

镍基高温合金激光焊液化裂纹倾向性数值模拟研究

任闻杰¹, 杨上陆¹, 孙军浩², 陈双建¹, 李铸国²

(¹中国科学院上海光学精密机械研究所, 激光智能制造技术研发中心, 上海 201800;

²上海交通大学, 上海市激光制造与材料改性重点实验室, 上海 200240)

摘要 采用有限元计算方法对高温合金 Inconel 617 光纤激光焊和 CO₂ 激光焊接热循环规律、热应力应变演变规律及其力学机制进行研究。结果表明, 旋转体热源-旋转对数体热源-3D 高斯热源模型构建的高温合金 Inconel 617 激光焊接热源模型准确性较好, 热影响区的颈缩处冷却速率最低。当热影响区温度加热高于约 1 280 °C, 晶界和晶内开始发生组元液化。高温合金 Inconel 617 光纤激光焊和 CO₂ 激光焊的 Von miss 应力均无大幅度的下降; 光纤激光焊 HAZ 的第一主应变逐渐增加, 而 CO₂ 激光焊 HAZ 颈缩处附近的第一主应变增加明显。随着激光焊接热输入降低, HAZ 液化裂纹敏感性应变速率逐渐增加。相对于激光焊接 HAZ 的 von Mises 应力和第一主应变, 液化裂纹敏感性应变速率更适合解释 Inconel 617 高温合金激光焊接液化裂纹形成的主要因素。

关键词 高温合金; 激光焊接; 应力应变; 液化裂纹敏感性应变速率; 液化裂纹

中图分类号: TG456.7

文献标志码: A

doi: 10.14128/j.cnki.al.20244407.085

Numerical Simulation of Liquation Cracks Tendency During Laser Welding of Nickel-Based Superalloy

Ren Wenjie¹, Yang Shanglu¹, Sun Junhao², Chen Shuangjian¹, Li Zhuguo²

(¹Research and Development Center of Laser Intelligent Manufacturing Technology, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China; ²Shanghai Key Laboratory of Materials Laser Processing and Modification, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

Abstract In this paper, the finite element method was used to study the thermal cycle, the evolution law of thermal stress-strain and the mechanical mechanism of the fiber laser welding and CO₂ laser welded superalloy Inconel 617. The results show that the accuracy of the heat source model for laser welded superalloy Inconel 617 with the rotating body heat source, the rotational body heat source rotational logarithmic body heat source and 3D gauss heat source is good. The cooling rate at the neck shrinkage of the HAZ is the lowest. When heating above 1280 °C in the HAZ, constitutional liquation was found inside the grain and at grain boundaries. There was no significant decrease in Von Miss stress of fiber laser welding and CO₂ laser welding for superalloy Inconel 617. The first principal strain of HAZ for fiber laser welding is increased gradually, while the first principal strain near the HAZ neck shrinkage in CO₂ laser welding is increased significantly. With the decrease of laser welding heat input, the sensitive strain rate of HAZ liquation cracking gradually increased. Compared with the Von-mises stress and the first principal strain of laser welding in HAZ, the liquation cracking sensitive strain rate is more suitable to explain the main factors for the formation of liquation cracking in laser welding of superalloy Inconel 617.

Key words superalloy; laser welding; stress and strain; liquation cracks sensitive strain rate; liquation cracks

0 引言

镍基高温合金 Inconel 617 (Ni-23Cr-13Co-9Mo) 已经应用于超临界火电机组、燃气轮机中过渡

导管和涡轮盘轴等高温部件中。近年来, 激光焊接和真空电子束焊接等先进焊接方法广泛应用到燃气轮机研制中。然而, Ni 基高温合金激光焊有较高的

收稿日期: 2022-11-10

基金项目: 国家自然科学基金(51905343, 52005492)、中国博士后科学基金面上项目(2019M651461)、浙江省“尖兵”“领雁”研发攻关计划(2022C01026)、上海前瞻创新研究院项目(22xtcx00500)

作者简介: 任闻杰(1986—), 男, 博士, 高级工程师。研究方向为激光智能制造技术。E-mail: renwenjie@siom.ac.cn

焊接液化裂纹敏感性,会导致高温合金结构件在高温长期运行中开裂。

目前,国内外在镍基高温合金激光焊液化裂纹倾向性数值模拟方面开展了广泛的研究。高温合金激光焊接头裂纹机械驱动力与焊接接头凝固过程中的局部应力-应变有关,同时“Y”形焊缝颈缩处的曲率降低导致弹性应变和第一主弹性也随之增加^[1-3]。秦昕等^[4]采用应力释放法测量厚 10 mm GH3536 高温合金电子束焊接接头残余应力分布,其残余应力最大值可达到材料的屈服极限。Yann 等^[5]通过运用热-力-相变数值模拟技术预测出 Inconel 738 高温合金抗液化裂纹性的应力范围在 360~550 MPa。Chamanfar 等^[6]研究得出电子束焊接热影响区产生大量液化裂纹的最大拉应力值和焊缝纵向应力明显高于能引起焊缝裂纹的横向应力。Xu 等^[7]研究表明,由于熔融区层间存在不同的热循环,因此多层熔融区残余应力明显高于内部熔融区,且预热至 700 ℃能够降低 IN738LC 熔覆层残余应力,从而能够有效抑制裂纹。Bonakdar 等^[8]采用非耦合三维有限元模型预测电子束焊接汽轮机叶片易产生裂纹的接头区域,认为沿焊缝路径的纵向残余应力大于焊缝横向残余应力,是裂纹萌生的关键因素之一。

笔者已研究高温合金 Inconel 617 光纤激光焊接液化裂纹产生的冶金机制以及热输入量对焊缝形貌和液化裂纹的影响规律^[9-10]。由于液化裂纹形成主要是由晶界液化(冶金机制)和热应力(力学机制)

共同决定的,因此,本文研究高温合金 Inconel 617 激光焊接接头热循环规律以及热应力应变演变规律,阐述高温合金 Inconel 617 激光焊接液化裂纹的力学机制。

1 试验材料和设备

本试验材料为厚 5 mm 高温合金 Inconel 617,其化学成分如表 1 所示。激光焊接试验使用的设备为光纤激光焊接(FLW)系统(IPG-10000)和 CO₂激光焊接(CLW)系统(TRUMPF)。采用平板堆焊方法进行焊接,其焊接工艺参数(激光功率/焊接速度)如下:

光纤激光焊:1 号,4 000 W/1 140 mm·min⁻¹(210.5 J/mm);2 号,6 000 W/2 560 mm·min⁻¹(142.9 J/mm);3 号,8 000 W/3 900 mm·min⁻¹(123.1 J/mm)。

CO₂激光焊:4 号,6 000 W/1 000 mm·min⁻¹(360 J/mm);5 号:12 000 W/2 800 mm·min⁻¹(257.1 J/mm)。

焊接后,对焊接接头砂纸打磨、抛光和腐蚀后进行焊缝形貌和组织观察,腐蚀液为 10 g FeCl₃ + 100 mL HCl。使用体视显微镜观察焊缝形貌,并使用美国 NOVA 公司 NanoSEM 230 观察焊缝显微组织。为了对 Inconel 617 CO₂激光焊液化裂纹敏感性进行量化,本文对 8 个焊接接头横截面上的液化裂纹进行统计,采用热影响区总液化裂纹长度、最大裂纹长度作为评定液化裂纹敏感性的判据。

表 1 Inconel 617 化学成分
Table 1 The chemical composition of the Inconel 617

Element	Ni	Cr	Co	Mo	Al	C	Fe	Mg	Si	Ti	Cu	B
Mass fraction/%	Bal.	20.000 ~24.000	10.000 ~15.000	8.000 ~10.000	0.800 ~1.500	0.050 ~0.150	≤3.000	≤1.000	≤1.000	≤0.600	≤0.500	≤0.006

2 热源分析与模型建立

2.1 有限元模型建立

焊接时,由于工件受到一个不均匀的局部瞬时热源,靠近焊缝区域存在较大的温度梯度,网格划分时焊缝及其附近区域应尽可能细密,以确保计算的准确性;远离焊缝的母材网格划分相应稀疏。本文中所采用的网格模型如图 1 所示,其模型尺寸为 30 mm×15 mm×5 mm。模型网格数量约为 423 750,节点数量约为 398 036,其中焊缝和 HAZ 区域网格尺寸为 0.05 mm×0.05 mm。为了降低焊接接头温度场和应力场的计算量,采用对称模型进行计算。

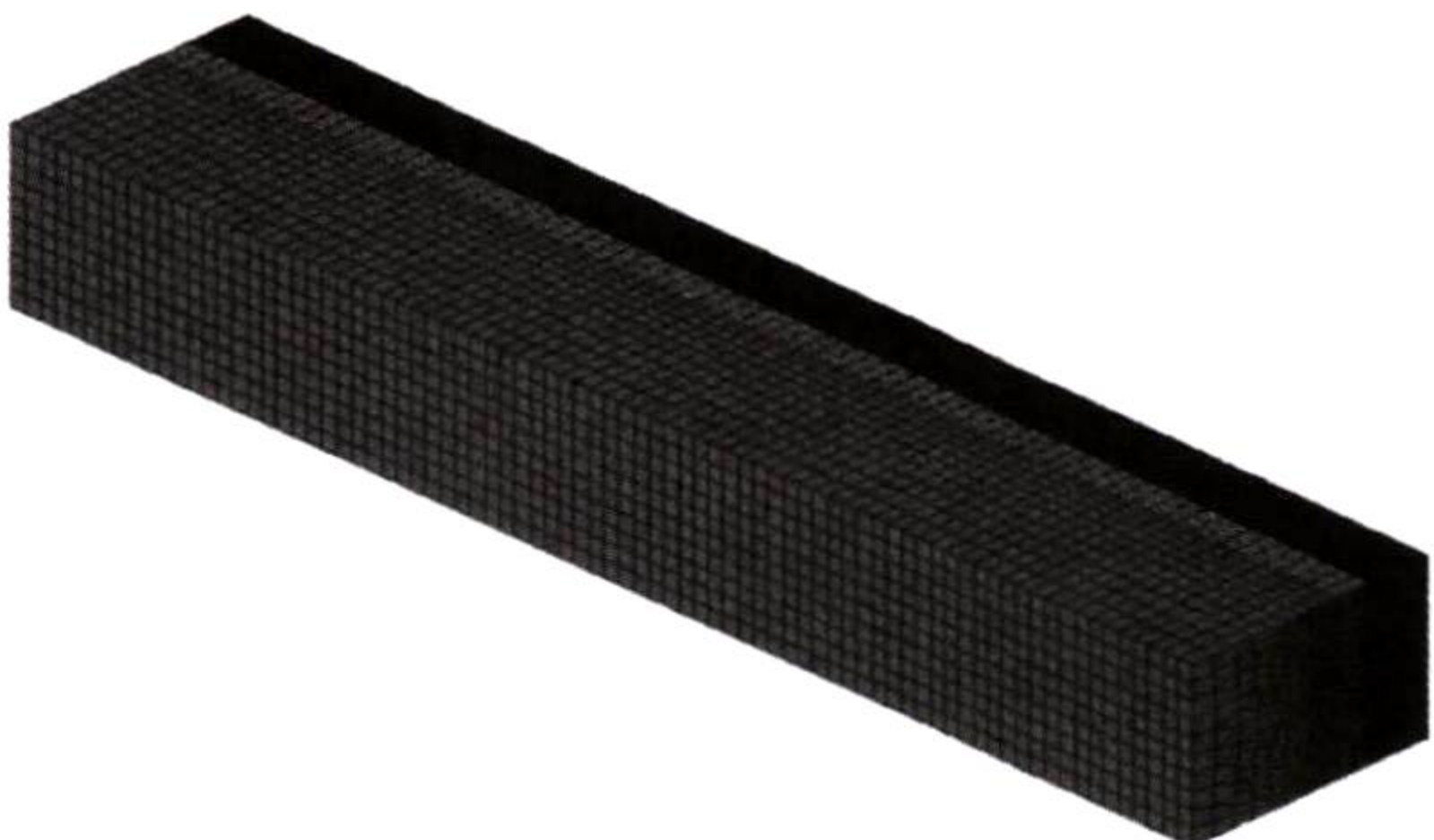


图 1 高温合金 Inconel 617 激光焊接接头网格模型
Fig. 1 The meshed finite element model of laser-welded superalloy Inconel 617

2.2 组合热源模型的建立

本文大力简化各种因素,从热源作用模式上构建符合焊缝成形的热源作用模式。单一的 3D 高斯热源和双椭球热源模型的模拟结果并不能够令人满意,无法用单一热源模拟焊缝形貌。所以,在三维锥体热源的基础上进行焊接热源的二次开发,即采用多组合热源。

当热源任意平面 $Z_L < h_1$ 时,采用高斯曲线沿对称轴旋转再向下翻转 180° 得到模型,即旋转体热源模型,垂直于对称轴平面内能量呈高斯形式分布,在沿对称轴方向上峰值能量不变,体热流密度 q 如公式(1)所示^[11]:

$$q = \frac{9 \times P \times e^3 \times \delta}{\pi \times H \times (e^3 - 1) \times R_e^2} e^{\left(\frac{-9 \times R^2}{R_e^2 \times \log_{10}(H/Z_L)} \right)} \quad (1)$$

当 $Z_L > h_1$ 时,采用高斯锥体热源,如公式(2)所示^[12]:

$$q = \frac{9 \times \delta \times P \times e^3}{\pi \times H \times (e^3 - 1) \times (R_e^2 + R_e R_i + R_i^2)} \exp\left(\frac{-3 \times R^2}{R_0^2}\right) \quad (2)$$

其中当 $h_1 < Z_L < h_2$ 时:

$$R_0 = R_e - \frac{(R_e - R_i)[\log_{10}(Z_e) - \log_{10}(Z_L)]}{\log_{10}(Z_e) - \log_{10}(Z_i)} \quad (3)$$

当 $h_2 < Z_L < h_3$ 时:

$$R_0 = R_e - \frac{Z_e - Z_L}{Z_e - Z_i} (R_e - R_i) \quad (4)$$

式中: δ 为材料对激光的吸收率; P 为激光功率; Z_e ,

Z_i 和 R_e , R_i 分别为热源作用工件上、下表面的 z 坐标位置和热流作用半径; R 为热源内任一点离加热斑点中心的距离; H 为热源的高度,且 $H = Z_e - Z_i$, Z_L 的范围为 $0 \sim H$ 。

高温合金 Inconel 617 焊接热影响区液化晶界约在 1200°C 完全凝固^[13]。因此,本文将热影响区加热峰值温度冷却至约 1200°C 作为局部冷却时间,并且研究在该局部冷却时间内热影响区应力应变的变化。将 Inconel 617 激光焊热影响区分为 3 个区域,即 Top 区域、Middle 区域和 Bottom 区域,并且在这 3 个区域中取若干点进行焊接接头热循环(冷却速度和时间)和应力应变(Von Miss 应力和第一主应变)分析研究,如图 2 所示。

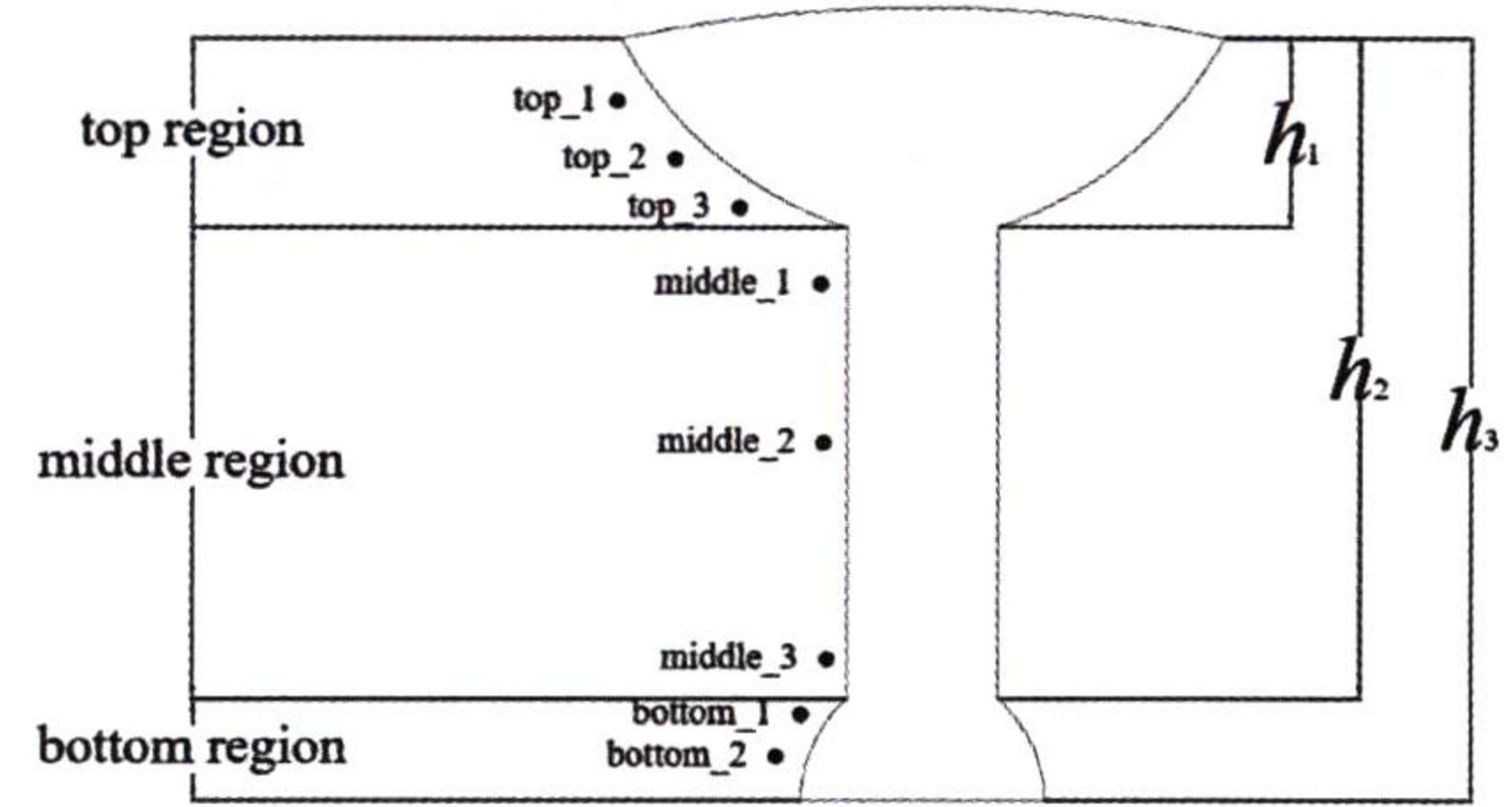


图 2 激光焊缝示意图

Fig. 2 Schematic diagram of laser welding seam

2.3 材料的物理力学性能参数

高温合金 Inconel 617 的物理和力学性能参数随着温度的变化而变化,如图 3 所示。此外,泊松比值为 $0.30 \sim 0.32$ 。

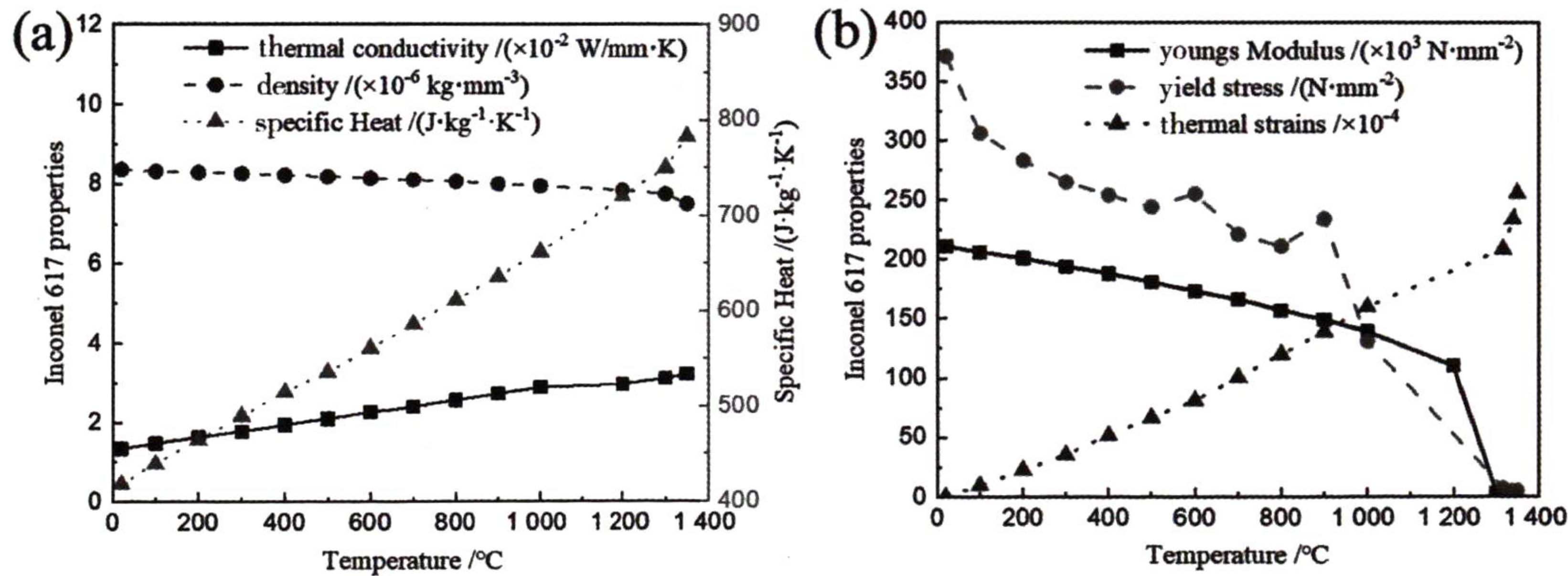


图 3 Inconel 617 物理和力学性能参数

Fig. 3 The physical and mechanical properties of Inconel 617

2.4 传热和力学模型

激光焊接过程中焊接试件与周围环境存在热交换,包括对流和辐射换热。对流换热系数设置为常

数 $25 \times 10^{-6} \text{ W}/(\text{mm}^2 \cdot \text{K})$,热辐射率设为 0.85 。采用热弹塑性分析法对高温合金 Inconel 617 激光焊接应力与应变进行分析。定义试样的初始温度为

10 ℃。金属材料的应力与变形采用米塞斯屈服准则来确定等效应力,在 3 个主应力下的等效应力大小为:

$$\bar{\sigma} = \frac{\sqrt{2}}{2} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2} \quad (5)$$

3 仿真结果与讨论

3.1 高温合金激光焊液化裂纹分析

图 4 为 Inconel 617 光纤激光焊接(6 000 W/2 560 mm·min⁻¹)热影响区的热裂纹。图 4(a)为热影响区(HAZ),分布着不规则、曲折的液化裂纹。图 4(b)为远离部分熔化区,也分布着液化裂纹,主

要在三叉晶界处萌生,然后沿晶界向母材方向扩展。此外,部分液化裂纹沿晶界向焊缝方向扩展,如图 4(c)所示,其中有部分液化裂纹能穿过熔合线进入焊缝,如图 4(d)所示。由高温合金 Inconel 617 激光焊热影响区液化裂纹分布来看,光纤激光焊与 CO₂ 激光焊大多数液化裂纹分别在 Top 区域距离熔合线 50~60 μm 和 100~120 μm 内萌生,而在 Middle 和 Bottom 区域中距离熔合线 30~40 μm 内萌生。因此,对高温合金 Inconel 617 激光焊热影响区裂纹萌生区域的温度场和应力应变进行仿真计算。

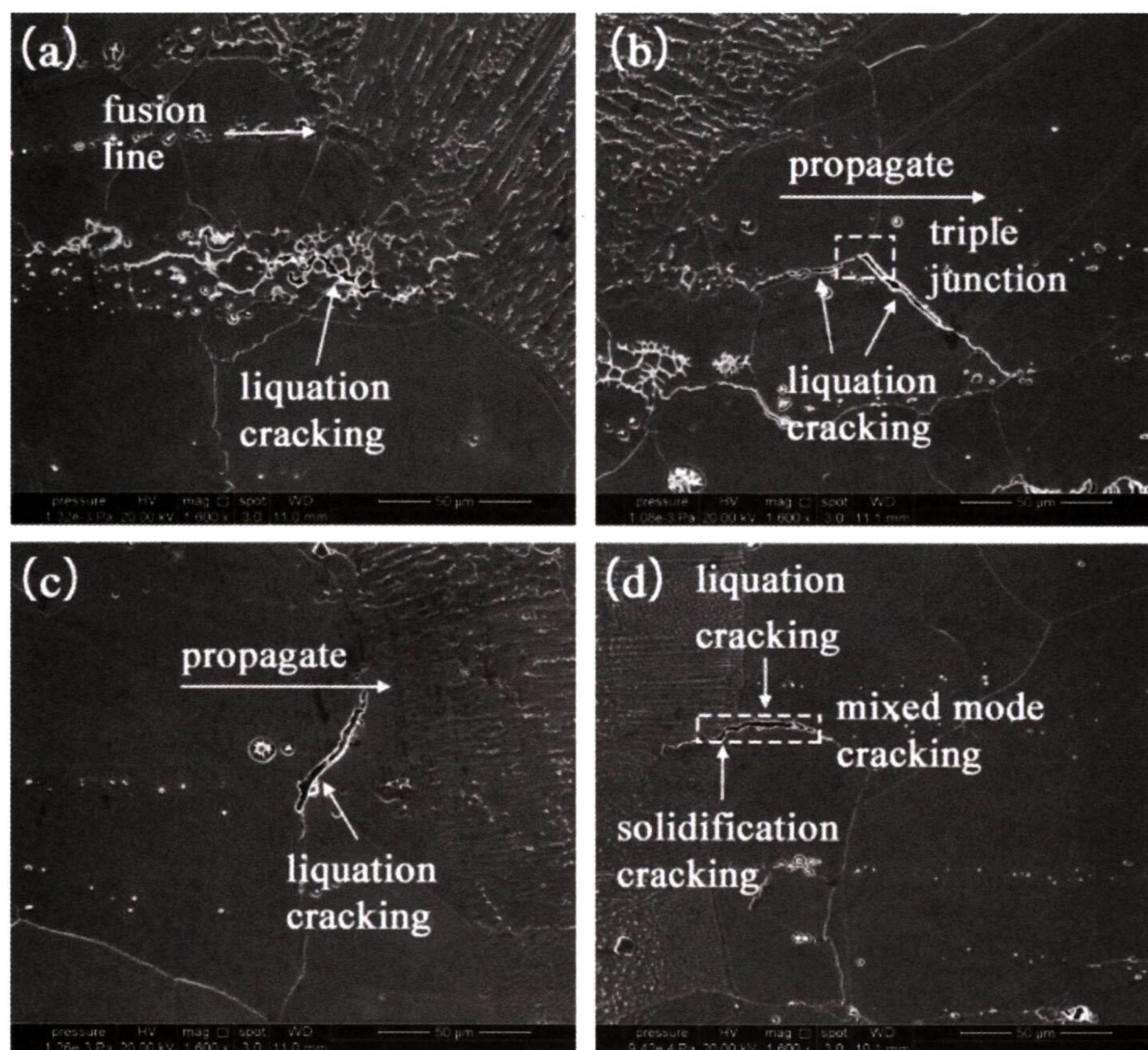


图 4 高温合金 Inconel 617 光纤激光焊 HAZ 的热裂纹(6 000 W/2 560 mm·min⁻¹)
(a~c)液化裂纹;(d)复合裂纹

Fig. 4 Hot cracking of fiber laser welded Inconel 617 in HAZ (6 000 W/2 560 mm·min⁻¹)
(a~c) Liquation cracking; (d) mixed mode cracking

3.2 高温合金激光焊焊缝形貌及温度场分析

高温合金 Inconel 617 光纤激光焊和 CO₂ 激光焊模拟的焊缝形状与实际对比如图 5 所示。在不考虑焊缝余高、咬边和下凹的情况下,利用旋转体热源-旋转对数体热源-3D 高斯热源的三元组合式热源模型模拟的焊缝形貌与焊缝实际形貌对比,其模拟的焊缝形貌、焊缝轮廓与焊缝实际形貌吻合情况

良好。由计算所得焊缝表面和横截面的温度场看出,在熔池前部等温线密集,即温度梯度非常大,这也正确地反映了激光焊接的温度场特点。从焊缝横截面的温度场看出,焊缝横截面的温度场分布与熔池形状基本接近。由此可以证明,由旋转体热源-旋转对数体热源-3D 高斯热源组合式模型构建的高温合金 Inconel 617 激光焊接热源模型具有较高的准确性。

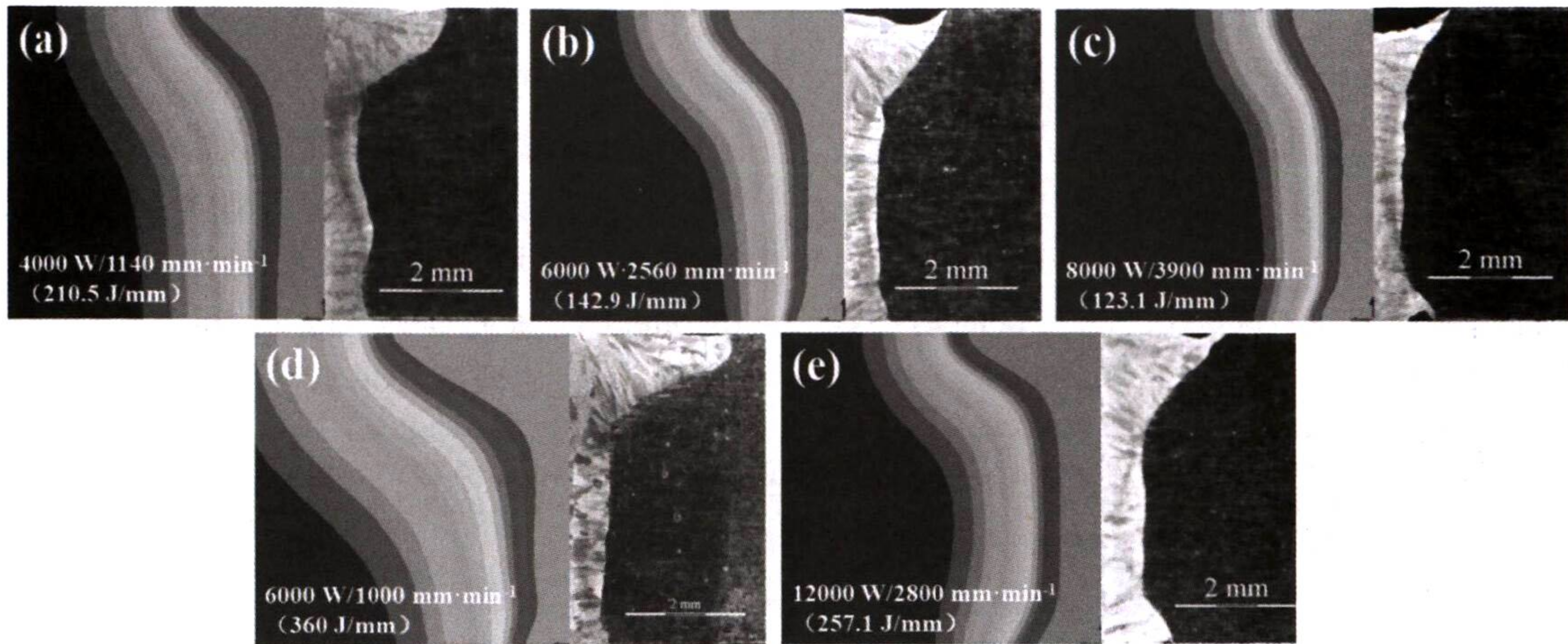


图5 Inconel 617 激光焊模拟的焊缝形状与实际焊缝的对比

(a)4 000 W/1 140 mm·min⁻¹, 光纤激光焊接; (b)6 000 W/2 560 mm·min⁻¹, 光纤激光焊接;
(c)8 000 W/3 900 mm·min⁻¹, 光纤激光焊接; (d)6 000 W/1 000 mm·min⁻¹, CO₂激光焊接;
(e)12 000 W/2 800 mm·min⁻¹, CO₂激光焊接

Fig. 5 Comparison between the weld shape calculated and the actual weld shape of laser welded Inconel 617

(a)4 000 W/1 140 mm·min⁻¹ in FLW; (b) 6 000 W/2 560 mm·min⁻¹ in FLW;
(c)8 000 W/3 900 mm·min⁻¹ in FLW; (d)6 000 W/1 000 mm·min⁻¹ in CLW;
(e) 12 000 W/2 800 mm·min⁻¹ in CLW

图6 为高温合金 Inconel 617 激光焊热影响区的热循环曲线。由图可见,随着激光功率和焊接速度的增加,热输入量降低,HAZ 加热速率明显增加,当峰值温度降至 1 200 °C 时,热影响区的冷却曲线斜率逐

渐增加,冷却速率逐渐增加,高温停留时间降低,同时颈缩区域的曲率半径增加,有助于熔池的热量从 Top 区域向 Bottom 区域传递,从而缓解颈缩区域的热积累程度,因此,各区域的冷却曲线逐渐靠近。

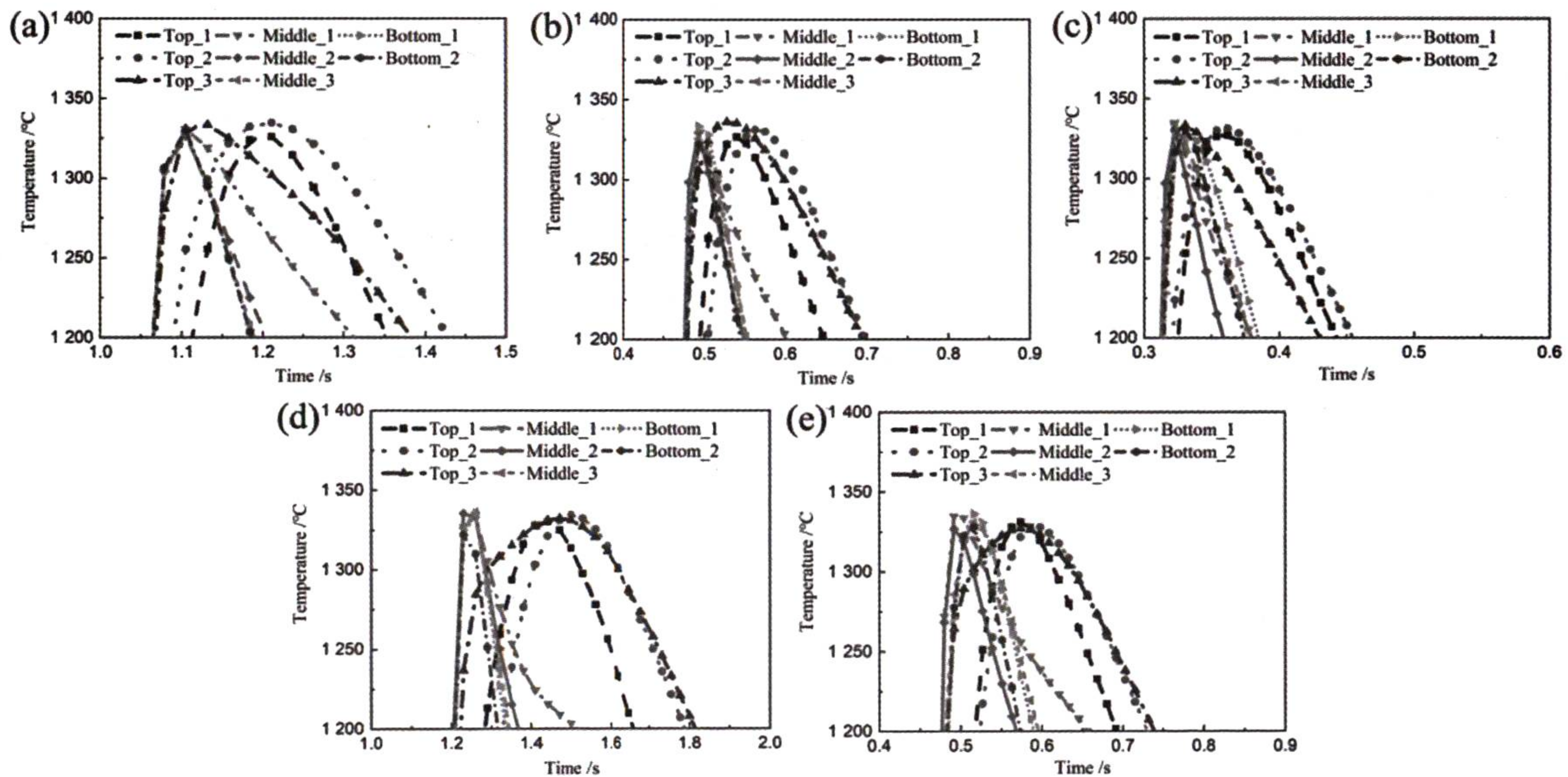


图6 Inconel 617 激光焊接 HAZ 热循环曲线(1 350~1 200 °C)

(a)4 000 W/1 140 mm·min⁻¹, 光纤激光焊接; (b)6 000 W/2 560 mm·min⁻¹, 光纤激光焊接;
(c)8 000 W/3 900 mm·min⁻¹, 光纤激光焊接; (d)6 000 W/1 000 mm·min⁻¹, CO₂激光焊接;
(e)12 000 W/2 800 mm·min⁻¹, CO₂激光焊接

Fig. 6 Thermal cycle curve of laser welded Inconel 617 in HAZ (1 350~1 200 °C)

(a)4 000 W/1 140 mm·min⁻¹ in FLW ; (b)6 000 W/2 560 mm·min⁻¹ in FLW;
(c)8 000 W/3 900 mm·min⁻¹ in FLW; (d)6 000 W/1 000 mm·min⁻¹ in CLW;
(e)12 000 W/2 800 mm·min⁻¹ in CLW

图 7 为高温合金 Inconel 617 激光焊 Top、Middle 和 Bottom 区域的冷却速率。由图可见,在热影响区的 Top 区域中,冷却速度逐渐减小至最低[即 FLW:537.8 °C/s(1 号)~1 360 °C/s(3 号),CLW:383.6 °C/s(4 号)~1 069.7 °C/s(5 号)],主要是由于激光焊接热影响区颈缩区(Top_3)大量的热积累所致,高温停留时间长,有助于晶界处 Cr 和 Mo 等

元素的扩散,促使晶界和晶内产生大量液化相。随着熔深继续增加,热影响区 Middle 和 Bottom 区域的冷却速度整体呈逐渐增加的趋势,且光纤激光焊 Middle_2 区域的加热和冷却速率随着激光功率和焊接速度的增加而大幅度增加,因此,高温合金 Inconel 617 激光焊的 Middle 和 Bottom 区域的晶界液化均明显低于 Top 区域。

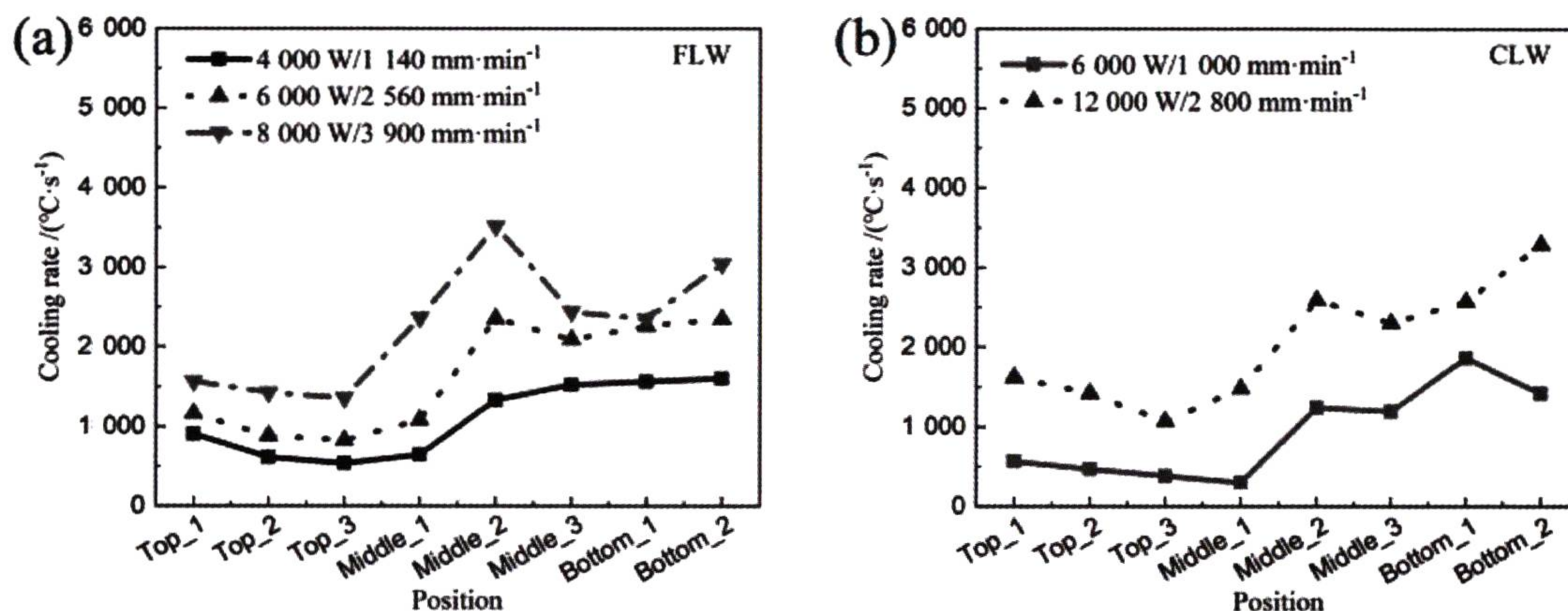


图 7 Inconel 617 激光焊 HAZ 冷却至 1 200 °C 的冷却速率
(a)FLW, (b)CLW

Fig. 7 Cooling rate of laser welded Inconel 617 in HAZ (Cooling to 1 200 °C)
(a)FLW; (b)CLW

图 8 为离光纤激光焊缝熔合线不同距离处的热循环曲线。由图可见,在热影响区 Top 区域中,离熔合线距离约为 18、70 和 118 μm 时,其峰值分别为 1 340、1 310 和 1 280 °C,而在热影响区 Middle 区域中,离熔合线距离约为 5 μm 和 55 μm ,其峰值分别为 1 348 °C 和 1 287 °C。在 Top 和 Middle 区域中,离焊缝熔合线距离分别大于 120 μm 和 55 μm 的区域中无晶界和晶内液化现象。因此,高温合金 Inconel 617 激光焊接的热影响区温度加热高于约

1 280 °C,晶内和晶界开始发生组分液化: $\text{M}_{23}(\text{C},\text{B})_6$ 碳化物的相界面附近基体中的溶质原子 Mo、Cr 和 C 浓度增加,当达到共晶点成分后,基体发生液化,从而形成了液相。当温度加热到共晶温度以上, $\text{M}_{23}(\text{C},\text{B})_6$ 碳化物继续溶解,同时 Ni 元素向碳化物表面扩散,从而导致基体和碳化物界面移动,未溶解的 $\text{M}_{23}(\text{C},\text{B})_6$ 碳化物尺寸继续减小,直到碳化物消失,并在晶界上形成了富 Cr 和 Mo 的液膜。

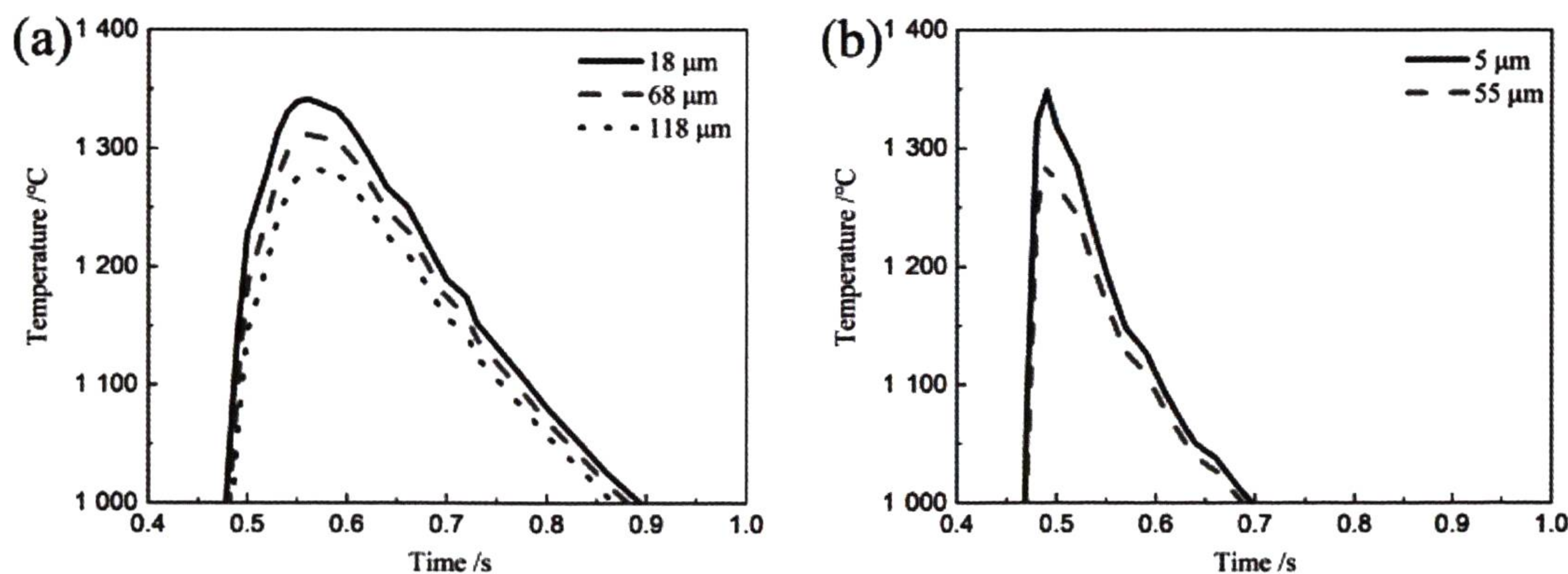


图 8 离熔合线不同距离的热循环曲线
(a)Top 区域; (b)middle 区域

Fig. 8 Thermal cycle curves at different distances from the fusion line
(a)Top region; (b)middle region

3.3 高温合金激光焊 HAZ 局部应力分析

在热影响区从峰值温度(约为 $1\,330\text{ }^{\circ}\text{C}\pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$)到 $1\,200\text{ }^{\circ}\text{C}$ 过程中,Inconel 617 激光焊热影响区的热应力(Von miss 应力)变化如图 9 所示。由图 9 (a)、(c)可见,当冷却至 $1\,250\text{ }^{\circ}\text{C}$,随着熔深的增加,光纤激光焊和 CO_2 激光焊 Top 区域的应力逐渐降低,光纤激光焊的 Middle 和 Bottom 区域整体呈逐渐下降趋势,其中,Middle_2 处的应力陡然大幅度降低,即应力最小; CO_2 激光焊的 Top 和 Middle 区域的应力均逐渐下降,Bottom 区域的应力逐渐增加。当冷却至 $1\,200\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,随着熔深的增加,Inconel 617 光纤激光焊和 CO_2 激光焊接热影响区应力整体呈微弱下降趋势,其中光纤激光焊 $8\,000\text{ W}/3\,900\text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$

试样 Middle_2 处的应力最低,约为 17 MPa 。

当 HAZ 冷却至 $1\,250\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,光纤激光焊和 CO_2 激光焊的 Von miss 应力随着激光焊接热输入量增加均无明显的下降,然而, $8\,000\text{ W}/3\,900\text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ 试样 Middle_2 处的 Von miss 应力降幅最大。当冷却至 $1\,200\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,随着激光焊接热输入增加,光纤激光焊 HAZ 热应力整体无明显降低,而在颈缩处(Top_3 处)应力明显下降,其中 $6\,000\text{ W}/2\,560\text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ 试样 Middle_2 处的应力明显增加; CO_2 激光焊热影响区的应力明显降低,然而,Middle 区域的 Middle_1 处应力最大且该处应力随着热输入量增加而增加,这可能与 CO_2 激光焊颈缩区曲率半径降低有关。

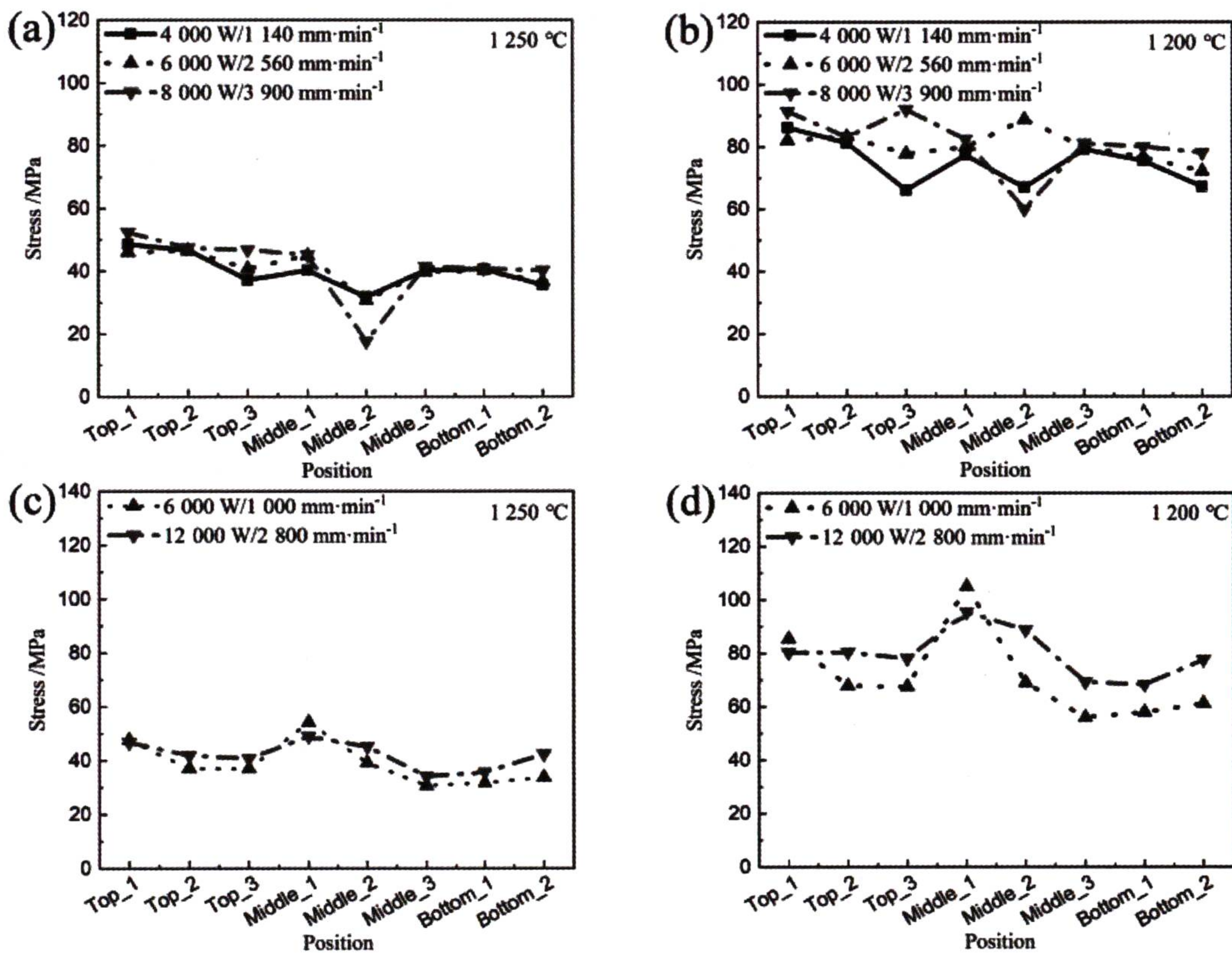


图 9 Inconel 617 激光焊 HAZ Von miss 应力变化
(a)冷却至 $1\,250\text{ }^{\circ}\text{C}$, 光纤激光焊接;(b)冷却至 $1\,200\text{ }^{\circ}\text{C}$, 光纤激光焊接;
(c)冷却至 $1\,250\text{ }^{\circ}\text{C}$, CO_2 激光焊接;(d)冷却至 $1\,200\text{ }^{\circ}\text{C}$, CO_2 激光焊接
Fig. 9 Von miss stress change of laser welded Inconel 617 in HAZ
(a)Cooling to $1\,250\text{ }^{\circ}\text{C}$ in FLW; (b)cooling to $1\,200\text{ }^{\circ}\text{C}$ in FLW;
(c)cooling to $1\,250\text{ }^{\circ}\text{C}$ in CLW; (d)cooling to $1\,200\text{ }^{\circ}\text{C}$ in CLW

HAZ 液化裂纹主要是由于较大的收缩应力和不均匀的应变分布造成的。由于 HAZ 拉应力的存在,引起 HAZ 弹性应变、塑性应变和热应变,即第一主应变。在冷却至 $1\,200\text{ }^{\circ}\text{C}$ 过程中,高温合金 Inconel 617 激光焊 HAZ 的第一主应变变化如图 10

所示。由图可见,当 HAZ 从 $1\,250\text{ }^{\circ}\text{C}$ 冷却至 $1\,200\text{ }^{\circ}\text{C}$ 中,光纤激光焊和 CO_2 激光焊的 HAZ 的第一主应变出现略微降低。随着激光焊接热输入的降低,Inconel 617 光纤激光焊接 HAZ 的第一主应变逐渐增加,而 CO_2 激光焊 HAZ 颈缩处附近(Top_3

~Middle_1 区域)和 Middle_2 区域的第一主应变明显增加。随着 HAZ 熔深增加,高温合金 Inconel

617 激光焊 Middle 区域的第一主应变最大。

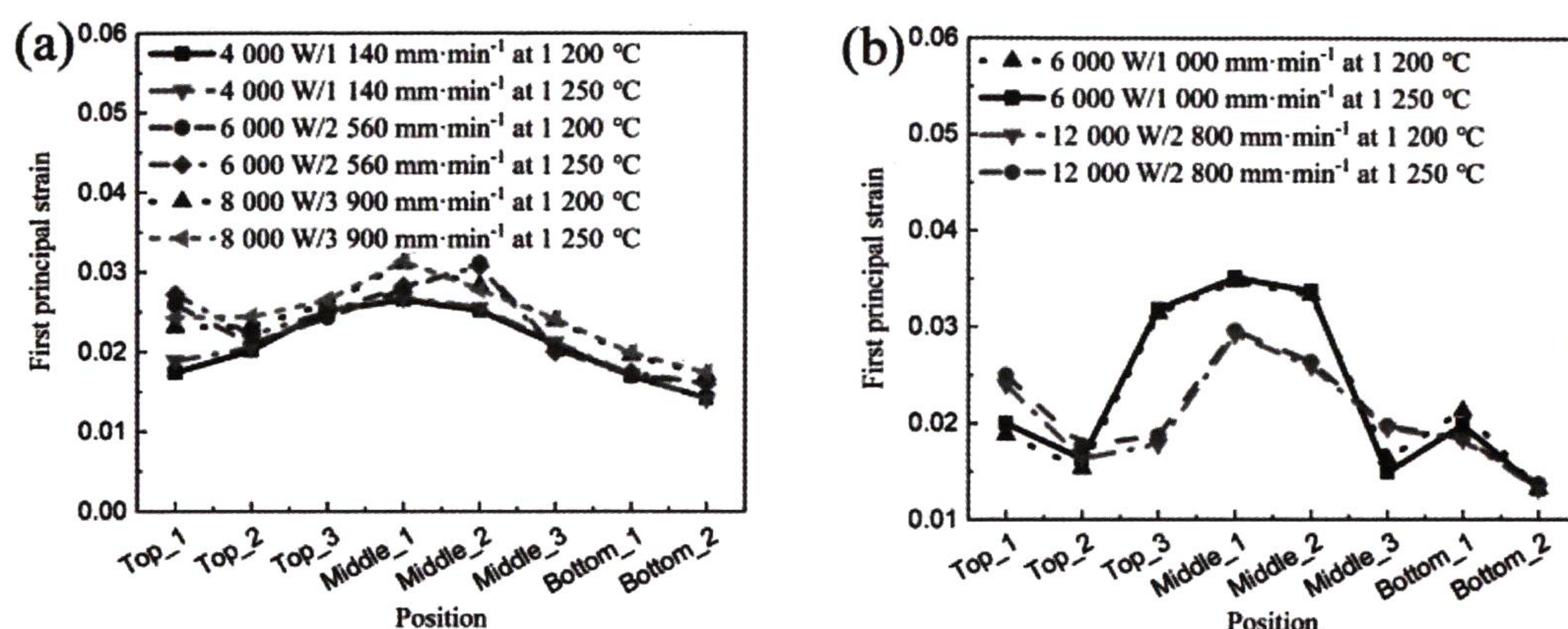


图 10 Inconel 617 激光焊接接头第一主应变变化

(a)光纤激光焊接;(b)CO₂激光焊接

Fig. 10 First principal strain change of laser welded Inconel 617

(a)FLW; (b)CLW

3.4 讨论

由之前的作者研究结果^[10]得出,高温合金 Inconel 617 激光焊接液化裂纹的形成由力学因素和冶金因素共同作用,随着热输入量从 210.5 J/mm (4 000 W/1 000 mm · min⁻¹)降低至 123.1 J/mm (8 000 W/3 900 mm · min⁻¹),光纤激光焊接 HAZ 晶界液化裂纹总裂纹长度从 188.79 μm 增加至 2 336.51 μm,即液化裂纹敏感性明显增加。在激光焊接冷却过程中的焊接接头脆性温度范围(BTR)内产生大量热致应变,从而导致热裂纹产生。本研究,随着 CO₂ 激光焊接热输入量从 360 J/mm(6 000 W/1 000 mm · min⁻¹)降低至 257.1 J/mm(12 000 W/2 800 mm · min⁻¹),液化裂纹总长度从 860.8 μm 增加至 2 342.5 μm,即液化裂纹敏感性明显增加,然而,随着激光焊接输入明显降低,光纤激光焊和 CO₂ 激光焊接头 HAZ 的 Von miss 应力仅微弱增加(图 9)。因此,本文采用液化裂纹敏感性应变速率($\dot{\epsilon}$)对凝固前端附近的液化裂纹塑性进行量化评价,即公式:

$$\dot{\epsilon} = \frac{\epsilon_1}{t_s} \quad (6)$$

式中: ϵ_1 为第一主应变; t_s 为从峰值温度冷却至 1 250 °C 和 1 200 °C 的时间; $\dot{\epsilon}$ 为 Top、Middle 和 Bottom 区域的裂纹敏感性应变速率。

由图 11 可见,随着高温合金 Inconel 617 激光焊热输入量降低,HAZ 液化裂纹敏感性应变速率逐渐增加。随着 HAZ 熔深增加至颈缩区(Top_3 处)

时,液化裂纹敏感性应变速率逐渐降低,熔深继续增加至底部,液化裂纹敏感性应变速率先增加(Middle_2 处最高)后降低;Middle 和 Bottom 区域液化裂纹敏感性应变速率均高于 Top 区域,导致低热输入量 HAZ 的 Middle 区和 Bottom 区极易产生液化裂纹。

图 12 为 Inconel 617 激光焊接 HAZ 横截面各区域的液化裂纹长度。由图可见,随着热输入降低,光纤激光焊和 CO₂ 激光焊液化裂纹明显增加,同时, Middle 区域的液化裂纹明显增加,即分别从 51.32 μm 增加至 975.28 μm(FLW)和从 114.87 μm 增加至 887.63 μm(CLW),均与液化裂纹敏感性应变速率变化趋势一致。然而,由图可见,光纤激光焊和 CO₂ 激光焊的 Top 区域液化裂纹高于 Middle 和 Bottom 区域,而 Top 区域的液化裂纹敏感性应变速率明显低于 Middle 和 Bottom 区域,这主要是激光焊接 Top 区域高温停留时间长,晶界液化膜量多,液化膜厚度增加,液膜开裂所需要的应力应变较低,而 Top 区域无应变累积,因此,Top 区域的液化裂纹敏感性应变低,而 Top 区域的液化裂纹多。

液化裂纹敏感性应变速率的大小不仅反映了应变能的输入速度,而且影响 HAZ 在脆性温度区内的塑性变形机制和变形能力。当高温合金 Inconel 617 激光焊接热影响区处于 1 280~1 350 °C 时,晶界会出现大量的液化膜,此时,液化膜具有较低的塑性变形能力。随着 HAZ 温度降低至 1 200 °C,裂纹尖端所处的温度越来越低,液化膜趋于凝固,晶粒间固态更

加紧密,HAZ 塑性的恢复而导致对裂纹扩展的阻碍作用增强,液化裂纹敏感性应变速率降低(图 12)。

通过上述分析得出,相对于激光焊接 HAZ 的

Von Mises 应力和第一主应变,单位冷却时间内应变即热裂纹敏感性应变速率更适合解释 Inconel 617 高温合金激光焊接液化裂纹形成的主要因素。

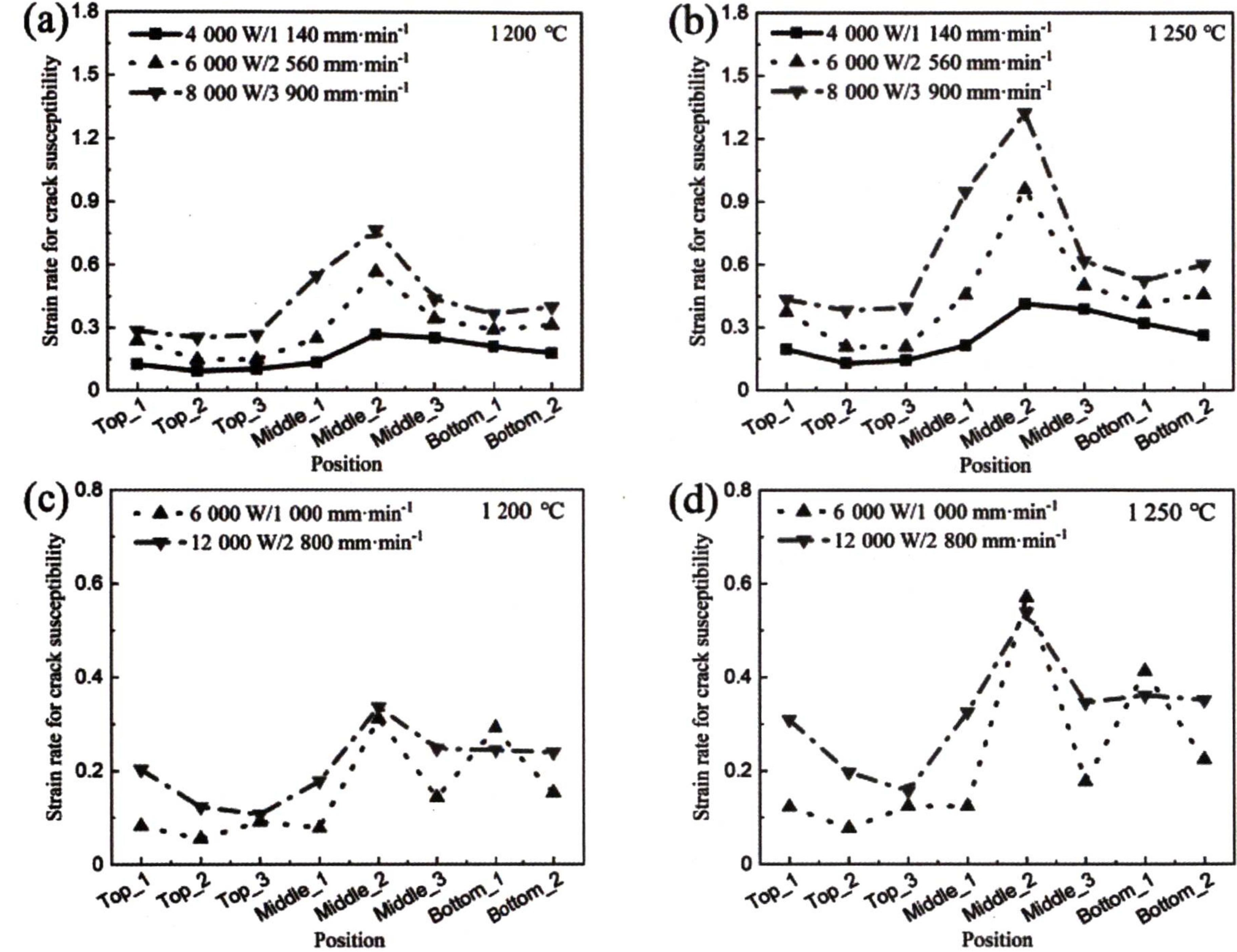


图 11 Inconel 617 激光焊接 HAZ 裂纹敏感性应变速率

(a)1 200 °C, 光纤激光焊接;(b)1 250 °C, 光纤激光焊接;
(c)1 200 °C, CO₂ 激光焊接;(d)1 250 °C, CO₂ 激光焊接

Fig. 11 Strain rate for crack susceptibility of laser welded Inconel 617 in HAZ
(a)1 200 °C in FLW; (b)1 250 °C in FLW; (c)1 200 °C in CLW; (d)1 250 °C in CLW

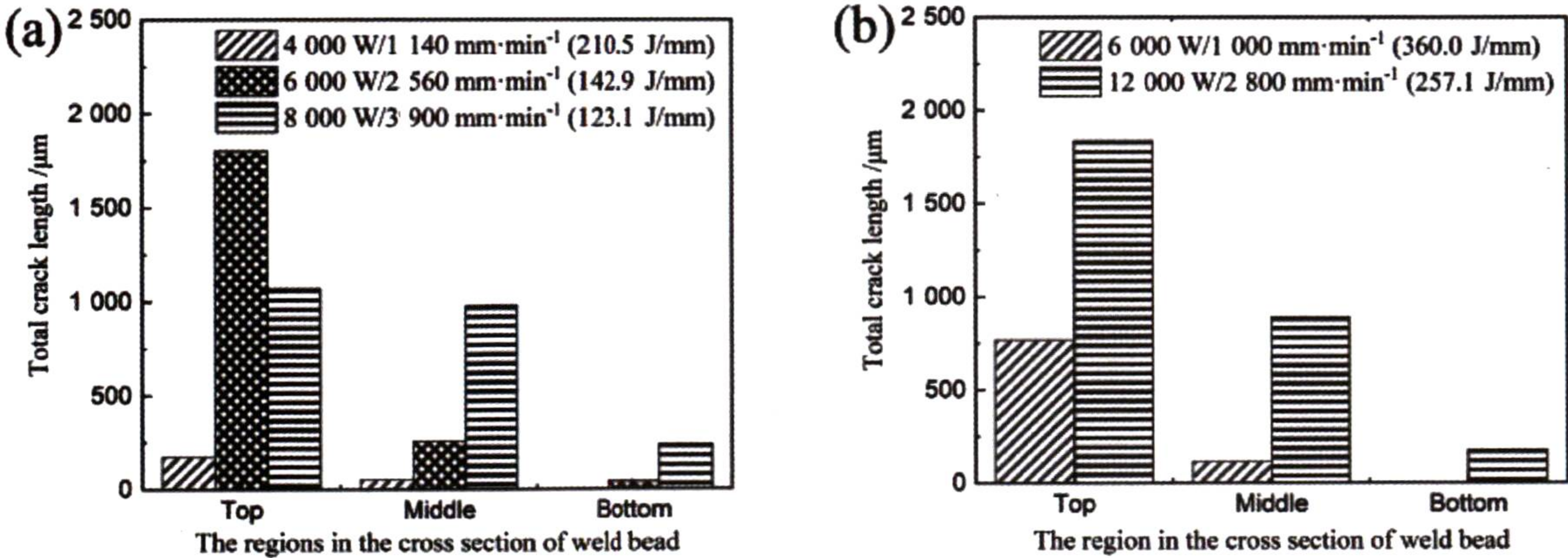


图 12 Inconel 617 激光焊接 HAZ 横截面各区域的液化裂纹长度

(a)光纤激光焊接^[10];(b)CO₂ 激光焊接

Fig. 12 Liquation cracking in the different regions of cross section of weld bead
(a) FLW, (b) CLW

4 结论

(1)采用旋转体热源-旋转对数体热源-3D 高斯热源模型对 Inconel 617 激光焊接温度场进行模拟,其模拟的焊缝形貌与焊缝实际形貌吻合情况良好,因此,三元组合式热源模型具有较高的准确性。

(2)高温合金 Inconel 617 激光焊接热影响区颈缩处的冷却速率最低,随着激光功率和焊接速度的增加,热输入量降低,HAZ 加热速率明显增加,当温度高于约 1 280 °C,晶内和晶界开始发生组分液化。

(3)在 HAZ 温度冷却至 1 200 °C 过程中,随着激光焊接热输入增加,光纤激光焊和 CO₂ 激光焊的 Von miss 应力均无大幅度的下降;光纤激光焊 HAZ 的第一主应变逐渐降低,而 CO₂ 激光焊 HAZ 颈缩处附近的第一主应变增加明显。

(4)随着高温合金 Inconel 617 激光焊接热输入量降低,液化裂纹敏感性应变速率逐渐增加,Middle 和 Bottom 区域液化裂纹敏感性应变速率均高于 Top 区域,且 Middle_2 处的裂纹敏感性应变速率最高。

(5)相对于激光焊接 HAZ 的 von Mises 应力和第一主应变,单位冷却时间内应变即热裂纹敏感性应变速率更适合解释 Inconel 617 高温合金激光焊接液化裂纹形成的主要因素。

参考文献

- [1] GAO Z G. Numerical modeling to understand liquation cracking propensity during laser and laser hybrid welding (I)[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2012, 63(1): 291-303.
- [2] NISHIMOTO K, WOO I, SHIRAI M. Analyses of temperature and strain distributions in laser welds study of the weldability of Inconel 718 cast alloy (Report 6) [J]. Welding International, 2002, 16(4): 284-292.
- [3] LUO X, SHINOZAKI K, KUROKI H, et al. Analysis of temperature and elevated temperature plastic strain distributions in laser welding HAZ study of laser weldability of Ni-base superalloys (Report 5)[J]. Welding International, 2002, 16(5): 385-392.
- [4] 秦昕,王庆,张彦华. GH3536 电子束焊接残余应力分布分析[J]. 航空制造技术, 2009, 52(4): 78-80.
- [5] QIN X, WANG Q, ZHANG Y H. Residual-stress distribution of high-temperature alloy GH3536 welded by EBW [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2009, 52(4): 78-80.
- [6] YANN D, ERIC L, CORINNE A. Numerical modeling of Inconel 738LC deposition welding: Prediction of residual stress induced cracking[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2010, 210(14):2053-2061.
- [7] CHAMANFAR A, JAHAZI M, BONAKDAR A, et al. Cracking in fusion zone and heat affected zone of electron beam welded Inconel-713LC gas turbine blades [J]. Materials Science and Engineering: A, 2015, 642: 230-240.
- [8] XU J J, LIN X, GUO P F, et al. The initiation and propagation mechanism of the overlapping zone cracking during laser solid forming of IN-738LC superalloy[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2018, 749: 859-870.
- [9] BONAKDAR A, MOLAVI-ZARANDI M, CHAMANFAR A, et al. Finite element modeling of the electron beam welding of Inconel-713LC gas turbine blades[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2017, 26: 339-354.
- [10] REN W J, LU F G, YANG R J, et al. A comparative study on fiber laser and CO₂ laser welding of Inconel 617 [J]. Materials & Design, 2015, 76: 207-214.
- [11] REN W J, LU F G, YANG R J, et al. Liquation cracking in fiber laser welded joints of inconel 617[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2015, 226: 214-220.
- [12] 张瑞华,片山聖二,内藤恭章,等. 基于旋转 GAUSS 曲面体热源模型的激光焊接热过程的数值模拟[J]. 电焊机, 2007, 37(5): 51-54.
- [13] ZHANG R H, KATAYAMA S, NAITOU Y, et al. Numerical simulation of the laser welding by using the Rotary-Gauss body heat source model [J]. Electric Welding Machine, 2007, 37(5): 51-54.
- [14] 张拓,张宏,刘佳. 激光-电弧复合焊接数值模拟的热源模型[J]. 应用激光, 2016, 36(1): 58-62.
- [15] ZHANG T, ZHANG H, LIU J. Laser-arc hybrid welding heat source model for numerical simulation [J]. Applied Laser, 2016, 36(1): 58-62.
- [16] DUPONT J N, LIPPOLD J C, KISER S D. Welding metallurgy and weldability of nickel-base alloys[M]. John Wiley & Sons, Inc, New Jersey, 2. New Jersey: Wiley-blackwell, 2009.