

# 开放环境下钛合金激光熔覆局部保护气体的质量分布

李刚, 张津超\*, 石世宏, 程东霖

苏州大学机电工程学院, 江苏 苏州 215021

**摘要** 针对开放大气环境下钛合金激光熔覆层极易氧化的问题,设计了一种可在熔池附近形成局部气氛的同轴保护气罩。采用 FLUENT 软件建立了光内送粉同轴熔覆喷嘴的三维模型,模拟分析保护气道的入口数量、角度及保护气体流量对氩气质量分布的影响。结果表明:气罩保护气体入口数量与氩气分布的对称性有关;入口角度对氩气质量分布的影响较小;增大保护气体的流量会极大地提高有效保护范围。根据保护气罩结构优化参数,选用氩气作为保护气,进行开放大气环境下 Ti-6Al-4V 合金的激光熔覆实验,熔道表面呈银白色,熔覆层饱满,验证了同轴保护气罩的保护效果。

**关键词** 激光技术; 激光熔覆; 光内送粉; 开放环境; 三维流场; 质量分布; 数值模拟

中图分类号 TN249

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201946.0702007

## Mass Distribution of Local Shielding Gas for Laser Cladding of Titanium Alloy in Open Environment

Li Gang, Zhang Jinchao\*, Shi Shihong, Cheng Dongji

School of Mechanical and Electric Engineering, Soochow University, Suzhou, Jiangsu 215021, China

**Abstract** Considering the serious oxidation of titanium alloy induced by laser cladding in air, a coaxial nozzle with shielding gas is designed to protect the molten pool. A three-dimensional numerical model of the coaxial cladding nozzle with inside-laser powder feeding is established using FLUENT software, and the influences of the inlet number, angle, and flow rate of shielding gas on the mass fraction of argon are analyzed. The results demonstrate that the inlet number of the shielding gas is related to the symmetry of argon distribution. The inlet angle has little effect on the mass distribution of argon; however, increasing the flow rate of the shielding gas will greatly improve the effective protection domain. According to the optimized parameters of the coaxial shielding gas nozzle, the laser cladding of the Ti-6Al-4V alloy in an open environment is conducted by using argon as the shielding gas. The surface of the molten track presents silvery white and the cladding layer is fine, indicating that the coaxial gas nozzle can effectively protect the molten pool from oxidation.

**Key words** laser technique; laser cladding; inside-laser powder feeding; open environment; three-dimensional flow field; mass distribution; numerical simulation

**OCIS codes** 140.3390; 220.4610; 160.3900; 350.3390

## 1 引 言

钛合金具有比强度高以及耐热性、耐腐蚀性好等优点,被广泛应用于航空航天、化工、冶金、医疗等领域<sup>[1]</sup>。钛合金的化学活性大,在温度为 250 °C 时吸氢,400 °C 时吸氧,600 °C 时吸氮,钛合金对气体的吸收能力随着温度的升高而增强<sup>[2]</sup>。钛合金吸收过多的气体杂质后,就会生成晶间化合物,导致其力

学性能急剧降低<sup>[3]</sup>。因此,在 Ti-6Al-4V 合金激光熔覆成形过程中,采用稀有气体保护熔池以防止其吸收活性气体是保证熔覆层质量的关键。

目前,钛合金的激光熔覆是在封闭的真空手套箱内进行的<sup>[4-7]</sup>。刘宏宇等<sup>[8]</sup>用气体渗氢以及在铸锭中加入氧化物、氮化物的方法,研究了氢、氧、氮对 ZTC4 铸造钛合金力学性能的影响,得出氧气体积分数控制在 0.10%~0.15% 时,ZTC4 可获得较好

收稿日期: 2019-01-07; 修回日期: 2019-02-10; 录用日期: 2019-03-07

基金项目: 国家重点研发计划(2016YFB1100300)、国家自然科学基金(51675359)

\* E-mail: lasershare@hotmail.com

的力学性能。杨光等<sup>[9]</sup>通过循环系统和在线氧分析仪控制保护箱内氧气的体积分数,研究了成形气氛中氧含量对激光沉积 TA15 钛合金组织及力学性能的影响,结果表明,随着氧含量增加,试样的强度提高,塑性下降。通过控制气氛室中的稀有气体的含量可以有效防止熔池氧化,但是设备成本昂贵,加工零件尺寸受限,且不利于零件的现场加工或修复。冯志国<sup>[10]</sup>设计了一种局部稀有气体保护装置,该装置突破了零件尺寸的限制,但对修复零件的形状具有一定要求,且软罩无法实时移动,操作灵活性不强。因此,需要一种便携移动式稀有气体保护装置。曹娜等<sup>[11]</sup>设计了一种主保护匹配附加保护的焊接喷嘴,两路保护气体协同作用,对熔池及高温区进行保护,但侧向吹气形成的惰性保护范围具有方向性。赵恒等<sup>[12-13]</sup>设计了一种钛合金同轴激光熔覆喷嘴,但该喷嘴的有效保护气流量范围较小,而且也没有对该喷嘴保护气流的质量分布进行研究。

在稀有气体封闭箱内进行激光熔覆存在空间受限、不便移动等问题,而目前针对开放环境钛合金激光熔覆有效保护的研究报道较少。本文基于光内送粉<sup>[14]</sup>原理及喷头,设计了一种同轴保护气罩。采用 FLUENT 软件模拟了喷嘴的三维气体流场,通过计算平板拘束条件下,保护气在加工面方向以及垂直方向的质量分布,研究了保护气罩入口数量、入口角度及保护气流量对稀有气体保护范围的影响,为激光熔覆同轴保护喷嘴的结构设计以及保护气流场参数的选择提供了依据,并为实现大型钛合金部件的成形以及受损零部件的现场修复提供了技术支持。

## 2 数值模拟

### 2.1 同轴保护喷嘴模型的建立

光内同轴送粉熔覆喷嘴结构如图 1 所示。单根粉管位于环形激光内部,粉末通过载粉气输送,粉管外层设置环形准直气道,起到集束粉末和保护熔池的作用。保护气道位于环形激光束外侧,对保护气氛的形成起到决定性作用。与光外同轴熔覆喷嘴相比<sup>[12]</sup>,光内送粉喷嘴具有光束中空、粉管居中的特点,保护气道空间大,能够形成更大的有效保护范围和层流厚度。本实验选用氩气作为载粉气和保护气。气罩内部流线为多段圆弧以及直线的光滑过渡曲线,以减小气流对壁面的冲击,从而获得更稳定的气流。通过在喷嘴与基板之间形成局部惰性气氛来隔离外界空气。采用光内送粉喷头进行钛合金的激光熔覆时,在不同的工艺参数下,根据红外测温仪获

取的温度与时间之间的关系,计算得到扫描方向上熔池后方高于 400 °C 的长度为 6~8.5 mm。对于同轴的圆形保护区域,当半径方向上的高浓度惰性气氛完全覆盖该区域时,能够实现良好的防氧化效果。

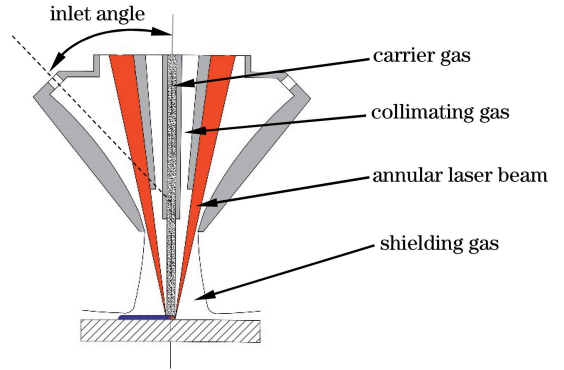


图 1 同轴熔覆喷嘴示意图

Fig. 1 Schematic of coaxial cladding nozzle

在光内同轴送粉过程中,送粉量选用 3~10 g·min<sup>-1</sup>,并且单粉束具有良好的集束特性,不易受到气流的干扰,故假设粉末的气体流场分布与载粉气一致<sup>[15]</sup>。在建立模型时只考虑三维气流流场。准直气流道和保护气流道的入口为非对称结构,CFD 模型采用三维模型,建模时去除无通道的实体区域,并简化不必要的转角及接口。

图 2 所示为同轴喷嘴流道模型,图中 inlet 1 和 inlet 2 分别为载粉气体入口和准直气体入口,inlet 3 为保护气体入口。inlet 1 和 inlet 2 的直径分别为 1.5 mm 和 3 mm;inlet 3 直径为 4 mm,各入口均垂直于气道横截面。在离焦点为 -3.5 mm 时,保护气流道底端至基板的垂直距离为 23.5 mm。建立直径为 80 mm、高 23.5 mm 的圆柱体作为空气域,以满足气体喷出喷嘴后的流动特性。outlet 1 和 outlet 2 分别为空气域出口和基板平面,outlet 3 为粉腔卸压出口,直径为 3 mm。

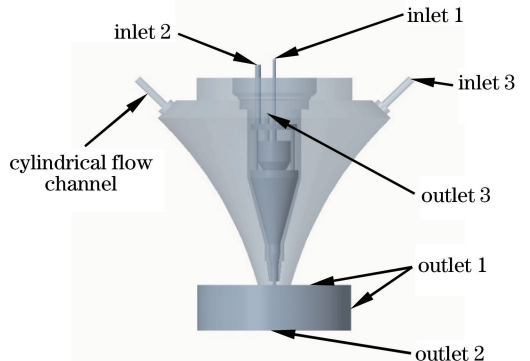


图 2 同轴喷嘴流道模型

Fig. 2 Flow channel model of coaxial cladding nozzle

为了研究保护气入口数量、角度及流量对氩气质量分布的影响,采用单因素变量法设置不同的入口参数,并计算对应的入口速度。保护气入口速度见表1。当保护气体入口采用单入口时,保护气质量分布的对称性较差;当入口数量大于6时,保护气质量分布的对称性变差,且保护气罩结构较为繁琐。同时,考虑到便于气管分流,入口数量分别采用2、3、4、6。过小的入口角度使得气罩内部流道的曲线无法光滑过渡,而过大的入口角度则会使保护气罩内的气流对准直气嘴壁面产生冲击,从而使喷嘴的出口气流变得紊乱,因此入口角度分别选用 $45^\circ$ 、 $60^\circ$ 和 $75^\circ$ 。保护气流量选用 $10\sim 50\text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ ,因为过大的气体流量会对熔池行为产生干扰,并且会增加成本。

表1 保护气的入口速度  
Table 1 Velocity of shielding gas

No.	Inlet number	Inlet angle / ( $^\circ$ )	Flow rate / ( $\text{L}\cdot\text{min}^{-1}$ )	Velocity / ( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ )
1	2	45	30	19.89
2	3	45	30	13.26
3	4	45	30	9.95
4	6	45	30	6.63
5	4	60	30	9.95
6	4	75	30	9.95
7	4	45	10	3.32
8	4	45	20	6.63
9	4	45	40	13.26
10	4	45	50	16.58

## 2.2 网格划分与边界条件

三维模型网格划分是在 ANSYS Workbench 18.0 平台中的 Mesh 模块中进行的,划分方法为 Tetrahedrons,网格生成方式为 Path Conforming。对于保护气道入口等处的圆柱形流道部分,其壁面处的流动情况更为复杂,因此选用 Inflation 对管壁处划分膨胀层网格。在修改保护气罩入口参数时,需要重新建立模型,以入口数量为4、入口角度为 $45^\circ$ 的模型划分的网格为例,生成的网格数为2240538,网格平均质量为0.70508。根据数值模拟的残差曲线收敛结果,该网格能够满足精度要求。

各气流入口平面均选用速度进口条件。载粉气入口 inlet 1 和准直气入口 inlet 2 的气体流量分别为 $3\text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ 和 $10\text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ ,经计算得到对应的入口速度分别为 $28.29\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 和 $23.58\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。根据2.1节确定的参数范围,可得到保护气入口 inlet 3 的速度参数,结果如表1所示。各气体入口的组分

均设置为体积分数为99.99%的氩气,其余部分为空气。空气域出口 outlet 1 和粉腔卸压出口 outlet 3 设置为压力出口条件,绝对压强为 $101325\text{ Pa}$ 。基板平面 outlet 2 相当于熔覆时基板的上表面,设置为壁面边界条件。

## 3 结果与讨论

### 3.1 氩气质量分布与流场分析

图3是表1中编号3对应的氩气质量分数云图以及对应的气体流线图。从图3(a)中可以看出,保护气流场可分为3个不同的特征区域:自由射流区、基板表面层流区和周围回流区。自由射流区呈近似的圆柱状,流场能够保持稳定的流态。气体流线呈现为较好的平行关系,说明准直气、保护气和载粉气均为层流,并且未出现紊流流动和上升气流。气流冲击基材表面后沿基板向四周扩散流动,形成具有一定厚度的基材表面层流区。熔池附近的层流厚度较大,可将熔池与外界空气隔离开。较远处的气体可对离开保护喷嘴处的已成形表面进行笼罩拖尾,加快其冷却速度。图3(b)是保护气在基材表面的质量分布,保护区域呈圆形,各向氩气质量分布较均匀。保护气体为层流时,能够较好地隔离外界空气,因此层流区域的有效保护范围对激光成形区的保护起到决定性作用。根据模拟所得数据与实验结果之间的对比分析,定义氩气质量分数超过96%所覆盖的区域为有效保护范围,其直径为有效保护长度。编号3参数下的层流有效保护长度为18.91 mm,层流厚度为1.7~4.8 mm。周围回流区位于层流区上方,呈现出大尺度的旋涡<sup>[13,16]</sup>。回流区会扰动喷嘴周围的空气,使其被无序流动的湍流吸入喷嘴保护气流区域,降低保护气流外围氩气的浓度。

### 3.2 保护气入口数量及角度的影响

图4和图5是表1中编号1~4所对应的基材平面上的横向氩气质量分布,保护气入口数量 $n$ 分别为2、3、4和6。从图中可以看出:随着入口数量增加,保护气体的质量分数和有效保护长度均呈增大的趋势,当入口数量从2个增加至4个时,氩气的最高质量分数从99.7997%增加至99.8559%,有效保护长度从16.74 mm增加至18.91 mm;当入口数量增加到6时,虽然最高质量分数增加至99.8865%,但氩气的质量分布对称性变差,使得有效保护长度减小至17.61 mm。气流的对称性变差会导致在进行同轴送粉激光熔覆时,气流的保护效果具有方向性,从而使得熔覆层出现氧化程度不均



的现象<sup>[3]</sup>。对于入口数量为 3 和 4 的结构,氩气的有效保护范围近似为圆形,质量分布具有良好的对称性,有效保护长度分别为 17.93 mm 和 18.91 mm,半径方向上的长度分别为 8.965 mm 和 9.455 mm,

均大于扫描方向上熔池后方最大高温区长度 (8.5 mm),说明此时能够对熔池及周围高温区进行良好的保护。

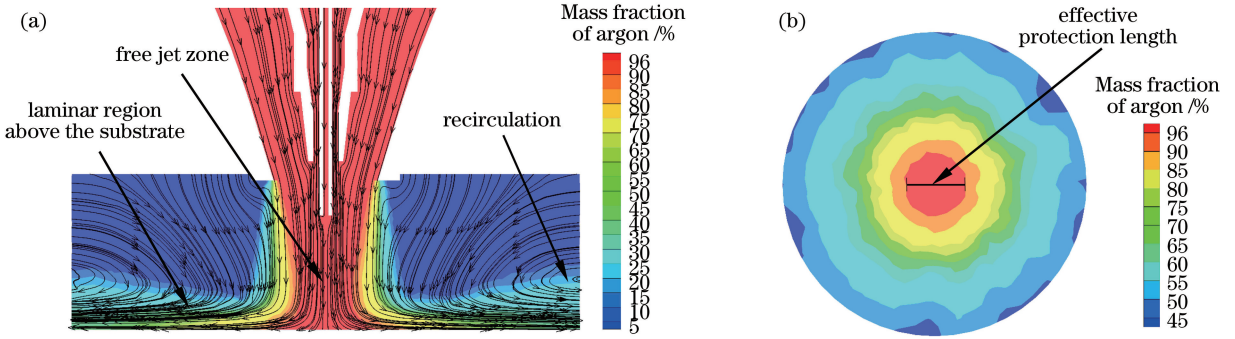


图 3 氩气质量分数分布云图。(a)基于质量分数云图的保护气体流线图;(b)基材表面保护气体的质量分布

Fig. 3 Contours of mass fraction of argon. (a) Streamline chart of shielding gas based on contour of mass fraction; (b) mass distribution of shielding gas above substrate

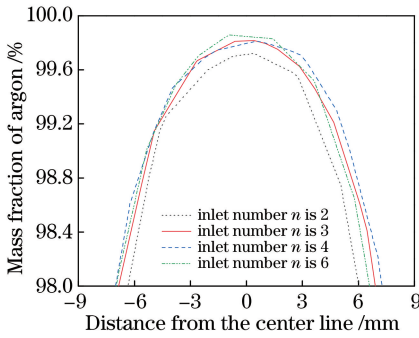


图 4 保护气体入口数量对氩气质量分数的影响  
Fig. 4 Effects of shielding gas inlet numbers on mass fraction of argon

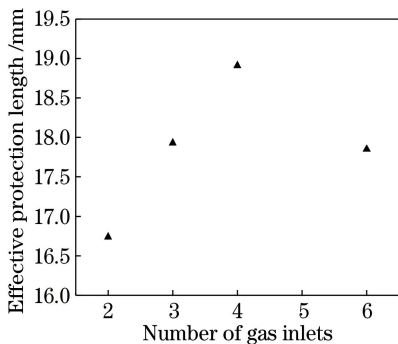


图 5 保护气体入口数量对有效长度的影响  
Fig. 5 Effects of shielding gas inlet numbers on effective protection length

选取入口数量为 4,入口角度分别为 45°、60°、75°,研究入口角度对氩气质量分布及有效保护长度的影响。研究发现,入口角度对氩气质量分布和有效保护长度的影响较小,但当入口角度为 75°时,气流的对称性明显变差。根据模拟所得的压力云图分

析后认为,当入口角度较大时,气流进入保护气流道后,对准直气嘴壁面产生冲击,使喷嘴出口气流变得紊乱。当入口角度为 45°和 60°时,气流具有良好的对称性,有效保护长度分别为 18.91 mm 和 18.85 mm,能对熔池及高温区进行有效保护。

### 3.3 保护气流量的影响

图 6 为不同流量下的氩气质量分布曲线,可见:当气体流量小于 40 L·min<sup>-1</sup>时,氩气的质量分数和有效保护长度均会随着气体流量的增大而迅速增大;当气体流量为 10 L·min<sup>-1</sup>时,最大的氩气质量分数为 93.7191%,小于 96%,故不存在有效的保护范围;气体流量从 20 L·min<sup>-1</sup>增加至 40 L·min<sup>-1</sup>时,最高氩气质量分数增加了 0.45%,有效保护长度增加了 47.85%;当气体流量大于 40 L·min<sup>-1</sup>时,由于气流受到喷嘴出口尺寸的限制,氩气质量分数和有效保护长度的增加速率减小。气体流量在合适的范围内时,能够在熔池以及周围高温区形成良好的惰性气氛,但过大的气体流量会使到达熔池附近的气体压强太大,从而对熔池的行为产生干扰<sup>[17]</sup>,影响熔覆质量。当气体流量在 30~40 L·min<sup>-1</sup>范围内时,可得到 18.91~21.44 mm 的有效保护长度,半径方向上的长度分别为 9.455 mm 和 10.72 mm,能够较好地保护熔池及高温区;当气体流量增加至 50 L·min<sup>-1</sup>,有效保护长度仅增加至 22.23 mm。

## 4 实验验证

根据上述数值模拟结果可知,当保护气罩的入口数量为 3 或 4、入口角度为 45°~60°时,气流具有

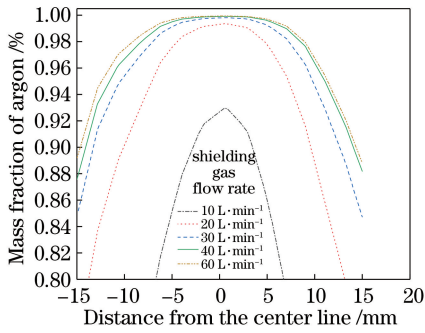


图 6 保护气体流量对有效范围的影响

Fig. 6 Effect of flow rate of shielding gas on effective protection domain

较好的保护效果。故选取入口数量为 4、入口角度为  $45^\circ$  的保护气罩在开放环境下进行激光熔覆钛合金实验。激光器采用 IPG 公司的 YLS-2000-TR 光纤激光器,采用光内送粉激光熔覆喷头,基体与粉末材料均为 Ti-6Al-4V 合金,载粉气、准直气、保护气均为氩气。激光功率为 1000 W,扫描速度为  $4 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ ,离焦量为  $-3.5 \text{ mm}$ ,送粉量为  $4 \text{ g}\cdot\text{min}^{-1}$ ,保护气流量为  $10\sim 40 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ 。图 7 为不同保护气流量下得到的单道熔覆层的宏观形貌,可以看出:当保护气流量为  $30 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$  和  $40 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$  时,气体保护效果较好,熔覆层为银白色。与文献[13]相比,熔覆层表面更加光滑、光亮。当保护气流量为  $20 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$  时,熔覆层发生轻微氧化,表面呈轻微黄色。当保护气流量减小至  $10 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$  时,熔覆层氧化严重,出现深黄色以及蓝色区域,与模拟分析结果一致。

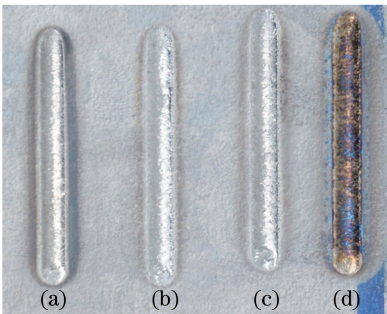


图 7 不同保护气体流量下 Ti-6Al-4V 单道熔覆层的外观。(a)  $20 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ ; (b)  $40 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ ; (c)  $30 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ ; (d)  $10 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$

Fig. 7 Exterior of single cladding layers of Ti-6Al-4V alloy under different flow rates of shielding gas. (a)  $20 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ ; (b)  $40 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ ; (c)  $30 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ ; (d)  $10 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$

根据单道熔覆实验结果,选取图 7(b)中对应的工艺参数,进行大气环境下的钛合金激光熔覆搭接

实验。图 8(a)为水平面上的横向搭接(5 道),搭接率为 33%。可以看出,熔覆层表面未出现氧化变色。图 8(b)为垂直面上的纵向搭接(7 层),z 轴提升量为 0.4 mm。可以看出,熔覆层侧壁和表面均未出现明显的氧化。结果表明,在进行多道搭接时,保护气罩同样具有良好的防氧化效果。

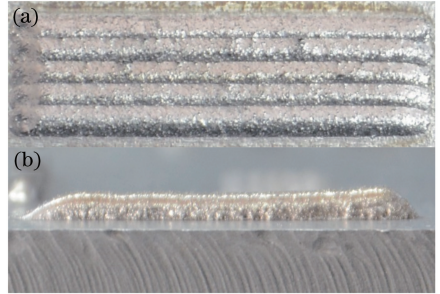


图 8 Ti-6Al-4V 多道搭接熔覆层的成形形貌。

(a)多道单层;(b)单道多层

Fig. 8 Morphologies of multi-track-overlapped cladding layers of Ti-6Al-4V alloy. (a) Multi-track and single layer; (b) single-track and multilayer

在钛合金的激光熔覆过程中,熔覆层在扫描方向以及横截面方向具有不同的散热情况,所以这两个方向上高于氧化温度的区域具有明显的差异。对于横截面方向,采用对比热影响区范围与有效保护长度的方法。对于扫描方向,通过红外测温仪获取的温度数据计算出熔覆时高于  $400 \text{ }^\circ\text{C}$  的范围,并与有效保护长度进行对比。

分析氩气的保护效果时,选取图 7 中保护气流量为  $40 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$  的单道熔覆层进行研究。图 9 是熔覆层及热影响区的实验结果,测量得到热影响区的范围为  $2.93 \text{ mm}$ ,远小于数值模拟中所得氩气的有效保护范围( $21.44 \text{ mm}$ ),说明保护气流能够对熔覆层横截面方向进行较好的保护。图 10 是采用红外测温仪获取的扫描方向上一点的温度随时间的变化曲线,由图可知,热源前方的温度梯度较大,因此熔池后方高于  $400 \text{ }^\circ\text{C}$  的区域比前方大得多。根据图 10 中曲线得到的高温停留时间以及扫描速度 ( $4 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ ),计算得到熔池后方高温区域的长度为  $8.2 \text{ mm}$ 。而  $40 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$  参数下半径方向上的有效长度为  $10.72 \text{ mm}$ ,因此可以得出,该参数下的保护气能在扫描方向和横截面方向上形成有效保护。

采用 ON836 氧氮分析仪测量图 9 所示钛合金单道熔覆层中氧的质量分数,结果为  $0.163\%$ 。根据国家标准 GB/T 3620.1—2016<sup>[18]</sup>,TC4 钛合金中的氧元素质量分数不大于  $0.2\%$ 。可见,采用本文所提

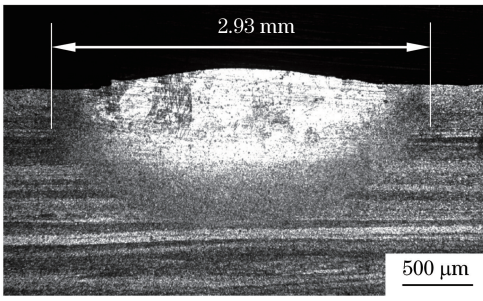


图 9 单道熔覆层的横截面形貌

Fig. 9 Cross-section morphology of single-track cladding layer

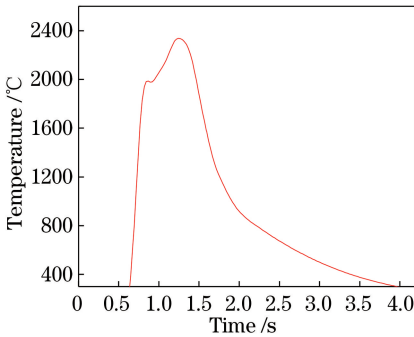


图 10 扫描方向上一点的温度变化曲线

Fig. 10 Curve of temperature variation at one point in scanning direction

同轴保护气罩制备的钛合金熔覆层中的氧含量符合国家标准。

## 5 结 论

设计了一种同轴保护气罩,采用 FLUENT 软件分析了保护气道的入口数量、角度及保护气流量对氩气质量分布的影响,得出如下结论:随着保护气入口数量增加,氩气的最高质量分数和有效保护长度增大,但过多的入口数量会使氩气的质量分布对称性变差;入口角度对氩气质量分布的影响较小;增大保护气流量会极大地提高有效保护范围;在合适的工艺参数下获得了银白色的熔覆层,说明所设计的同轴保护气罩具有良好的抗氧化效果。

通过同轴保护气罩获得了良好的熔覆层,但未对成形性能进行系统分析。下一步计划进行激光熔覆沉积成形实验,进一步分析样件的组织、性能与工艺参数的关系。

## 参 考 文 献

[1] Li J F, Wei Z Y, Lu B H. Research progress on technology of selective laser melting of titanium and titanium alloys [J]. Laser & Optoelectronics

Progress, 2018, 55(1): 011402.

李俊峰,魏正英,卢秉恒. 钛及钛合金激光选区熔化技术的研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2018, 55(1): 011402.

[2] Liu X, Zhao X J, Gong S L, *et al.* Influence of hydrogen on microstructure of TA15 titanium alloy [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2010, 20(S1): 178-182.

刘昕,赵秀娟,巩水利,等. 氢对 TA15 钛合金微观组织的影响[J]. 中国有色金属学报, 2010, 20(S1): 178-182.

[3] Zou S. Study on gas shielding technology for titanium alloys laser welding[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2016: 56-75.

邹帅. 钛合金激光焊接气体保护技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2016: 56-75.

[4] Arcella F G, Froes F H. Producing titanium aerospace components from powder using laser forming[J]. JOM, 2000, 52(5): 28-30.

[5] Wang H M, Zhang L Y, Li A, *et al.* Progress on laser melting deposition processing and manufacturing of advanced aeronautical metallic structural materials and coatings[J]. Heat Treatment of Metals, 2008, 33(1): 82-85.

王华明,张凌云,李安,等. 高性能航空金属结构材料及特种涂层激光熔化沉积制备与成形研究进展[J]. 金属热处理, 2008, 33(1): 82-85.

[6] Gong X Y, Liu M K, Li Y, *et al.* Research on repair of TC11 titanium alloy components by laser melting deposition process [J]. Chinese Journal of Lasers, 2012, 39(2): 0203005.

宫新勇,刘铭坤,李岩,等. TC11 钛合金零件的激光熔化沉积修复研究[J]. 中国激光, 2012, 39(2): 0203005.

[7] Zhou Q J, Yan Z Y, Han X, *et al.* Microstructure and mechanical properties of laser melting deposited TC11 titanium alloys[J]. Chinese Journal of Lasers, 2018, 45(11): 1102005.

周庆军,严振宇,韩旭,等. 激光熔化沉积 TC11 钛合金的组织与力学性能[J]. 中国激光, 2018, 45(11): 1102005.

[8] Liu H Y, Zhao J, Xie H S, *et al.* Effect of gas elements on mechanical properties of ZTC4 cast titanium alloy [J]. Foundry, 2012, 61(9): 1006-1008, 1014.

刘宏宇,赵军,谢华生,等. 气体元素对 ZTC4 铸造钛合金力学性能的影响[J]. 铸造, 2012, 61(9): 1006-1008, 1014.

[9] Yang G, Feng Z G, Qin L Y, *et al.* Effects of oxygen content in the argon shielding gas on microstructure and mechanical properties of laser

- deposition manufactured TA15 titanium alloy [J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2017, 46(6): 1650-1655.
- 杨光, 冯志国, 钦兰云, 等. 成形气氛中氧含量对激光沉积 TA15 钛合金组织及力学性能的影响[J]. *稀有金属材料与工程*, 2017, 46(6): 1650-1655.
- [10] Feng Z G. Study on partial protection of laser deposition manufacturing TA15 titanium alloy in inert gas[D]. Shenyang: Shenyang Aerospace University, 2017: 18-22.
- 冯志国. 激光沉积 TA15 钛合金惰性气体局部保护研究[D]. 沈阳: 沈阳航空航天大学, 2017: 18-22.
- [11] Cao N. The study on working head for titanium laser welding [D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2006: 27-39.
- 曹娜. 钛合金激光焊接工作头研制[D]. 北京: 北京工业大学, 2006: 27-39.
- [12] Zhang D Y, Zhao H, Gao Z P, *et al.* A direct manufacturing method of rapid prototyping titanium alloy part in air: CN201410147260.1 [P]. 2014-04-30.
- 张冬云, 赵恒, 高志鹏, 等. 一种在空气中直接制造钛合金零件的快速成形方法: CN201410147260.1 [P]. 2014-04-30.
- [13] Zhao H. Numerical simulation and optimization of shield gas flow field for titanium alloy parts laser rapid forming [D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2014: 1-15.
- 赵恒. 激光制造钛合金零件过程中喷嘴保护气流场模拟及结构优化[D]. 北京: 北京工业大学, 2014: 1-15.
- [14] Shi S H, Fu G Y, Wang A J, *et al.* In-light powder feeding process and in-light powder feeding nozzle manufactured by laser processing: CN200610116413.1 [P]. 2008-03-26.
- 石世宏, 傅戈雁, 王安军, 等. 激光加工成形制造光内送粉工艺与光内送粉喷头: CN200610116413.1 [P]. 2008-03-26.
- [15] Dong C H, Yao J H, Hu X D, *et al.* Three dimensional numerical simulation of coaxial powder feeding flow with carrying gas[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2010, 37(1): 261-265.
- 董辰辉, 姚建华, 胡晓冬, 等. 激光熔覆载气式同轴送粉三维气流流场的数值模拟[J]. *中国激光*, 2010, 37(1): 261-265.
- [16] Pinkerton A J. Advances in the modeling of laser direct metal deposition [J]. *Journal of Laser Applications*, 2015, 27(S1): S15001.
- [17] Ham H S, Oh D S, Cho S M. Measurement of arc pressure and shield gas pressure effect on surface of molten pool in TIG welding [J]. *Science and Technology of Welding and Joining*, 2012, 17(7): 594-600.
- [18] National Technical Committee on Nonferrous Metals of Standardization Administration of China. Designation and composition of titanium and titanium alloys: GB/T 3620.1—2016 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2016.
- 全国有色金属标准化技术委员会. 钛及钛合金牌号和化学成分: GB/T 3620.1—2016 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2016.