具有复杂的内部结构及高度的异型体特征,传统制备工艺难以实现生产,且无法保证其使用性能^[8-10]。因此,3D 打印技术在复杂零部件制造方面更具潜力。从军工产品到民用产品,从海上巡逻船到海下舰艇,从小型汽艇到大型万吨油轮,铝合金产品在造船行业的应用范围正不断扩大,具有广阔的发展前景。然而,3D 打印技术也面临着诸多挑战,如工艺稳定性欠佳、材料性能有待提高等,需要进一步研究和改进。

特殊的铝合金零件在各种复杂环境中服役,必须掌握铝合金材料在不同温度下的热物性参数,对于研究其新工艺及服役寿命具有重要的参考价值。随着导热领域需求量的增大和热管理学科领域的逐步发展完善,热测量成为导热材料性能研究的关键和突破口。导热系数和热扩散系数是反映材料热传导性能的重要物理参数,测量导热系数的常用方法包括热线法、热流法、保护热板法和激光闪射法。其中,激光闪射法(LFA)属于导热测试中的瞬态法,即测量时样品温度会随时间而变化,通过分析变化曲线得到特征物理量,从而推断出样品的接触热阻^[11]。相较于其他方法,激光闪射法采用非接触式测量,有效避免因接触产生的接触热阻,使测量结果更接近实际样品的导热参数,不但可以准确、直接地测量热扩散系数,还可以利用材料的比热容、密度推算出导热系数。由于其测量范围广、速度快、样品简单易加工,在各个行业得到广泛应用^[12]。

李经怀等^[11]运用激光闪射法测量 4 种不同厂家制造的 690 合金传热管的导热系数,并对 20~400 °C 下的测量数据进行线性拟合,可直接求得该温度范围内任一温度下的导热系数,为蒸汽发生器传热计算提供可靠参数。李艳等^[13]采用激光闪射法测量氮化硅陶瓷基板的导热系数,详细介绍 NETZSCH LFA 467 激光导热仪的测试原理及不同支架的测试方法与实践应用。张雅淋等^[14]借助激光闪射法测量金刚石的热导率,实现对样品的无损测试。张振威

等^[12]通过激光闪射法导热仪测定不同工作温度下铝合金活塞的比热容、热扩散系数和导热系数,研究发现,随着工作温度的升高,该铝合金活塞的热扩散系数逐渐降低,比热容逐渐增大,而导热系数则呈逐步上升趋势。

本文基于激光闪射法对 3D 打印铝合金的热扩散系数、比热容和导热系数进行研究,分析不同温度下这些参数的变化规律,为船舶、航空领域用高强度 3D 铝合金技术的改进提供了重要依据。

实验原理

测量原理

激光闪光分析又称激光闪射法,是一种用于测量不同材料热扩散率的方法。该方法的测量原理如下:通过能量脉冲加热平面平行样品的前端面,测量样品背面吸收脉冲后温度随时间变化的升高量。样品的热扩散率越高,能量到达背面的速度越快。具体操作时,需先将制备好的样品置于充满保护气体的样品室,再利用激光脉冲对样品进行短时间辐照,最后通过红外检测器检测并记录样品温度的变化过程,其原理如图 1 所示。热扩散系数反映了物体中某点温度扰动传递到另一点的速率,材料的热扩散系数越大,其传热速度就越快。样品导热系数的计算见式(1)^[15]。

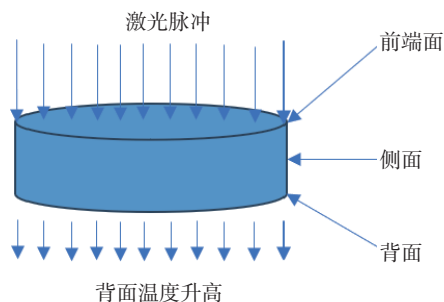


图1 激光闪射法原理示意

$$\lambda = \alpha \cdot \rho \cdot c_p \quad (1)$$

式中: λ 为导热系数, W/(m·K); α 为热扩散系数, m²/s; ρ 为密度, kg/m³; c_p 为比定压热容, J/(kg·K)。

热扩散系数的计算原理

在利用激光闪射法测量热扩散系数时,设定以

下初始条件:

(1) 热量仅沿垂直方向一维传播, 无横向热传播, 且样品表面无热量损失;

(2) 光源能量强度相同, 且能量吸收仅发生在样品表面层;

(3) 样品材质均匀、不透光, 且其物理性质不

随温度变化;

(4) 激光脉冲作用时间极短, 可忽略不计。

温度恒定时, 样品背面的温度随时间变化的表达式见式(2)^[16]。

$$T(x, t) = \int_0^L T(x, 0) dx + \frac{2}{L} \sum_{n=1}^{\infty} \exp\left(\frac{-n^2 \pi^2 \alpha t}{L^2}\right) \cdot \cos \frac{n \pi x}{L} \int_0^L T(x, 0) \cos \frac{n \pi x}{L} dx \quad (2)$$

式中: T 为温度, K; x 为距离样品正面的距离, m; t 为响应时间, s; L 为样品厚度, m; n 为自然数。

一个能量脉冲 Q (单位: J) 从样品正面 $x=0$ 处瞬间射入且被均匀吸收, 假设吸收层深度为 g (单位: mm), 则此时的温度分布计算见式(3)。

$$T(x, 0) = \begin{cases} Q/(\rho c_p g), & 0 < x < g \\ 0, & g < x < L \end{cases} \quad (3)$$

初始条件下, 样品背面的温度随时间变化的表达式见式(4)。

$$T(x, 0) = \frac{Q}{\rho c_p L} \left[1 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} \cos \frac{n \pi x}{L} \cdot \frac{\sin\left(\frac{n \pi g}{L}\right)}{n \pi g / L} \cdot \exp\left(\frac{-n^2 \pi^2 \alpha t}{L^2}\right) \right] \quad (4)$$

不透光样品的 g 值极小, 因此有 $\sin(n \pi g / L) = n \pi g / L$ 。当 $x=L$ 时, 样品背面的温度随时间变化的表

达式见式(5)。

$$T(L, t) = \frac{Q}{\rho c_p L} \left[1 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n \cdot \exp\left(\frac{-n^2 \pi^2 \alpha t}{L^2}\right) \right] \quad (5)$$

引入 2 个无量纲参数 V 和 ω , 表达式分别见式(6)~(7)。

$$V(L, t) = \frac{T(L, t)}{T_{\max}} \quad (6)$$

式中: $T_{\max}$ 为样品背面的最高温度, K。

$$\omega = \frac{\pi^2 \alpha t}{L^2} \quad (7)$$

根据式(5)和式(7), 可得到式(8)。

$$V(L, t) = 1 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n \cdot \exp(-n^2 \omega) \quad (8)$$

当 $V=0.5$ 、 $\omega=1.38$ 时, 材料的热扩散系数计算见式(9)。

$$a = 0.1388 \frac{L^2}{t_{0.5}} \quad (9)$$

式中: $t_{0.5}$ 为样品背面温升达到最高温度的一半所需的时间, s。

比热容的计算原理

激光闪射法是将一个标准样与多个待测样品同时放入样品室内, 保证其在相同条件下进行测试, 吸收相同激光能量强度的脉冲辐射, 可由能量平衡

方程求得测试样品的比热容^[17], 表达式见式(10)。

$$c_{px} = \frac{c_{pB} \cdot m_B \cdot \Delta T_B}{m_x \cdot \Delta T_x} \quad (10)$$

式中: c_{px} 为待测样品的比定压热容, J/(kg·K); c_{pB} 为标样比定压热容, J/(kg·K); m_B 为标样质量, g; ΔT_B 为标样受到激光辐照后的最大温升, °C; m_x 为待测样品的质量, g; ΔT_x 为待测样品受到激光辐照后的最大温升, °C。

实验设计

采用 NETZSCH LFA 467 HyperFlash C 型闪射法导热仪测量 3D 打印铝合金的导热性能, 该仪器在 25~500 °C 下进行测试, 最大升温速率为 50 °C/min, 数据采集频率最高达 2 MHz, 热扩散系数测量范围为 0.01~2000 m²/s, 导热系数测量范围为 0.01~4000 W/(m·K)。实验所用样品为直径 12.7 mm、厚度 2.5 mm 的圆片, 样品密度为 2.81 g/cm³。实验前, 在样品表面均匀喷涂一层石墨, 以提高样品吸收能量的能力。实验温度为 25、100、200、300、400、500 °C, 每个温度进行 3 次激光闪射测量。实

验保护气体为氩气，参比标准样品分别为石墨标样、Cu 标样及 310 不锈钢标样，测试电压为 250 V，脉冲宽度为 600 μ s。

数据处理与分析

图 2 为以石墨为标样时，不同方向 3D 打印铝合金样品在 25~500 $^{\circ}\text{C}$ 条件下的热物性测量结果随温度变化图。由图 2 可知，在同一标样下，3D 打印铝合金样品的热扩散系数随着温度的升高而增大，且横向样品的热扩散值明显高于竖向；比热容同样随着

温度的升高而增大，竖向值略高于横向值。这是由于在样品受热升温的非稳态过程中，热扩散系数大的样品热传播速率快，热量损失少。不同方向的 3D 打印铝合金样品，其导热系数随着温度的升高逐渐增大，且横向热扩散系数明显高于竖向。这是因为在 3D 打印过程中， z 轴方向（竖向）层间黏结力有限，合金组织间存在微间隙，导致热传播受阻。金属材料的导热由电子运动形成，温度升高使电子热运动速率加快，从而提高材料的导热性能和散热能力。

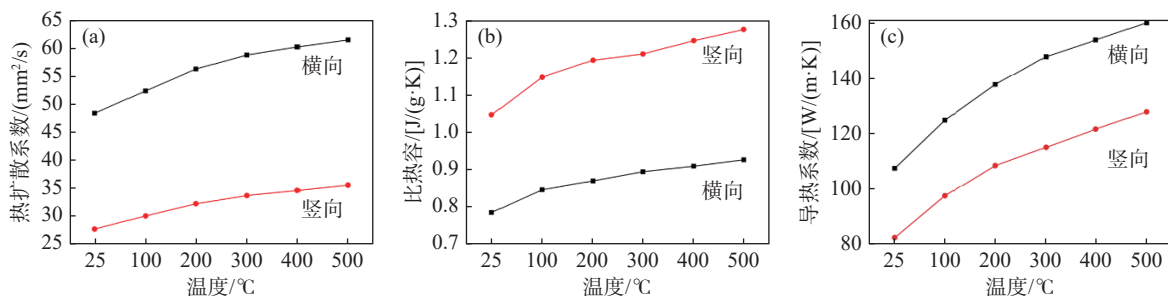


图 2 以石墨为标样的 3D 打印铝合金样品热物性参数变化: (a) 热扩散系数; (b) 比热容; (c) 导热系数

图 3 为以铜为标样时，不同方向 3D 打印铝合金样品在 25~500 $^{\circ}\text{C}$ 条件下的热物性测量结果随温度变化图。由图 3 可知，以 Cu 为标样的热扩散系数变化趋势与石墨相似：随着温度升高，热扩散系数均呈

增大趋势，但横向与竖向的参数均小于石墨标样下测得的数据。以 Cu 为标样的导热系数和比热容值呈现先增加后减小趋势，测量结果在 400 $^{\circ}\text{C}$ 时达到最大值，且该数值与石墨标样相差较大，远低于理论值。

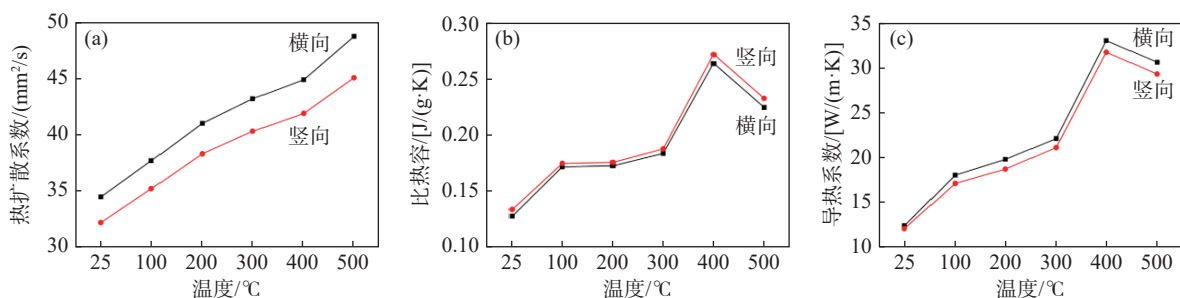


图 3 以 Cu 为标样的 3D 打印铝合金样品热物性参数变化: (a) 热扩散系数; (b) 比热容; (c) 导热系数

图 4 为以 310 不锈钢为标样时，不同方向 3D 打印铝合金样品在 25~500 $^{\circ}\text{C}$ 条件下的热物性测量结果随温度变化图。由图 4 可知，导热系数同样随温度升高而增大。横向导热系数普遍大于竖向，这与石墨标样和 Cu 标样基本规律基本一致。该标样下测得

的比热容和导热数值远低于石墨标样，该数值与 Cu 标样测量结果相差不大。

图 5 为 3D 打印铝合金的原始显微组织，结合铝合金金相图分析可知，横向与竖向样品的微观组织缺陷较少，结构致密均匀，整体呈“鱼鳞”状，有效

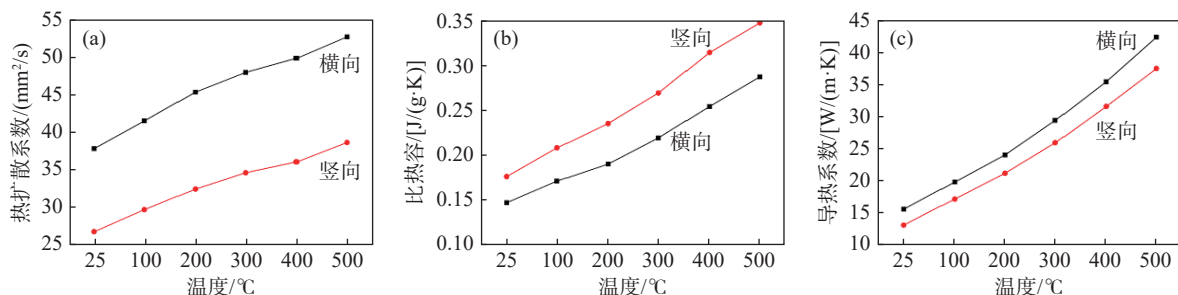


图4 以310不锈钢为标样的3D打印铝合金样品热物性参数变化: (a) 热扩散系数; (b) 比热容; (c) 导热系数

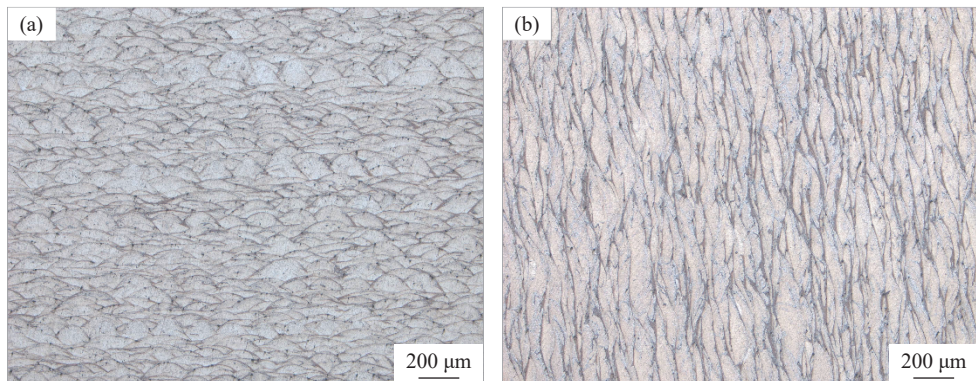


图5 3D打印铝合金样品原始显微组织: (a) 横向; (b) 竖向

保证铝基体的连续性。但材料的竖向结构在3D打印过程中存在不同层间的热传递,导致组织均匀性不如横向,因此横向导热系数大于竖向,且二者均随温度升高而增大。

综上所述,不同参比标样测得的3D打印铝合金样品的热物理参数存在差异。当温度一定时,样品的热扩散系数受标样影响较小;导热系数方面,以Cu为标样时样品的横向和竖向数值最小,以石墨为标样时数值最大,310不锈钢标样结果介于两者之间。由于石墨标样所得热物理参数更接近铝合金导热系数的理论值,建议选用石墨标样作为测量3D打印铝合金样品热物理性能的参比样品。目前,各大实验室及学术研究中均采用石墨标样,所测数据可以准确反映材料的热物性参数^[11-12,18-19]。

结束语

(1) 以Cu为标样时,3D打印铝合金样品的横向和竖向导热系数最小,以石墨为标样时横向和竖向导热系数最大,310不锈钢标样结果介于两者之间。由于石墨标样测得的热物理参数更接近铝合金

导热系数的理论值,建议选用石墨标样作为测量3D打印铝合金样品热物理性能的参比样品。

(2) 在3D打印过程中,受层间热传递影响,材料的竖向均匀性较横向差,以石墨为标样的热扩散系数和导热系数随温度升高而增大,横向热扩散系数和导热系数均高于竖向。

(3) 随着实验温度的升高,以石墨为标样的3D打印铝合金样品的比热容逐渐增大,竖向值高于横向值。本文实验结果为3D打印铝合金热物性参数的进一步研究与应用提供了理论指导。

参考文献

- [1] 程婷. 超高强铝合金材料新技术及其发展趋势. 冶金与材料, 2024, 44(10): 133
- [2] 赵吉峰, 孙霄霄, 董恩昌. 铝合金材料发展现状及趋势展望. 中国金属通报, 2024(9): 13
- [3] 赵亮, 刘鹏, 郑敬超, 等. 金属3D打印技术工艺探索及应用. 汽车工艺与材料, 2023(2): 1
- [4] 刘铭, 张坤, 樊振中. 3D打印技术在航空制造领域的应用进展. 装备制造技术, 2013(12): 232
- [5] 李文刚, 谢凝. 航空铝合金薄壁零件上3D打印技术的应用研

- 究. 科技创新与应用, 2019(31): 159
- [6] 李传涛. 3D 打印技术在航空铝合金薄壁零件上的应用. 机电信息, 2019(15): 80
- [7] Pradeep P I, Roy A, Anilkumar V, et al. 3D printing of AlSi₁₀Mg for realization of components of liquid engines for launch vehicles. *Trans Indian Natl Acad Eng*, 2024, 9: 385
- [8] Qi S W, Huang G J, Xu X R, et al. Effect of laser process parameters on thermal behavior and residual stress of high-strength aluminum alloy processed by laser powder bed fusion. *J Mater Res Technol*, 2024, 33: 3756
- [9] Wu Y, Chen B Q, Xu P X, et al. Microstructure and microhardness of high-strength aluminium alloy prepared using high-speed laser fabrication. *Metals*, 2024, 14(5): Art No. 525
- [10] 王悦. 3D 打印制备铝合金的组织与性能研究 [学位论文]. 沈阳: 沈阳航空航天大学, 2020
- [11] 李经怀, 周全, 应秉斌. 基于闪光法的蒸汽发生器传热管导热系数的测量研究. 压力容器, 2024, 41(3): 67
- [12] 张振威, 蒋锐, 赵洁, 等. 基于激光闪射法测量某内燃机铝合金活塞的热物性参数. 理化检验: 物理分册, 2022, 58(3): 26
- [13] 李艳, 才洪冰, 丛佳玥, 等. 激光法测试氮化硅陶瓷基板导热系数的探讨. 当代化工研究, 2024(17): 74
- [14] 张雅淋, 安晓明, 葛新岗, 等. 大尺寸金刚石激光闪射法热导率测试研究. 人工晶体学报, 2024, 53(3): 503
- [15] 苗社强, 周永胜. 激光闪射法测量一种砂岩的高温热扩散系数和热导率. 矿物岩石地球化学通报, 2017, 36(3): 450
- [16] 王东, 孙晓红, 赵维平, 等. 激光闪射法测试耐火材料导热系数的原理与方法. 计量与测试技术, 2009, 36(3): 38
- [17] 奚同庚. 无机材料热物性学. 上海: 上海科学技术出版社, 1981
- [18] 张琳, 杜斌, 鲁燕萍. 激光导热仪准确测量比热容的方法研究. 真空电子技术, 2015(2): 41
- [19] 刘黎, 周旺枝, 张洪雷. 激光法测量材料热物理性能的原理及方法. 电工钢, 2013, 51(3): 9

作者简介: 徐亮 (1995—), 男, 甘肃省天水人, 硕士, 研发助理工程师, 2023 年毕业于兰州理工大学材料与化工专业。主要研究方向: 金属材料的制备及应用。通信地址: 陕西省西安市高陵区泾渭新城渭华路北段 12 号; E-mail: 826937154@qq.com。