

文章编号: 1001-3806(2018)06-0764-05

GH4037 镍基高温合金激光打孔相变过程数值模拟

王琪琪, 任乃飞*, 任旭东

(江苏大学 机械工程学院, 镇江 212013)

摘要: 为了更准确地研究激光打孔相变过程, 基于流体传热和流体力学理论, 建立了 GH4037 镍基高温合金激光打孔相变模型。模型中考虑了重力、粘滞力、反冲压力的作用, 以及材料的固-液相变和液-气相变过程, 通过数值计算得到了激光打孔相变过程的温度场和速度场。结果表明, 气化材料的反冲压力可以加快熔池的流动, 在激光功率为 2000W、脉宽为 1.70ms 时, 材料最大气化蒸发速率可以达到 250m/s。该模型为进一步开展激光打孔研究提供了理论基础。

关键词: 激光技术; 激光打孔; 数值模拟; GH4037 镍基高温合金

中图分类号: TG665 **文献标志码:** A **doi:** 10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2018.06.007

Numerical simulation of phase transition process of laser drilling on GH4037 nickel-based superalloy

WANG Qiqi, REN Naifei, REN Xudong

(School of Mechanical Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

Abstract: In order to study the phase transformation process of laser drilling more accurately, based on the theories of fluid heat transfer and fluid mechanics, a phase transition model of laser drilling on GH4037 nickel-based superalloy was established. In the model, the effect of gravity, viscous force, recoil pressure, solid-liquid phase transition and liquid-gas phase transition process were considered, and the temperature field and velocity field of laser drilling phase transition process were obtained by numerical calculation. The results show that, the reaction pressure of the gasification material can accelerate the flow of the molten pool. When the laser power is 2000W and the pulse width is 1.70ms, the maximum evaporation rate of the material can reach 250m/s. This model provides a theoretical basis for further research on laser drilling.

Key words: laser technique; laser drilling; numerical simulation; GH4037 nickel-based superalloy

引言

激光打孔过程既存在熔化又存在气化蒸发, 是一个复杂的多态多物理场耦合过程。国内外研究人员围绕激光参量对激光打孔质量的影响规律与激光打孔工艺参量优化已经开展了大量的实验研究^[1-9], 如 WANG^[1] 等人基于单因素法的激光打孔实验, 分析了激光器电压、脉冲宽度、重复频率、聚焦条件、辅助气体

等对不锈钢激光打孔的影响规律。FU^[2] 等人利用光纤激光打孔实验分析了激光功率、占空比、切割速率、重复频率等参量对光纤激光打孔质量的影响。QIAN^[3] 等人基于正交实验方法进行的激光打孔实验, 得出了 SUS304 不锈钢激光打孔的最优实验参量组合。

但是, 采用传统的实验手段难以解释和分析激光打孔的机理以及激光打孔过程中材料的相变过程。采用模拟仿真的方法有利于研究激光打孔的物理机制和瞬态过程, 并为实际的激光打孔加工提供理论指导。

早期针对激光打孔过程的模拟仿真主要基于解析法^[10-11], 如 SWIFT-HOOK 等人引入高斯分布的激光热源建立了激光热作用物理模型, 分析了激光移动速率对熔池大小及形状的影响^[10], 但未考虑相变潜热的影响。WU 等人以无限大均匀介质中热扩散方程的解为理论工具, 给出了激光打孔过程的近似数学表达式, 模拟了激光打孔的孔洞形成过程^[11]。但利用解析法求

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2011CB013004); 江苏省高校自然科学研究资助项目(11KJA460003; 15KJD460002); 江苏省科技支撑计划资助项目(BE2015037); 江苏省高校“青蓝工程”资助项目(苏教师[2016]15号); 江苏省“六大人才高峰”资助项目(2013-ZBZZ-025)

作者简介: 王琪琪(1992-), 男, 硕士研究生, 主要从事激光先进加工技术的研究。

* 通讯联系人。E-mail: rnf@ujs.edu.cn

收稿日期: 2018-01-08; 收到修改稿日期: 2018-02-06

解时,无法处理材料热物理参量随温度变化的实际情况^[12]。

目前,针对激光打孔过程的数值模拟主要基于热传导理论^[13-17],即通过求解热传导方程得到激光打孔过程的温度场。ZHANG 等人建立了1维稳态热传导模型,研究了长脉冲激光打孔的效能比,计算了不同激光能量密度下的打孔深度^[13]。CHU 等人基于有限元法建立了2维激光打孔模型,考虑了激光束空间分布和材料相变潜热对孔的影响,计算了激光打孔过程温度场和孔型演化过程^[14]。BEGIC-HAJDAREVIC 等人基于有限体积法计算了激光打孔过程中温度的分布和孔的几何形状^[15]。SONG 等人利用 ANSYS 软件中的单元生死技术对激光打孔过程的温度场进行模拟仿真,得到了小孔的孔深、孔径的时间特性以及随激光能量的变化曲线^[16],但该模型忽略了打孔过程中产生的熔化现象,只考虑材料的气化。

基于热传导理论的模型大多忽略了重力、反冲击力和粘滞力等对激光打孔的影响,且仅考虑材料的固-液相变过程,忽略了材料的液-气相变过程,因此仅能模拟激光打孔过程中的温度分布情况。另外,激光打孔过程中材料发生相变会导致材料的热物理属性发生阶跃跳变,需要对随温度变化的材料参量进行平滑处理。材料的熔化和气化蒸发过程还涉及到粘滞力和反冲击力的作用,以及相变潜热和热对流的影响,因此基于热传导理论建立准确的激光打孔模型较为困难。

本文中以航空涡轮发动机叶片常用的 GH4037 镍基高温合金为研究对象,基于流体传热和流体力学理论建立了控制方程组,模型中考虑了重力、反冲击力和粘滞力的作用,也考虑了材料的固/液相变和气/液相变过程,提高了激光打孔模型的准确性。通过计算得到了激光打孔相变过程中不同时刻的温度场分布、熔池流动速率以及气化蒸发速率,为进一步开展激光打孔的研究奠定了理论基础。

1 数学模型

1.1 有限元模型

本文中有限元模型的建立、参量设置、边界条件设置、求解以及后处理等均基于 COMSOL MULTIPHYSICS 多物理场仿真软件。为便于计算,有限元模型采用2维模型,分为上下两个矩形域。上矩形域为空气,长4mm,高4mm;下矩形域为 GH4037 镍基高温合金,长4mm,高1mm。考虑到模型精确性,同时减少计算量,在空气以及材料表面以下0.5mm左右的深度构造

较细的网格,其它区域构建较粗的网格,网格类型采用三角形网格。几何模型的网格划分效果如图1所示。

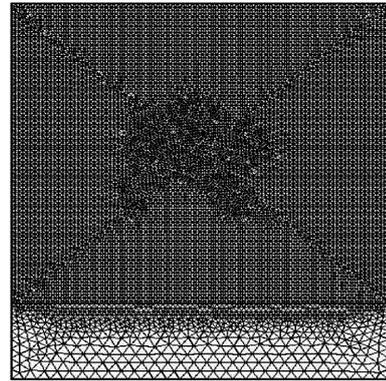


Fig. 1 Schematic diagram of mesh division

1.2 控制方程

假设激光打孔过程中主要受到重力、粘滞力和反冲击力的作用,熔化和气化材料的传热过程主要受到热传导和热对流的作用。根据质量守恒、动量守恒和能量守恒原则,给出气、液、固三相统一的控制方程如下:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u}) = 0 \quad (1)$$

$$\rho \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \rho (\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} = \nabla \cdot [-p \mathbf{I} + \mu (\nabla \mathbf{u} + (\nabla \mathbf{u})') - \frac{2}{3} \mu (\nabla \cdot \mathbf{u}) \mathbf{I}] + \rho \cdot \mathbf{g} \quad (2)$$

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} + \rho c_p \mathbf{u} \cdot \nabla T = \nabla \cdot (\kappa \nabla T) + S(x, t) \quad (3)$$

式中, ρ 为密度, \mathbf{u} 为速度矢量, p 为压强, μ 为动态粘度, g 为重力加速度, T 为绝对温度, c_p 为比定压热容, κ 为热导率, $S(x, t)$ 为热源项。

激光热源采用高斯面热源模型,热源项的数学表达式如下:

$$S(x, t) = \frac{2P}{\pi r^2} (1 - R) \exp\left(-2 \frac{x^2}{r^2}\right) \quad (4)$$

式中,激光功率 $P = 2000 \text{ W}$,反射率 $R = 0.74$,光斑半径 $r = 0.25 \text{ mm}$ 。

1.3 初始条件和边界条件

(1) 初始值速率 $u = 0 \text{ m/s}$,压力 $p = 1 \times 10^5 \text{ Pa}$, T 为环境温度,则有 $T = 300 \text{ K}$ 。

(2) 温度边界条件设置为绝热,边界方程为:

$$-\kappa \cdot \nabla T = 0 \quad (5)$$

(3) 速度边界条件设置为无滑移边界,边界方程为:

$$\mathbf{u} = 0 \quad (6)$$

1.4 空气与 GH4037 镍基高温合金物理参量

空气的热物理属性^[18]如表 1 所示。

Table 1 Physical properties of air

T/K	$c_p/(J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1})$	$\kappa/(W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1})$	$\mu/(Pa \cdot s)$
300	1.005×10^3	0.0262	1.983×10^{-5}
500	1.029×10^3	0.0403	2.671×10^{-5}
1000	1.141×10^3	0.0675	4.152×10^{-5}
1500	1.230×10^3	0.0946	5.400×10^{-5}
2000	1.338×10^3	0.1240	6.500×10^{-5}
2500	1.688×10^3	0.1750	7.670×10^{-5}

随温度变化的空气密度 ρ 可由以下表达式计算:

$$\rho = p \cdot M / (\alpha \cdot T) \quad (7)$$

式中,空气摩尔质量 $M=0.0289\text{kg/mol}$,通用气体常数 $\alpha=8.314\text{J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$ 。

GH4037 镍基高温合金的热物理属性^[19]如表 2 所示。

Table 2 Physical properties of GH4037 Nickel-based superalloy

property	value
specific heat of solid phase $c_{p,s}$	440J/(kg · K)
thermal conductivity of solid phase κ_s	13.8W/(m · K)
thermal conductivity of melting phase κ_m	23.9W/(m · K)
dynamic viscosity μ	0.006Pa · s
latent heat of melting H_m	296kJ/kg
latent heat of vaporization H_v	6423kJ/kg
melting temperature T_m	1585K
vaporization temperature T_v	3005K

采用等效热熔法处理材料熔化和气化过程的相变潜热的影响,等效热熔法的表达式如下^[20]:

$$c_p = c_{p,s} + \left(\frac{H_m}{T_m}\right)H((T - T_m), \Delta T) +$$

$$\delta_m H_m + \left(\frac{H_v}{T_v}\right)H((T - T_v), \Delta T) + \delta_v H_v \quad (8)$$

$$\delta_m = \frac{\exp[-(T - T_m)^2/\Delta T^2]}{\Delta T \sqrt{\pi}} \quad (9)$$

$$\delta_v = \frac{\exp[-(T - T_v)^2/\Delta T^2]}{\Delta T \sqrt{\pi}} \quad (10)$$

式中, $H((T - T_m), \Delta T)$ 和 $H((T - T_v), \Delta T)$ 均为 Heaviside 平滑函数,分别用于处理材料在固-液相变和液-气相变过程中的相变潜热; δ_m 和 δ_v 为高斯函数,高斯函数的中心分别为材料的熔点和沸点; ΔT 为相转变温度范围,本文中取 $\Delta T=50\text{K}$ 。

在材料发生固-液相变和液-气相变过程中,材料的密度 ρ 也会发生两次阶跃性跳变,容易导致求解过程出现奇异。本文中也采用 Heaviside 平滑函数对其进行处理,改善了模型的收敛性。经平滑处理后的

GH4037 镍基高温合金的密度 ρ 如图 2 所示。

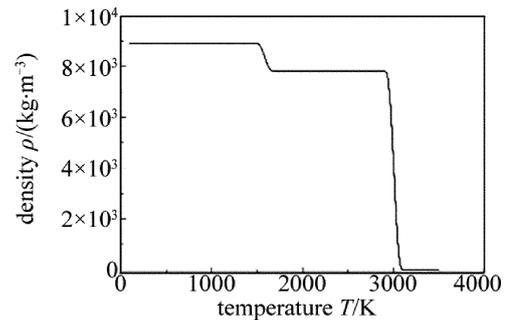


Fig. 2 Density of GH4037 Nickel-based superalloy after smoothing

2 模拟结果与分析

2.1 温度场模拟结果

图 3 为激光作用 0.80ms, 1.20ms, 1.60ms 和 1.70ms 左右的温度场模拟结果。图 3 中的横纵坐标分别代表几何区域的长和高,单位为 mm,色柱表示温度,单位为 K。如图 3a、图 3b 所示,在激光加热早期阶段,激光束主要用于加热基体,激光束下方的材料达到融化温度后,开始形成小的熔池,此时激光能量以菲涅尔吸收的方式被材料表面吸收,其余能量被反射,传热过程以热传导方式为主。随着加热时间增加,热传导现象加剧,熔池的深度随之增加。如图 3c 所示,激光加热 1.60ms 左右,材料表面发生气化现象,在小孔内外压力差的作用下,气化材料沿垂直方向向上喷出,并与周围空气形成了热对流。如图 3d 所示,激光加热 1.70ms 左右,材料气化蒸发现象更加明显,气化后的材料进一步上升,并向周围扩散,形成了类似“蘑菇云”的形状。

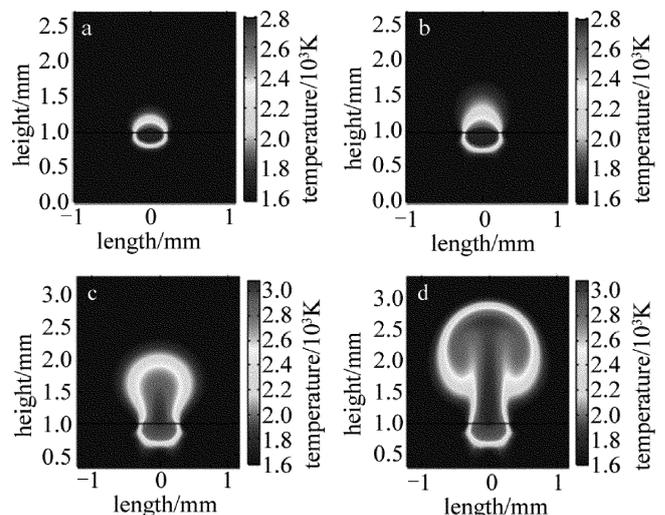


Fig. 3 Simulation results of temperature field

a— $t=0.80\text{ms}$ b— $t=1.20\text{ms}$ c— $t=1.60\text{ms}$ d— $t=1.70\text{ms}$

2.2 速度场模拟结果

图 4a、图 4b 分别为熔池表面和熔池内部不同位置(x,y)的水平流动速率。从图 4a 可以看出,熔池中心区域的水平流动速率较快,两端的水平流动速率较慢,水平流动速率最高为 1.7m/s。从图 4b 可以看出,熔池表面的水平速率较高,越往下水平速率越低。

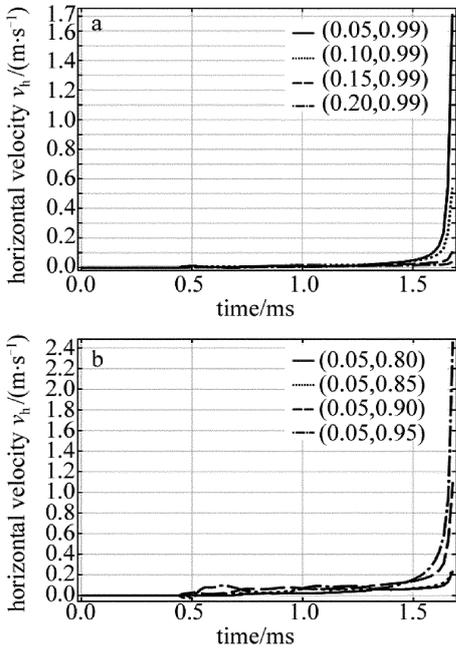


Fig. 4 Horizontal flow velocity of molten pool a—surface b—inside

结合图 4a、图 4b 可以看出,在激光加热早期阶段,熔池表面和内部的水平流动速率都较低,随着激光作用时间增加,熔池表面和内部的水平流动速率开始增加,但增速均较为缓慢。在激光加热 1.70ms 左右,熔池表面和内部的水平流动速率都迅速上升。

图 5 为熔池表面的垂流动速率。从中可以看出,在激光加热 0.50ms 左右,熔池开始出现垂流动。随着时间的增加,熔池的垂流动速率不断增加,在激光加热 1.70ms 左右,熔池的垂速率也迅速上升。从图 5 中还能看出,靠近熔池中心区域的垂流动速率较快,熔池两端的垂流动速率较慢,垂流动

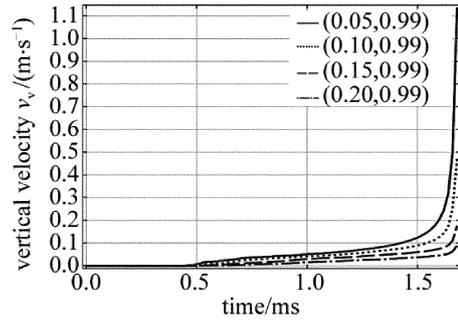


Fig. 5 Vertical flow velocity at the surface of molten pool 速率最高为 1.1m/s。

图 6 为材料表面不同位置的压强随时间变化的曲线。从图 6 可以看出,在激光加热初始阶段,此时的压强与大气压强相同,然后随着激光加热时间增加,压强开始缓慢的上升,在激光加热 1.70ms 左右,压强开始迅速上升,中心点压强最大达到 1.38×10^5 Pa,而且距离中心区域越近最大压强越大。

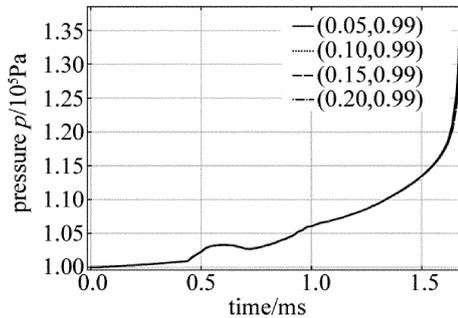


Fig. 6 Pressure at the surface of molten pool

对比熔池水平和垂流动速率与压强的模拟结果可以看出,在激光加热 1.70ms 左右压强迅速上升,距离中心点越近最大压强越大,此时速率场模拟中的熔池流速也在迅速上升,且越靠近熔池中心区域流动速率较快,表明蒸发气体的反冲压力可以加快熔池的流动。

图 7 为激光作用 1.60ms, 1.64ms, 1.66ms 和 1.70ms 时的材料气化蒸发速率场模拟结果。图中的横纵坐标分别代表几何区域的长和高,单位为 mm,色柱表示速率,单位为 m/s。从图上可以看出,在材料发

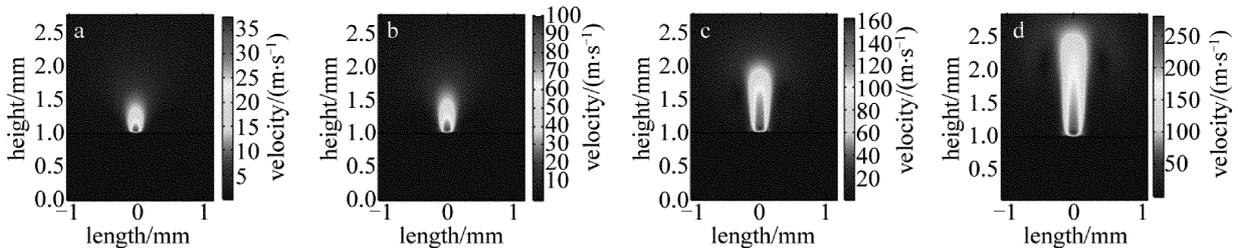


Fig. 7 Simulation results of vertical field a—t=1.60ms b—t=1.64ms c—t=1.66ms d—t=1.70ms

生气化后,材料的最大气化蒸发速率由 1.60ms 时的 35m/s 迅速增加到 1.70ms 时的 250m/s。靠近材料表面中心区域的材料蒸发速率最高,向周围扩散的气化蒸发材料在空气的阻力作用下速率逐渐递减。

3 结论

基于流体力学和流体传热理论建立了 GH4037 镍基高温合金激光打孔相变模型,计算了激光打孔相变过程的温度场分布、熔池流动速率以及气化蒸发速率,模拟结果较好地展示了材料熔化和气化蒸发的相变过程。

(1)随着激光作用时间增加,材料相继发生熔化和气化现象,熔化材料初期在粘滞力和重力的阻碍作用下流动较为缓慢,然后在气化蒸发材料的反冲压力下,熔池的流动速率迅速增加,气化蒸发材料沿垂直方向从小孔喷射到空气中,并向周围空气中扩散。

(2)在激光功率为 2000W、脉宽为 1.70ms 时,熔池的水平流动最高速率为 1.7m/s,垂流动最高速率为 1.1m/s,材料最大气化蒸发速率可以达到 250m/s。

参考文献

- [1] WANG Zh P, LIU Y, WANG Y. Experiment study on laser cutting and process simulation [J]. *Manufacturing Technology & Machine Tool*, 2016(6):118-122 (in Chinese).
- [2] FU B Y, OUYANG B Sh, LIU W D, *et al.* Study on fiber laser rotary drilling process of 0.12mm SUS304 [J]. *Optical and Technique*, 2016,42(2):126-129 (in Chinese).
- [3] QIAN X Zh, WANG Q Q, REN N F. Optimization of laser drilling processing parameters for SUS304 based on orthogonal experiments [J]. *Laser Technology*, 2017, 41(4): 578-581 (in Chinese).
- [4] HAN F M, XU Sh Zh, SONG W L, *et al.* Study of nanosecond laser ablation on aluminum and stainless steel targets [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2016, 43(2): 203005 (in Chinese).
- [5] HANON M M, AKMAN E, OZTOPRAK B G, *et al.* Experimental and theoretical investigation of the drilling of alumina ceramic using Nd:YAG pulsed laser [J]. *Optics & Laser Technology*, 2012, 44(4):913-922.
- [6] NATH A K, HANSDAH D, ROY S, *et al.* A study on laser drilling of thin steel sheet in air and underwater [J]. *Journal of Applied Physics*, 2010, 107(12):123103.
- [7] LOW D K Y, LI L, BYRD P J. The effects of process parameters on spatter deposition in laser percussion drilling [J]. *Optics & Laser Technology*, 2000, 32(5):347-354.
- [8] LOU D Y, XIONG H, WU Y G, *et al.* Damage threshold and drilling mechanism of aluminum plate by nanosecond laser with different pulse widths [J]. *Laser Technology*, 2017, 41(3): 427-432 (in Chinese).
- [9] XU B Zh, QI L J, WANG W, ZHU X, *et al.* Study on the optimum matching parameters of the combined laser drilling [J]. *Laser Technology*, 2018, 42(1): 5-10 (in Chinese).
- [10] SWIFT-HOOK D T, GICK A E F. Penetration welding with laser [J]. *Welding Journal*, 1973, 52:492-499.
- [11] WU Y M, LI J Ch. Simulation of laser drilling based on semi-analytical solution [J]. *Laser Technology*, 2009, 33(2):205-208 (in Chinese).
- [12] XU B Q, WANG H, XU G D, *et al.* Numerical modeling of laser-induced molten pool for laser interaction with metal material [J]. *Journal of Jiangsu University (Natural Science Edition)*, 2010, 31(3):358-362 (in Chinese).
- [13] ZHANG L, QIN Y, LU J, *et al.* Analysis of energy efficiency ratio for long-pulse laser drilling based on the heat conduction equation [J]. *Journal of Optoelectronics · Laser*, 2015, 26(10): 1990-1996 (in Chinese).
- [14] CHU Q C, YU G, LU G Q, *et al.* Two-dimensional numerical investigation for the effects of laser process parameters on hole type during laser drilling [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2011, 38(6): 0603001 (in Chinese).
- [15] BEGIC-HAJDAREVIC D, BIJELONJA I. Experimental and numerical investigation of temperature distribution and hole geometry during laser drilling process [J]. *Procedia Engineering*, 2015, 100:384-393.
- [16] SONG L L, SHI G Q, LI Zh G. Simulation on laser drilling temperature field by using ANSYS [J]. *Journal of Changchun University of Science and Technology*, 2006, 29(4): 19-21 (in Chinese).
- [17] SOWDARI D, MAJUMDAR P. Finite element analysis of laser irradiated metal heating and melting processes [J]. *Optics & Laser Technology*, 2010, 42(6):855-865.
- [18] JIE Q, ZHANG G H, CHEN Y W. *Real fluid dynamics* [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1986: 383-385 (in Chinese).
- [19] THE COUNCIL OF EDITORS OF CHINA AERONAUTICAL MATERIALS HANDBOOK. *China aeronautical materials handbook* [M]. Beijing: Standards Press of China, 2002:260-261 (in Chinese).
- [20] ZHANG Y, SHEN Z, NI X. Modeling and simulation on long pulse laser drilling processing [J]. *International Journal of Heat & Mass Transfer*, 2014, 73(4):429-437.