

DOI: 10.7652/xjtuxb201808005

# GH4169 镍基合金短电弧加工温度场数值模拟

李雪芝<sup>1</sup>, 周建平<sup>1</sup>, 王恪典<sup>1,2</sup>, 许燕<sup>1</sup>, 吴天博<sup>3</sup>

(1. 新疆大学机械工程学院, 830047, 乌鲁木齐; 2. 西安交通大学机械工程学院, 710049, 西安;  
3. 新疆电力科学研究院, 830011, 乌鲁木齐)

**摘要:** 以镍基合金 GH4169 为研究对象, 开展了短电弧铣削过程的数值模拟研究。通过选用合适的高斯面热源、体热源以及热边界条件, 建立了 GH4169 镍基合金短电弧加工温度场的数学模型, 得到了短电弧铣削过程熔池形成、温度等值线及温度场分布规律。由温度等值线确定了短电弧放电通道与基体材料形成的 3 个区域(气化区、熔融凝固区、热影响区)。同时, 在相同工艺参数下进行短电弧铣削工艺试验, 利用红外热成像仪监测整个加工过程。通过 FLIR R&D Software 处理热成像仪监测数据, 并获取三节点的热循环曲线, 其温度变化趋势与仿真结果吻合较好, 由温度成像云图观测放电通道与基体形成的各区域范围与温度等值线基本吻合, 验证了所建立模型的正确性, 为短电弧铣削加工过程中去除特性、表面质量、微观形貌等基础问题提供理论依据。

**关键词:** 镍基合金; 短电弧; 铣削加工; 熔池; 温度场

**中图分类号:** TH161 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2018)08-0030-07

## Numerical Simulation for Temperature Field of Short Electric Arc Milling Process of Nickel-Based Alloy GH4169

LI Xuezhi<sup>1</sup>, ZHOU Jianping<sup>1</sup>, WANG Kedian<sup>1,2</sup>, XU Yan<sup>1</sup>, WU Tianbo<sup>3</sup>

(1. School of Mechanical Engineering, Xinjiang University, Urumqi 830047, China; 2. School of Mechanical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China; 3. Xinjiang Electric Power Research Institute, Urumqi 830011, China)

**Abstract:** Taking the nickel-based alloy GH4169 as the research object, numerical simulation of short electric arc milling process was carried out. A mathematical model of temperature field in short electric arc milling of nickel-based alloy GH4169 was established by selecting suitable Gaussian surface heat source, body heat source and thermal boundary conditions, and then the formation of the molten pool, temperature contour and temperature distribution were obtained in the short electric arc milling process. According to the temperature contour, the three regions (gasification zone, melt-solidification zone and heat-affected zone) formed between the short arc discharge channel and the matrix material were determined. The short electric arc milling tentative was carried out with the same process parameters, and the whole process was monitored by infrared thermal imager. The monitoring data was processed by FLIR R&D software, and the three-node thermal cycle curve was extracted. The temperature trend coincides well with the simulations. The range of each region formed between the discharge channel and the substrate observed on the temperature imaging cloud map is essentially consistent with the temperature

收稿日期: 2017-11-08。 作者简介: 李雪芝(1989—), 博士生; 王恪典(通信作者), 男, 教授, 博士生导师。 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51765063)。

网络出版时间: 2018-04-18

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20180418.1513.004.html>

contour, which verifies the correctness of the established model and thus provides a theoretical basis for basic issues such as removal characteristics, surface quality, and micro-topography in the short electric arc milling process.

**Keywords:** nickel-based alloy; short electric arc; milling; molten pool; temperature field

镍基合金在中、高温范围内具有良好的综合性能,如高强度、抗氧化、抗腐蚀,广泛用于航空、热动、船舶等领域<sup>[1-2]</sup>。由于镍基合金的热导率和比热容较低,内部加入了大量强化元素(Cr、W、Mo 等),故在冷加工过程中存在切削温度高、加工硬化严重、易形成积屑瘤等现象,选用的主要加工方法有高速机械加工、电火花加工、电解加工、激光束加工、超高压射流等<sup>[3-5]</sup>,但此类方法的加工效率需要进一步提高。

短电弧加工是一种新的材料去除技术,在铣削放电加工过程中,工具、工件两极之间的放电通道内具有明显的电弧作用,等离子体具有能量密度集中、温度高、材料去除率高的特点,尤其在水雾射流压缩作用下产生更强的热压缩效应,使工件表面迅速被熔化、剥离母体,材料去除率极高,可达  $1.92 \times 10^5 \text{ mm}^3/\text{min}$ 。因此,短电弧铣削加工技术能够为超硬面合金材料的加工提供一种高效可行的手段<sup>[6-8]</sup>。汪兵兵等研究了短电弧铣削工具电极材料的放电性能,低电压加工时紫铜电极的损耗率是石墨电极损耗率的 7 倍<sup>[9-10]</sup>;朱晨光等研究脉冲电弧加工镍基高温合金表面微观形貌,得出频率和占空比较高时更容易产生裂纹,较低的频率和占空比会使熔化凝固层的厚度提高<sup>[11]</sup>;王博等研究了短电弧加工过程中进给速度与加工质量、加工效率之间的关系,在保证加工效率的前提下使电极损耗降到最低<sup>[12]</sup>。然而,目前研究多集中在实验方面,关于镍基合金短电弧铣削过程数值模拟方面的研究较少。

在电加工的数值模拟方面,国内外学者做了大量研究,并且取得诸多成果<sup>[13-18]</sup>。Marafona 等提出了液态介质中脉冲放电的热电模型。该模型可计算出表面粗糙度、材料去除率、工具电极损耗以及放电通道最高温度等<sup>[19-20]</sup>。Das 等提出了单脉冲放电过程有限元模型<sup>[21]</sup>,该模型不仅能够预测放电凹坑形状,而且能够预测单脉冲放电瞬时温度分布、固-液相转变以及残余应力等。Shankar 等对火花放电通道形状进行有限元分析,得到了火花放电区域的电势和温度场,同时还计算了阴极、阳极、工作液的热吸收率<sup>[22]</sup>。王振龙等利用离子模拟方法来研究等离子体放电通道的波动振荡,发现平衡状态下的放

电通道的负极呈喇叭口形,中部呈腰鼓形<sup>[23]</sup>。

为验证短电弧放电加工所涉及的基本物理过程,借助数值模拟的方法从微观上揭示物理过程。本文建立了 GH4169 镍基合金短电弧熔池温度场的数学模型,以 Ansys 有限元分析软件为平台,从短电弧铣削有限元模型的建立、网格划分、热源处理、热边界施加等方面,着重研究了移动电弧对熔池形成及温度场分布规律,为镍基合金短电弧高效去除及工艺优化实践提供理论支持。

1 短电弧铣削加工物理模型

短电弧放电过程中,在工件、工具两极间施加电压(击穿电压低于火花放电),工作介质被击穿形成一个圆锥形的放电通道,阴、阳极斑点大小不同,电流密度也不相同,阳极电流密度约为  $2\,800 \text{ A/cm}^2$ ,阴极电流密度为  $300 \text{ A/cm}^2$ 。电弧在气体或液体的流动作用下,迅速移动、伸长或弯曲,电流几乎都从弧柱内部流过,而火花放电为鼓形,阳极与阴极斑点大小相等,放电位置相对固定。短电弧放电通道内带电电子、粒子高速运动发生碰撞,将电能转化为热能等形式,并在工具、工件电极表面上形成高温热源,迅速加热工件表面放电区域,使工件材料熔融、气化,抛离电极表面。短电弧脉冲放电物理模型如图 1 所示。

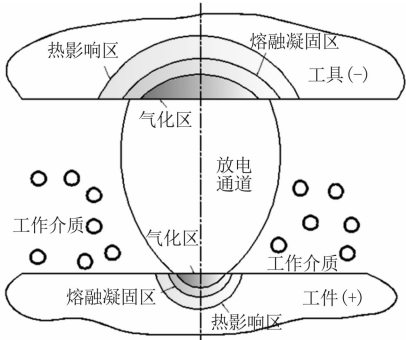


图 1 短电弧脉冲放电物理模型

2 短电弧铣削加工温度场数学模型

2.1 热源模型的选取

短电弧放电加工热源模型如图 2 所示。脉冲电

源传递给电极之间的能量,以热能形式分配在两极表面上,形成一个高温热源,分为表面热源和体积热源。表面热源由放电通道带电粒子相互碰撞所释放的,在短电弧放电间隙中占主导位置;体积热源依赖于电流的集肤效应,只发生在放电加工的初级阶段。

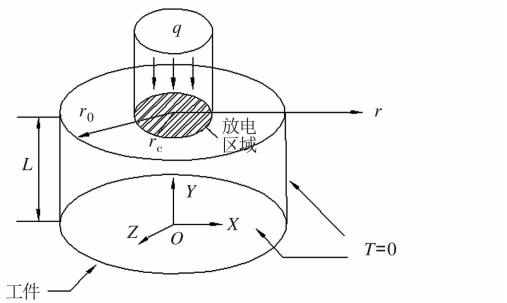


图 2 短电弧放电加工热源模型

(1)表面热源。带电粒子在通道中心处密度最高、边缘处最低,符合高斯分布,如图 3 所示。在短电弧放电区域中,与脉冲放电中心区域相距为  $r$  处的热流密度为

$$q(r) = 3 \frac{\eta UI}{\pi r_c^2} \exp\left(-3\left(\frac{r}{r_c}\right)^2\right) \quad (1)$$

式中: $r_c$  为放电通道半径,mm; $U$  为放电电压,V; $I$  为峰值电流,A; $\eta$  为能量分配系数,取  $0.3^{[24]}$ 。

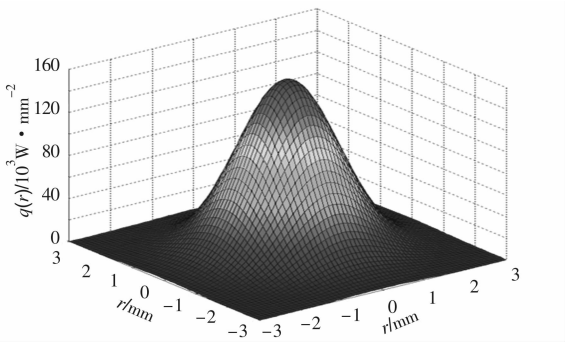


图 3 放电通道中热流密度分布情况

(2)体积热源。如图 4 所示,短电弧放电电压为 25 V,峰值电流为 600 A,放电电流较大,必然产生焦耳热,但在电弧放电蚀除材料过程中,作用极小。根据焦耳定律,焦耳热可通过下式计算

$$Q = I^2 R t \quad (2)$$

式中: $R$  为电阻, $\Omega$ ; $t$  为时间,s。

2.2 热源半径的计算

短电弧放电间隙、放电时间都是  $10^{-6}$  级,很难用物理方法检测,半经验计算方法是目前比较主流的,即放电半径  $r_c(t)$  的经验公式为<sup>[24]</sup>

$$r_c(t) = 0.002\,04 I^{0.43} \tau_{on}^{0.44} \quad (3)$$

式中: $\tau_{on}$  为脉宽, $\mu s$ 。

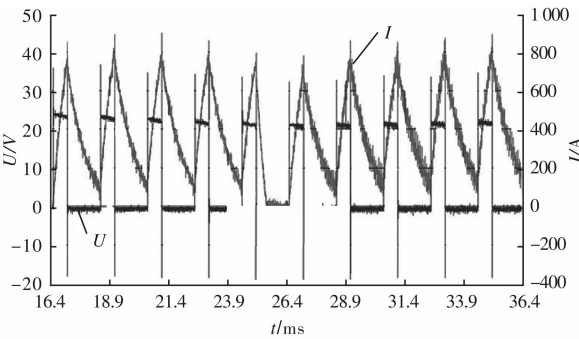


图 4 短电弧加工波形

根据式(3),短电弧铣削加工的电规准见表 1。

表 1 短电弧铣削加工放电参数

| 参数                      | 数值  |
|-------------------------|-----|
| 峰值电流 $I/A$              | 800 |
| 放电电压 $U/V$              | 25  |
| 占空比 $D/\%$              | 55  |
| 脉冲宽度 $\tau_{on}/\mu s$  | 917 |
| 脉冲间隔 $\tau_{off}/\mu s$ | 750 |
| 放电半径 $r_c/mm$           | 1.5 |

2.3 热边界条件及热源加载

热边界条件如图 5 所示,在  $B_1$  平面区域内,热流密度  $q(r)$  施加在放电通道  $r \leq r_c$  的区域;工件与工作介质的热对流  $h_c(T - T_0)$  施加在  $r > r_c$  的区域。平面  $B_2$ 、 $B_3$ 、 $B_4$  的边界条件均是室温温度

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial x} = \begin{cases} h_c(T - T_0), & r > r_c \\ q(r), & r \leq r_c \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (4)$$

式中: $h_c$  为对流换热系数; $T_0$  为室温 293 K。

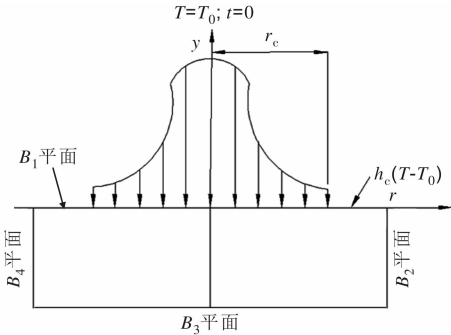


图 5 本文模型的热边界分布情况

蚀除区温度达到材料熔点以上,工件被去除,热源加载随着短电弧的蚀除位置而不断变化。为模拟这一过程,利用 Ansys Apdl 语言编写热源移动程序,借助“生死单元”模拟短电弧加工温度场的变化过程,思路为:设定高于熔点以上的单元被杀死,熔

点以下的单元继续下一步的加载循环。

2.4 潜热分析

由于短电弧瞬时输入能量大,工件迅速达到熔点熔化,由固态变成液态,又受到工作液介质的冷却作用,熔融部分又由液态变成固态,材料发生相变现象。基于等效比热容解决潜热问题,且只考虑熔化部分引起的潜热,等效比热容的计算公式如下

c\_eff = c + \frac{L\_H}{\Delta T} \tag{5}

式中:c 为比热容;L<sub>H</sub> 为潜热;ΔT 为熔点与室温温度之差。

3 短电弧铣削温度场仿真

3.1 前处理

工件 GH4169 的热物理性能见表 2,工具材料为石墨。热源主要有工件表面上的面热源和工具旋转方向的体热源,采用非均匀网格对模型进行划分,并在温度梯度较大处进行局部细化,如图 6 所示。定义单元时,选用单元 SOLID70 进行热-结构计算,选用表面效应单元 SURF152 施加热流密度。

表 2 GH4169 的热物理性能

| T/℃   | λ/W·(m·K) <sup>-1</sup> | c/J·(kg·K) <sup>-1</sup> | α/10 <sup>-6</sup> ℃ <sup>-1</sup> |
|-------|-------------------------|--------------------------|------------------------------------|
| 100   | 14.7                    | 460.3                    | 11.8                               |
| 200   | 15.7                    | 469.6                    | 13.0                               |
| 300   | 17.8                    | 481.4                    | 13.5                               |
| 400   | 18.3                    | 493.9                    | 14.1                               |
| 500   | 19.6                    | 514.8                    | 14.4                               |
| 600   | 21.2                    | 539.0                    | 14.8                               |
| 700   | 22.8                    | 573.4                    | 15.4                               |
| 800   | 23.6                    | 615.3                    | 17.0                               |
| 900   | 27.6                    | 657.2                    | 18.4                               |
| 1 000 | 30.4                    | 707.4                    | 18.7                               |

注:GH4169 的密度为 8 240 kg/m<sup>3</sup>;弹性模量为 1.999 GPa;泊松比为 0.3;熔点为 1 260~1 320 ℃。表中 λ 为导热系数;α 为线膨胀系数。

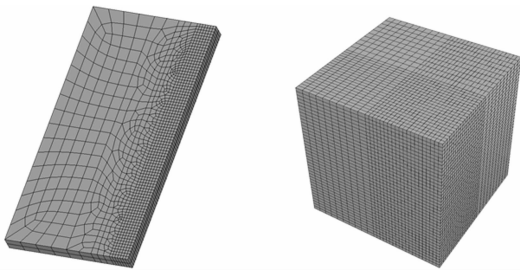


图 6 网格划分系统

3.2 短电弧温度场模型求解

如图 7 所示,工具直径为 Φ18 mm,工件尺寸为 100 mm×50 mm×20 mm,工具电极沿 X 方向以恒定速度移动,与电弧移动速度相同。图 8 为电压 U=25 V、电流 I=600 A、热源移动速度 v=10 mm/s 的短电弧铣削过程中,试件 GH4169 不同时刻的温度场分布和熔池形成过程。

在 0.2 s 时,蚀除位置由于受到电弧的持续热作用,迅速受热熔化,在工件表面形成一个近似椭圆形的熔池。在 1 s 时,随着电弧的移动,熔池也向前移动,此时的熔深、熔宽、熔池长度也不断增加。在 5 s 时,熔池继续加热,瞬时的高温使放电通道内压

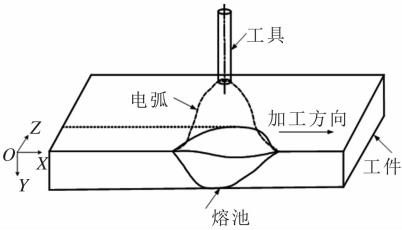
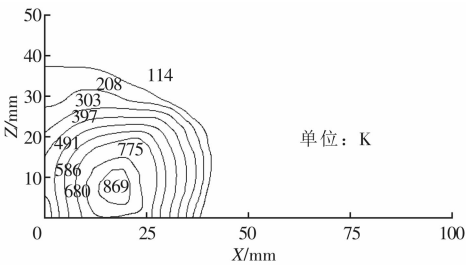
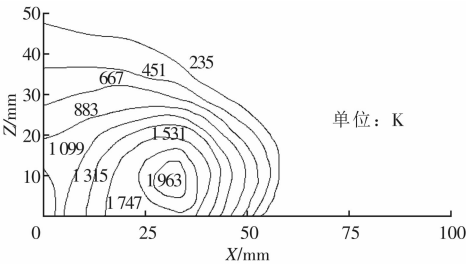


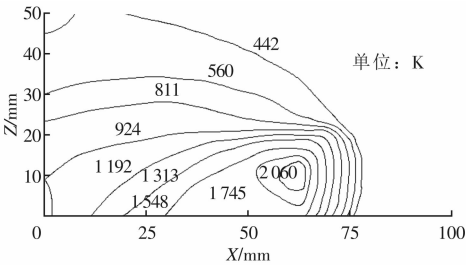
图 7 短电弧加工过程示意图



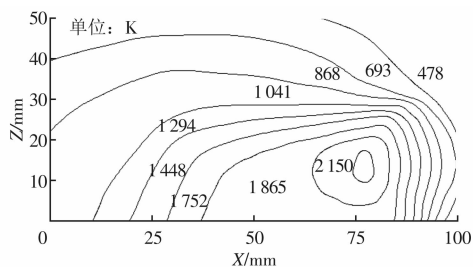
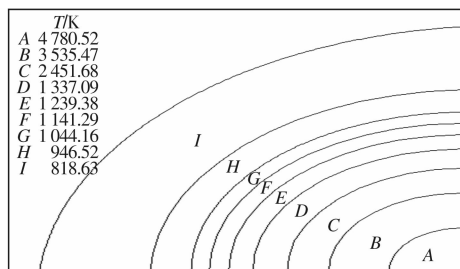
(a) t=0.2 s



(b) t=1 s



(c) t=5 s

(d)  $t=8\text{ s}$ 

(e) 体热源温度分布

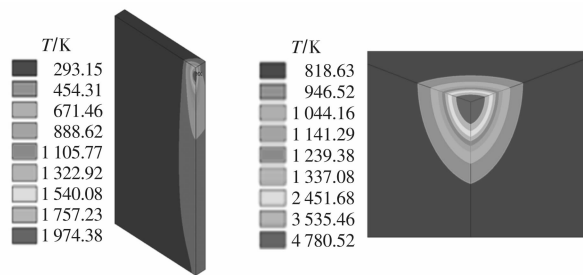
图8 短电弧熔池温度场分布规律

力急速增加,积累的热量把待蚀除区的金属融化,使得熔池长度继续增加,但熔宽和熔深已基本达到稳定,不再变化。在8 s时,由于工件、工具两极之间产生的电磁场具有箍缩效应,使放电通道的扩张受到阻力达到平衡,形成电弧的维持阶段,熔池长度不再增加、形状不再变化,熔池进入准稳态状态。

体热源的等温线如图8e所示,放电中心热流密度随放电半径的增加而降低,工件蚀除区面积逐渐增大,但蚀除区温度始终要比同时刻的面热源下的要高很多。

如图9所示,当脉冲放电结束后,短电弧面热源的熔宽为 $11.76\text{ }\mu\text{m}$ ,熔深为 $3.72\text{ }\mu\text{m}$ ,而体热源下的熔宽和熔深基本一致,近似为 $6.52\text{ }\mu\text{m}$ 。这说明短电弧采用大电流加工,在宽度、深度方向材料蚀除率较快,整个加工效率也大大提高,同时大的凹坑增大了工件的表面粗糙度。

短电弧放电通道和工件基体材料之间形成3个区域,即气化区、熔融凝固区和热影响区,如图10所示。气化区是工件由固态变成气体的区域,温度高于工件沸点,该区域的材料完全剥离母体。熔融凝固区是工件由固态变成液态的区域,温度高于工件熔点,该区域的材料由于受到工作介质的冷却作用,不能完全被剥离,在工件表面重新凝固产生再铸层。热影响区温度高于700 K,但低于熔点温度,此时工件材料处于固态,但材料的金相组织和力学性能仍被改变。



(a) 面热源

(b) 体热源

图9 脉冲放电结束后的熔池状态

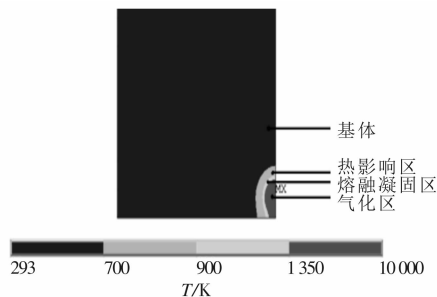


图10 气化区、熔融凝固区和热影响区的温度分布

## 4 实验

### 4.1 实验准备

短电弧铣削加工装置如图11所示。利用红外热像仪监测整个短电弧铣削过程。采用线切割将工件切割成与 $5\text{ mm}\times 5\text{ mm}\times 2.5\text{ mm}$ 的试样,经过磨光、抛光、腐蚀(50 mL HCl, 10 mL  $\text{HNO}_3$ , 5 mL HF, 38 mL 蒸馏水, 浸入240~270 s)利用, SU-PRATM55VP 扫描电镜进行金相观测。

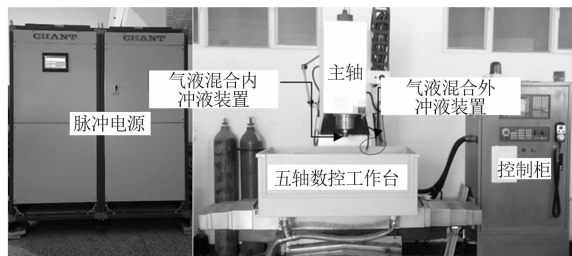
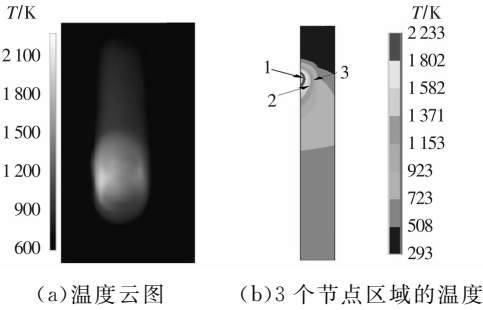


图11 短电弧铣削加工装置

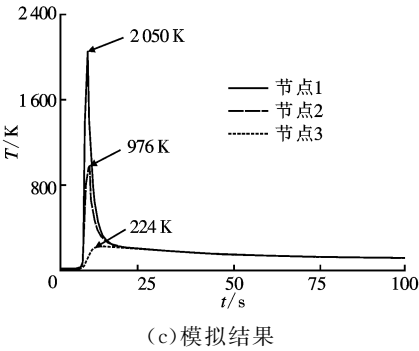
### 4.2 实验验证

利用 ThermoVision A40M 型红外热成像仪进行测试,帧频为50/60 Hz。在 $12^\circ\times 9^\circ/1.2\text{ m}$ 镜头上添加高温滤光片扩展测温范围,调整相机与计算机控制终端之间的连接,选择最佳拍摄角度,使用 THERMCAM 控制软件调整相机焦距,并选择温度范围为800~2300 K,准备就绪后监测短电弧加工。图12a显示了第9.6 s时的温度分布。熔融凝

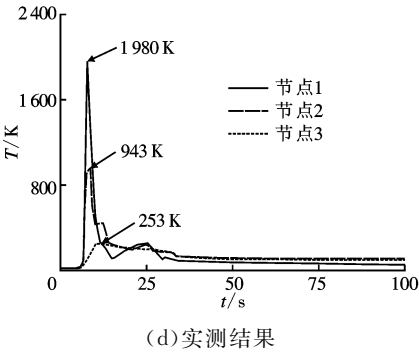
固区温度在 1 500~1 700 K 之间,热影响区域的温度范围在 900~1 500 K 之间。当电弧移动到基体附近时,温度梯度逐渐平滑,边界温度由于与周围的热交换而保持恒定。由此可知,通过温度成像云图观察到的气化区、熔融凝固区、热影响区的温度范围与仿真的温度等值线基本吻合。



(a)温度云图 (b)3 个节点区域的温度



(c)模拟结果



(d)实测结果

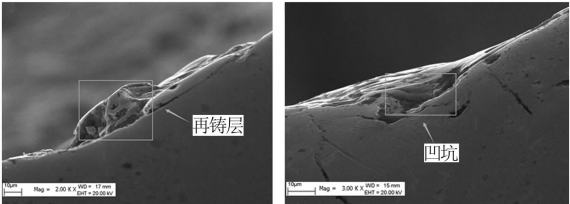
图 12 3 个节点的温度变化情况

通过 FLIR R&D Software 处理热成像仪监测结果,提取分别位于气化区、热影响区、基体的 3 个节点 1、2、3(见图 12b)的温度变化数据,并与 3 节点的模拟值和实测值进行比较,如图 12c、图 12d 所示。图中显示模拟结果与实测结果吻合较好,峰值温度最大误差为 70 K,在允许的误差范围内。实测的热循环曲线存在一定的波动,主要是在短电弧铣削过程中,气液混合工作介质注入时量能不足,必然导致电弧的不稳定,而在数值模拟过程中很难考虑这种影响。GH4169 镍基合金短电弧铣削过程

的温度场变化极为剧烈,在升温阶段,材料几乎从室温瞬间上升到峰值温度;而在冷却阶段,冷却速率同样很快,工件的热影响区也在瞬时几秒内形成。通过仿真预测工件热影响区范围,为今后优化电参数提高工件表面质量提供理论支持。

工件沿宽度、厚度方向的高温区域很窄,温度场变化也十分剧烈。分析认为,在短电弧铣削过程中,采用大电流、大脉宽的模式,每个脉冲周期的放电过程皆可实现电弧放电,几乎没有空载、短路电压,可达到瞬时输入能量大、高效去除、放电持续平稳的目的。因此,被蚀除工件瞬时达到熔点,并以对流传热、导热的方式对附近传热,随后又由于连续注入工作液介质,温度便急剧下降,产生了很强的温度梯度。显然,这对蚀除区的组织产生明显的影响,如图 13 所示,在  $U=25\text{ V}$ 、 $I=600\text{ A}$  的电参数下,工件表面产生  $15.8\text{ }\mu\text{m}$  的再铸层、半径为  $16.3\text{ }\mu\text{m}$  的放电凹坑。

综上所述,通过热成像仪对短电弧加工过程温度变化的监测,获取的实验数据,得到工件 GH4169 不同时刻的温度场变化曲线以及工件热影响区分布,与之前仿真的短电弧瞬态温度场、温度等值线基本吻合,验证了所建立模型的正确性。该研究为短电弧铣削加工过程中去除特性、表面质量、微观形貌等基础问题提供理论依据,为短电弧加工技术工程应用提供支撑。



(a)再铸层 (b)凹坑

图 13 工件 GH4169 微观形貌( $U=25\text{ V}$ 、 $I=600\text{ A}$ )

5 结束语

通过对 GH4169 镍基合金短电弧铣削过程的温度场进行三维实时动态模拟研究,综合考虑多种因素,建立了三维瞬态短电弧熔池温度场数学模型。利用 Ansys 模拟了在电弧热源作用下短电弧熔池温度场的动态变化过程。分析 3 个节点的热循环曲线,模拟结果和实测结果吻合较好,且符合短电弧铣削过程温度变化规律。试验验证了温度场数值模拟的适用性与正确性,为镍基合金短电弧高效去除及工艺优化实践提供理论支持。

## 参考文献:

- [1] 王会阳, 安云岐, 李承宇, 等. 镍基高温合金材料的研究进展 [J]. 材料导报, 2011, 25(S2): 482-486.  
WANG Huiyang, AN Yunqi, LI Chengyu, et al. Research progress of nickel-based superalloys [J]. Materials Review, 2011, 25(S2): 482-486.
- [2] 路彦君. 镍基高温合金 Inconel718 微铣削残余应力与加工硬化研究 [D]. 大连: 大连理工大学, 2016: 10-12.
- [3] MIAO Zhujun, SHAN Aidang, WU Yuanbiao, et al. Quantitative analysis of homogenization treatment of Inconel718 superalloy [J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2011, 21(5): 1009-1017.
- [4] 刘维伟, 李晓燕, 万旭生, 等. GH4169 高速车削参数对加工表面完整性影响研究 [J]. 机械科学与技术, 2013, 32(8): 1093-1097.  
LIU Weiwei, LI Xiaoyan, WAN Xusheng, et al. The effects of turning parameters on machining surface integrity in high speed turning GH4169 [J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2013, 32(8): 1093-1097.
- [5] 张志伟. 镍基高温合金高效深切成型磨削关键技术研究 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2014: 17-28.
- [6] ZHOU Jianping, LIANG Chuhua, XU Yan. The NC power supply design of large current and wide frequency pulse in short electric arc machining [J]. Applied Mechanics and Materials, 2013, 278-280 (7): 1051-1055.
- [7] 周碧胜, 梁楚华, 周建平. 短电弧切削技术的应用 [C]//第九届中国铸造科工贸大会论文选集. 北京: 中国机械工程学会, 2009: 142-146.
- [8] 卢江, 梁楚华, 周碧胜. 基于短电弧切削加工技术高效性特点的研究 [J]. 电加工与模具, 2011(2): 57-60.  
LU Jiang, LIANG Chuhua, ZHOU Bisheng. The research of the high efficiency based on the short electricity arc cutting [J]. Electromachining & Mould, 2011(2): 57-60.
- [9] 汪兵兵, 周建平, 许燕, 等. 短电弧铣削工具电极材料的放电性能研究 [J]. 制造技术与机床, 2016(5): 94-98.  
WANG Bingbing, ZHOU Jianping, XU Yan, et al. Research for discharge performance of electrode materials by short arc milling [J]. Manufacturing Technology & Machine Tool, 2016(5): 94-98.
- [10] 汪兵兵, 周建平, 许燕, 等. 镍基高温合金短电弧铣削加工性能与电极损耗规律研究 [J]. 制造技术与机床, 2015(10): 139-143.  
WANG Bingbing, ZHOU Jianping, XU Yan, et al. The experiment research of processing performance of nickel-base superalloy and electrode loss rule by short electric arc milling [J]. Manufacturing Technology & Machine Tool, 2015(10): 139-143.
- [11] 朱晨光, 周建平, 汪兵兵. 镍基高温合金脉冲电弧加工表面完整性研究 [J]. 机床与液压, 2015, 43(11): 27-29, 33.  
ZHU Chenguang, ZHOU Jianping, WANG Bingbing. Study of nickel base super alloy surface integrity in pulsed arc machining [J]. Machine Tool & Hydraulics, 2015, 43(11): 27-29, 33.
- [12] 王博, 周建平, 木合塔尔·克力木, 等. 数控短电弧铣削加工最优进给速度研究 [J]. 机械设计与研究, 2016, 32(6): 110-112, 117.  
WANG Bo, ZHOU Jianping, Muhetar, et al. Study on the optimal feed rate in short arc milling [J]. Machine Design & Research, 2016, 32(6): 110-112, 117.
- [13] SCHULZE H P, HERMS R, JUHR H, et al. Comparison of measured and simulated crater morphology for EDM [J]. Journal of materials Processing Technology, 2004, 149(6): 316-322.
- [14] PATEL M R, BARRUFET M A, EUBANK P T, et al. Theoretical models of the electrical discharge machining: process II The anode erosion model [J]. J Appl Phys, 2013, 66(9): 4104-4111.
- [15] YEO S H, KURNIA W, TAN P C. Critical assessment and numerical comparison of electro-thermal models in EDM [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2008, 203(1/2/3): 241-251.
- [16] SHABGARD M, AHMADI R, SEYEDZAVVAR M, et al. Mathematical and numerical modeling of the effect of input-parameters on the flushing efficiency of plasma channel in EDM process [J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2013, 65 (23): 79-87.
- [17] SHABGARD M, OLIAEI S N B, SEYEDZAWAR M, et al. Experimental investigation and 3d finite element prediction of the white layer thickness, heat affected zone, and surface roughness in EDM process [J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2011, 25(12): 3173-3183.
- [18] 崔景芝. 微细电火花加工的基本规律及其仿真研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2007: 15-16.

(下转第 116 页)