匙孔效应对激光熔覆层横截面几何形貌的影响研究

徐平，江国业，胡艳娇，庞铭

（中国民航大学 机场学院，天津 300300）

摘 要：目的 研究匙孔效应在不同激光功率、扫描速度和送粉速率工艺参数下，对熔覆层横截面形貌的影响规律，并揭示匙孔对基体的作用机制。**方法** 利用光束模式为高斯光束分布的 YLS-3000 光纤激光器进行熔覆镍基高温合金 Ni35 实验。利用光学显微镜（OM）采集熔覆层横截面宏观形貌，并用金相分析软件以及计算机辅助绘图软件对熔覆横截面参数进行测量。**结果** 随激光功率的增加，匙孔深度增加；随送粉速率和激光扫描速度的增加，匙孔深度减小。随送粉速率的增加和激光功率的减小，熔覆层横截面左右垂直段高度值（*H*2 和 *H*4）减小；随扫描速度的增加，*H*2 和 *H*4 先增加再减小。在激光熔覆过程中，当基体没有形成匙孔时，*H*2 和 *H*4 的值为零，熔覆层与基体混合区域的横截面形貌为月牙形；当在基体中形成匙孔时，*H*2 和 *H*4 的值大于零，熔覆层与基体混合区域的横截面形貌为蘑菇形。**结论** 在激光熔覆过程中，不同激光功率、扫描速度和送粉速率工艺参数对匙孔的影响机制不同。匙孔效应的强弱显著影响熔覆层横截面参数 *H*2 和 *H*4 的大小，进而影响熔覆层形貌。

关键词：激光熔覆；匙孔；横截面形貌；高斯光束分布；镍基高温合金；月牙形；蘑菇形

中图分类号：TG174.4 **文献标识码：**A **文章编号：**1001-3660(2019)10-0125-06

DOI：10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2019.10.015

Influence of Keyhole Effect on the Cross-section Geometry of Laser Cladding Layer

XU Ping*, *JIANG Guo-ye*, *HU Yan-jiao*, *PANG Ming

(College of Airport Engineering, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China)

ABSTRACT: The work aims to study the influence of keyhole effect on the cross-section morphology of cladding layer and to reveal the mechanism of keyhole on substrate under different process parameters such as laser power, scanning speed and powder feeding rate. The YLS-3000 fiber laser with Gaussian beam distribution was used to coat Ni-based superalloy Ni35. The cross-section macroscopic morphology of the cladding layer was collected by optical microscope (OM), and the cladding cross-section parameters were measured by metallographic analysis software and computer aided drawing software. With the increase of laser power, the keyhole depth increased. As the scanning speed and the powder feeding rate increased, the keyhole

收稿日期：2019-04-07；**修订日期：**2019-09-11

Received：2019-04-07；**Revised：**2019-09-11

基金项目：国家重点研发计划（2018YFB1105800）；中央高校基本科研业务费项目中国民航大学专项资助（3122018D020）；中国民航大学蓝天青年科研资金资助

Fund：Supported by National Key Research and Development Project(2018YFB1105800), Special Subsidy of CAUC University for Fundamental Research Funds of Central Universities (3122018D020), Blue Sky Youth Research Fund of Civil Aviation University of China

作者简介：徐平（1991—），男，硕士研究生，主要研究方向为激光与材料相互作用及结构强度评估。

Biography：XU Ping (1991—), Male, Master, Research focus laser-material interaction and structural strength assessment.

通讯作者：江国业（1977—），男，硕士，副教授，主要研究方向为激光熔覆与表面处理技术。邮箱：guoyejiang@foxmail.com

Corresponding author：JIANG Guo-ye (1977—), Male, Master, Associate professor, Research focus laser cladding and additive manufacturing. E-mail guoyejiang@foxmail.com

depth decreased. With the increase of powder feeding rate or the decrease of laser power, the height (*H*2 and *H*4) of the left and right vertical section of the cladding layer cross section decreased. As the scanning speed increased, *H*2 and *H*4 firstly increased and then decreased. During laser cladding, when keyhole was not formed on substrate, *H*2 and *H*4 were zero and the cross-sectional shape of the mixed layer of the cladding layer and the substrate was crescent-shaped. When keyhole was formed on the substrate, *H*2 and *H*4 were more than zero and the cross-sectional shape of the mixed layer of the cladding layer and the substrate was mushroom-shaped. During laser cladding, different process parameters, laser power, scanning speed and powder feeding rate have different effects on keyhole and the cross-section parameters *H*2 and *H*4 of the cladding layer are significantly affected by the strength of the keyhole effect, thus changing the morphology of the cladding layers.

KEY WORDS: laser cladding; keyhole; cross-sectional morphology; Gaussian beam distribution; nickel-based superalloy; crescent-shaped; mushroom-shaped

激光熔覆技术是通过同轴送粉或预置粉末的方式，将涂层粉末送达需要被熔覆的基体材料的表面，再利用高能激光束扫描，使粉末和基体快速熔化并凝固，从而使涂层材料与基体形成良好的冶金结合的工艺过程[1-2]。激光熔覆具有热影响区小、工件变形小和易于实现自动化等特点，广泛应用于航空、航天和船舶等领域[3-5]。然而，由于实验参数配合的问题，激光熔覆过程中会出现匙孔效应，影响熔覆层深宽比、低熔合金元素含量、熔池的流动和材料对激光的吸收率等，进而影响熔覆层的横截面宏观形貌，最终影响熔覆层的综合力学性能[6-7]。高霁等[8]在 TC11 钛合金表面熔覆 CBN 熔覆层的研究中发现，扫描速度对熔覆层形貌的影响最大，其次为激光功率和预置层厚度，离焦量的影响最小。陈茹等[9]采用不同的扫描速度和送粉速度进行激光熔覆，发现当扫描速度小于 5 mm/s、送粉速率小于 5.6 g/min 时，熔覆层熔深较大，熔覆层与基体的结合线向下凹陷；当扫描速度大于 6 mm/s、送粉速率大于 5.6 g/min 时，熔覆层熔深较小，熔覆层与基体的结合线平整光滑。Dara 等[10]采用侧向送粉的方式进行激光熔覆实验，结果显示，随送粉速率的增加，基体熔化的体积减少，熔覆层横截面形貌由对称向非对称转变。Masoud 等[11]以线性回归的方法，研究主要工艺参数与熔覆层横截面特征参数的线性关系，发现熔覆层的特征参数均能用激光功率、扫描速度和送粉速率三者形成的组合参数构成线性相关，且相关系数均大于 0.9。

虽然国内外许多学者对激光熔覆过程中熔覆层横截面特征参数做了大量的研究，但对于熔覆横截面宏观形貌的描述主要集中在熔覆层的宽度和高度、熔覆深度以及熔覆层与基体的接触角等方面，而关于激光熔覆过程中匙孔效应对熔覆层与基体混合区域横截面形貌的影响还未见公开文献报道。匙孔的形成主要与激光功率密度、激光工艺参数、基体材料和粉末的热物性参数等因数密切相关。本文以 Q235 为基体材料，高温镍基合金 Ni35 粉末为例，开展了不同激光功率、扫描速度和送粉速率条件下的熔覆实验，分析不同工艺参数下，匙孔效应对熔覆层横截面的影响规律，揭示不同熔覆层横截面形成机制，为工程上激光熔覆工艺参数的制定提供支撑。

1 实验

1.1 实验材料

熔覆实验的基体材料为 Q235 钢板，尺寸为 120 mm×120 mm×10 mm。在熔覆实验前对其进行喷砂、清洗和吹干处理。熔覆合金粉末为镍基高温合金（Ni35），粉末粒度范围为 44 ~ 104 μm，其化学成分如表 1 所示，实验前对其进行干燥处理。

表 1 Ni35 粉末化学成分

Tab.1 Chemical compositions of Ni35 power

%

C	Cr	Si	Fe	B	Ni
0.30	10.50	3.50	10.00	2.00	Bal.

1.2 实验方法

利用 YLS-3000 光纤激光器进行熔覆实验，采用武汉光电国家实验室研制的 HUST-IV型激光熔覆自动送粉器进行同轴送粉，熔覆过程中采用高纯氩气（纯度大于 99.9%）保护熔池。熔覆激光器为光纤激光器，额定输出功率为 3000 W，激光光束为高斯分布。实验过程中送粉气流量为 6.5 L/min，保护气流量为 10 L/min，激光离焦量为正离焦 25 mm，其他工艺参数见表 2。

表 2 激光熔覆工艺参数设置

Tab.2 Laser cladding process parameter settings

Number	Laser power/W	Scanning speed/(mm·s^{-1})	Powder feeding rate/(g·min^{-1})
1	1400, 1600, 1800, 2200	3	8
2	2	1,3,5,7,9	8
3	2.2	3	6,8,10,12,14,16,18

为了能够清晰地观察到熔覆层横截面的宏观形貌，采用线切割机沿激光扫描方向的垂直方向对试样

进行切割，然后对切割的试样进行镶样、打磨、抛光。采用 4%的硝酸酒精对抛光后的试样进行腐蚀，腐蚀时间为 20 s。通过 LEICA MEF4 光学显微镜（OM）采集试样横截面照片，并用金相分析软件和计算机辅助绘图软件测量数据。

2　结果分析与讨论

2.1　熔覆过程匙孔的形成

为了描述方便，用 *H*1、*H*3、*H*2 和 *H*4 表示熔覆层与基体混合区域的横截面形貌参数，如图 1 所示。其中 *H*1 和 *H*3 分别为熔覆层横截面基材表面弧形区域左、右的垂直高度；*H*2 和 *H*4 分别为熔覆层横截面左、右垂直段高度。

各参数条件下的熔覆横截面宏观形貌如图 2 所示。在熔覆过程中，激光直接作用于合金粉末和基体，使熔池温度迅速达到金属材料的气化临界温度，在气化金属反冲作用力下，作用于熔池液体金属，使其向下凹陷，开始形成细长的匙孔[12-13]。当气化金属反冲作用压力与液体金属表面张力、熔池静液压力和重力等相平衡时，匙孔将达到稳定状态，不再继续加深[14]。当激光能量密度较弱时，工件表面熔化，基体的熔化

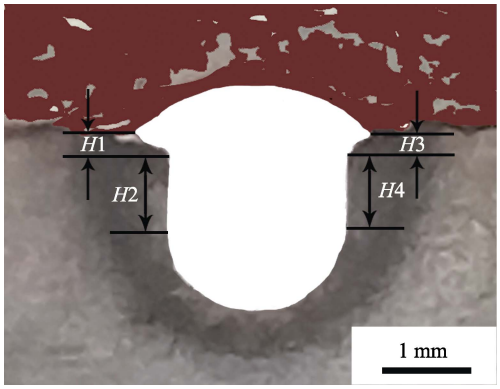


图 1　熔覆层与基体混合区域的横截面形貌图

Fig.1 Cross-sectional morphology of the mixed area of the cladding layer and the substrate

主要依靠熔化合金粉末的热传导、部分激光辐照在基体上等综合作用，熔覆层在基体内部的形貌为月牙形（*H*2 和 *H*4 等于 0）。当激光能量密度较强时，熔覆过程中，熔池形成匙孔，激光在匙孔中多重反射，匙孔内壁吸收激光能量而熔化，并通过热传导熔化周边的金属，激光深入底部，在熔覆层中形成深入基体内部的宏观形貌（*H*2 和 *H*4 大于 0），最终熔覆层与基体内部熔覆区形成含有垂直段和月牙形组合的蘑菇形形貌[15-16]。

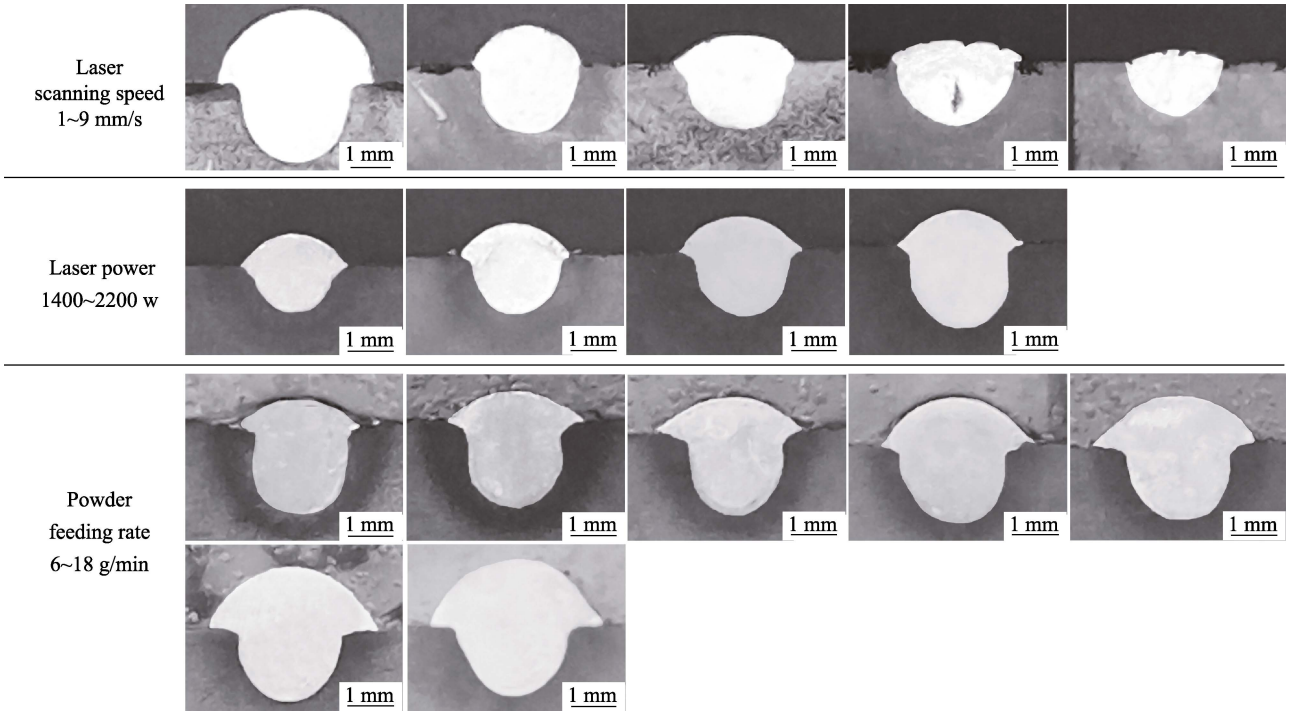


图 2　不同激光参数的熔覆层横截面宏观形貌图

Fig.2 Cross-section macroscopic topography of cladding layer under different laser parameters

激光熔覆过程中，匙孔效应的强弱与空间能量分布、熔化金属基体和合金粉末的热物性、离焦量、送粉速率、扫描速度等因素相关。激光能量由光斑中心向边缘呈高斯分布降低。熔覆过程中形成的匙孔示意图如图 3 所示。其中，*E* 为熔池开始形成匙孔的临界能量值，高斯曲线能量分布的峰值与 *E* 的差值影响熔池形成的匙孔的深度。激光熔覆与激光深熔焊不同，激光熔覆过程中进行的是同轴送粉熔覆，而激光深熔焊不需要添加粉末材料，在分析匙孔对基体的直接作用时，除了考虑激光能量的影响，还须考虑熔池上表

面增高和粉末熔化吸收部分激光能量的影响[17]。

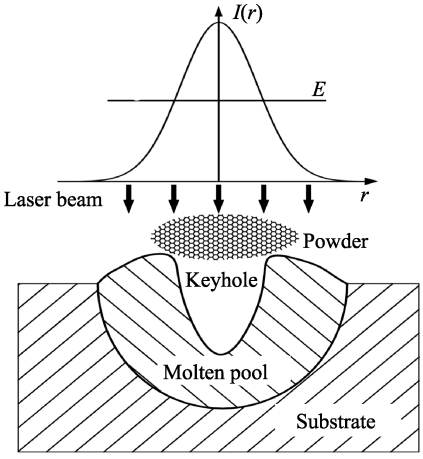


图 3　激光熔覆匙孔形成示意图

Fig.3 Schematic diagram of laser cladding keyhole formation

2.2　激光功率对 *H*1、*H*2、*H*3、*H*4 的影响

在其他激光参数一定的情况下，激光功率决定空间能量的分布大小，进而影响基体的热输入量。激光功率对熔覆层与基体混合区域的横截面形貌参数影响规律如图 4a 所示，其中激光熔覆参数为：保护气流量 10 L/min，送粉速率 8 g/min，正离焦量 25 mm，扫描速度 3 mm/s。由图可知，随着激光功率的增加，*H*1、*H*2、*H*3 和 *H*4 的值均增加，其中，当激光功率为 1400 W 时，*H*1、*H*2、*H*3 和 *H*4 的值为零。*H*1、*H*2、*H*3 和 *H*4 的值与熔池是否形成匙孔，以及匙孔能否直接作用于基体密切相关。图 4b 为激光空间能量分布与金属材料形成匙孔的临界能量值以及匙孔直接作用于基体临界能量值的关系示意图。其中，*E*1 为金属材料形成匙孔的临界能量值，其值的大小与激光功率密度、金属材料的热物性和材料对激光吸收率的影响等相关[13-18]。*E*2 为克服基体上表面熔池静液压力匙孔能直接作用于基体的临界能量值。

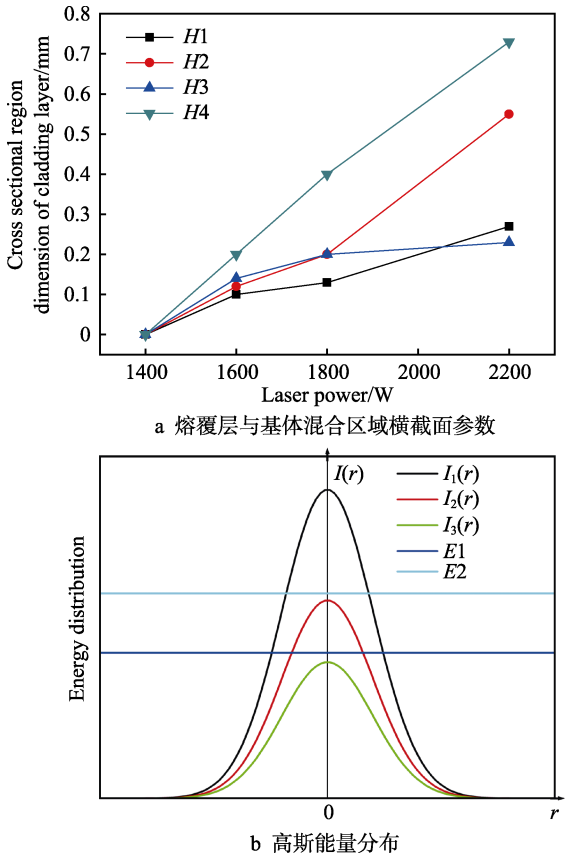


图 4　激光功率对熔覆层宏观形貌的影响

Fig.4 Effect of laser power on the macro morphology of cladding layer: a) cross-section parameters of the mixed layer of the cladding layer and the substrate; b) gaussian energy distribution

在其他参数一定的情况下，在激光熔覆过程中改变功率可以分为 3 种情况：1）激光空间能量分布峰值 $I_3(0)$小于 *E*1，熔池不能形成匙孔，如图 $I_3(r)$曲线分布所示；2）激光空间能量分布的峰值 $I_2(0)$位于 *E*1 与 *E*2 之间，熔池形成匙孔，但此时需考虑定量合金粉末在熔池表面的堆积引起的熔池上部表面静液压力的增加，即匙孔不能直接作用于基体，如图 $I_2(r)$曲线分布所示；3）激光空间能量分布的峰值 $I_1(0)$超过 *E*2，金属气化反冲压力克服定量熔池上表面静液压力、表面张力和重力后仍有剩余，匙孔将进一步加深，即熔池形成的匙孔能够直接作用于基体，如图 $I_1(r)$曲线分布所示。当激光功率为 1400 W 时，*H*1、*H*2、*H*3 和 *H*4 的值为零，这主要是由于激光功率小，该激光功率下能量分布的峰值小于匙孔直接作用于基体的临界能量值。*H*1、*H*2、*H*3 和 *H*4 的值随激光功率的增加而增加，这主要是由于激光功率对应的激光空间能量峰值超过匙孔直接作用于基体的临界能量值，且随激光功率的增加，峰值与 *E*2 差值增加，匙孔效应增强。激光空间能量分布的峰值与 *E*2 的差值，也决定匙孔的深度和激光直接通过匙孔内壁熔覆基体金属的量，具体体现在随激光功率的增加，激光通过匙孔的多重反射，匙孔内壁吸收的激光能量增加，熔化周边金属量增加。

2.3　激光扫描速度对 *H*1、*H*2、*H*3、*H*4 的影响

激光扫描速度对熔覆层与基体混合区域的横截面形貌参数的影响规律如图 5 所示。由图 5 可知，随着扫描速度的增加，*H*1 和 *H*3 的值减小。扫描速度由 1 mm/s 到 3 mm/s 时，*H*2 和 *H*4 的值增加；当扫描速度大于等于 3 mm/s，*H*2 和 *H*4 的值随扫描速度的增加而减小。

在其他参数一定的情况下，激光扫描速度对基体主要有两方面影响：一方面，基体接受激光线能量变化；另一方面，基体单位时间内接受合金粉末量变化。*H*1 和 *H*3 随扫描速度的变化主要是由于基体接受的线能量降低，熔池存在时间缩短，通过激光直接作用

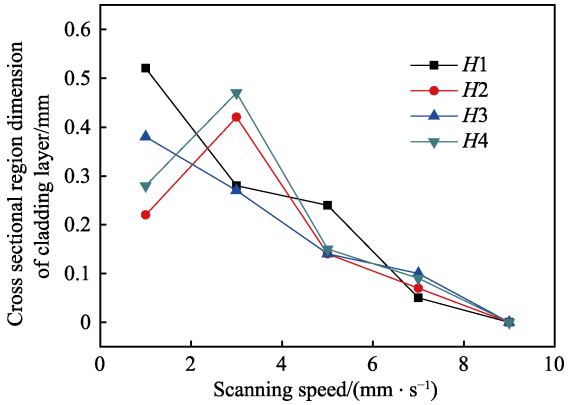


图 5　激光扫描速度对熔覆层横截面参数影响

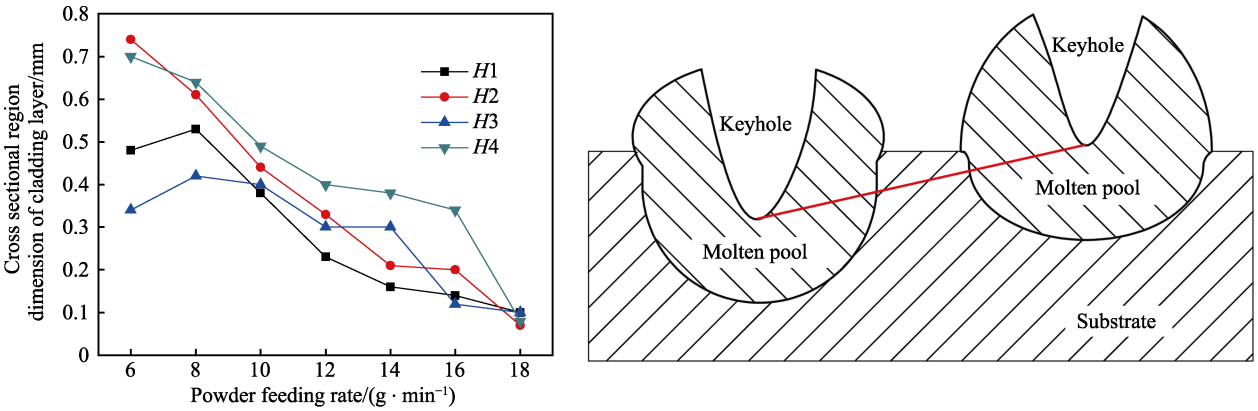
Fig.5 Effect of laser scanning speed on cross-section parameters of cladding layer

和热传导两种方式，熔化的基体金属量减小。当扫描速度由 1 mm/s 到 3 mm/s 时，*H*2 和 *H*4 的值增加，一方面是因为扫描速度低，初始形成较大的 *H*2 和 *H*4 的值，但通过热传导熔化基体金属，使其值减小；另一方面，熔池形成的匙孔深度平衡与激光输入能量大小、熔池的静液压力等相关。当扫描速度低时，激光输入能量增加，输送的合金粉末量也提高，激光输入能量的增加值和增加的合金粉末对能量的消耗有一个竞争关系，当激光输入的能量达到基体表面提高时，匙孔深度会增加；当激光输入的能量到达基体表面减弱时，匙孔深度会降低[13]。当扫描速度大于 3 mm/s，随扫描速度的进一步增加，*H*2 和 *H*4 的值减小，这主要是因为扫描速度增大的同时，基体接受的能量减小，匙孔作用于基体的时间缩短，匙孔效应减弱[16,19-20]。

2.4　送粉速率对 *H*1、*H*2、*H*3、*H*4 的影响

在激光扫描速度一定的情况下，送粉速率的大小直接决定了单位时间内送达基体表面的合金粉末量，从而影响熔覆层沉积高度和激光透过粉末作用于基体的能量大小。送粉速率对熔覆层与基体混合区域的横截面形貌参数的影响规律如图 6a 所示。由图可知，随着送粉速率的增加，*H*2 和 *H*4 的值减小。送粉速率由 6 g/min 增加到 8 g/min 时，*H*1 和 *H*3 的值增加；当送粉速率大于 8 g/min 时，随送粉速率的增加，*H*1 和 *H*3 的值减小。

随着送粉速率的增加，*H*2 和 *H*4 变化是由于，一方面，在相同激光能量输入的条件下，伴随送粉率的增加，粉末对激光能量的消耗率提高，导致激光用于基体表面形成匙孔效应的能量降低；另一方面，根据文献[21]可知，匙孔的平衡与大气压力、蒸气反冲压力、熔池表面张力压力和静液压力等相关，送粉速率的增加使熔覆层上表面熔池高度增加，从而使激光用于基体表面形成匙孔的能量降低，即基体上合金粉末的堆积使匙孔的空间位置相对于送粉速率低时上移，如图 6b 所示（送粉速率和熔池上表面静液压力为左侧小于右侧）。送粉速率由 6 g/min 增加到 8 g/min 时，*H*1 和 *H*3 的值增加，这是由于送粉速率较小时，激光熔化金属粉末消耗的能量降低，而激光用于熔化基体金属的能量增加。当送粉速率大于 8 g/min 时，随送粉速率的进一步增加，*H*1 和 *H*3 变化主要是由于匙孔在空间上位置的变化使激光直接作用于基体的深度变化和相当于热源的表面熔池通过热传导熔化金属的量变化的综合作用引起。



a 熔覆层与基体混合区域的横截面参数　　b 送粉速率对匙孔的影响示意图

图 6　送粉速率对熔覆层横截面参数和匙孔的影响

Fig.6 Effect of powder feeding rate on the cross-section parameters and keyhole of the cladding layer: a) cross-section parameters of the mixed layer of the cladding layer and the substrate; b) schematic diagram of the effect of powder feeding rate on the keyhole

3　结论

1）*H*2 和 *H*4 的值能够反映激光熔覆过程中匙孔效应的强弱。在激光熔覆过程中，当 *H*2 和 *H*4 的值为零时，熔覆层与基体混合区域的形貌为月牙形；当基体中形成匙孔时，*H*2 和 *H*4 的值大于零，熔覆层与基体混合区域的形貌为蘑菇形。随着匙孔直接作用于基体的深度增加，*H*2 和 *H*4 的值增加；随扫描速度的

增加和激光功率的减小，*H*1、*H*2、*H*3 和 *H*4 的值减小；随送粉速率的增加，*H*2 和 *H*4 的值减小，*H*1 和 *H*3 的值先增加再减小。

2）激光熔覆过程中，激光功率、扫描速度和送粉速率影响匙孔效应的强弱。伴随激光功率的增加，激光输入能量提高，匙孔深度增加；伴随送粉速率、粉末熔化吸收能量的增加，匙孔的空间位置相对于送粉速率小时上移；增加扫描速度，降低激光输入能量等，会导致匙孔深度减小。

参考文献：

[1] 初雅杰, 李晓泉, 李建, 等. 退火温度对激光熔覆 AlFeCrCoNiTi 高熵合金涂层组织与性能的影响[J]. 材料热处理学报, 2018, 39(6): 91-95.
CHU Ya-jie, LI Xiao-quan, LI Jian, et al. Effects of annealing temperature on microstructure and properties of AlFeCrCoNiTi high-entropy alloy coating prepared by laser cladding[J]. Transactions of materials and heat treatment, 2018, 39(6): 91-95.

[2] 陈明慧, 朱红梅, 王新林. 激光熔覆制备金属表面非晶涂层研究进展[J]. 材料工程, 2017(1): 120-128.
CHEN Ming-hui, ZHU Hong-mei, WANG Xin-lin. Research progress on laser cladding amorphous coatings on metallicl substrates[J]. Journal of materials engineering, 2017(1): 120-128.

[3] 高东强, 王蕊, 陈威, 等. 激光熔覆改善材料性能的研究进展[J]. 热加工工艺, 2017, 46(12): 14-18.
GAO Dong-qiang, WANG Rui, CHEN Wei, et al. Research progress of improving material properties by laser cladding[J]. Hot working technology, 2017, 46(12): 14-18.

[4] ALAM M K, EDRISY A, URBANIC J, et al. Microhardness and stress analysis of laser-cladded AISI 420 martensitic stainless steel[J]. Journal of materials engineering and performance, 2017, 26(3): 1076-1084.

[5] 付福兴, 畅庚榕, 赵小侠, 等. 激光光斑直径对熔覆层裂纹的影响[J]. 激光与光电子学进展, 2015, 52(3): 031401.
FU Fu-xing, CHANG Geng-rong, ZHAO Xiao-xia, et al, Influence of laser spot diameter on cladding layer cracking [J]. Laser & optoelectronics progress, 2015, 52(3): 031401.

[6] KAPLAN Alexander F H, MIZUTANI Masami, KATAYAMA Seiji. On the mechanism of pore formation during keyhole laser spot welding[J]. Proceedings of the SPIE-the international society for optical engineering, 2003, 4831: 186-191.

[7] VOLPP Joerg, VOLLERTSEN Frank. Modeling keyhole oscillations during laser deep penetration welding at different spatial laser intensity distributions[J]. Production engineering, 2015, 9(2): 167-178.

[8] 高霁, 宋德阳, 冯俊文. 工艺参数对钛合金激光熔覆 CBN 涂层几何形貌的影响[J]. 表面技术, 2015, 44(1): 77-80.
GAO Ji, SONG De-yang, FENG Jun-wen. Influence of processing parameters on geometrical features of CBN coatings by laser cladding on titanium alloy surface[J]. Surface technology, 2015, 44(1): 77-80.

[9] 陈茹, 虞钢, 何秀丽, 等. 38MnVS6 钢中硫元素扩散对激光熔覆涂层形貌和组织的影响[J]. 中国激光, 2018, 45(6): 0602005.
CHEN Ru, YU Gang, HE Xiu-li, et al, Effect of sulfur diffusion in 38MnVS6 steel on morphology and microstructure of laser cladding layers[J]. Chinese journal lasers, 2018, 45(6): 0602005.

[10] GOODARZI Dara-moazami, PEKKARINEN Joonas, SALMINEN Antti. Effect of process parameters in laser cladding on substrate melted areas and the substrate melted shape[J]. Journal of laser applications, 2015, 27(2): 29201.

[11] BAREKAT Masoud, RAZAVI Reza-Shoja, GHASEMI Ali. Nd: YAG laser cladding of Co-Cr-Mo alloy on γ-TiAl substrate[J]. Optics and laser technology, 2016, 80: 145-152.

[12] 庞铭, 虞钢, 刘兆, 等. K418 与 42CrMo 异种金属的激光穿透焊接[J]. 中国激光, 2006, 33(8): 1122-1126.
PANG Ming, YU Gang, LIU Zhao, et al. Dissimilar metal of K418 and 42CrMo full penetration laser welding[J]. Chinese journal lasers, 2006, 33(8): 1122-1126.

[13] 装莹蕾, 吴爱萍, 单际国, 等. 基于熔池流动分析的高速激光焊驼峰焊道形成过程研究[J]. 金属学报, 2013, 49(6): 725-730.
ZHUANG Ying-lei, WU Ai-ping, SHAN Ji-guo, et al. Investigation of humping formation based on melt flow analysis in high-speed laser welding process[J]. Acta metallurgica sinica, 2013, 49(6): 725-730.

[14] CHEN Ming-hua, XU Jian-nan, XIN Li-jun, et al. Effect of keyhole characteristics on porosity formation during pulsed laser GTA hybrid welding of AZ31B magnesium alloy[J]. Optics and lasers in engineering, 2017, 93: 139-145.

[15] AI Yue-wei, JIANG ping, SHAO Xin-yu, et al. The prediction of the whole weld in fiber laser keyhole welding based on numerical simulation[J]. Applied thermal engineering, 2017, 113: 980-993.

[16] OLA O T, DOERN F E. Factors controlling keyhole-induced porosity in cold wire laser welded aluminum[J]. Journal of laser applications, 2017, 29(1): 012008.

[17] 史平安, 万强, 庞盛永, 等. 工艺因素对熔池小孔特征行为的影响[J]. 材料热处理学报, 2016, 37(4): 228-235.
SHI Ping-an, WANG Qiang, PANG Shen-yong, et al. Influence of technological factors on dynamic behavior of welding pool and keyhole in deep penetration laser welding[J]. Transactions of materials and heat treatment, 2016, 37(4): 228-235.

[18] 徐国建, 李响, 杭争翔, 等. 光纤激光及 CO_2 激光焊接高强钢[J]. 激光与光电子学进展, 2014, 51(3): 031403.
XU Guo-jian, LI Xiang, HANG Zheng-xiang, et al. Laser welding of high strength steel using fiber laser and CO_2 laser[J]. Laser & optoelectronics progress, 2014, 51(3): 031403.

[19] MIZUTANI Masami, KATAYAMA Seiji, MATSUNAWA Akira. Observation of molten metal behavior during laser irradiation: Basic experiment to understand laser welding phenomena[C]// Proceedings of lamp: International congress on laser advanced. USA: Spie-int soc optical engineering, 2003, 4831: 208-213.

[20] 虞钢, 赵树森, 张永杰, 等. 异种金属激光焊接关键问题研究[J]. 中国激光, 2009, 36(2): 261-268.
YU Gang, ZHAO Shu-sen, ZHANG Yong-jie, et al. Research on key issues of laser welding of dissimilar metal [J]. Chinese journal lasers, 2009, 36(2): 261-268.

[21] KAPLAN Alexande F H, MIZUTANI Masami, KATAYAMA Seiji, et al. Mechanism of pore formation during keyhole laser spot welding[C]// Proceedings of SPIE: The international society for optical engineering. USA: Spie-int soc optical engineering, 2003, 4831: 186-191.