

# 凝固过程微熔池温度场数值模拟及分析

苏新磊, 赵定国, 陈洋, 王书桓, 孙鑫, 崔小杰

(华北理工大学 冶金与能源学院, 河北唐山 063210)

**摘要:** 采用数值模拟软件对微米和毫米尺度微熔池凝固过程中的温度场进行了模拟, 探究了微熔池凝固过程中温度场和固相的变化规律, 并对比了20 μm和20 mm熔池凝固过程中温度场和固相变化的异同。结果表明, 20 μm、30 μm和40 μm熔池的温度降低到固相线温度用时分别为7.2 ms、11.1 ms和14.3 ms, 平均速率分别为24 135 /s、14 685.9 /s、12 064.2 /s, 表明微熔池具有快速凝固、急速冷却的特点。20 mm熔池凝固用时9.2 s, 平均冷却速率为19.4 /s, 凝固时间和平均冷却速率远大于微熔池的数值。

**关键词:** 微熔池; 温度场; 数值模拟

## 作者简介:

苏新磊(1994-), 男, 硕士生, 主要从事纯净钢冶炼及夹杂物控制、金属增材制造技术研究工作。电话: 15226521229, E-mail: 1084833310@qq.com

## 通讯作者:

赵定国, 男, 教授, 博士生导师。E-mail: gyyzhao@163.com

中图分类号: TP391.9

文献标识码: A

文章编号: 1001-4977(2022)

03-0340-06

## 基金项目:

国家自然科学基金(51774139, 52074128); 河北省自然科学基金(E2020209014, E2019209597)。

## 收稿日期:

2021-06-21 收到初稿,  
2021-10-14 收到修订稿。

选区激光熔化(Selective Laser Melting, SLM)技术的熔凝是一个高温快速过程, 微熔池在凝固过程中冷却速度可达 $10^3 \sim 10^6$  K/s, 属于快速冷却范畴, 被应用于航空航天、医疗等领域<sup>[1-5]</sup>。微熔池凝固过程中的温度场也处于一个快速的变化过程, 使用常规实验很难观察凝固过程中的温度场的变化规律, 而运用数值模拟的方法可以很好的观察凝固过程中温度场的变化。

许多学者研究了SLM工艺参数对凝固过程中温度场的影响, 采用CA-FE耦合算法模拟了不同扫描速度下合金SLM成形过程中温度场变化规律, 当扫描速度为1 000、1 600和2 400 mm/s时, 熔池中的最高温度分别约为2 970、2 270和1 820 , 最大冷却速率约为 $2.5 \times 10^6$ 、 $3.2 \times 10^6$ 和 $3.9 \times 10^6$  /s<sup>[6-7]</sup>。采用有限元法研究线能量对于激光熔池凝固过程中温度场的影响表明, 随着线能量密度的增大, 温度梯度和冷却速率逐渐变大<sup>[8]</sup>。采用有限元与相场模型相结合的方法模拟不同扫描速度下SLM制备Ti6Al4V合金的温度场变化, 当扫描速度从1 000 mm/s提高到1 600 mm/s时, 温度梯度从 $5.64 \times 10^4$  K/cm提高到 $1.84 \times 10^5$  K/cm, 冷却速率从 $5.56 \times 10^5$  K/s提高到 $1.93 \times 10^6$  K/s<sup>[9-10]</sup>。粉末层密度对熔池温度分布、冷却速度和尺寸的影响研究发现, 最高温度、热影响区和熔池尺寸随着层数的增加而增加, 随着粉末层密度的降低而增加; 而冷却速率随着层数的增加而降低(第一层除外), 随着密度的降低而降低<sup>[11]</sup>。

本文通过对SLM微熔池的凝固过程中的温度场进行了数值模拟实验, 研究并分析了微熔池凝固过程中温度场和固相率变化情况, 并通过微熔池传热模型理论计算熔池温度下降时间, 观察理论温度冷却时间和数值模拟温度冷却时间的差别, 最后对比不同尺寸熔池的温度场和固相率变化情况, 并分析两种熔池的特征, 对介观尺度微米级微熔池热态实验研究具有指导意义。

## 1 数学模型

模拟实验材料为Cr12含氮不锈钢, 采用Pro CAST软件计算出导热系数、热焓、密度和固相率等热物性参数与温度的关系曲线, 如图1所示。同时, 计算出模拟实验材料固相线温度为1 509 , 液相线温度为1 396 。

微熔池传热方程为式(1), 传热方程中的潜热处理采用热焓法。

$$\rho \frac{\partial H}{\partial t} = \lambda \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) \quad (1)$$

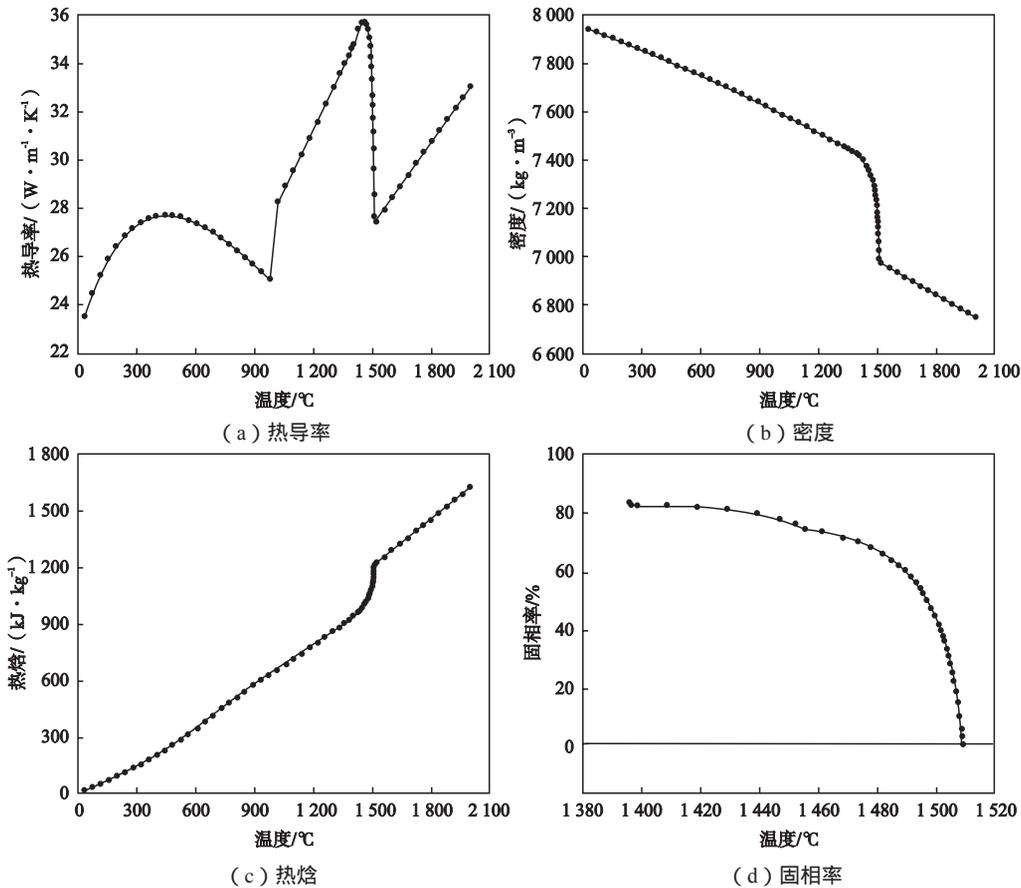


图1 不同热物性参数随温度的变化曲线

Fig. 1 Curves of different thermal physical properties with temperature

式中： $T$ 为温度， $t$ 为热传导时间， $s$ ； $\lambda$ 为热导率， $W/(m \cdot s)$ ； $c$ 为材料比热容， $J/(kg \cdot ^\circ C)$ ； $\rho$ 为材料密度， $kg \cdot m^{-3}$ ； $Q$ 为金属的结晶潜热， $J$ ； $x$ 、 $y$ 、 $z$ 为物体的空间坐标。

使用微熔池传热模型计算对微熔池温度下降时间进行理论计算，如式(2)所示。

$$\tau = \frac{-\rho c V \ln \frac{\theta}{\theta_0}}{hF} = \frac{-\rho c V \ln \frac{T - T_f}{T_0 - T_f}}{hF} \quad (2)$$

式中： $\theta$ 为微熔池实际温度与环境温度差， $^\circ C$ ； $\theta_0$ 为微熔池温度与环境温度差， $^\circ C$ ； $T$ 为微熔池实际温度， $^\circ C$ ； $T_0$ 为微熔池初始温度， $^\circ C$ ； $T_f$ 为环境温度， $^\circ C$ ； $\tau$ 为时间， $s$ ； $h$ 为换热系数， $W/(m^2 \cdot ^\circ C)$ ； $c$ 为材料比热容， $J/(kg \cdot ^\circ C)$ ； $\rho$ 为材料密度， $kg/m^3$ ； $V/F$ 为毕渥数和傅里叶数特征尺寸，半径为 $R$ 的球体，取 $R/3$ 。

采用微熔池传热模型计算凝固过程的传热问题，所用的参数如表1所示。

根据选区激光熔化工艺特点，采用前人数值模拟研究，在激光照射之下，熔池的形状约为半球状<sup>[12]</sup>，为了更好的计算，将模型简化为半球形。建立了 $R=20 \mu m$ 的微熔池模型，如图2所示，ProCAST软件模拟过程中的参数设置如表2所示。

熔池与粉床之间的传热借鉴了大熔池的换热系数，对微熔池的数值模拟研究进行了简化处理。熔池与周围粉材的换热系数为 $1\ 000\ W/(m^2 \cdot ^\circ C)$ ，微熔池周边的粉材无限大，可以充分吸收微熔池的热量，将粉材与外界环境的换热系数设为 $5\ 000\ W/(m^2 \cdot ^\circ C)$ 。

表1 铁基合金的热物性参数

Table 1 Thermal properties of the iron-based alloys

温度/ °C	密度/ ( $kg \cdot m^{-3}$ )	热导率/ ( $W \cdot m^{-1} \cdot ^\circ C^{-1}$ )	热焓/ ( $kJ \cdot kg^{-1}$ )
1 100	7 550.15	29.56	711.36
1 200	7 510.24	31.17	779.37
1 300	7 460.36	32.99	852.12
1 400	7 418.66	34.64	929.93
1 500	7 180.02	32.63	1 097.94
1 600	6 931.67	28.39	1 280.23

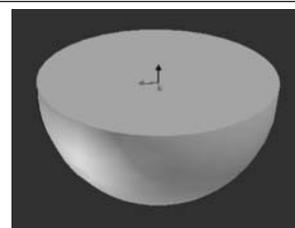


图2 微熔池模型

Fig. 2 The model of the micro-molten pool

## 2 模拟结果及讨论

### 2.1 微熔池不同位置温度变化曲线

为了研究不同时刻温度场和固相率变化过程，从温度场的分布云图的中心轴线自下而上选取四个位置点，如图3所示。图4为微熔池不同位置温度变化曲线。

微熔池凝固过程中四个不同位置的温度变化曲线相互重合。在开始时，温降曲线较陡，温降速度最快，随温降过程的进行，温降曲线出现一个小平台，微熔池的温降曲线呈平缓状态，之后随凝固过程的进一步进行，微熔池温降曲线斜率又变大，整个凝固过程温降速率由大变小再变大。

在图4中取A、B、C和D四点，A点为0，B点为2.04 ms，C为14.33 ms，D为16.38 ms，将温度变化曲线分为AB、BC和CD段。AB阶段为1 569~1 509 ℃，用时2.04 ms，平均温降速率为29 411.8 ℃/s，温降速率最大。BC阶段为1 509~1 396 ℃，用时12.3 ms，平均温降速率为9 187 ℃/s。在这一过程中，熔池中会有凝固潜热的释放，潜热的释放促使微熔池温度升高，但微熔池本身处于散热过程，当散热速率等于升温速率时，温降曲线出现小平台，使温降速率减缓，这一阶段温降速率最小。CD段为1 396~1 345 ℃，用时2.05 ms，平均温降速率为24 630.5 ℃/s。这个阶段熔池已经完成了

表2 数值模拟参数设置

Table 2 Parameter setting of the numerical simulation

微熔池初始温度/℃	外界温度/℃	重力方向
1 569	20	-Z轴

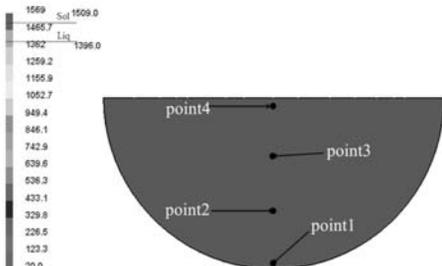


图3 微熔池位置点

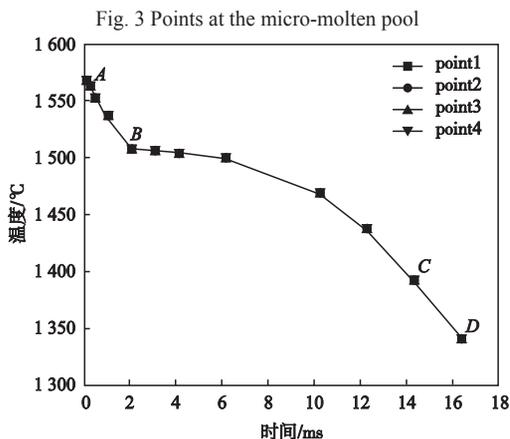


图4 不同位置的温度变化曲线

Fig. 4 Temperature variation curves at different points

整个凝固的过程，但由于微熔池的温度高于外部的区域，还会进行一定的降温，直到两个区域的温差相同。

表3为微熔池不同位置温度随时间变化数值。从表3可看出，在0 ms时，四点温度相等，为1 569 ℃；2.04 ms时，微熔池温差均为0.000 1 ℃级别，差值极小，如图4所示，四个位置的温度变化曲线相互重合。

### 2.2 微熔池不同位置的固相率变化曲线

图5为熔池凝固过程中四个不同位置固相率随时间的变化曲线，四个位置的固相率曲线与温度曲线变化相同，四条曲线相互重合。在图5的曲线上取a、b、c、d四点，其中a点所对应的时间点为0 ms，b点为1.02 ms，c点为2.04 ms，d点为14.33 ms。在图5中，ab阶段，微熔池还没有开始凝固过程，为散热阶段；在b点，开始有固相析出，随着微熔池凝固过程进行，到d点，微熔池完成了整个凝固过程。

表4为微熔池中不同位置固相率随时间的变化值。

在0 ms时，微熔池内四个位置的固相率都为0；1.02 ms时，固相率也都为0；2.04 ms时，微熔池point1的固相率为0.088%，有固相的生成，可知微熔池在1.02~2.04 ms之间开始凝固，point1的固相率与三点的固相率差值分别为 $6 \times 10^{-8}$ 、 $9 \times 10^{-8}$ 和 $9 \times 10^{-8}$ ；在14.33 ms，固相率为100%，微熔池完成了整个凝固过程。从表4中可看出，微熔池上4个位置的固相率基本相等，因此四个不同位置固相率变化曲线相互重合，微熔池在14.3 ms内瞬间完成整个凝固过程。

表3 微熔池中不同位置的温度随时间的变化数值

Table 3 Temperature changes with time at different positions in the micro-molten pool

时间/ms	point1温度/℃	point2温度/℃	point3温度/℃	point4温度/℃
0	1 569	1 569	1 569	1 569
2.04	1 508.646 9	1 508.647	1 508.647 2	1 508.647
14.33	1 392.955 9	1 392.96	1 392.96	1 392.965 9
16.38	1 342.292 8	1 342.292 9	1 342.292 9	1 342.292 8

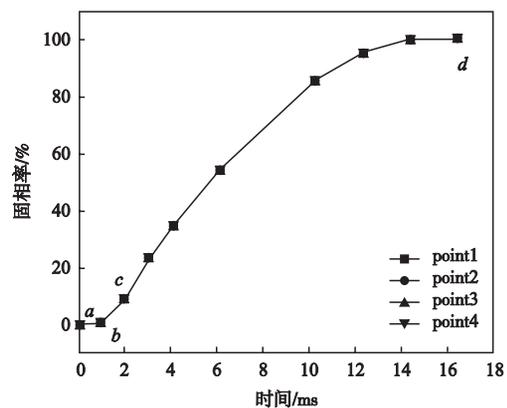


图5 微熔池不同位置的固相率变化曲线

Fig. 5 Variation curves of the solid rate at different positions of the micro-molten pool

### 3 不同尺寸微熔池温度场数值模拟及分析

对 $R=20\ \mu\text{m}$ 、 $30\ \mu\text{m}$ 和 $40\ \mu\text{m}$ 的微熔池进行数值模拟，观察不同位置温度的变化，图6为微米级熔池温度变化曲线。从图6中可看出， $20\ \mu\text{m}$ 、 $30\ \mu\text{m}$ 和 $40\ \mu\text{m}$ 熔池温度变化曲线为陡峭-平滑-陡峭趋势， $20\ \mu\text{m}$ 、 $30\ \mu\text{m}$ 与 $40\ \mu\text{m}$ 熔池四个不同位置的温度变化相同，四条曲线相互重合。

微熔池的数值模拟凝固时间与采用微熔池传热模型计算值相对比，如表5所示，可看出数值模拟和理论

表4 微熔池中不同位置的固相率随时间的变化数值  
Table 4 Variation of the solid fraction at different positions in the micro-molten pool with time

时间/ms	point1 固相率/%	point2 固相率/%	point3 固相率/%	point4 固相率/%
0	0	0	0	0
1.02	0	0	0	0
2.04	0.088 322	0.088 316	0.088 313	0.088 313
14.33	100	100	100	100

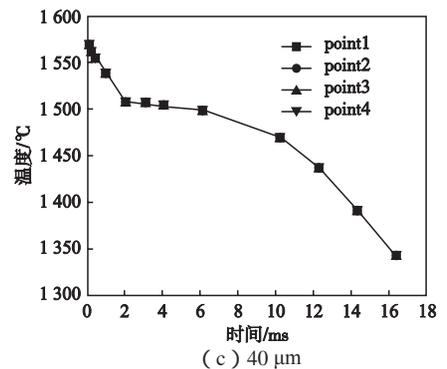
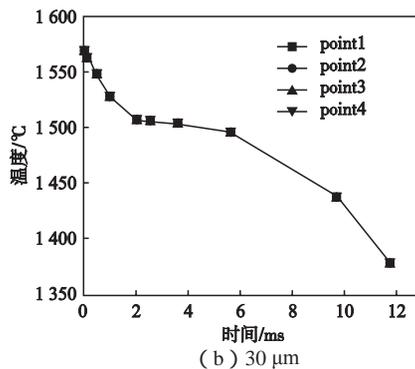
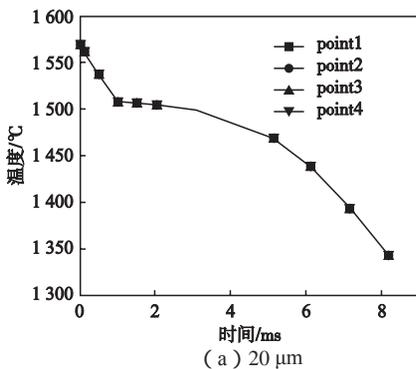


图6 不同尺寸熔池温度变化曲线

Fig. 6 Temperature curves of the molten pool with different sizes

取三个微熔池point1位置温度作图，如图7所示。三个微熔池的温度曲线可分为三个阶段。第一阶段，三个微熔池温度在到达其液相线温度之前，温度快速降低，熔池尺寸越大，温度变化曲线斜率越大，即到达液相线温度所用的时间越长。第二阶段，微熔池温度从固相线温度降低到液相线温度，熔池尺寸越大，所用时间越长，所用时间分别为6.1、9.1、12.3 ms。熔池体积越大热量越多，在相同换热系数之下，温度降低到相同的温度时所用时间也越长。第三阶段，熔池完成凝固过程并向环境散热的阶段，从图中可看出，随熔池尺寸变大，所用时间也变长。

### 4 微熔池与大熔池温度场数值模拟对比

为了对比微米级和毫米级熔池温度场异同，模拟

计算数值相吻合。

三个微熔池凝固过程的冷却速率如表6所示。随着微熔池的增大，微熔池的冷却速率逐渐减小， $20\ \mu\text{m}$ 熔池冷却速率最大，为 $24\ 135\ \text{°C/s}$ ， $40\ \mu\text{m}$ 熔池冷却速率最小，为 $12\ 142.4\ \text{°C/s}$ 。

表5 数值模拟与理论计算所用时间  
Table 5 Time taken for the numerical simulation and theoretical calculation

微熔池尺寸/ $\mu\text{m}$	数值模拟用时/ms	理论计算用时/ms
20	7.2	7.6
30	11.1	11.4
40	14.3	15.2

表6 微熔池凝固过程的冷却速率  
Table 6 Cooling rate of the micro-molten pool during solidification

微熔池尺寸/ $\mu\text{m}$	冷却速率/ $(\text{°C} \cdot \text{s}^{-1})$
20	24 135
30	14 685.9
40	12 142.4

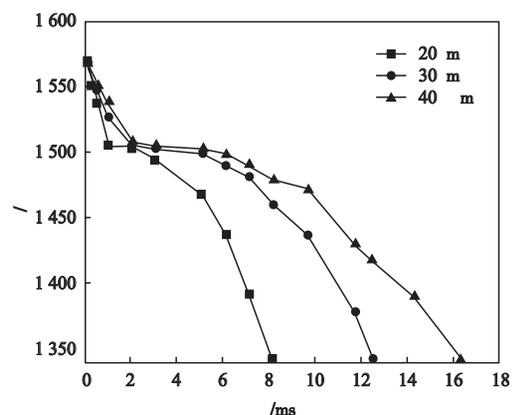


图7 不同尺寸微熔池冷却温度变化曲线

Fig. 7 Cooling temperature variation curves of the micro-molten pool with different sizes

并分析了 $20\ \mu\text{m}$ 和 $20\ \text{mm}$ 熔池在凝固过程中的温度场变化情况，两个熔池内取点位置与图3中的位置相同。图

8为20 μm和20 mm熔池不同位置温度变化曲线。

从图8a中可看出，微熔池四个位置的温度变化曲线相互重合。从图8b中可看出，熔池温度变化曲线初始温度下降速率较大，之后温度下降速率开始变小，最后温度的下降速率又变大，温度变化趋势与微熔池相同。熔池在初始凝固时，四个位置的温度均下降，point1处的温度下降明显，point2、3、4处位置的温度有一定的下降，这是因为point1处最接近熔池的底部位置，散热速率最大，point2、3、4处位置的散热速率小于point1处，所以降温最为明显。随熔池凝固过程的进行，温度变化曲线变为平缓，熔池温度到达结晶温度时，熔池发生形核和晶粒长大，此过程中释放结晶潜热使熔池温度回升，同时熔池的温度变化速率也相应降低，使降温曲线斜率有一定的减小。

20 μm熔池中四个不同位置的温度变化曲线相互重合（图8a），微熔池凝固过程的平均冷却速率为24 135 /s。与图8a相比，20 mm熔池中四个位置到达固相线温度分别用时4 099 ms、6 501 ms、7 406 ms和7 742 ms，冷却速率为42.7 /s、26.9 /s、23.6 /s和24 /s，四个点的冷却速度依次降低。表7为两个熔池的平均冷却速

率。从表7可看出，20 μm熔池的冷却速率要远大于20 mm熔池的冷却速率。

图9分别为20 μm和20 mm熔池不同位置固相率变化曲线。从图9a中可看出，20 μm熔池的固相率变化曲线与40 μm熔池固相率变化曲线相同，四个不同位置的固相率变化曲线相互重合，在7.6 ms内完成整个凝固过程。

从图9b中可看出，四个不同位置的凝固过程分阶段进行。point1处最先凝固，因为熔池底部散热速度最快，随着凝固过程的进行，point2、point3和point4开始有固相析出，熔池自下而上用时9 224 ms完成整个凝固过程。

微熔池与大熔池温度场数值模拟对比结果表明，微熔池凝固所需时间为ms级，而大熔池一般在s级，微熔池尺寸小，凝固时间也远远小于大熔池，因此具有快速冷却成形的优势。

表7 熔池平均冷却速率  
Table 7 Average cooling rate of molten pool

熔池尺寸	所用时间/ms	冷却速率/( · s <sup>-1</sup> )
20 μm	7.2	24 135
20 mm	9 224	18.7

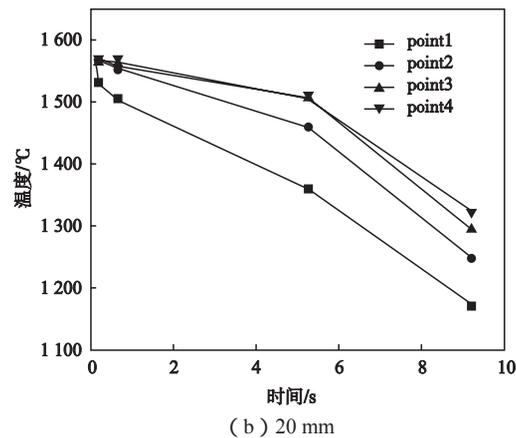
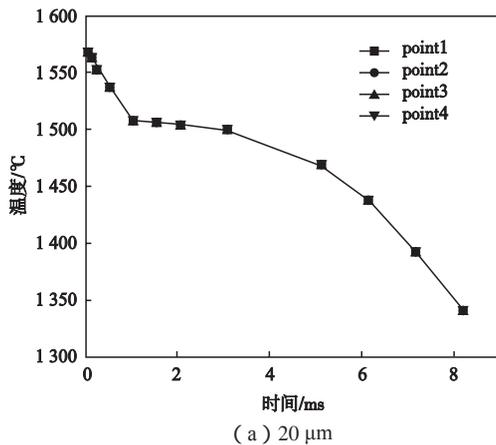


图8 熔池不同位置的温度变化曲线

Fig. 8 Temperature variation curves at different positions of the molten pool

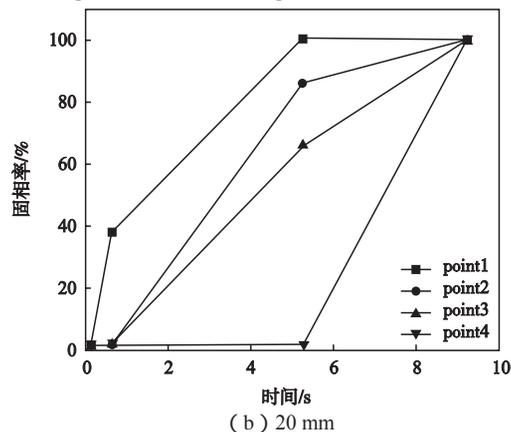
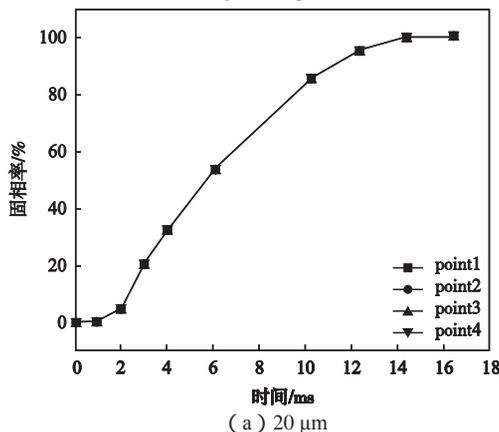


图9 熔池不同位置的固相率变化曲线

Fig. 9 Variation curves of the solid rate at different positions of the molten pool

## 5 结论

(1) 模拟并分析了40  $\mu\text{m}$ 微熔池凝固过程中温度场的变化情况,微熔池在14.3 ms内快速地完成整个凝固过程,平均冷却速率可达12 142.4  $^{\circ}\text{C}/\text{s}$ ,属于快速冷却凝固过程;由于冷却速度极快,微熔池瞬间凝固,微熔池中不同位置的温度变化曲线和固相率变化曲线相互重合。

(2) 20  $\mu\text{m}$ 、30  $\mu\text{m}$ 熔池不同位置的温度和固相率变化曲线和40  $\mu\text{m}$ 熔池不同位置的温度和固相率变化曲线变化相同,变化曲线相互重合。随着熔池尺寸

增大,微熔池的凝固时间和冷却时间也随之增加,20  $\mu\text{m}$ 、30  $\mu\text{m}$ 和40  $\mu\text{m}$ 熔池的凝固时间分别为7.2 ms、11.1 ms和14.3ms,平均冷却速率分别为24 135  $^{\circ}\text{C}/\text{s}$ 、14 685.9  $^{\circ}\text{C}/\text{s}$ 和12 142.4  $^{\circ}\text{C}/\text{s}$ 。数值模拟和理论计算熔池凝固时间相吻合。

(3) 20  $\mu\text{m}$ 熔池温度和固相率曲线相互重合,在7.6 ms内完成凝固过程,平均冷却速率为24 135  $^{\circ}\text{C}/\text{s}$ 。20 mm熔池在9 224 ms内自下而上地完成整个凝固过程,平均冷却速率为19.8  $^{\circ}\text{C}/\text{s}$ 。

### 参考文献:

- [1] 左春林,董选普,林少凯.基于增材制造工艺的机械臂三轴座V法成形[J].铸造,2020,69(2):191-195.
- [2] WANG M K, WU Y W, LU S H, et al. Fabrication and characterization of selective laser melting printed Ti-6Al-4V alloys subjected to heat treatment for customized implants design [J]. Progress in Natural Science: Materials International, 2016, 26(6): 671-677.
- [3] 刘志权,尹家新,徐志锋,等. ZL114A铝合金激光选区熔化成形工艺[J].铸造,2018,67(11):961-967.
- [4] 何力佳,王文峰,王函,等.激光功率对Cr12钢铁基熔覆层的组织和显微硬度的影响[J].铸造,2017,66(3):250-253.
- [5] 杨慧芳,赵建江,王勇.3D打印技术在口腔医学领域中的应用[J].中国医疗设备,2015,30(5):63-65.
- [6] WANG Y C, SHI J. Influence of laser scan speed on micro-segregation in selective laser melting of an iron-carbon alloy: a multi-scale simulation study [J]. Procedia Manufacturing, 2018, 26: 941-951.
- [7] 王志坚,王宗园,宋鸿武,等. Ti-6Al-4V激光快速成形熔池凝固过程研究[J].机械设计与制造,2017(8):103-105.
- [8] 周博康,魏正英,李俊峰,等.90W-7Ni-3Fe激光选区熔化热行为及试验分析[J].焊接学报,2020,41(11):76-82.
- [9] DING L, SUN Z G, LIANG Z L, et al. Investigation on Ti-6Al-4V microstructure evolution in selective laser melting [J]. Metals, 2019, 9(12): 1270.
- [10] YAO W J, NIU X L, ZHOU L, et al. Competition growth of  $\alpha$  and  $\beta$  phases in Ti-50 at.%Al peritectic alloy during the rapid solidification by laser melting technique [J]. Acta Metallurgica Sinica (English Letters), 2013, 26(5): 523-532.
- [11] HUANG W B, ZHANG Y M. Finite element simulation of thermal behavior in single-track multiple-layers thin wall without-support during selective laser melting [J]. Journal of Manufacturing Processes, 2019, 42: 139-148.
- [12] 赵定国,陈洋,支保宁,等.选区激光熔化过程金属微熔池传热研究[J].热加工工艺,2022(2):76-81.

## Numerical Simulation and Analysis of Temperature Field in Micro-Molten Pool During Solidification

SU Xin-lei, ZHAO Ding-guo, CHEN Yang, WANG Shu-huan, SUN Xin, CUI Xiao-jie

(College of Metallurgy and Energy, North China University of Science and Technology, Tangshan 063210, Hebei, China)

### Abstract:

Numerical simulation software was used to simulate the temperature field in the solidification process of micrometer and millimeter scale micro-pool, and the variation rules of the temperature field and solid phase in the solidification process of the micro-pool were explored and analyzed, and the similarities and differences of the temperature field and solid phase change in the solidification process of 20  $\mu\text{m}$  and 20 mm molten pool were compared. The results showed that the temperatures of the 20  $\mu\text{m}$ , 30  $\mu\text{m}$  and 40  $\mu\text{m}$  molten pool were reduced to the solid line temperature for 7.2 ms, 11.1 ms and 14.3 ms, respectively, and the average rates were 24 135  $^{\circ}\text{C}/\text{s}$ , 14 685.9  $^{\circ}\text{C}/\text{s}$  and 12 064.2  $^{\circ}\text{C}/\text{s}$ , respectively, indicating that the micro-molten pool had rapid solidification and rapid cooling features. The solidification time of the 20 mm molten pool was 9.2 s, and the average cooling rate was 19.4  $^{\circ}\text{C}/\text{s}$ , and its solidification time and average cooling rate were much higher than that of the micro molten pool.

### Key words:

micro-molten pool; temperature field; numerical simulation