

doi: 10.11933/j.issn.1007-9289.20180918001

开放条件下气流对激光重熔过程中氧化行为的影响

叶正挺^{1,2}, 方 铮^{1,2}, 杨高林^{1,2}, 张群莉^{1,2}, VOLODYMYR Kovalenko (乌克兰)³, 姚建华^{1,2}

(1. 浙江工业大学 激光先进制造研究院, 杭州 310014; 2. 浙江省高端激光制造装备协同创新中心, 杭州 310014; 3. 乌克兰国立科技大学 激光技术研究所, 乌克兰 基辅 03056)

摘 要: 在激光加工过程中, 保护气和载粉气对熔池氧含量有很重要的影响, 为了减少在开放条件下激光加工过程中产生的氧化, 需要研究保护气和载粉气工艺参数对激光加工过程中氧化行为的影响。以激光重熔 45 钢为例, 通过测定熔池上方气氛以及重熔后基材表层的氧含量, 对比研究了不同保护气流量、载粉气流量和离焦量对激光重熔过程中氧化行为的影响。结果表明: 气流量较低时, 气流卷吸周围空气, 载粉气流量、保护气流量以及离焦量升高会加剧激光重熔时的氧化。当载粉气流量超过 84 L/min 时, 大量氩气对周围空气进行了稀释, 熔池上方气氛中的氧含量会有所降低。但是保护气流量过高会加剧熔池飞溅。降低熔池上方气氛中氧含量的气流量工艺参数为: 保护气流量 8.5 L/min, 载粉气流量 6.5 L/min。

关键词: 激光重熔; 保护气; 载粉气; 离焦量; 氧化

中图分类号: TG174.44

文献标志码: A

文章编号: 1007-9289(2019)01-0108-09

Influence of Gas Flow on Oxidation of Molten Pool During Laser Remelting Under Open-air Condition

YE Zhengting^{1,2}, FANG Zheng^{1,2}, YANG Gaolin^{1,2}, ZHANG Qunli^{1,2}, VOLODYMYR Kovalenko³, YAO Jianhua^{1,2}

(1. Institute of Laser Advanced Manufacturing, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310014, China; 2. Zhejiang Provincial Collaborative Innovation Center of High-End Laser Manufacturing Equipment, Hangzhou 310014, China; 3. Laser Technology Research Institute, National Technical University of Ukraine, Kyiv 03056, Ukraine)

Abstract: Protective gas and carrier gas have significant effects on the oxygen content of molten pool in laser processing. To minimize the oxidation of laser processing in the air condition, the effects of protective gas and carrier gas on the oxidation of the molten pool during processing should be studied. In this research, laser remelting of 45 steel was taken as an example. The effects of protective gas flow, carrier gas flow and laser defocusing on the oxidation of the molten pool during laser remelting were investigated by measuring the oxygen content over the molten pool and laser remelted surface layer. Results show that the gas flow entrains the surrounding air when it is low. With the increase of carrier gas flow, protective gas flow and defocusing amount, surface oxidation of the substrate is aggravated during laser remelting. When carrier gas flow exceeds 84 L/min, the oxygen content over the molten pool will be reduced due to the dilution of the surrounding air by a large amount of argon. However, high flow rate aggravates the spatter of molten pool. The process parameters of reducing oxygen content in the atmosphere above the molten pool are as follows: protective gas flow is 8.5 L/min and carrier gas flow is 6.5 L/min.

Keywords: laser remelting; protective gas; carrier gas; laser defocusing; oxidation

收稿日期: 2018-09-18; 修回日期: 2019-01-05

通信作者: 杨高林 (1980—), 男 (汉), 讲师, 博士; 研究方向: 激光加工技术; E-mail: ygaolin@163.com

基金项目: 浙江省自然科学基金 (LY16E050014); 国家重点研发计划项目 (2018YFB0407300); 凝固技术国家重点实验室开放课题 (SKLSP201745)

Fund: Supported by Zhejiang Provincial Natural Science Foundation (LY16E050014), National Key R&D Program of China (2018YFB0407300) and Opening up of State Key Laboratory of Solidification Technology (SKLSP201745)

引用格式: 叶正挺, 方铮, 杨高林, 等. 开放条件下气流对激光重熔过程中氧化行为的影响[J]. 中国表面工程, 2019, 32(1): 108-116.

YE Z T, FANG Z, YANG G L, et al. Influence of gas flow on oxidation of molten pool during laser remelting under open-air condition[J]. China Surface Engineering, 2019, 32(1): 108-116.

0 引言

氧化是开放条件下激光加工金属零件的共性问题,在激光熔覆、激光淬火、激光重熔、激光增材制造中等都会遇到氧化问题^[1-4]。熔池的氧化会改变熔池成分,产生氧化物夹杂,影响性能^[5-7]。为减少氧化,提高成形性能,金属材料的激光增材制造通常在惰性气体保护箱内进行^[8-9]。而激光熔覆和激光修复,特别是针对大型件或需在设备现场进行的激光熔覆和修复加工大多只能在开放条件下进行,这时氧化会对后续激光加工产生影响。因此,如何减少激光加工过程中的氧化就十分必要。在开放环境下,大多数研究通过调整粉末成分以提高熔覆层的抗氧化性^[10-12],熔覆材料作为影响激光熔覆层性能的关键因素之一^[13],由于抗氧化的需要,这就使得熔覆粉末成分被限制,熔覆层在性能上无法达到最优状态。而气流对激光加工过程中有很大影响,目前,在气流对激光加工过程中影响的研究主要集中在气流对激光加工过程中的粉末流运动状态和浓度分布的影响^[14-15],在气流对激光加工过程中氧化行为方面的研究较少。

激光熔覆时通常产生一个较浅的碗状熔池,粉末进入熔池实现增材制造的同时,熔池的上表面和气氛中的氧进行反应产生氧化。考虑到激光熔覆时,粉末的存在会对氧化产生交互影响,从而在衡量氧化程度时较难建立相对准确的衡量指标,使问题更加复杂。因此采用激光重熔的方式产生一个和激光熔覆类似的碗状熔池,研究这种熔池在不同气流情况下的氧化规律。基于此,文中以45钢为基材,在开放环境下对比研究不同保护气和载粉气流量、离焦量对激光重熔氧化行为的影响,分析气流对开放条件下激光重熔过程中熔池氧化的影响,为在开放环境下减少激光熔覆过程中的氧化提供一定的理论依据。

1 试验

1.1 设备及材料

试验使用波长为976 nm,光斑直径为2 mm,焦距为14 mm的700 W光纤耦合半导体激光器。采用自行研制的同轴送粉装置(四束送粉管),其中载粉气喷嘴直径为1.5 mm,保护气喷嘴直径为8 mm。运动机构为史陶比尔TX90系列机械手。熔池上方气氛氧含量测定试验所用基材为钴梯形

孔的45钢(如图1),激光重熔试验所用基材为45钢平板,外形尺寸为20 mm×40 mm×10 mm,保护气、载粉气采用纯度为99.994%的氩气。

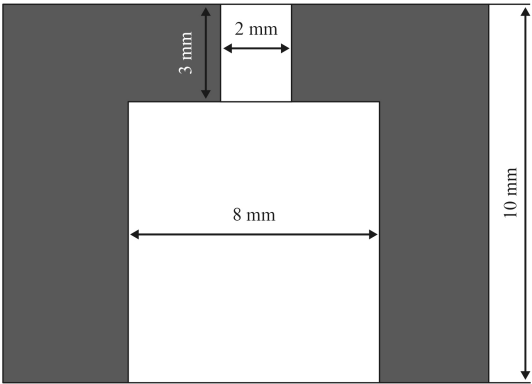


图1 梯形孔示意图
Fig.1 Schematic of trapezoidal holes

1.2 试验方法

在不同保护气流量、载粉气流量、离焦量下,通过MF5700系列气体质量流量计来测定采集的气体流量,用P860系列智能氧/氮分析仪来测定熔池上方气氛中的氧含量,用Bruker X-Flash 6130能谱仪来测定重熔后基材表层的氧含量。采集的气体流量测定的试验装置示意图如图2所示,保护气喷嘴、载粉气喷嘴产生的气流经45钢上的梯形孔(如图1所示)后流入气体质量流量

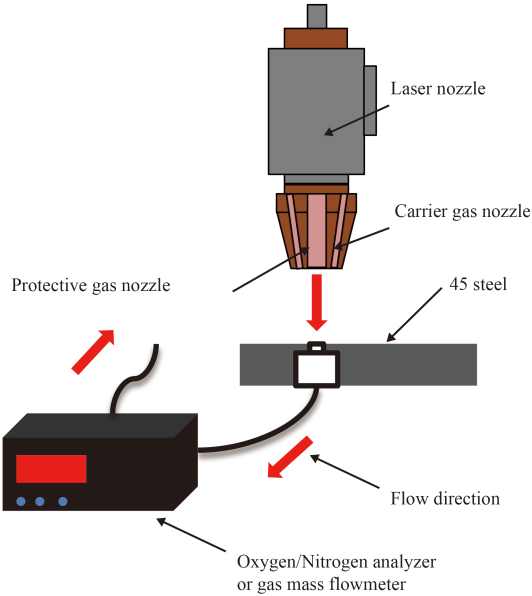


图2 气体流量及气流中氧含量测定过程示意图
Fig.2 Schematic diagram of measurement for gas flow and oxygen content in gas flow

计;熔池上方气氛的氧含量测定的试验装置示意图如图2所示,保护气喷嘴、载粉气喷嘴产生的气流经45钢上的梯形孔(如图1所示)后流入氧/氮分析仪。单束载粉管通过夹具固定在机械手臂上,其轴线与基板垂直,测量单束载粉管作用下熔池上方气氛中的氧含量。

2 试验结果

2.1 保护气流量、载粉气流量对采集气体流量的影响

图3为采集的气体流量随保护气流量、载粉气流量变化的关系。可以看出,在保护气作用下,随着保护气流量的增加,流经梯形孔后的气流流量增加,采集到的气体流量约占保护气流量的1/40;在载粉气作用下,随着载粉气流量的增加,流经梯形孔后的气流流量也随之增加,采集到的气体流量约占保护气流量的1/6。因此,开梯形孔对保护气和载粉气产生的气流影响较小。

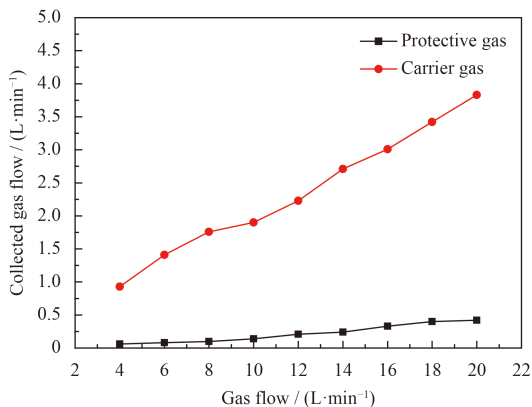


图3 保护气流量、载粉气流量对采集气体流量的影响

Fig.3 Effects of protective gas flow and carrier gas flow on collected gas flow

2.2 保护气流量、载粉气流量对激光重熔过程中氧化行为的影响

在激光焦点处,熔池上方气氛中的氧含量以及重熔区表层的氧含量随保护气流量的变化如图4所示。为防止激光重熔过程中产生的金属蒸汽对激光头的保护镜片产生污染,文中选用的最低保护气流量为4 L/min。由图4可以看出,气氛中氧含量随着保护气流量的增加而增加,并且重熔区表层的氧含量也随之增加。保护气流量从6 L/min增加到14 L/min时,气氛中的氧从0.04%增加到0.8%,重熔区表层的氧含量从

2.2%增加到5.9%。当保护气流量超过14 L/min的时候,重熔区表层的氧含量迅速上升。保护气流量超过16 L/min后,重熔区表层的氧含量不断增加但是增加的速率有所下降。重熔区表层的氧是由气氛中的氧和熔池反应得到。气氛中的氧含量越多,参与反应的氧就越多,氧化越严重。气氛中的氧和熔池反应后,接触面的氧含量会减少,后续的气流对之进行补充,流速越大,补充越快,氧化越严重。但是随着气体流量的增加,反应趋向饱和,氧化增加幅度下降。而气氛中氧含量较低时,熔池内的氧含量变化较慢是因为45钢中含有碳,碳更容易氧化并产生气体排出,使熔池得到保护。

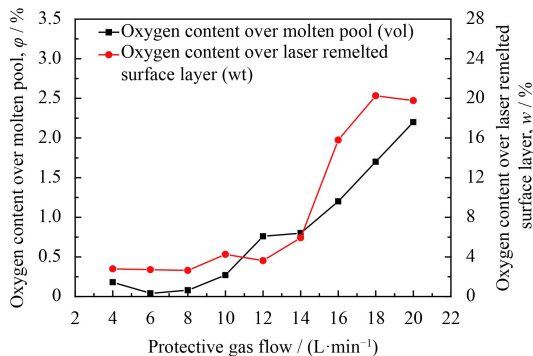


图4 保护气流量与氧元素含量的关系

Fig.4 Relationship between protective gas flow and oxygen content

在激光焦点处,不同载粉气流量下,熔池上方气氛中的氧含量以及重熔区表层的氧含量如图5所示。可以看出,熔池上方气氛中的氧含量随着载粉气流量的增加而增加。载粉气流量为6 L/min时,气氛中的氧含量(体积分数)为2.9%,远超过在保护气作用下气氛中的氧含量。重熔之

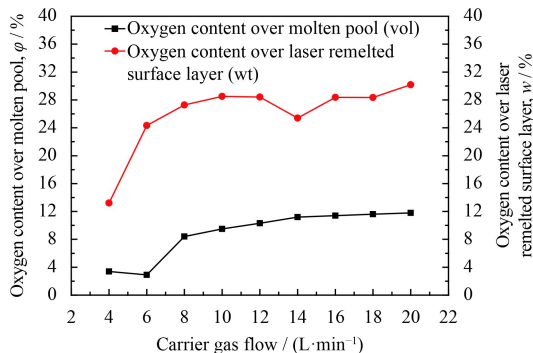


图5 载粉气流量与氧元素含量的关系

Fig.5 Relationship between carrier gas flow and oxygen content

后, 重熔区表层的氧含量也随着载粉气流量的增加而增加, 且高于在保护气作用下重熔表层的氧含量。但是随着载粉气流量增加到 8 L/min 之后, 重熔区表层的氧含量 (质量分数) 维持在 28% 左右, 而重熔后的氧化产物主要为 Fe_3O_4 (氧的质量分数 27%), 说明基材表面已经被完全氧化, 从而基材重熔区表层的氧含量几乎不再发生明显的变化。

在载粉气流量为 20 L/min 下, 激光重熔后的试样横截面的线扫描如图 6 所示, 可以看出, 沿线扫描方向, 氧元素含量突变主要发生在起始位置处, 之后氧元素含量没有多大变化, 结合 Fe 元素含量突变的位置, 可以发现氧元素发生突变位置时的峰高于 Fe 元素的峰, 因此氧元素发生突变的主要原因是该处线扫描位置是镶嵌粉。从而, 可以发现, 由于固体氧化物密度较低, 固体氧化物主要存在熔池表面, 且氧化层厚度较薄。

不同气流下的光镜纵截面如图 7 所示, 可以发现在相同的气流量下, 载粉气相对于保护气, 其气流对熔池的搅拌作用更大, 更容易造成飞溅以及重熔表面的不平整度, 熔池表面起伏更大。

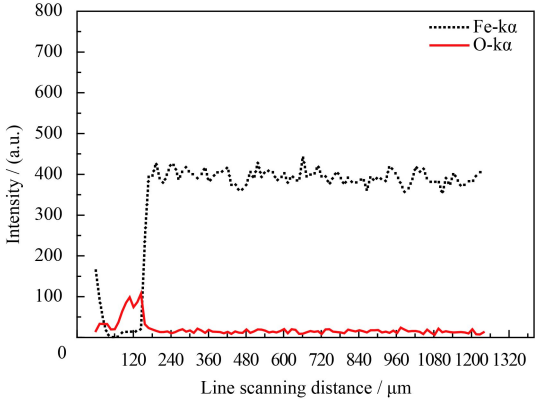
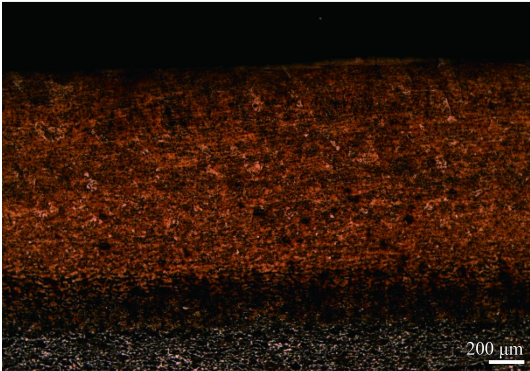


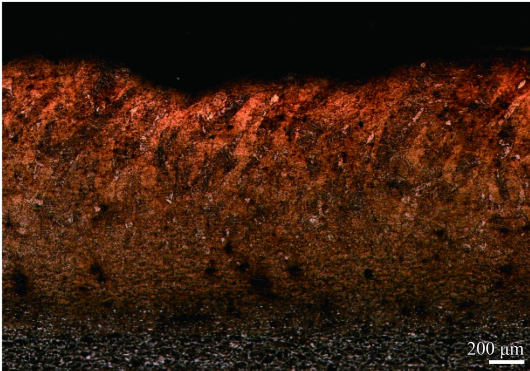
图 6 20 L/min 载粉气流量下试样的横截面线扫描

Fig.6 Line scanning in cross section of sample in carrier gas flow of 20 L/min

因此, 在相同气流量下, 造成在载粉气作用下比在保护气作用下重熔区表层的氧含量更高的原因, 除了与在载粉气作用下, 熔池上方气氛中的氧含量更高, 参与反应的氧多有关, 还与在载粉气作用下, 其对熔池搅拌作用增加促进氧与铁的接触有关, 从而更容易造成氧化。



(a) Protective gas flow, 20 L/min



(b) Carrier gas flow, 20 L/min

图 7 不同气流下试样的纵截面

Fig.7 Longitudinal section of the samples in different gas flow

2.3 离焦量对激光重熔过程中氧化行为的影响

在保护气, 载粉气, 单管载粉气单独作用下, 熔池上方气氛中的氧含量随离焦量变化如图 8 所示。从中可以看出, 在保护气、载粉气作用下, 随着离焦量数值的增加, 基材上方气氛中的氧含量随之增加。总体来看, 高气流量下气氛中的氧含量高于低气流量下气氛中的氧含量。在保护气作用下的气氛中氧含量最低, 在载粉气作用下的气氛中氧含量较高, 在单管载粉气作用下的

气氛中氧含量最高。各种条件下, 熔池上方气氛中的氧含量都随离焦量的增加而增加, 并最终趋向于空气中氧含量, 但气氛中氧含量随离焦量的变化速度有所不同。在单载粉管作用下气氛中氧含量的增加速度逐渐减慢, 而在保护气和载粉气作用下气氛中氧含量的增加速度都有一个先增加后减小的过程, 其变化速度在某一距离处有一个突变。在载粉气作用下的突变距离小于在保护气作用下的突变距离, 同时流量越小, 突变距离越大。

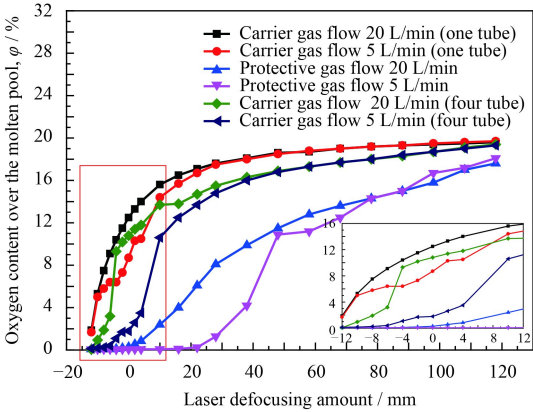


图8 离焦量与氧元素含量的关系

Fig.8 Relationship between laser defocusing and oxygen content

在不同的离焦量下，重熔区表层的氧元素质量分数如表 1 所示。可以看出，在保护气作用下，随着离焦量数值增加，基材重熔区表层的氧含量(质量分数)从 3.17% 增加到 21.44%。在载粉气作用下，重熔之后，重熔区表层的氧元素含量也随着离焦量的增大而增加。在离焦量相同的情况下，载粉气作用下的重熔区表层氧含量比保护气作用下的重熔区表层氧含量高。虽然在负离焦下进行激光重熔时能有效减少基材重熔区的氧化，但是在实际激光加工过程中需要考虑成形质量，因此需要保持正常的激光焦距，在满足成形质量要求的情况下，可以适当通过负离焦来减少激光加工过程中的氧化。

表 1 不同离焦量下的氧元素质量比

Table 1 Oxygen mass ratio of elements under different laser defocusing amount

Sample	Laser defocusing amount / mm	Protective gas flow / (L·min ⁻¹)	Carrier gas flow / (L·min ⁻¹)	Oxygen content, w / %
1	6	10	0	21.44
2	0	10	0	4.93
3	-4	10	0	3.17
4	6	0	10	24.57
5	0	0	10	22.41
6	-4	0	10	20.65

2.4 气流量工艺参数对熔池上方气氛中的氧含量影响

在激光焦点处，在不同保护气流量下，熔池上方气氛中的氧含量随载粉气流量的变化如图 9 所示。可以看出，不同保护气流量下，气氛中的氧含量随载粉气流量变化的规律基本一致，载粉

气流量的增加会使熔池上方气氛中的氧含量先迅速增加，之后增加的速率减少；当载粉气流量超过 80 L/min 时，气氛中的氧含量随之减少；随着载粉气流量的继续增加，气氛中的氧含量不再发生变化。保护气流量增加会减少气氛中的氧含量。

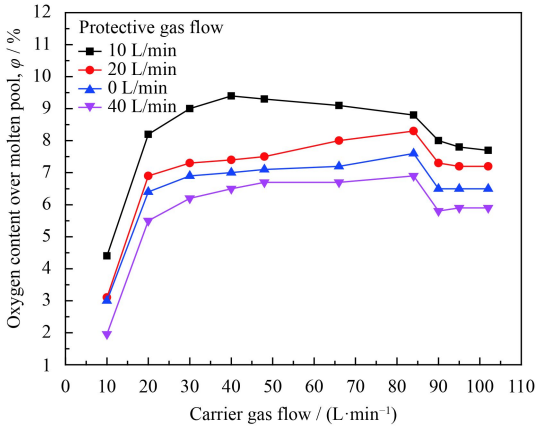


图9 不同载粉气流量对熔池上方气氛氧含量的影响

Fig.9 Effects of different carrier gas flow on oxygen content over molten pool

低气流量时，在不同载粉气流量下、气氛中的氧含量随保护气流量的变化如图 10 所示。可以看出，不同载粉气流量下，气氛中的氧含量随保护气流量变化的规律有所不同。当载粉气流量大于 6.5 L/min 时，熔池上方气氛氧含量随着保护气流量低气流量时，在不同载粉气流量下、气氛中的氧含量随保护气流量的变化如图 10 所示。可以看出，不同载粉气流量下，气氛中的氧含量随保护气流量变化的规律有所不同。当载粉气流量大于 6.5 L/min 时，熔池上方气氛氧含量随着保护气流量的增加而减少。但是当载粉气流量较小时，保护气流量的增加会引起熔池上方气氛氧含量的增加。考虑到载粉气相对保护气更容易造成熔池氧化，因此在选择降低熔池上方气氛中氧含量的气流量工艺参数时先考虑载粉气的工艺参数。从图 10 中可以看到，载粉气流量在 3.5~8.5 L/min 时，气氛中的氧含量相对较少，因此降低熔池上方气氛中氧含量的载粉气流量的工艺参数区间为 3.5~8.5 L/min。在相同的保护气流量下，熔池上方气氛中的氧含量随着载粉气流量的增加而增加。但是过低的气流量则容易使粉末在管内发生沉降，不利于粉末的输送，通过试验发现能保证稳定送粉的载粉气流量下限为 6 L/min。因此，降低熔池上方气氛中氧含量的载粉气流量的最好设

为 6.5 L/min。保护气流量选择过高时, 会降低粉末的汇聚性, 保护气流量选择过低时, 激光加工过程中产生的金属蒸汽会对激光头的保护镜片产生污染。从图 10 中可以看到, 在载粉气流量为 6.5 L/min, 氧含量先降低后增加, 保护气流量在 5 和 8.5 L/min 时氧含量相当。为了保护镜片, 在保证氧含量较低的同时增大保护气流量, 所以保护气流量在 8.5 L/min 时能更好保证激光头的保护镜片安全。因此, 降低熔池上方气氛中氧含量的保护气流量的最优工艺参数为 8.5 L/min。从而激光加工过程中降低熔池上方气氛中氧含量的气流量工艺参数为: 保护气流量 8.5 L/min, 载粉气流量 6.5 L/min。

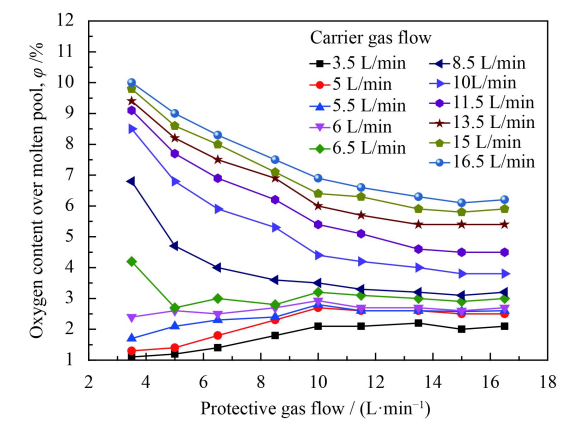


图 10 不同气流量对熔池上方气氛氧含量的影响

Fig.10 Effects of different protective gas flow on oxygen content over molten pool

3 分析与讨论

保护性气体(氩气)从喷嘴出来之后由于不再受到边壁限制先形成自由射流, 然后冲击到基材时会形成冲击射流。冲击射流的流动特征如图 11 所示, 分为 3 个区域: ①自由射流区(Free jet zone), ②滞止区域(Stagnation zone), ③壁面射流区(Wall jet zone)^[16]。在自由射流区, 根据射流在形成稳定的流动形态后, 射流按出流后是否被混掺分为 2 个区域: ①射流核心区(Core area), ②射流混合区(Mixing area)。

在自由射流区, 保护性气体(氩气)从喷嘴出来以一定速度射入空间静止的空气中时, 会与周围静止的空气形成速度不连续的间断面, 产生波动, 从而发展成涡旋, 引起紊动。湍流的脉动会将原来周围处于静止的空气卷吸到射流中, 这就

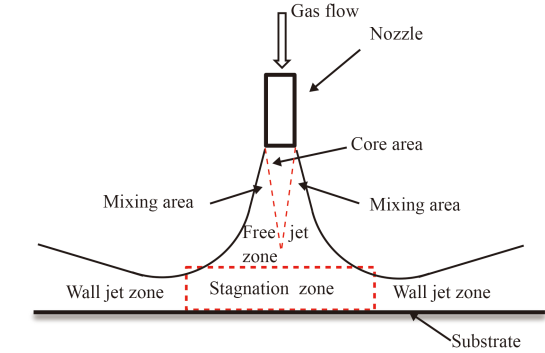


图 11 冲击射流模型

Fig.11 Impinging jet model

是射流的卷吸现象^[17-18]。被卷吸带入的空气在射流运动的过程中不断增多, 掺混区域自边缘向射流中心发展, 经过一定距离到射流中心。射流和空气的掺混区域即为射流混合区, 射流内部尚未受掺混影响的区域即为射流核心区。冲击射流在滞止区域轴向速度向横向速度转变, 紊流有所加大, 但是气流的方向平行于平板, 对中心的氧含量影响不大, 因此, 熔池上方气氛中的氧含量主要受自由射流区影响。在自由射流区的射流混合区内, 氧靠紊流从外界向内部输运; 在自由射流区的射流核心区, 氧从射流混合区向射流核心区扩散。而紊流的输送速度远超扩散的输送速度^[19], 因此, 射流混合区内的氧含量要远大于射流核心区内的氧含量。由于射流核心区内的氧含量很少, 所以射流核心区的存在会使熔池上方形成低氧的气氛保护区。

利用 ANSYS 软件, 对冲击射流进行大涡模拟, 通过涡量值的大小来反映卷吸的强弱。大涡模拟中采用亚尺度(sub grid scale, SGS)模型, 环境温度设置为 288 K, 环境压力为 1.01×10^5 Pa。在不同进口速度下的涡量图如图 12 所示。从中可以看出, 在进口速度 6 m/s 以及 20 m/s 时, 射流内部都存在涡量值为 0 的区域, 说明该区域未发生卷吸, 是射流核心区。并且进口速度为 20 m/s 时, 相对于进口速度为 6 m/s 时, 其外部涡量值较大, 说明对周围空气卷吸的强度高; 其内部涡量值为 0 的区域较小, 射流核心区尺寸较短。已有研究表明, 在一定情况下, 自由射流核心区的长度随雷诺数的增加而减少^[20]。气流量越大, 流速越大, 雷诺数越大, 射流核心区尺寸越短。

在保护气、载粉气单独作用下, 气流量 20 L/min

时，大涡模拟得到的涡量图如图 13 所示。从中可以看出，在保护气作用下，熔池上方区域的涡量值大小约为 0；而在载粉气作用下，熔池上方区域的涡量值大小约为 30 000。说明在保护气作用下，到达熔池上方区域的气流几乎没发生卷吸，处于射流核心区，氧含量较少；而在载粉气作用下，到达熔池上方区域的气流发生卷吸，与周围的空气发生混掺，氧含量较高。这是因为射流核心区区域几乎是一个等腰三角形，其尺寸与喷嘴的形状、雷诺数有关^[21-22]。喷嘴的管径越小，射流核心区的尺寸越小。由于载粉气喷嘴直径比保护气喷嘴直径小，气流动经载粉气喷嘴时形成的射流核心区尺寸更小，并且载粉气喷嘴尺寸比熔池尺寸小，从而其射流核心区形成低氧的气氛保护

区无法覆盖熔池，因此在载粉气作用下，熔池上方氧含量更高，参与反应的氧就越多，更容易发生氧化。气氛中的氧和熔池反应后，接触面的氧含量会减少，后续的气流对之进行补充，流速越大，补充越快，氧化越严重 (如图 4、图 5 所示)。

在保护气作用下，离焦量较低时，射流核心区笼罩在熔池上方，所以气氛中的氧含量较低，当离焦量较大时，射流核心区脱离熔池，使射流混合区笼罩在熔池上时，气氛中的氧含量就会迅速增加。从而从图 8 中可以看出，在保护气流量为 20 L/min 以及 5 L/min 时，随着离焦量的增加，气氛中的氧含量不断增加。在射流核心区保护时，气氛中氧含量较低，但是氧含量随着离焦量的增加依然会缓慢增加。这是因为氧会从射流

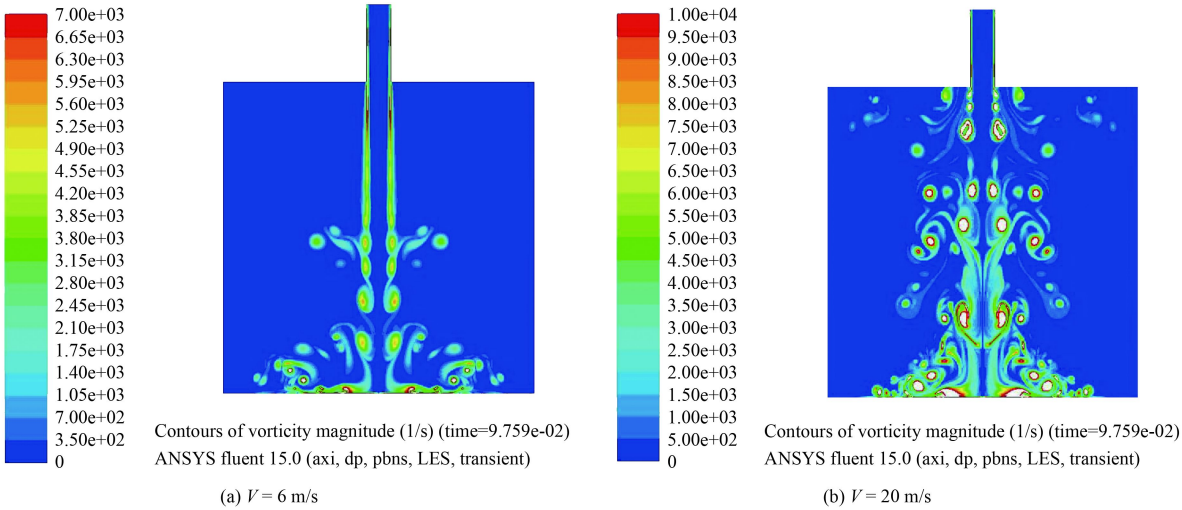


图 12 不同进口速度下的涡量云图 (1/s)

Fig.12 Contours of vorticity magnitude (1/s) with different inlet velocity

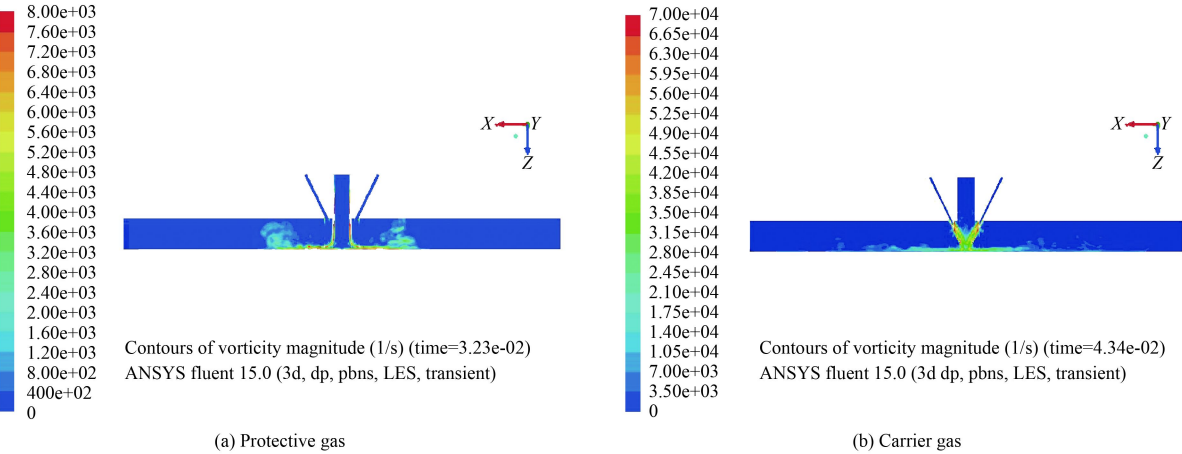


图 13 不同气流下的涡量云图 (1/s)

Fig.13 Contours of vorticity magnitude (1/s) with different gas flow

混合区向射流核心区扩散,随着离焦量的增加氧不断向射流核心区内扩散,导致氧含量缓慢增加。从而在保护气作用下,随着离焦量变化过程中,气氛中的氧含量在刚开始缓慢增加(如图8所示)。由于扩散和浓度梯度有关,流量越大,紊流越严重,射流混合区的氧含量越大,加速了射流核心区的扩散效应,因此,如图4所示,在激光焦点处,随着保护气流量增加,气氛中的氧含量随之增加。而在保护气流量为20 L/min时的突变距离比在保护气流量为5 L/min时的小是因为气流量越大,雷诺数越大,射流核心区越短。而载粉管的内径只有1.5 mm,其尺寸小于熔池的尺寸,单管的载粉气射流核心区产生的气氛保护区无法覆盖熔池,所以单管载粉气的试验中没有氧含量缓慢增长区(如图8所示)。

在载粉气作用下,当气流流经四束载粉气喷嘴时,随着离焦量的增加,试验规律和保护气接近,但产生的机理有所不同。当离焦量很小时,由于载粉气喷嘴距离基板距离很近,喷嘴的出口界面和基材近似构成一个半封闭空间,空间小,从而氩气向外溢出,形成的壁面射流会阻碍空气进入四孔中心部位,中心部位的空气不能得到有效补充。随着离焦量的增加,内部气体回流对中心部位的屏蔽效果减弱。因此,如图8所示,在离焦量从-6 mm到4 mm变化过程中,气氛中的氧含量缓慢增加。当离焦量比较大时,相当于单管气流的混合,从而在离焦量超过4 mm之后,气氛中的氧含量迅速上升。

当保护气和载粉气共同作用时,气流量超过84 L/min时,大量氩气对周围空气进行了稀释,减少了空气中的氧含量,从而从图9中可以看到,基材上方的氧含量会有所降低。并且在低气流量下,载粉气与从保护气喷嘴射流出来的氩气发生卷吸,减少了对空气的卷吸,因此当载粉气流量超6.5 L/min时,载粉气到达熔池上方时随着保护气流量的增加混掺的氧含量减少,从而熔池上方气氛氧含量减少(如图10所示)。

4 结 论

在开放环境下,研究了不同保护气和载粉气流量、离焦量对激光重熔氧化行为的影响。分析了气流对空气中的氧进入熔池上方气氛中的输送过程以及对熔池氧化过程的影响。

(1) 气流量较低时,保护气流量、载粉气流量、离焦量的增加都会加剧熔池氧化。保护气流量从6 L/min增加到14 L/min时,重熔区表层的氧含量(质量分数)从2.2%增加到5.9%,气流量超过14 L/min后,重熔区表层更容易被氧化。载粉气流量在4 L/min时,重熔区表层的氧含量超过12%,载粉气流量超过8 L/min时,重熔区表层被完全氧化,且氧化层较薄。载粉气比保护气更容易造成熔池氧化。

(2) 激光加工过程中熔池上方气氛中的氧含量随着保护气流量、载粉气流量、离焦量的增加而增加。但当气流量超过84 L/min时,熔池上方气氛中的氧含量会有所降低。降低熔池上方气氛中氧含量的气流量参数为:保护气流量8.5 L/min,载粉气流量6.5 L/min。

(3) 射流核心区的存在会使熔池上方形成低氧的气氛保护区。熔池上方气氛的氧含量与低氧的气氛保护区在熔池的截面有关。一定情况下,气流量越大,离焦量越大,管径越小,低氧的气氛保护区在熔池的截面越小,熔池上方气氛的氧含量越高。

参考文献

- [1] 于有生,倪火炬,温家伶.铁基金属激光熔覆的研究[J].中国表面工程,2004,17(4):24-27.
YU Y S, NI H J, WEN J L. A study on laser cladding of iron-based alloy[J]. China Surface Engineering, 2004, 17(4): 24-27 (in Chinese).
- [2] 梁二军,梁会琴.激光淬火及熔覆层性能与物相变化的拉曼光谱研究[J].中国激光,2006,33(1):121-123.
LIANG E J, LIANG H Q. Study on the properties and phase transition in laser quenching and cladding layers by raman spectroscopy[J]. Chinese Journal of Lasers, 2006, 33(1): 121-123 (in Chinese).
- [3] 贾卫平,姚井龙,吴蒙华,等.激光重熔参数对镍基纳米TiN复合电沉积镀层性能的影响研究[J].表面技术,2016,45(3):78-83.
JIA W P, YAO J L, WU M H, et al. Effect of laser remelting parameters on properties of nickel-based nano TiN composite deposition coatings[J]. Surface Technology, 2016, 45(3): 78-83 (in Chinese).
- [4] 高翔宇,高祥熙,姜涛,等.增材制造大型钛合金横梁缺陷分析[J].失效分析与预防,2018,13(1):43-48.
GAO X Y, GAO X X, JIANG T, et al. Defects analysis of large additive manufacturing beam of titanium alloy[J].

- Journal of Failure Analysis and Prevention*, 2018, 13(1): 43-48 (in Chinese).
- [5] CAMPANA G, ASCARI A, FORTUNATO A, et al. Hybrid laser-MIG welding of aluminum alloys: The influence of shielding gases[J]. *Applied Surface Science*, 2009, 255(10): 5588-5590.
- [6] TAN H, CHEN J, ZHANG F, et al. Process analysis for laser solid forming of thin-wall structure[J]. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 2010, 50(1): 1-8.
- [7] YUE L, WANG Z, LIN L. Material morphological characteristics in laser ablation of alpha case from titanium alloy[J]. *Applied Surface Science*, 2012, 258(20): 8065-8071.
- [8] WANG X J, ZHANG L C, FANG M H, et al. The effect of atmosphere on the structure and properties of a selective laser melted Al-12Si alloy[J]. *Materials Science & Engineering A*, 2014, 597(597): 370-375.
- [9] MASMOUDI A, BOLOT R, CODDET C. Investigation of the laser-powder-atmosphere interaction zone during the selective laser melting process[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2015, 225: 122-132.
- [10] 王铀, 刘家浚. 稀土元素在表面工程领域中的应用[J]. *中国表面工程*, 1992(1): 40-43.
- WANG Y, LIU J J. The application of rare earths on the surface engineering[J]. *China Surface Engineering*, 1992(1): 40-43 (in Chinese).
- [11] 张大伟, 雷廷权, 李强. 激光熔覆金属表面改性研究进展(上)[J]. *中国表面工程*, 1999(3): 11-15.
- ZHANG D W, LEI T Q, LI Q. Recent development of research on surface modification of metals with laser cladding(I)[J]. *China Surface Engineering*, 1999(3): 11-15 (in Chinese).
- [12] 黄标, 张冲, 程虎, 等. 激光熔覆 FeCoCrNiB 高熵合金涂层的组织结构与耐磨性[J]. *中国表面工程*, 2014, 27(6): 82-88.
- HUANG B, ZHANG C, CHENG H, et al. Microstructure and wear resistance of FeCoCrNiB high-entropy alloy coatings prepared by laser cladding[J]. *China Surface Engineering*, 2014, 27(6): 82-88 (in Chinese).
- [13] CAPELLO E, PREVITALI B. The influence of operator skills, process parameters and materials on clad shape in repair using laser cladding by wire[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2006, 174: 223-232.
- [14] YANG N. Concentration model based on movement model of powder flow in coaxial laser cladding[J]. *Optics & Laser Technology*, 2009, 41(1): 94-98.
- [15] LIU H, HE X L, YU G, et al. Numerical simulation of powder transport behavior in laser cladding with coaxial powder feeding[J]. *Science China (Physics Mechanics & Astronomy)*, 2015, 58(10): 104701.
- [16] CHEN H J, MOSHFEGH B, CEHLIN M. Numerical investigation of the flow behavior of an isothermal impinging jet in a room[J]. *Building & Environment*, 2012, 49: 154-166.
- [17] FELLOUAH H, BALL C G, POLLARD A. Reynolds number effects within the development region of a turbulent round free jet[J]. *International Journal of Heat & Mass Transfer*, 2009, 52(17): 3943-3954.
- [18] CAPONE A, SOLDATI A, ROMANO G P. Mixing and entrainment in the near field of turbulent round jets[J]. *Experiments in Fluids*, 2013, 54(1): 1434.
- [19] 董志勇. 冲击射流[M]. 北京: 海洋出版社, 1997: 99-103.
- DONG Z Y. Impinging jet[M]. Beijing: China Ocean Press, 1997: 99-103 (in Chinese).
- [20] 陈东林, 负英, 米建春, 等. 菱形自由射流与圆形自由射流流动特性的粒子图像测速研究[J]. *中国电机工程学报*, 2012, 32(17): 76-81.
- CHEN D L, YUN Y, MI J C, et al. Particle image velocimetry measurements of turbulent jets issuing from diamond and circular orifice plates[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2012, 32(17): 76-81 (in Chinese).
- [21] 黎惠霖, 阮伯如. 射流技术及其应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 1982: 10-12.
- LI H L, RUAN B R. Jet technology and its application[M]. Beijing: China Machine Press, 1982: 10-12 (in Chinese).
- [22] 徐世凯, 王勇. 自由射流出口临界雷诺数的确定[J]. *河南大学学报(自然科学学报)*, 2012, 32(17): 76-81.
- XU S K, WANG Y. Determination of critical Reynolds number at outlets of free jet flows[J]. *Journal of Henan University (Natural Science)*, 2012, 32(17): 76-81 (in Chinese).