

基于相界面随动热源模型的激光穿孔过程动态模拟

徐方超¹, 王志东¹, 佟玲^{1*}, 徐哲¹, 孙凤¹, 张晓友²¹ 沈阳工业大学机械工程学院, 辽宁 沈阳 110870;² 日本工业大学机械工学科, 日本 埼玉 345-8501

摘要 激光穿孔是现代工业生产中重要的加工手段。明晰激光穿孔过程中激光热源、辅助气体与被加工物间的作用机理及被加工物的多相流变化过程,对指导实际生产工作至关重要。本文提出一种相界面随动热源模型,旨在动态模拟 3 mm 钢板的激光穿孔过程,揭示其穿孔加工机理。首先,融合相变界面随动热源模型与辅助气体模型建立激光穿孔模型,规划计算流程,对激光穿孔过程进行多场耦合多相流动态模拟;其次,分别对穿孔相变的温度场及流场结果进行分析,明晰穿孔过程中金属的相变过程、熔池的温度变化过程,金属液相随辅助气体的流动过程。分析结果表明,采用相变界面随动热源模型的仿真结果可有效模拟激光穿孔加工的动态过程,揭示其作用机理。

关键词 激光技术; 热源模型; 热流固耦合; 数值模拟

中图分类号 TG480

文献标志码 A

doi: 10.3788/CJL202249.0202004

1 引言

近年来随着重工业、船舶、航空航天的发展,产品更新速度加快,传统的加工技术已经很难满足加工工艺要求,如微精小孔的加工、复合材料的高精度加工^[1-2],因此突破传统加工的特种加工发挥着越来越重要的作用。激光加工工艺已被机械制造行业视为标准工艺^[3],广泛应用于工件切割作业中。激光切割作为特种加工的一种,凭借其柔性好,噪声低,效率高,适应性强等优点^[4],应用领域越来越广泛。激光切割对结构复杂,高硬脆性金属或非金属材料可以实现快速切割,广泛应用于机车,计算机行业,在加工工艺中具有重要的作用。近年来,大量学者对激光切割过程及切割机理进行研究,主要在提高激光切割质量和效率^[5]方面。

孙凤等^[6-9]认为辅助气体的动力学性能和热源分布对激光切割过程有着显著的影响。胡俊等^[10]研究了辅助气体对激光穿孔的影响,证明喷嘴出口处正激波是造成喷嘴处压力损失的主要原因。庞盛永^[11]建立了一种三维瞬态小孔与瞬态熔池相结

合的数学模型,并且对该数学模型进行了验证。Courtois 等^[12]提出了激光反射的热源模型,并举例讨论了这种模型的可靠性与局限性。

而王言金等^[13-17]提出了水平集法(level set)和界面追踪方法(VOF)的耦合界面捕捉方法,模拟深熔焊小孔形成过程,通过编程建立了自适应深度的激光热源,得到了不同时刻下小孔深度变化的特征。张斌等^[14]建立了激光深熔焊模型并进行了仿真,结果表明:在穿孔过程中,底部的熔融物在蒸发驱动力下沿着小孔壁面向上流动,熔融物在力的平衡作用下可能在孔壁的某一处聚集。吴家洲等^[18-19]对激光穿孔点焊瞬态过程进行了数值模拟,在焊接初期,匙孔在反冲压力等因素的影响下会出现不同方向的震荡,金属表面的等离子气对小孔的稳定性有着重要的影响。当匙孔逐渐变深的时候,匙孔状态变得稳定。Zhao 等^[20]通过建立一种考虑等离子体、液态金属和固态金属的激光焊接小孔模型,对激光焊接和气孔现象进行了研究,研究结果表明:连续的激光焊接过程中会产生小孔深度波动现象。

以上学者分别研究了辅助气体和热源对穿孔过

收稿日期: 2021-03-02; **修回日期:** 2021-04-07; **录用日期:** 2021-05-12

基金项目: 国家自然科学基金(52005345,52005344),辽宁省教育厅项目(LJGD2019011, LFGD2020002),辽宁省“兴辽英才计划”项目(XLYC1802077, XLYC1905003),辽宁省重点实验室建设项目(2020JH6/10500048)

通信作者: *tonglingsy@163.com

程的影响。本文利用相界面随动热源与气流场耦合对激光穿孔过程进行分析,通过 VOF 方法研究激光穿孔中热流固耦合作用,能有效反映激光穿孔过程中匙孔内部流场与温度场的动态变化,为激光穿孔提供技术支持和理论依据。

2 激光穿孔多相流模型建立

2.1 激光穿孔原理

激光穿孔是使用经聚焦的高能量密度激光束照射材料表面,在多次反射作用下激光能量被材料吸收,使材料表面迅速熔化、气化、烧蚀或达到燃点,同时借助高压辅助气体吹除熔融物质,从而实现材料

打孔的一种热加工方法^[21]。激光穿孔过程示意图如图 1 所示,为了反映气相与铁相之间的相互作用,以气相作为第一相,铁相作为第二相;铁相与气相之间互不相容;使用热流固多相流模拟分析激光穿孔过程。本文以相随动热源模型为激光热源,将温度场和流场进行耦合分析。匙孔内部的铁相在熔化、吹除过程中,分析铁的熔化凝固作用、相变作用、热传导作用、热对流作用、辅助气体对匙孔内的剪切力作用。气与液/固界面决定了穿孔形貌,利用 VOF 跟踪气-液/固液面;实时捕捉铁与气相界面,在铁与气相之间添加相界面随动热源;采用焓-孔介质法^[22]求解铁的相变过程。

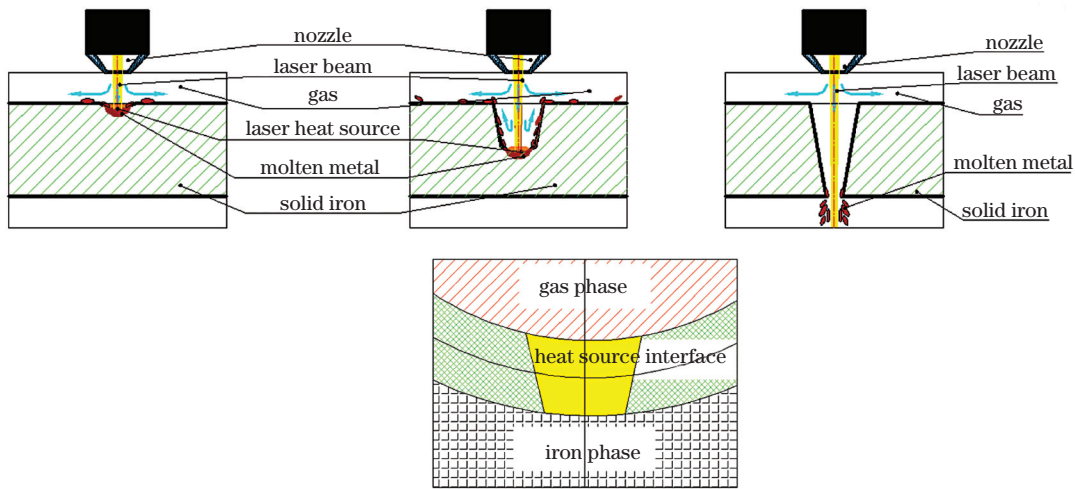


图 1 激光穿孔原理。(a)穿孔初期;(b)穿孔中期;(c)穿孔时刻;(d)相界面随动热源模型示意图

Fig. 1 Principle of laser perforation. (a) Early stage of perforation; (b) middle stage of perforation; (c) time of perforation; (d) schematic diagram of phase-interface-based heat source model

穿孔是气液固多相流模型,激光穿孔的过程较为复杂,为了保证计算和仿真的可行性,做以下几点假设:

- 1) 流体为不可压缩流体,流动模型为层流模型;
- 2) 将铁与氧气反应产生的热量位置与激光热源位置重合;
- 3) 多重反射效应只发生在匙孔底部附近区域内。

2.2 热源模型的建立

激光穿孔过程中光束与材料的作用主要为匙孔内部的菲涅耳吸收、逆韧性吸收和熔融铁的热对流与热传导等,由于激光的热源分布在实验中难以获得,确定激光热源的分布范围比较困难。前人用体热源或者时变高斯分布面热源,难以准确反映激光穿孔中热源分布^[12],本文提出相界面随动热源模型。热源输入位置随气相与铁相界面移动而变化,穿孔过程示意图如图 1(d) 所示。

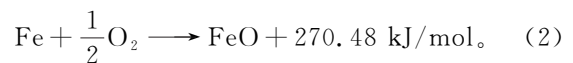
在热源范围分布方面,水平方向的热源位置限定在以激光轴线为轴心、以光斑大小为直径的圆柱体范围内;在垂直方向捕捉铁相体积分数大于 0 小于 1(铁相与气相界面)的位置。在水平和垂直方向的限定下,激光热源总是捕捉在匙孔底部,为不规则曲面体热源,热源随匙孔深度运动(图 1)。

在功率分布方面,目前激光光源热量分布难以确定,高斯分布与实验结果吻合性较好,以源相形式添加到能量方程中,其中激光光源的分布为高斯分布,热源通过捕捉相界面的范围进行添加,表达式如下

$$q_f(x, y) = q_{\max} \exp(-Ax^2 - By^2), (x - \mu)^2 < r^2, \quad (1)$$

式中, q_f 为热量功率, q_{\max} 为中心热量功率分布。

氧气作为辅助气体,氧气与铁的反应不可忽略,氧气与铁放热方程如下



穿孔过程中氧化反应放出的热量^[23] 计算如下

$$J_{ox} = \frac{ShD}{d} \cdot \frac{P_0}{\gamma R T_0} \ln\left(\frac{1 - \gamma C_{eq}(T)}{1 - \gamma C}\right), \quad (3)$$

式中, D 是混合气体中的氧扩散常数, P_0 和 T_0 是切割切口混合气体的总压力和温度, R 是通用气体常数, γ 表示反应过程中气体体积的变化(在气体吸收的情况下, $\gamma=1$), d 是穿孔直径, $C_{eq}(T)$ 是温度相关的平衡氧的摩尔分数, C 是气体射流中氧的摩尔分数。对于通道中的湍流, 舍伍德数 $Sh=0.023Re^{0.8}Sc^{0.4}$, 式中, $Re=U_0d/\nu_0$ 是雷诺数, $Sc=\nu_0/D$ 是施密特数 (ν_0 和 U_0 是气体的运动速度和黏度)。

在铁相中, 添加的热源以热传导、热对流的方式进行传递与吸收, 吹除熔融物过程中, 热量主要以热对流的方式散失, 其主控方程如下

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho H) + \nabla \cdot (\rho v H) = \nabla \cdot (k \nabla T) + S, \quad (4)$$

$$H = h + \Delta H, \quad (5)$$

$$h = h_{ref} + \int_{T_{ref}}^T c_p dT, \quad (6)$$

$$\Delta H = \alpha L, \quad (7)$$

式中, H 为焓, h 为显焓, ρ 为密度, v 为流体速度, S 为源项 [$S=q_f(x, y)$], 材料的焓 H 是显焓 h 和潜热 ΔH 之和, h_{ref} 为材料参考焓, T_{ref} 为参考温度, T 为温度, c_p 为定压比热容, β 为流体体积分数。在铁相中, α 表示某一单元液体体积分数, 当流体体积分数 $\alpha=1$ 时, 代表铁相为熔融铁, 当 $\alpha=0$ 时, 铁相为固体铁, 单元内液相体积分数计算如下

$$\begin{cases} T < T_{solid}, & \alpha = 0 \\ T > T_{liquid}, & \alpha = 1 \\ T_{solid} < T < T_{liquid}, & \alpha = \frac{T - T_{solid}}{T_{liquid} - T_{solid}} \end{cases}. \quad (8)$$

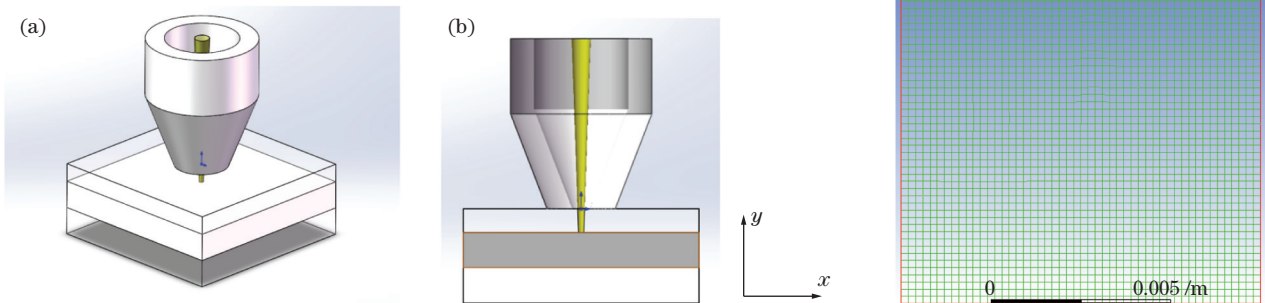


图 2 激光穿孔模型。(a)激光穿孔几何模型;(b)激光穿孔几何模型对称截面;(c)网格模型

Fig. 2 Laser perforation model. (a) Laser perforation geometric model; (b) symmetrical section of laser perforation geometric model; (c) grid model

2.3 流体模型的建立

在激光穿孔计算过程中, 辅助气体与熔融物同为流体, 通过对流体场的动量修正进行流固耦合。忽略铁溶液的热膨胀效应对激光穿孔过程进行模拟。辅助气体的分布函数如下

$$S = P \cdot \exp\left(-\frac{(x-d)^2}{r^2}\right), \quad |x-d| < r, \quad (9)$$

式中, P 为中心压力, r 为喷嘴半径, d 为辅助气体距离坐标轴的距离。辅助气体压强分布函数通过边界条件的形式添加到计算模型中。采用焓-孔介质技术处理固化熔融问题。固体凝固与熔化过程中的动量损失表达式^[24] 如下

$$S = \frac{(1-\beta)^2}{(\beta^3 + \epsilon)} A_{mu} (v - v_p), \quad (10)$$

式中, β 为流体体积分数, ϵ 为防止被 0 除的小数 0.001, A_{mu} 为糊状区常数, v_p 为将固相物质拉出该区域所引起的固相速度, v 为固相附近的流体速度。当体积分数 $\beta=1$ 时, 动量损失为 $S=0$ 。

以氧气作为辅助气体, 辅助气体需要具有一定速度和压力为吹除熔融物提供动量。在铁相与气相互不相容的前提下, 同一动量控制方程中气液两相不同的黏度使得气体可为熔融物提供剪切力, 即: 单一的动量方程组所求解的速度适用于单元体中任何一相。整个区域的动量主控方程如下

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho v) + \nabla \cdot (\rho v v) = -\nabla p + \nabla \cdot [\mu(\nabla v + \nabla v^T)] + \rho g + S, \quad (11)$$

式中, ρ 为密度, p 为流体压力, μ 为液态金属相的动力黏度系数, g 为重力加速度, 指向 y 轴负方向, S 为源项, v 为速度。

2.4 仿真模型的建立

在仿真模型中使用的三维模型如图 2 所示, 为

了简化计算区域,计算模型使用轴对称二维模型。如图 2(b)所示,垂直方向为 y 方向,水平为 x 方向。使用 mesh 划分四边形网格,网格大小为 0.1 mm,如图 2(c)所示。对铁相与气相进行区域划分,如图 3 所示,其中,体积分数为 1 的区域为铁相,体积分数为 0 的部分为气相;热源和辅助气体施加在 $x = 0.005$ m 的激光轴线上。为了后期温度场与流场的数据监测,在模型中上建立 $0 \sim 0.003$ m 的水平线。

模型中的仿真参数皆采用实际参数。表 1 为激光穿孔过程中固体铁与熔融铁的物理参数;表 2 为辅助气体的物理参数;表 3 为运行参数。

表 1 固体铁与熔融铁的物理参数

Table 1 Physical parameters of solid iron and molten iron

Physical parameters of solid iron		Physical parameters of molten iron	
Solid density / $(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	7850	Liquid density / $(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	7800
Specific heat of solid phase / $[\text{J} \cdot (\text{kg} \cdot \text{K})^{-1}]$	480	Specific heat of liquid phase / $[\text{J} \cdot (\text{kg} \cdot \text{K})^{-1}]$	480
Thermal conductivity of solid phase / $[\text{W} \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1}]$	81	Liquid thermal conductivity / $[\text{W} \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1}]$	81
Latent heat of melting / $(\text{J} \cdot \text{kg}^{-1})$	275000	Liquid viscosity / $[\text{kg} \cdot (\text{m} \cdot \text{s})^{-1}]$	0.001
Surface tension coefficient / $(\text{N} \cdot \text{m}^{-1})$	2.07	Liquidus temperature / K	1820
Solidus temperature / K	1800	Vaporization temperature / K	3023

表 2 辅助气体的物理参数

Table 2 Physical parameters of auxiliary gas

Physical parameters	Value
Density / $(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	1.225
Specific heat / $[\text{J} \cdot (\text{kg} \cdot \text{K})^{-1}]$	1006.43
Thermal conductivity / $[\text{W} \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1}]$	0.0242
Viscosity / $[\text{kg} \cdot (\text{m} \cdot \text{s})^{-1}]$	1.789×10^{-5}

表 3 运行与环境参数

Table 3 Operation and environmental parameters

Physical parameters	Value
Operating pressure / Pa	101325
Acceleration of gravity / $(\text{m} \cdot \text{s}^{-2})$	9.81
Auxiliary gas pressure / MPa	0.5
Thickness of steel sheet / mm	3
Heat source power / $(\text{W} \cdot \text{m}^{-3})$	3×10^{12}
Nozzle diameter / mm	1.5
Operating temperature / K	299.18

在激光热源模型与辅助气体模型建立完成后,进行在辅助气体作用下的激光穿孔仿真数值模拟。将热源模型和辅助气体模型添加到控制方程中,并通过更新时间步长,结合自由界面定位和实时跟踪小孔深度,实现对激光穿孔的仿真。计算流程如图 4 所示。

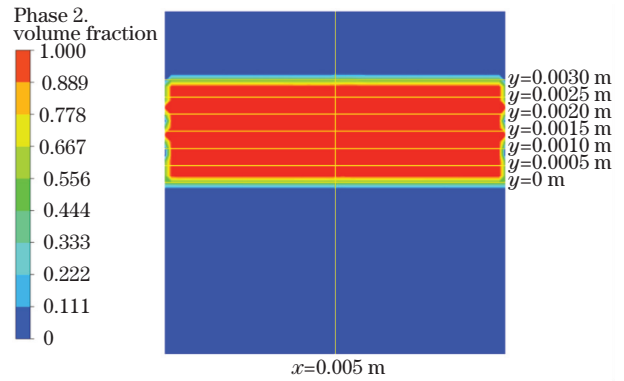


图 3 铁相与气相界面示意图

Fig. 3 Diagram of interface between iron and gas phases

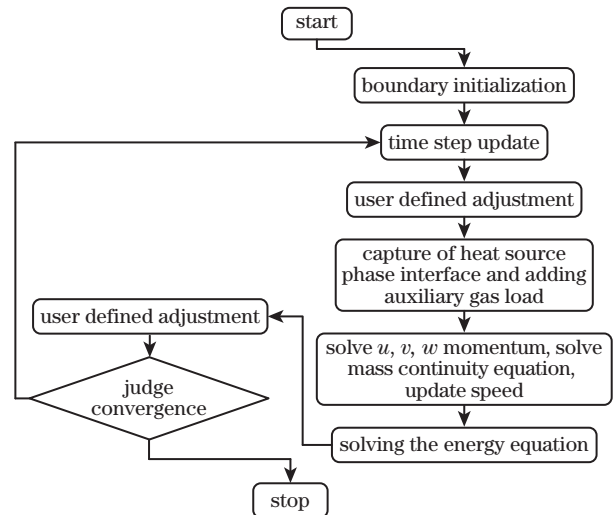


图 4 激光穿孔数值计算流程图

Fig. 4 Flow chart of numerical calculation of laser perforation

3 温度场相变过程分析

图 5 为激光穿孔过程中不同时刻铁相与气相分布云图。体积分数为 1 的区域为铁相区域,随着孔的加深,热源捕捉在匙孔的底部。在穿孔初期,匙孔会出现微小的水平方向震荡,随着匙孔变深,小孔在垂直方向趋于稳定。在匙孔顶部熔融物吹除的过程中,匙孔顶部聚集大量的热量,导致匙孔的上侧孔径较大,下侧孔径较小。在辅助气体将熔融物吹除的

过程中,由于热传导、热对流的作用,熔融物会在匙孔周围再次凝固,由图 5 可以看到匙孔两侧均有经

吹除匙孔后冷却形成的铁相。

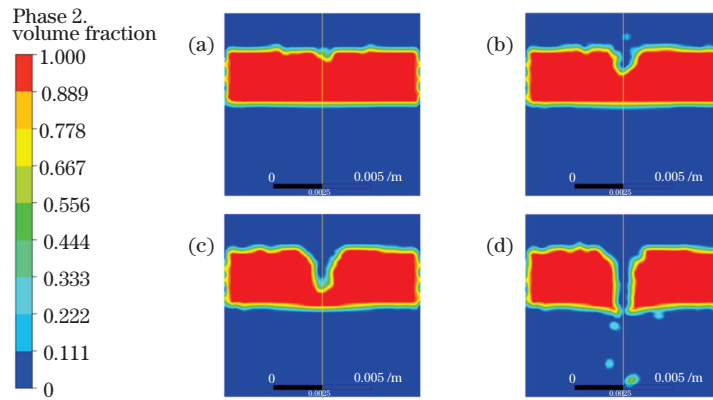


图 5 铁相与气相不同时刻分布云图。(a) $t=0.022$ s;(b) $t=0.044$ s;(c) $t=0.088$ s;(d) $t=0.1102$ s

Fig. 5 Cloud diagram of iron phase and gas phase at different time. (a) $t=0.022$ s; (b) $t=0.044$ s; (c) $t=0.088$ s; (d) $t=0.1102$ s

在穿孔过程中不同时刻温度分布云图如图 6 所示,在整个穿孔过程中,温度中心为热量输入中心;温度分布两侧对称,并以辐射状向周围逐渐降低。穿孔初期,在铁相表面吹除熔融物,所以铁相上表面温度

分布范围要大于铁相内部,铁相内部的温度分布范围呈半圆形状。当匙孔具有一定深度时,由于氧气的比热容大于铁,传热系数远小于铁,所以在热对流的作用下,温度分布在上侧出现缺口,如图 6(c)、(d)所示。

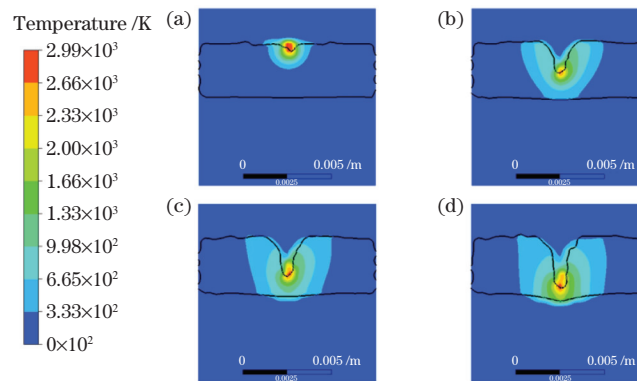


图 6 $x=0.005$ m 时,不同时刻温度场分布云图。(a) $t=0.044$ s;(b) $t=0.066$ s;(c) $t=0.088$ s;(d) $t=0.11$ s

Fig. 6 Temperature field distribution nephogram at different time when $x=0.005$ m. (a) $t=0.044$ s; (b) $t=0.066$ s; (c) $t=0.088$ s; (d) $t=0.11$ s

图 7 为在 $x=0.005$ m 时,不同时刻激光轴线上 0.0025 m $< y < 0.01$ m 的温度分布。由图 6、7 可知,随着匙孔深度的加深,在热传导的作用下,热量分布范围呈增加趋势。在 $t=0.022$ s 时,穿孔初期传热效率较低,热量输入中心温度为 2995.17 K,随着匙孔深度的加深,热量输入中心温度开始降低。当 $t=0.066$ s 时,输入中心的温度仅为 2553.2 K,之后趋于稳定。图 8 为 $t=0.044$ s、 0.066 s、 0.088 s、 0.11 s 时的熔融物体积分数云图,结合图 7、8 可知,在激光轴线上,随着热源的向下移动,温度分布(图 7)曲线的最大值随之向下移动,并且温度 $T > 1000$ K 的范围变大。在一定程度上,随着匙孔深度的加深,热量堆积呈增加趋势。

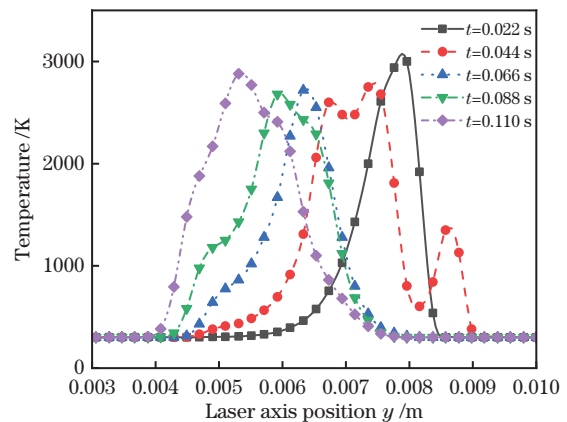


图 7 不同时刻激光轴线上的温度分布

Fig. 7 Temperature distribution on laser axis at different time

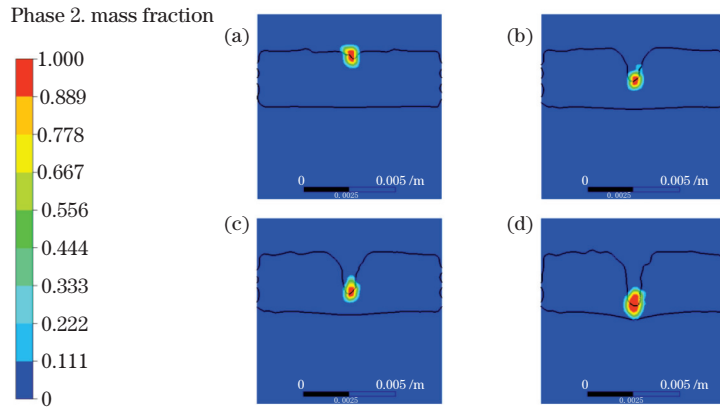


图 8 熔融物体积分数云图。(a) $t=0.044$ s; (b) $t=0.066$ s; (c) $t=0.088$ s; (d) $t=0.11$ s

Fig. 8 Cloud chart of the integral number of the melt. (a) $t=0.044$ s; (b) $t=0.066$ s; (c) $t=0.088$ s; (d) $t=0.11$ s

图 9、10 分别为穿孔时刻铁相分布云图与温度分布云图。在穿孔的一瞬间匙孔的底部熔融物在辅助气体压力与自身重力的作用下,迅速被吹除,并且带走大量的热量。由于表面张力的作用,熔融物在铁相下表面形成熔渣,如图 9 所示,在穿透的一瞬间匙孔变为通孔,由于孔中辅助气体的速度迅速增加,

孔中间温度迅速降低。

图 11 为穿孔时刻不同水平线($y=0\sim 0.003$ m)上的温度分布。由图可知,在 $y=0.003$ m 位置上的温度分布。由于辅助气体的影响,中间温度低于两侧温度,在 $y<0.003$ m 的位置,温度梯度增加。如表 4 所示,在 $y=0$ m 位置上,熔融孔中心最低温度为 1502 K;当 $y>0$ m 时,孔中心的最低温度降低。

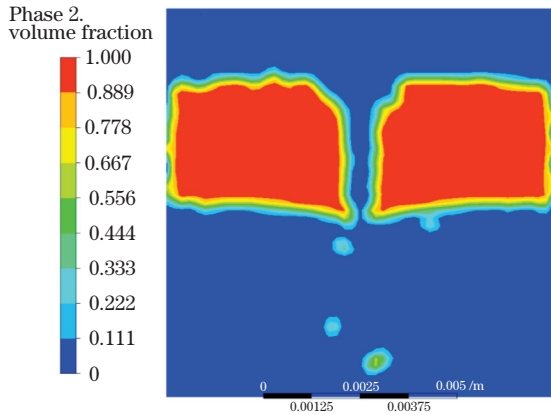


图 9 穿孔时刻铁相分布云图

Fig. 9 Cloud diagram of iron phase distribution at perforation time

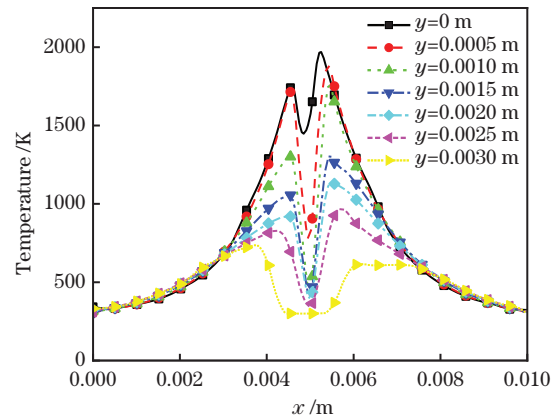


图 11 不同水平线上温度分布

Fig. 11 Temperature distribution on different horizontal lines

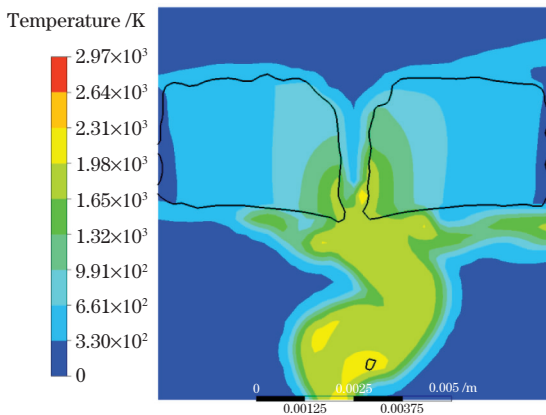


图 10 穿孔时刻温度分布云图

Fig. 10 Temperature distribution at perforation time

表 4 不同水平线上孔中心温度

Table 4 Hole center temperature on different horizontal lines

Level	Hole center temperature
$y=0$ m	1502.41
$y=0.0005$ m	784.41
$y=0.001$ m	463.14
$y=0.0015$ m	426.81
$y=0.002$ m	406.02
$y=0.0025$ m	349.39
$y=0.003$ m	300.04

4 流场过程结果分析

对流场进行分析可知,压力分布随着相分布而时刻变化,图 12、13 分别为 $t=0.044\text{ s}$ 、 0.066 s 、

0.088 s 、 0.11 s 时辅助气体压力分布云图与速度云图。由图 12 可知,在穿孔前期匙孔较浅,压力中心在上半部分对称分布,随着匙孔的深度加深,压力中心也随着向下移动。

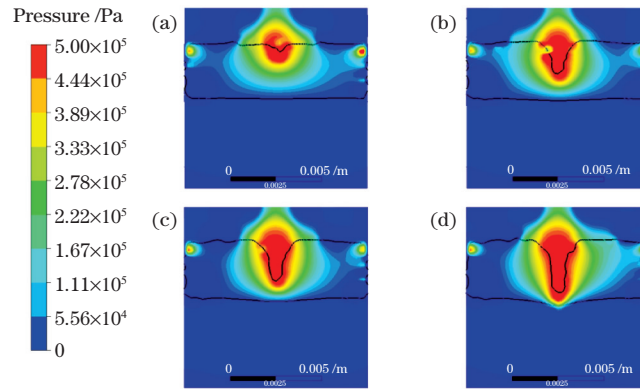


图 12 不同时刻压力分布云图。(a) $t=0.044\text{ s}$; (b) $t=0.066\text{ s}$; (c) $t=0.088\text{ s}$; (d) $t=0.11\text{ s}$

Fig. 12 Pressure distribution nephogram at different time. (a) $t=0.044\text{ s}$; (b) $t=0.066\text{ s}$; (c) $t=0.088\text{ s}$; (d) $t=0.11\text{ s}$

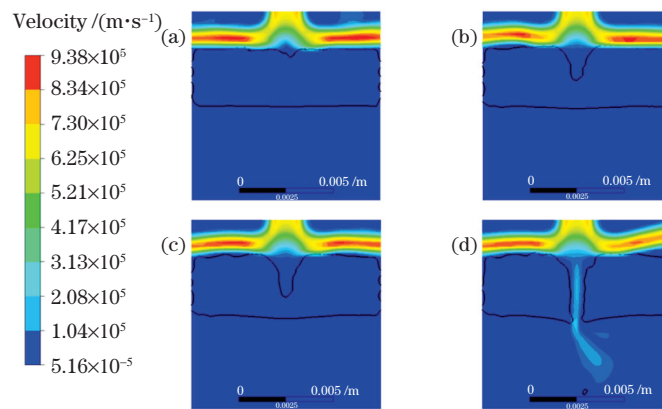


图 13 不同时刻速度云图。(a) $t=0.044\text{ s}$; (b) $t=0.066\text{ s}$; (c) $t=0.088\text{ s}$; (d) $t=0.11\text{ s}$

Fig. 13 Velocity nephogram at different time, (a) $t=0.044\text{ s}$; (b) $t=0.066\text{ s}$; (c) $t=0.088\text{ s}$; (d) $t=0.11\text{ s}$

图 14 为激光轴线上不同时刻压力分布曲线,结合图 12、13 可知,在穿透之前,随着匙孔的加深,高压分布区域向下推进,匙孔内的压力值维持在 0.5 MPa 。但从穿孔时刻开始,孔内速度开始上升,压力开始降低,在 $t=0.11\text{ s}$ 时,在 $0.005\text{ m} < y < 0.007\text{ m}$ 的区域压力为 0.4 MPa ,熔融孔内的气体将压力能转化为动能,压力降低,速度提高。由图 12(b)、(c) 可以发现,熔融物在飞溅过程中存在不确定性,因此在熔融飞溅的位置可能会出现真空区。

观曲线。匙孔速度较浅时,匙孔底部速度较大;随着匙孔变深,匙孔底部的速度也呈下降趋势。

图 15 为激光轴线上辅助气体与熔融物的速度分布的宏观曲线。在穿孔之前,激光轴线上速度分布基本相同,且速度较小。当穿孔之后孔中心速度上升;穿过铁相后,由于压力能减少,流动区域增大,从而速度减小。图 16 为激光轴线上速度分布的微

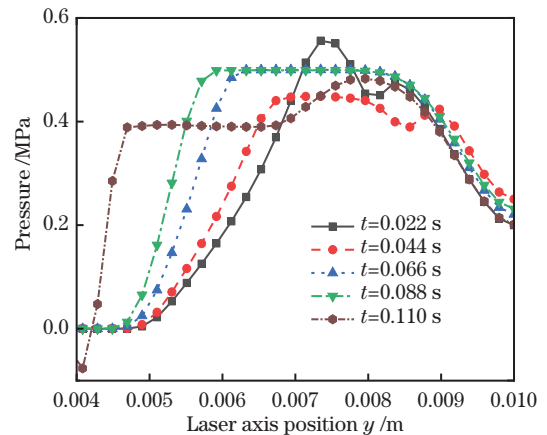


图 14 激光轴线 ($x=0.005\text{ m}$) 上压力分布

Fig. 14 Pressure distribution on laser axis ($x=0.005\text{ m}$)

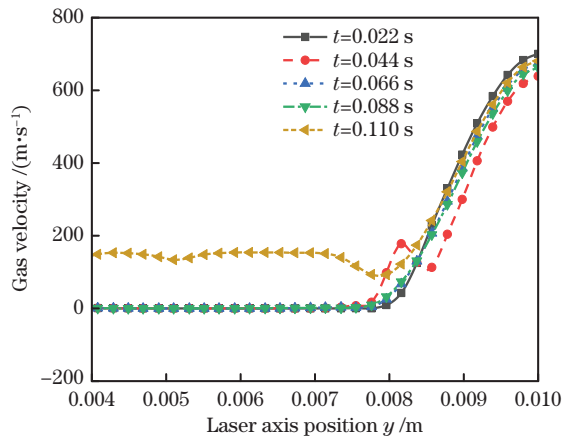


图 15 激光轴线上 ($x=0.005$ m) 的速度分布
Fig. 15 Velocity distribution on the laser axis
($x=0.005$ m)

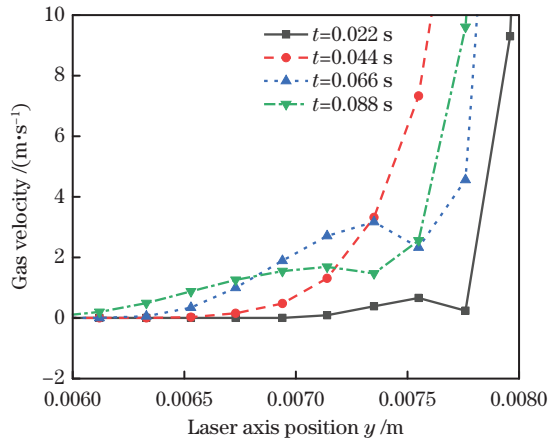


图 16 激光轴线上 ($x=0.005$ m) 辅助气体速度分布
Fig. 16 Velocity distribution of auxiliary gas
on laser axis ($x=0.005$ m)

图 17 为 $y=0.0025$ m 时, y 方向的速度分布图, 在 $t=0.022$ s 时穿孔中心速度为 0, 两侧为负, 此时的辅助气体向两侧流动。当 $t>0.022$ s 时, 匙孔中辅助气体流向一侧为正, 一侧为负, 这表明随着

匙孔深度的加深, 辅助气体在匙孔内部只沿着匙孔一侧进入, 另一侧流出; 随着匙孔变深, 辅助气体速度呈下降趋势。在 $t=0.088$ s 时, 此时在匙孔底部的速度小于 2 m/s, 由于速度的减少, 匙孔内部的液相提供的剪切力小于穿孔初期辅助气体对匙孔内部提供的剪切力, 而热源输入不变, 所以随着匙孔深度的加深, 匙孔内部速度下降, 辅助气体对熔融物的吹除能力下降。

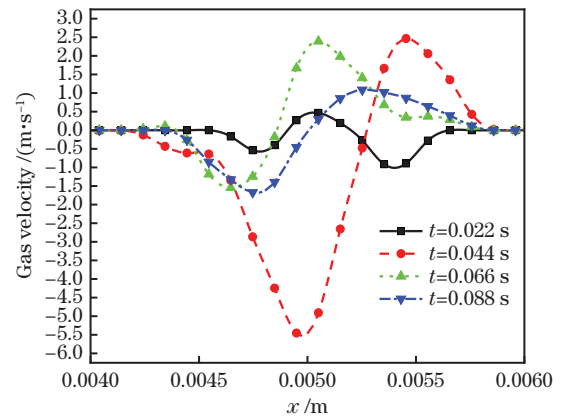


图 17 $y=0.0025$ m 水平线上辅助气体 y 方向速度分布
Fig. 17 Velocity distribution of auxiliary gas in y direction
along the horizontal line of $y=0.0025$ m

5 激光穿孔验证实验

使用 K-800-13M 型 YAG 激光切割机 (最大输出功率为 800 W) 进行穿孔实验, 采用圆锥形喷嘴, 激光电流为 180 A, 频率为 210 Hz, 辅助气体为氧气, 压力为 0.5 MPa, 切割的低碳钢 3 mm 厚。首先使用激光切割机对穿孔的不同阶段进行穿孔实验, 随后将断面切开, 将断面用细砂纸磨至光滑, 用激光显微镜进行观察, 对匙孔进行分析。图 18 为处理后的激光穿孔断面。



图 18 激光穿孔断面
Fig. 18 Laser perforation section

使用激光显微镜观察发现, 穿孔过程中产生的熔融物不能及时吹除时会在冷却后形成重铸层, 因此在实验中可以用孔重铸层数量来判断穿孔过程中产生的热量堆积。图 19 为不同孔深激光穿孔断面形貌, 由图 19(a)、(b) 可知, 随着激光孔深的增加, 孔底直径开始变小。图 19(d)、(e) 为激光穿孔过

程中不同孔深的重铸层局部图像。由图 19 可知, 随着孔深的增加重铸层随之增加, 这表明, 孔深的增加会使辅助气体吹除能力下降, 进而导致更多的熔融物不能被吹除, 从而在冷却之后形成更多的重铸层。图 19(c) 为激光穿孔仿真实验对比图, 实验结果与仿真结果相吻合。

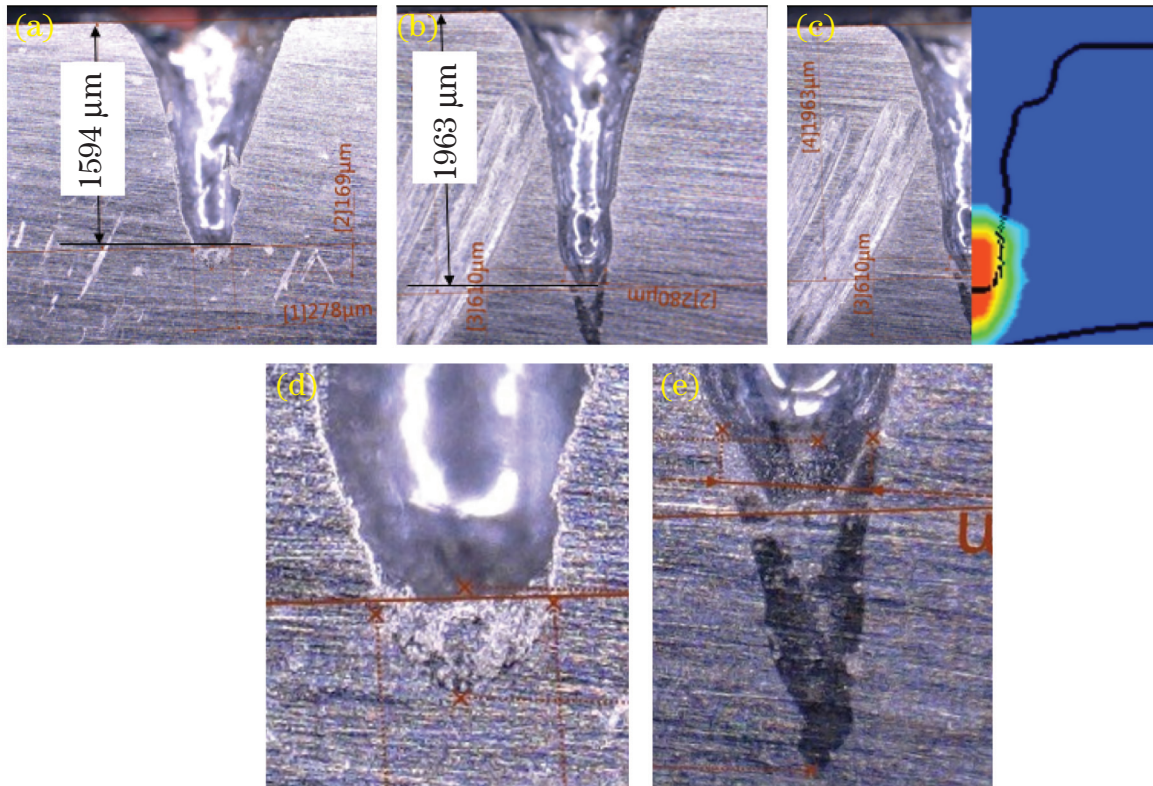


图 19 不同孔深激光穿孔断面形貌。(a) $H=1594 \mu\text{m}$; (b) $H=1963 \mu\text{m}$; (c) 实验仿真对比;
(d) $H=1594 \mu\text{m}$ 重铸层范围; (e) $H=1963 \mu\text{m}$ 重铸层范围

Fig. 19 Cross section morphology of laser perforation with different hole depths. (a) $H=1594 \mu\text{m}$; (b) $H=1963 \mu\text{m}$;
(c) experimental simulation comparison; (d) $H=1594 \mu\text{m}$ recast layer range; (e) $H=1963 \mu\text{m}$ recast layer range

6 结 论

提出了相界面热源模型,并结合激光穿孔过程中的热流固耦合作用,对 3 mm 钢板的激光穿孔过程进行温度场和流场分析,模型真实反映了温度场与流场的动态过程,计算结果能有效说明激光热源和辅助气体对穿孔过程的影响。

模拟结果表明:在激光穿孔初期,在辅助气体与热源的影响下,匙孔吹除能力较强,两侧堆积物较少,小孔在水平方向有轻微震荡;随着匙孔的加深,匙孔形态趋于稳定,匙孔中心在气体热对流的影响下有所降低,辅助气体吹除能力减弱,导致匙孔底部熔融物增多,验证性实验表明:随着孔深的增加,熔融物呈增加趋势,与仿真结果相吻合。

相界面随动热源模型能更实际地模拟出激光穿孔过程中的温度场与流场的相互作用,能真实反映出激光穿孔过程中的热量堆积作用,可为激光穿孔过程提供理论依据。

参 考 文 献

[1] Zhang X C, Qian J, Fu Q, et al. Cutting of PBO

fiber-reinforced composites using picosecond lasers [J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47 (10): 1002004.

张学聪, 钱静, 付强, 等. 皮秒激光切割 PBO 纤维增强复合材料[J]. 中国激光, 2020, 47(10): 1002004.

[2] Wang K, Wang X Y. Experimental study on laser cutting of copper steel laminates by pretreatment method [J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48 (6): 0602105.

王坤, 王续跃. 预处理法铜-钢层合板激光切割试验研究[J]. 中国激光, 2021, 48(6): 0602105.

[3] Ge J Q, Qin Y X, Liu X D, et al. Design of variable spot and zoom optical system for laser cutting [J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39(2): 0222001.

葛佳琪, 秦应雄, 刘晓东, 等. 变斑变焦激光切割光学系统的设计 [J]. 光学学报, 2019, 39 (2): 0222001.

[4] Chen Z Z. Application of laser processing technology in construction machinery manufacturing [J]. Modern Manufacturing Technology and Equipment, 2018 (11): 141, 143.

陈章智. 激光加工技术在工程机械制造中的应用浅析[J]. 现代制造技术与装备, 2018(11): 141, 143.

[5] Guo H F, Li J L, Sun T. On the research progress

- of laser cutting technology [J]. Journal of Xuzhou Institute of Technology (Natural Sciences Edition), 2015, 30(4): 71-78.
- 郭华锋, 李菊丽, 孙涛. 激光切割技术的研究进展 [J]. 徐州工程学院学报(自然科学版), 2015, 30(4): 71-78.
- [6] Sun F, Song Y Y, Zhao Q L, et al. Influence of off-axis amount on dynamics performance of gas in laser cutting process [J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(4): 0402003.
- 孙凤, 宋园园, 赵庆龙, 等. 激光切割中离轴量影响气体动力学性能的研究 [J]. 中国激光, 2020, 47(4): 0402003.
- [7] Riveiro A, Quintero F, Val J D, et al. Laser cutting using off-axial supersonic rectangular nozzles [J]. Precision Engineering, 2018, 51: 78-87.
- [8] Bocksrocker O, Berger P, Fetzer F, et al. Influence of the real geometry of the laser cut front on the absorbed intensity and the gas flow [J]. Lasers in Manufacturing and Materials Processing, 2019, 6(1): 1-13.
- [9] Tan X H, Wang W, Shan J G, et al. Numerical simulation on dynamic performance of assistant gas during laser cutting process [J]. Transactions of the China Welding Institution, 2012, 33(5): 25-28, 98, 114.
- 谭向虎, 王威, 单际国, 等. 激光切割过程辅助气体动力学性能的数值模拟 [J]. 焊接学报, 2012, 33(5): 25-28, 98, 114.
- [10] Hu J, Guo S G, Luo L, et al. Dynamic characteristic analysis of impinging jet in laser drilling [J]. Chinese Journal of Lasers, 2008, 35(8): 1250-1254.
- 胡俊, 郭绍刚, 罗磊, 等. 激光穿孔中辅助气体动力学性能分析 [J]. 中国激光, 2008, 35(8): 1250-1254.
- [11] Pang S Y. A study on the transient keyhole and moving weld pool behaviors and mechanisms of deep penetration laser welding [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2011.
- 庞盛永. 激光深熔焊接瞬态小孔和运动熔池行为及相关机理研究 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2011.
- [12] Courtois M, Carin M, Masson P L, et al. A new approach to compute multi-reflections of laser beam in a keyhole for heat transfer and fluid flow modelling in laser welding [J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2013, 46(50): 505305.
- [13] Wang Y J, Feng Q J, Zhang S D. Interface capturing method of coupled Level Set and VOF [J]. Chinese Journal of Hydrodynamics, 2011, 26(2): 201-208.
- 王言金, 冯其京, 张树道. 一类 Level Set 和 VOF 的耦合界面捕捉方法 [J]. 水动力学研究与进展 A 辑, 2011, 26(2): 201-208.
- [14] Zhang B, Zhao H Y, Cai Z P, et al. Simulation of the keyhole formation during deep penetration welding using an adaptive heat source model [J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2009, 49(11): 1761-1764.
- 张斌, 赵海燕, 蔡志鹏, 等. 用自适应热源模型模拟深熔焊小孔的形成过程 [J]. 清华大学学报(自然科学版), 2009, 49(11): 1761-1764.
- [15] Wang R P, Lei Y P, Shi Y W. Numerical simulation of keyhole formation process in laser deep penetration welding [J]. Transactions of the China Welding Institution, 2010, 31(11): 38-40, 114-115.
- 汪任凭, 雷永平, 史耀武. 激光深熔焊中匙孔形成过程的动态模拟 [J]. 焊接学报, 2010, 31(11): 38-40, 114-115.
- [16] Zhang Y, Liu X X, Shi R K, et al. Numerical simulation of deep-penetration laser welding based on Level-Set method [J]. Transactions of the China Welding Institution, 2016, 37(4): 29-34, 130.
- 张屹, 刘西霞, 史如坤, 等. 基于 Level-Set 方法的小孔及熔池动态形成数值模拟 [J]. 焊接学报, 2016, 37(4): 29-34, 130.
- [17] Li Y, Feng Y H, Zhang X X, et al. A dynamic heat source model with respect to keyhole evolution in plasma arc welding [J]. Acta Metallurgica Sinica, 2013, 49(7): 804-810.
- 李岩, 冯妍卉, 张欣欣, 等. 考虑小孔演变的等离子弧焊接动态热源模型及验证 [J]. 金属学报, 2013, 49(7): 804-810.
- [18] Wu J Z, Zhang H, Li Y L, et al. Numerical analysis of transient process in laser keyholing spot welding [J]. Transactions of the China Welding Institution, 2019, 40(2): 52-57, 163.
- 吴家洲, 张华, 李玉龙, 等. 激光穿孔点焊接瞬态过程数值分析 [J]. 焊接学报, 2019, 40(2): 52-57, 163.
- [19] Wu J Z, Zhang H, Zhang Q Q, et al. Numerical simulation of temperature and velocity field in laser drilling weld [J]. Laser & Infrared, 2018, 48(1): 24-29.
- 吴家洲, 张华, 张奇奇, 等. 激光穿孔焊接过程热流场数值模拟 [J]. 激光与红外, 2018, 48(1): 24-29.
- [20] Zhao H Y, Niu W C, Zhang B, et al. Modelling of keyhole dynamics and porosity formation considering the adaptive keyhole shape and three-phase coupling during deep-penetration laser welding [J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2011, 44(48): 485302.
- [21] Chang X P, Wang D D, Wang Q. Application of laser cutting technology [J]. Automobile Applied Technology, 2020, 45(17): 127-129.

- 畅雪苹, 王丹丹, 王谦. 浅析激光切割技术的应用 [J]. 汽车实用技术, 2020, 45(17): 127-129.
- [22] Ermolaev G V, Kovalev O B. Simulation of surface profile formation in oxygen laser cutting of mild steel due to combustion cycles [J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2009, 42(18): 185506.
- [23] Voller V R, Prakash C. A fixed grid numerical modelling methodology for convection-diffusion mushy region phase-change problems [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 1987, 30(8): 1709-1719.
- [24] Voller V R, Swaminathan C R. Eral source-based method for solidification phase change [J]. Numerical Heat Transfer, Part B: Fundamentals, 1991, 19(2): 175-189.

Dynamic Simulation of Laser Perforation Based on Dynamic Phase-Interface-Based Heat Source Model

Xu Fangchao¹, Wang Zhidong¹, Tong Ling¹, Xu Zhe¹, Sun Feng¹, Zhang Xiaoyou²

¹ School of Mechanical Engineering Shenyang University of Technology, Shenyang, Liaoning 110870, China;

² Department of Mechanical Engineering Japan University of Technology, Saitama 345-8501, Japan

Abstract

Objective In recent years, with the development of heavy industry, shipbuilding, and aerospace, the speed of product renewal has been increasing, and meeting the demands of processing technology, such as microfine hole processing and high-precision processing of composite materials, has been difficult for traditional processing technology. Therefore, breaking through traditional processing and into nontraditional processing is becoming increasingly important. Laser processing technology has been regarded as the standard technology in the mechanical manufacturing industry and has been widely used in the workpiece cutting operation. As a type of nontraditional machining, laser cutting is widely used because of its good flexibility, low noise, high efficiency, and strong adaptability. In this paper, a new method is proposed for analyzing laser perforation, which is based on the coupling of a heat source and gas flow field. The volume of fluid (VOF) method is used to study the thermal fluid structure coupling effect in laser perforation. It can effectively reflect the dynamic changes in the flow and temperature fields in the keyhole during laser perforation, providing technical support and a theoretical basis for laser perforation.

Methods Laser perforation is the irradiation of the surface of a material with a focused high-energy density laser beam. Under the action of multiple reflections, the material absorbs the laser energy, causing it to melt, vaporize, ablate or reach the ignition point quickly. Simultaneously, the molten material is blown away with high-pressure auxiliary gas to realize a hot material drilling method. To reflect the interaction between the gas and iron phases, the gas and iron phases are used as the first and second phases, respectively. The iron phase is incompatible with the gas phase. The laser perforation is simulated using the thermal fluid-solid multiphase flow. In this paper, as the laser heat source, a phase-interface-based heat source model is proposed, and the temperature and flow fields are coupled. In melting and blowing out the iron phase in the keyhole, the effects of melting and solidification, phase transformation, heat conduction, heat convection, and auxiliary gas on the shear force in the keyhole were analyzed. The VOF method is used to track the gas-liquid/solid-liquid interface. The interface between the iron and gas phases is captured in real time, and a follow-up heat source is added between the iron and gas phases. The enthalpy pore medium method is used to solve the phase transformation of iron.

Results and Discussions Laser perforation is simulated in this study. In the temperature field, with the deepening of the hole, the heat source is captured at the bottom of the keyhole. In the early stage of laser perforation, the keyhole will vibrate slightly in the horizontal direction. As the keyhole gets deeper, the keyhole tends to be stable in the vertical direction (Fig. 5). The temperature center is the heat input center. The temperature distribution is symmetrical on both sides and decreases radially (Fig. 6). With the deepening of keyhole depth, heat accumulation increases (Fig. 8). Regarding the flow field, the analysis of the flow field shows that the pressure distribution changes with the phase distribution. In the early stage of laser perforation, the keyhole is shallow and the pressure center is symmetrically distributed in the upper part. With the increase in keyhole depth, the pressure center moves downward (Fig. 12, Fig. 13). With the increase in keyhole depth, the internal velocity of the keyhole decreases,

and the blowing ability of auxiliary gas to melt decreases (Fig. 17). The results show that the recast layer increases with an increase in the hole depth (Fig. 19).

Conclusions In this paper, we present a phase-interface-based heat source model and analyze the temperature and flow fields of a 3 mm steel plate during laser perforation based on the thermal fluid-solid coupling effect. The model truly reflects the dynamic process of temperature and flow fields, and the calculation results can effectively explain the influence of laser heat source and auxiliary gas on laser perforation. The simulation results show that, in the early stage of laser perforation, under the influence of auxiliary gas and heat source, the keyhole has a stronger blowing ability, fewer deposits on both sides, and slightly vibrates in the horizontal direction. With the increase in keyhole depth, the keyhole shape tends to be stable, the keyhole center is reduced under gas thermal convection, and the auxiliary gas' blowing ability is weakened, increasing the amount of molten matter at the bottom of the keyhole. The confirmatory experiment results show that the amount of molten matter increases with an increase in the hole depth, which is consistent with the simulation results. The phase interface-based heat source model can simulate the interaction between the temperature and flow fields in laser perforation efficiently and can reflect heat accumulation during laser perforation. It provides a theoretical basis for laser perforation.

Key words laser technology; heat source model; thermal fluid-solid coupling; numerical simulation