

激光辐照盐溶液中铝靶材的温度场研究

程习成¹, 夏惠军^{2*}, 谭 勇¹

¹长春理工大学, 吉林 长春

²西南技术物理研究所, 四川 成都

收稿日期: 2022年11月25日; 录用日期: 2022年12月25日; 发布日期: 2022年12月30日

摘 要

基于Comsol multiphysics软件, 对连续激光辐照盐溶液中铝靶材的温度场进行了数值仿真模拟, 得到了不同的激光功率和不同的盐浓度对连续激光辐照盐溶液中铝靶材的温度时间响应。研究表明, 随着激光功率的增大, 激光辐照中心点、径向温度、轴向温度三者的变化曲线都呈现明显的上升趋势。而盐溶液浓度增大, 激光辐照中心点、径向温度、轴向温度三者的变化幅度都很小。但二者的径向温度和轴向温度都是分别随着径向距离、轴向距离的增大而呈现相同的下降趋势, 随空间分布都呈高斯分布, 与所用激光的空间分布类似。研究结果对激光的水下加工和激光的水下传输具有重要意义。

关键词

激光功率, 盐浓度, 温度场, 数值仿真

Study on the Temperature Field of Aluminum Target Material Irradiated by Laser in Salt Solution

Xicheng Cheng¹, Huijun Xia^{2*}, Yong Tan¹

¹Changchun University of Science and Technology, Changchun Jilin

²Southwest Institute of Technical Physics, Chengdu Sichuan

Received: Nov. 25th, 2022; accepted: Dec. 25th, 2022; published: Dec. 30th, 2022

Abstract

Based on Comsol multiphysics, the numerical simulation of the temperature field of aluminum target in salt solution irradiated by continuous laser was carried out. The influence of different

*通讯作者。

laser power and different salt concentration on the temperature time of aluminum target in salt solution irradiated by continuous laser was obtained. The results show that with the increase of laser power, the change curves of laser irradiation center point, radial temperature and axial temperature all show an obvious rising trend. However, with the increase of salt solution concentration, the laser irradiation center, radial temperature and axial temperature have a small range of change. However, with the increase of radial distance and axial distance, the radial temperature and axial temperature show the same downward trend respectively, and the spatial distribution is Gaussian, which is similar to the spatial distribution of the laser used. The results are of great significance for underwater laser processing and underwater laser transmission.

Keywords

Laser Power, Salt Concentration, Temperature Field, Numerical Simulation

Copyright © 2022 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

最近几十年激光技术发展迅速,特别是最近十年出现了激光焊接、激光切割、激光打孔以及激光表面改性等激光加工技术。激光加工技术具有能量高、热变形小、非接触式加工不会对材料产生机械挤压和机械应力、绿色环保等优点,因此,激光加工技术被广泛应用到工业、航空航天、国防以及日常生活等领域。

国内外的研究者逐步运用数值模拟软件构建具体模型的方法对激光辐照材料进行研究。2007年, Safda 等人[1]对激光辐照金属熔化的熔池的几何形状进行数值模拟,他们预测了表面热源模型辐照区域的温度分布和熔体的边界和液体流动情况。2006年, Yilbas 等人[2]研究了激光辐照区域的加热和相变变化,为数值模型的研究提供了相变过程和空洞形成的有用的信息。2006年,蒋艳锋[3]利用有限差分的方法对长脉冲激光辐照光学材料的热损伤进行了详细的研究,建立了一个可以广泛应用的数学模型,可用于金属和半导体光学材料熔融阈值和汽化阈值的计算。同年,蒋艳锋、江东、钟鸣等人应用固体热传导理论,计算了银、铜、铝等金属材料的熔融破坏阈值和汽化破坏阈值。2007年,丁伟环、张梁等人[4]利用有限元方法建立了相关模型,研究了长脉冲强激光辐照半导体材料 Si 和 Ge 的温度场。同年,赵方东对金属和半导体等强吸收材料的熔融和汽化的相变过程进行了系统的研究,第一次把研究熔融状态相变的等效比热容方法拓展到汽化相变。2008年,田宗军、王东生、黄因慧等人[5]根据传热学理论和有限元数值的模拟方法,构建了有限元仿真的模型,求解出了 45 钢表面温度场的分布规律。

近年来,对激光辐照材料有关方面的研究更加深入和多元化。2010年,许伯强、汪昊、徐桂东等人[6]应用数值模拟的方法模拟了激光与金属铝相互作用的温度场和流场,研究得出了激光产生熔池的温度场、熔池速度场及熔池的形状。2013年,金云声、谭福利、贺佳等人[7]提出利用数值反演的方法求解材料的反射率。2018年,许本志、齐丽君、王伟等人[8]采用长脉冲激光和短脉冲激光空间叠加打孔的方法,对复合激光打孔的最佳匹配参量进行了理论和实验研究,建立了复合激光打孔的最佳匹配模式,以熔融物的产生和去除达到平衡为原则,理论计算得出长脉冲激光和短脉冲激光的最佳匹配参量和最佳匹配情况下的复合激光打孔速率。2019年,中国科学院长春光学精密机械与物理所的李成龙[9]运用 COMSOL Multiphysic 有限元仿真软件对不同尺度律铝合金板进行数值模拟仿真,通过数值计算得到了绝热边界条件下的不同尺度律铝合金板的温度分布。2020年,文康、李和章、马壮等人[10]基于 ANSYS 有限元软件

构建了激光辐照下的三维物理模型，使用不同的激光参数进行激光辐照实验，根据所采集的温度数据和前表面散射光强度数据，反演计算了靶材在激光辐照过程中的吸收率变化。而激光的水下加工又是激光加工技术的主流研究方向，因其具有热损伤小、且加工碎片在工件表面的再沉积较少等优点，而受广大研究者的青睐。2022年，中国科学院长春光学精密机械与物理研究所的王铭[11]通过运用模拟仿真软件研究了激光功率对到靶材的功率密度分布的影响特性和激光辐照金属靶材结构的仿真研究，对激光损伤金属靶材的机理进行了研究。

2. 连续激光辐照盐溶液中铝靶材的理论及其仿真过程

2.1. 连续激光辐照铝靶材的热传导模型

激光作用盐溶液中铝靶材的过程中，激光是经过盐溶液中传播后传到靶材表面，靶材表面吸收激光能量并沉积，靶材吸收的激光能量通过热传导的方式向靶材内部进行传播。因此，可以构建上层是盐溶液、下层是铝靶材的分层模型，为了研究问题的方便，取盐溶液和铝靶材交界面处上方的厚度很薄的水层进行研究，这里取的厚度为0.2 mm。连续激光辐照盐溶液中的合金钢材料的实物模型如图1所示，几何模型如图2所示，本文中是取了铝靶材和铝靶材上方厚度为0.2 mm的盐溶液为研究对象，图2是铝靶材和铝靶材上方厚度为0.2 mm的盐溶液横截面的一半。

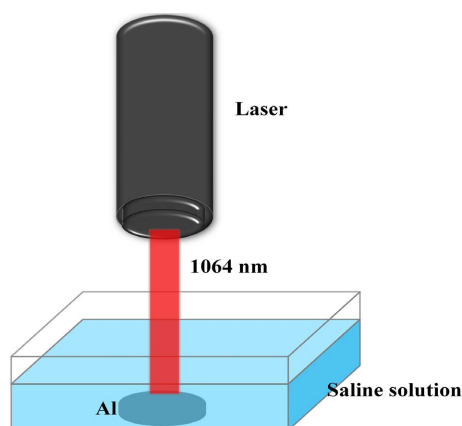


Figure 1. Physical model of aluminum target irradiated by laser in salt solution

图 1. 激光辐照盐溶液中铝靶的实物模型

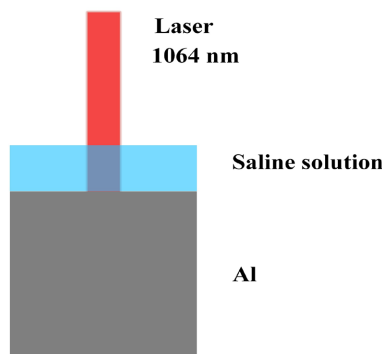


Figure 2. Geometric model of aluminum target irradiated by laser in salt solution

图 2. 激光辐照盐溶液中铝靶的几何模型

激光作用盐溶液中铝靶材的过程中，由于激光是经过盐溶液中传播后传到靶材表面，靶材表面吸收激光能量并沉积，靶材吸收的激光能量通过热传导的方式向靶材内部进行传播。当靶材表面温度升高速度一直大于向靶材内部的热传导速度，则铝靶材表面温度持续升高，则其热传导方程如下：

$$\rho_i c_i \frac{\partial T_i(r, z, t)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial r} \left[r k_i \frac{\partial T(r, z, t)}{\partial r} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[k_i \frac{\partial T_i(r, z, t)}{\partial z} \right] \quad (1)$$

其中，上式中 ρ_i 、 k_i 、 c_i 分别为靶材的密度、热传导系数、比热容， $T_i(r, z, t)$ 为时间为 t 时的温度分布，激光加热铝靶材可以看作面热源处理，可以作为边界条件中的热流注入项处理。由于上式(1)为偏微分方程，必须确定初始条件和边界条件后才能讨论方程的定解问题。

初始条件： $T_i(r, z, 0) = 293$

$$-k_l \frac{\partial T_l(r, z, t)}{\partial z} \Big|_{z=0} = I_0 A(T) f(r) \quad (2)$$

$$-k_s \frac{\partial T_s(r, z, t)}{\partial z} \Big|_{z=h+d} = 0 \quad (3)$$

侧面应用绝热边界条件：

$$k \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_{r=0}, \quad k \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_{r=R} = 0 \quad (4)$$

假设盐溶液与铝靶材的交界面为理想接触，

$$T_l(r, z, t) \Big|_{z=d} = T_s(r, z, t) \Big|_{z=d} \quad (5)$$

$$-k_l \frac{\partial T_l(r, z, t)}{\partial z} \Big|_{z=d} = -k_s \frac{\partial T_s(r, z, t)}{\partial z} \Big|_{z=d} \quad (6)$$

激光辐照铝靶材过程中，连续激光是高斯脉冲，靶材表面的激光空间域分布呈高斯分布。激光经过盐溶液的水下传输过程符合比尔 - 朗波定律，因此，激光热通量如下式所示：

$$Q = \frac{2p}{\pi r_0^2} \cdot e^{-\frac{2r^2}{r_0^2}} \cdot e^{-\alpha z} \quad (7)$$

其中， p 是激光功率， r_0 是激光光斑半径， r 是铝靶材表面上的点和激光焦点位置之间的距离，本论文中 r_0 取 1 mm， z 取 22 mm。

2.2. 激光参数和靶材的物理参数

仿真计算模型中，连续激光光束的激光参数如表 1 所示，靶材物理参数如表 2 所示。

Table 1. Laser parameters of continuous laser beam

表 1. 连续激光光束激光参数

参量	符号	参数
激光波长(nm)	λ	1064
连续激光功率(W)	P	50, 60, 80
光斑半径(mm)	r_0	1

Table 2. Physical parameters of the target
表 2. 靶材物理参数

参量	符号	参数
半径(mm)	r	5
厚度(mm)	h	2
导热系数(W/(m·k))	k	210
密度(Kg/m ³)	ρ	2698
恒压热容(J/(Kg·K))	C_p	900

盐溶液以在纯水中添加对应的 NaCl 进行配比, 由于 NaCl 的存在, 使得溶液对于激光的衰减和温度传递都有一定差异。2% 的盐溶液浓度对 1064 nm 激光的吸收系数为 34.8 m^{-1} , 4% 的盐溶液浓度对 1064 nm 激光的吸收系数为 35 m^{-1} , 6% 的盐溶液浓度对于 1064 nm 激光的吸收系数为 35.2 m^{-1} , 8% 的盐溶液浓度对于 1064 nm 激光的吸收系数为 35.3 m^{-1} , 10% 的盐溶液对于 1064 nm 激光的吸收为 35.5 m^{-1} 。

2.3. 激光辐照盐溶液中铝靶材模型的网格剖分

网格剖分对有限元模型的求解至关重要, 网格剖分的单元数越多和精细化程度越高, 求解的精度越高。但网格剖分的单元数和精细化程度越高, 所占用的计算机资源和所需计算求解的时间就越长, 因此可以采用二维轴对称的方法就行网格剖分。由于模型实体为圆柱体且激光辐照表面为圆形, 使用自由三角形网格剖分可以更精确地表征三维模型的几何特征。模型网格大小在定制的时候采取极细化, 具体的单元大小参数如下: 最大单元大小为 0.005 m, 最小单元大小为 $1 \times 10^{-4} \text{ m}$, 最大单元增长率为 1.1, 曲率因子为 0.2, 狭窄区域分辨率为 1。具体的网格剖分图如下图 3 所示。

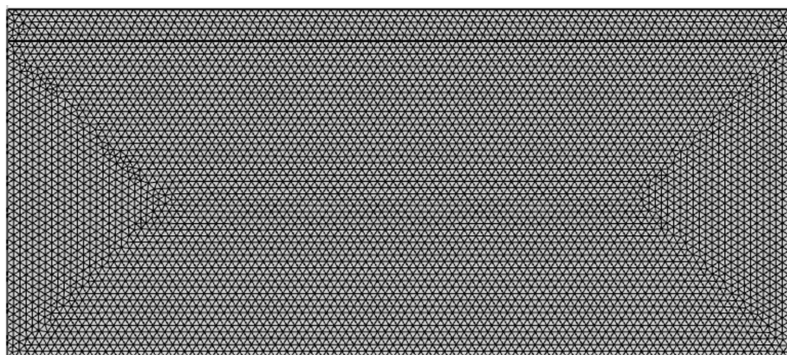


Figure 3. Grid subdivision diagram
图 3. 网格剖分图

3. 仿真结果与分析

以连续激光功率为 80 W 辐照盐浓度为 2% 的盐溶液中靶材为例, 考察铝靶材的温度分布, 如图 4 所示。可见, 靶材表面及其附近很浅的区域温度很高, 图中的各条温度等值线分布明显。

3.1. 不同激光功率下温度场的演化

对不同功率的连续激光辐照盐浓度为 2% 的盐溶液中铝靶材的温度场随时间和空间的变化情况, 进行分别讨论。

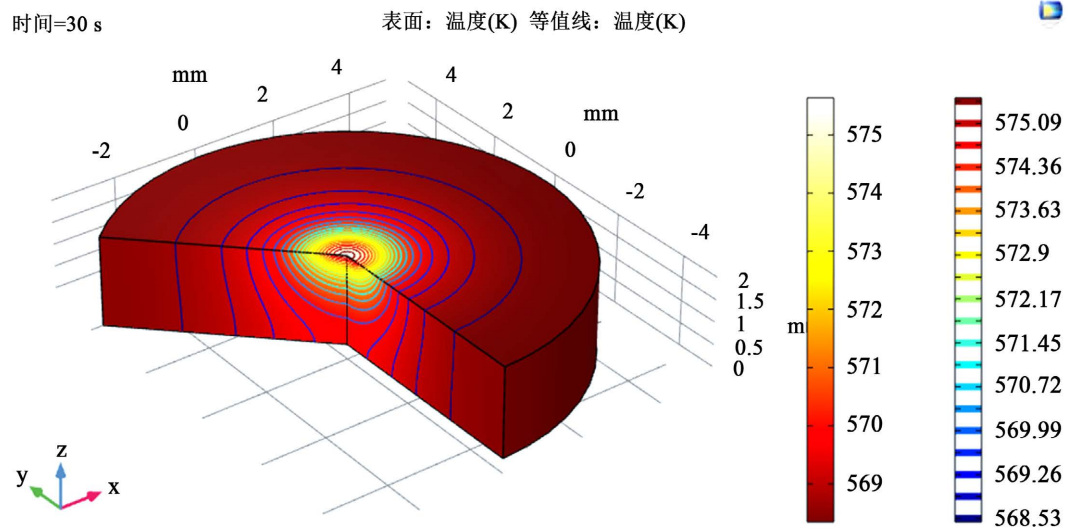


Figure 4. Temperature cloud map of target material irradiated by laser in salt solution
图 4. 激光辐照盐溶液中靶材的温度云图

3.1.1. 不同入射功率下温度场随时间的变化

图 5 表明三种不同功率的连续激光辐照盐浓度为 2% 的盐溶液中铝靶材, 三种不同功率下的辐照中心点的温度随时间变化的曲线的形态基本一致, 随着激光辐照时间的延长, 温度都基本成线性增长。激光的功率越大, 则变化曲线的斜率越大, 表明温度上升的越快。

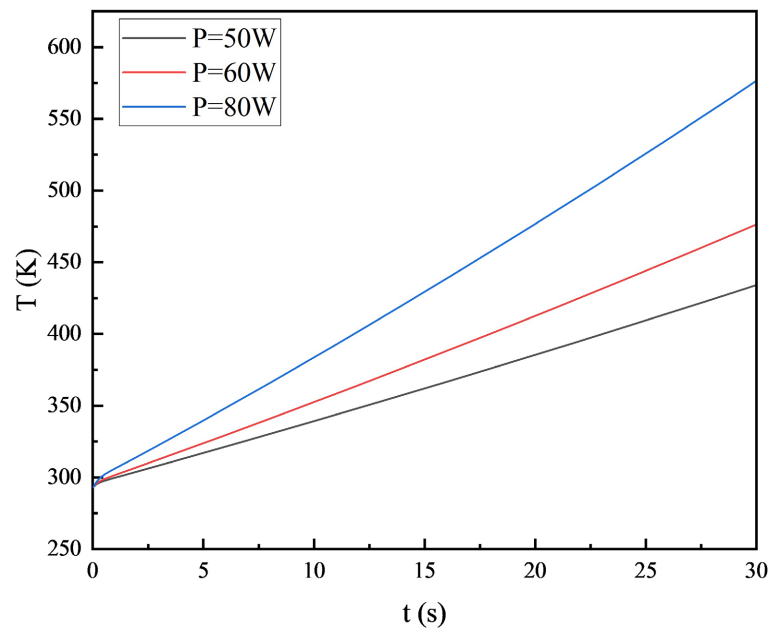


Figure 5. Variation of temperature at the irradiation center of the target with time under different powers

图 5. 不同功率下, 靶材的辐照中心点的温度随时间的变化情况

3.1.2. 不同入射功率下温度场随空间的变化

不同入射功率条件下, 径向温度随空间的变化情况如图 6 所示。

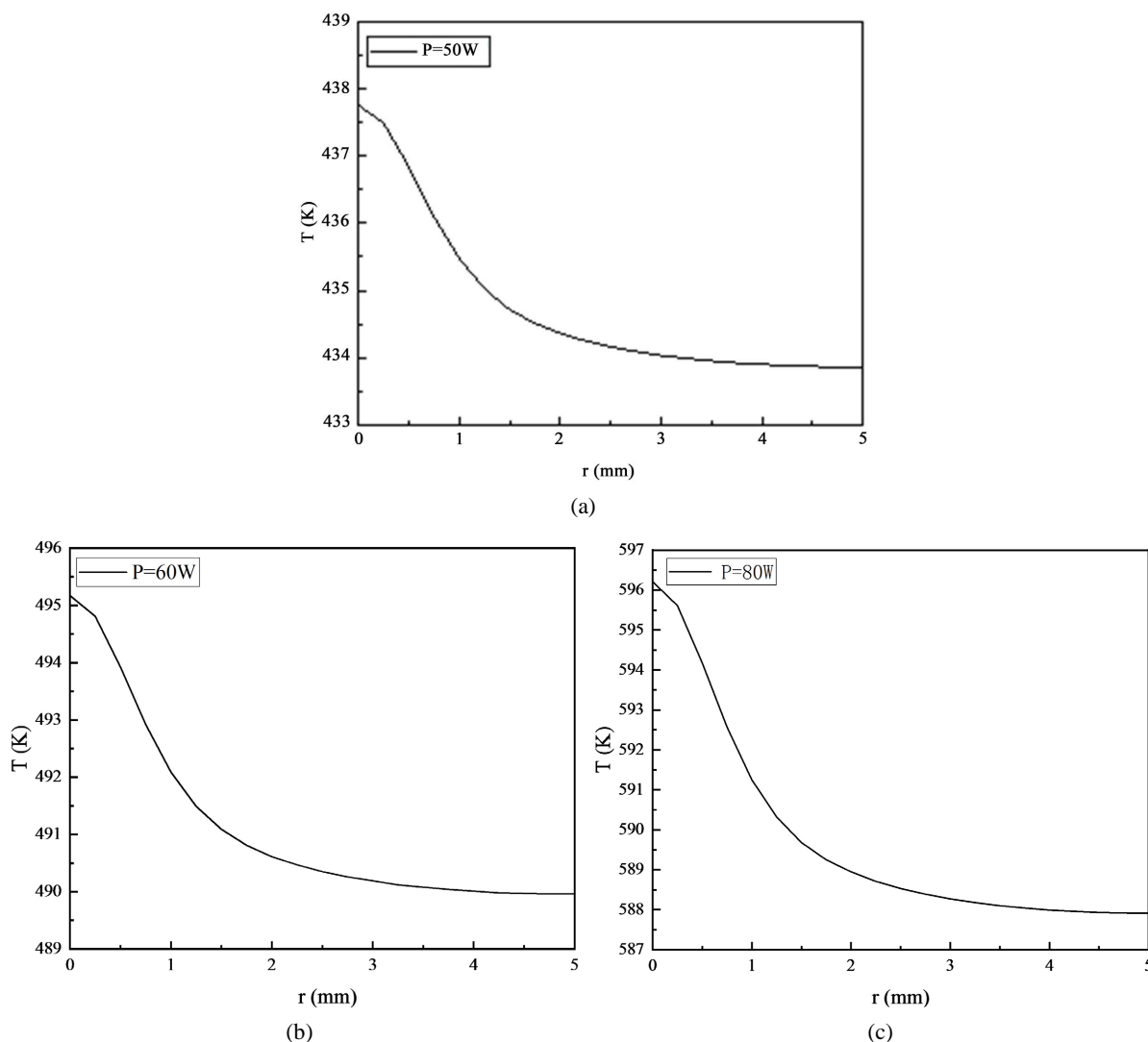


Figure 6. Variation of radial temperature of target with space under different powers

图 6. 不同功率下，靶材的径向温度随空间的变化情况

图 6 表明，随着激光功率的增加，径向温度也增加，随着径向距离的增加，温度呈现下降趋势。三种功率下的径向温度随空间变化的曲线形态一致，都呈类高斯分布，与所用激光的空间分布类似。

不同入射功率条件下，轴向温度随空间的变化情况如图 7 所示。

图 7 表明，随着激光功率的增加，靶材的轴向温度升高；三种功率下随着轴向距离的增加，靶材的轴向温度都呈现下降趋势，且下降的趋势相同，都呈类高斯分布。

3.2. 不同盐浓度水溶液中铝靶材的温度场的演化

80 W 的连续激光辐照不同盐浓度水溶液中铝靶材的温度场随时间和空间的变化情况，分别从时间和空间演化两个方面讨论。

3.2.1. 不同盐浓度水溶液中温度场随时间的变化

图 8 表明，三种不同的盐浓度的情况下，随着激光辐照时间的增加，靶材辐照中心点的温度都呈线性增加，且温度变化一致，三条曲线基本完全重合。

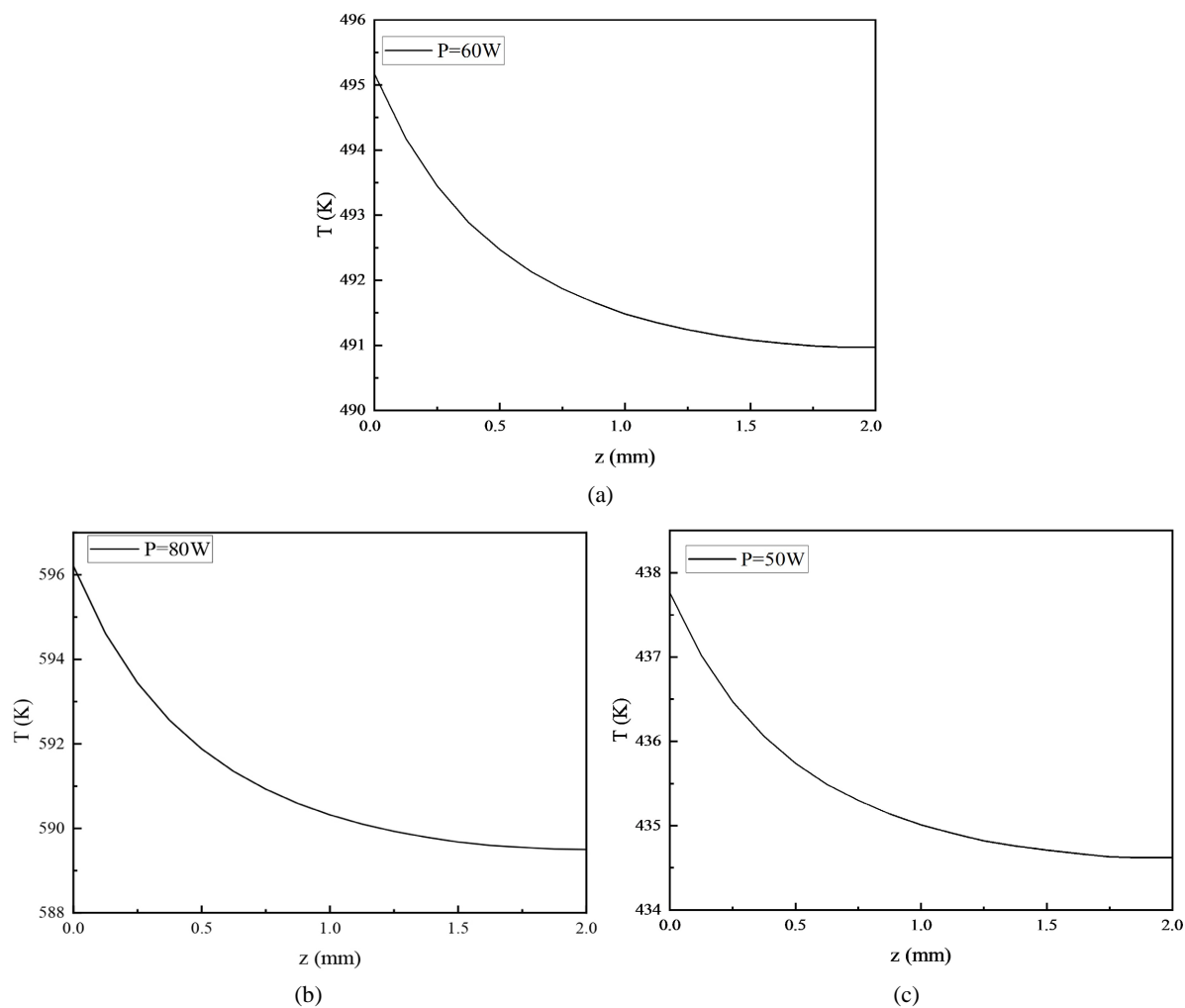


Figure 7. Variation of axial temperature of the target with space under different powers

图 7. 不同功率下，靶材的轴向温度随空间的变化情况

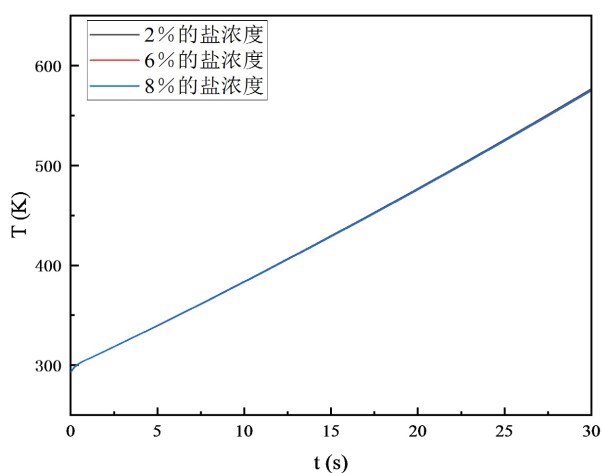


Figure 8. Variation of temperature at the irradiation center with time under different salt concentrations

图 8. 不同盐浓度下，辐照中心点温度随时间的变化情况

3.2.2. 不同盐浓度水溶液中温度场随空间的变化

图 9 表明，随着盐溶液盐浓度的增加，不同盐浓度中靶材的径向温度减小；随着径向距离的增加，靶材的径向温度呈现下降趋势，下降的趋势的速率越来越慢，呈类高斯分布。

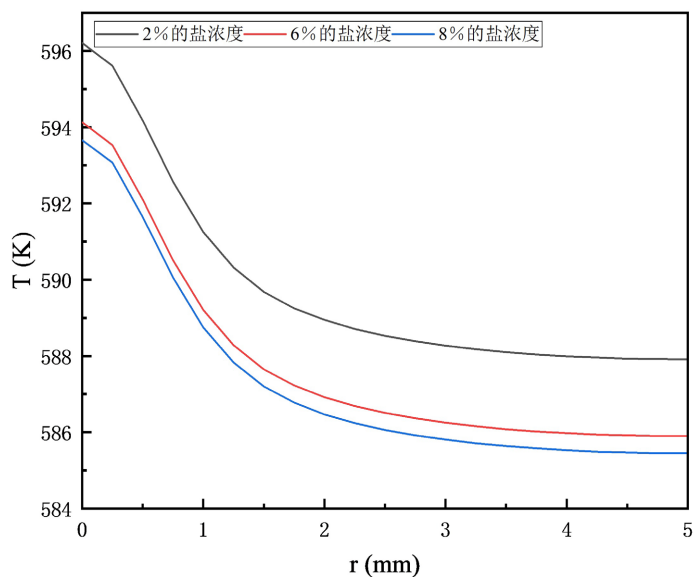


Figure 9. Variation of radial temperature of target with space under different salt concentrations

图 9. 不同盐浓度下，靶材的径向温度随空间的变化情况

图 10 表明，随着盐溶液盐浓度的增加，不同盐浓度中靶材的轴向温度减小；随着轴向距离的增加，靶材的轴向温度呈现下降趋势，下降的趋势的速率越来越慢，呈类高斯分布。

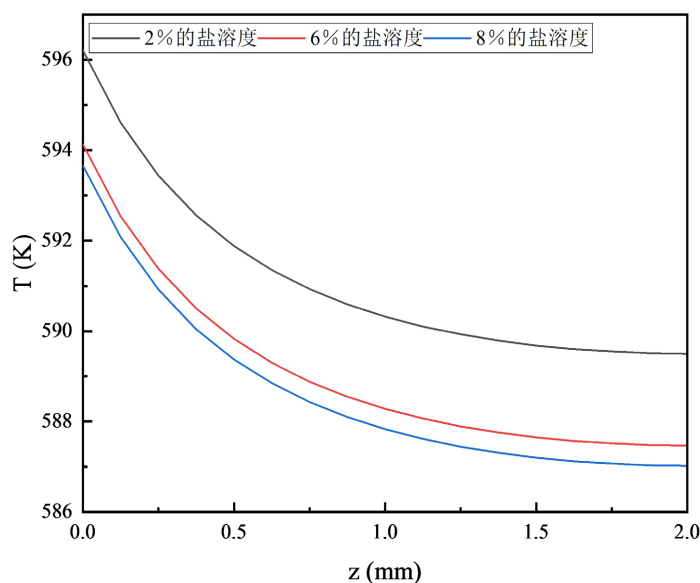


Figure 10. Variation of axial temperature of the target with space under different salt concentrations

图 10. 不同盐浓度下，靶材的轴向温度随空间的变化情况

4. 结论

本文研究了连续激光辐照盐溶液中铝靶材的分层模型时,靶材表面及其内部温度场在时间和空间上的分布和变化规律,本文考虑了激光未聚焦前时在盐溶液中传播的过程,本文把此过程看成能量衰减,根据比尔-朗伯公式进行处理。把靶材和其表面上方厚度为 0.2 mm 的盐溶液构建成双层模型,研究了激光功率和盐溶液的盐浓度这两大参数对双层模型的温度场影响的特点和变化规律,结果表明,连续激光辐照同一盐浓度的盐溶液中的铝靶材时,随着激光功率的增大,激光辐照中心点温度、径向温度、轴向温度均呈现明显的增加趋势。连续激光辐照不同盐浓度的盐溶液时,随着盐浓度的增大,激光辐照中心点的温度基本不变,不同盐浓度下的激光辐照中心点温度的变化曲线基本重合。径向温度和轴向温度随着盐浓度的增大而呈现少量的温度下降趋势,但二者的形态类似,都呈类高斯分布。此研究结果对研究激光的水下传输和水下加工具有重要意义。

参考文献

- [1] Ven, J. and Erdman, A.G. (2007) Laser Transmission Welding of Thermoplastics—Part I: Temperature and Pressure Modeling. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, **129**, 849-858. <https://doi.org/10.1115/1.2752527>
- [2] Yilbas, B.S. and Mansoor, S.B. (2006) Laser Evaporative Heating of Surface: Simulation of Flow Field in the Laser Produced Cavity. *Journal of Physics D: Applied Physics*, **39**, 3863-3875. <https://doi.org/10.1088/0022-3727/39/17/024>
- [3] 蒋艳锋. 长脉冲强激光对光学材料热损伤的研究[D]: [硕士学位论文]. 成都: 四川大学, 2006.
- [4] 丁玮环, 张梁, 沈中华, 等. 长脉冲高能激光与半导体材料的热作用分析[J]. *红外与激光工程*, 2007, 36(z1): 600-603.
- [5] 田宗军, 王东生, 黄因慧, 等. 45 钢表面激光重熔温度场数值模拟[J]. *材料热处理学报*, 2008, 29(6): 173-178.
- [6] 许伯强, 汪昊, 徐桂东, 等. 金属材料中激光产生熔池的数值模拟及应用[J]. *江苏大学学报(自然科学版)*, 2010, 31(3): 358-362.
- [7] 金云声, 谭福利, 贺佳, 等. 反射率的数值反演[J]. *强激光与粒子束*, 2013, 25(3): 549-552.
- [8] 许本志, 齐丽君, 王伟, 等. 复合激光打孔最佳匹配参量的研究[J]. *激光技术*, 2018, 42(1): 5-10.
- [9] 李成龙. 强激光辐照 7075 铝合金热响应与尺度律关系研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 中国科学院大学, 2019.
- [10] 文康, 李和章, 马壮, 等. 光斑尺寸对连续激光辐照铝合金温度响应影响研究[J]. *中国光学*, 2020, 13(5): 1023-1031.
- [11] 王铭. 会聚激光辐照金属约束含能材料结构的机理研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 中国科学院大学, 2022.