比粉与比能对激光熔覆 NiWC25 特性的影响

李高松，李金华，冯伟龙，单鹏超

（辽宁工业大学 机械工程与自动化学院，辽宁 锦州 121001）

摘 要：目的 探究激光熔覆过程中比粉和比能对合金粉末与基体的结合特性、熔覆层宏观形貌和微观结构、熔覆层最大宽度和结合宽度比值的影响规律，找出熔覆层既无柱节结构又具有良好冶金结合的比粉和比能的可选范围。**方法** 采用正交实验和单一控制变量相结合，制备出一组单道熔覆层，分析该熔覆层比粉和比能对柱节结构、临界结合结构、均匀圆柱结构的影响特性。**结果** 当激光熔覆的比粉大于 7 vs/mm、比能大于 200 ws/mm 时，熔覆层最大宽度与熔覆层结合宽度的比值大于 1.41，熔覆层和基体之间出现间隙，使熔融合金粉末在熔覆过程中沿着垂直于基体方向塌陷，形成了明显柱节结构的熔覆层；当比能为 200 ws/mm、比粉小于 5 vs/mm 时，熔覆层的宏观形貌为均匀圆柱形结构，且熔覆层最大宽度与基体和 NiWC25 的结合宽度比值为 1；当比粉大于 7 vs/mm、比能小于 100 ws/mm 时，NiWC25 和基体出现临界熔覆层，甚至出现基体和熔融 NiWC25 合金粉末脱离现象。**结论** 只要激光熔覆的比粉在 3~5 vs/mm、比能在 100~200 ws/mm 范围内变动时，不仅能保证熔覆层无任何柱节结构，且基体和 NiWC25 结合宽度与熔覆层最大宽度比值恒等于 1，从而使基体与 NiWC25 合金具有良好的冶金结合性能。

关键词：比粉；比能；柱节；NiWC25；宽度比；熔覆

中图分类号：TG174.4 **文献标识码：**A **文章编号：**1001-3660(2019)05-0253-06

DOI：10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2019.05.037

Effects of Specific Powder and Specific Energy on the Characteristics of NiWC25 by Laser Cladding

LI Gao-song, LI Jin-hua, FENG Wei-long, SHAN Peng-chao

(School of Mechanical Engineering and Automation, Liaoning University of Technology, Jinzhou 121001, China)

ABSTRACT: The work aims to investigate the effects law of specific powder and specific energy on the bonding characteristics of alloy powder and matrix, the macroscopic and microstructure of cladding layer, the maximum width of cladding layer and the ratio of bonding width during the laser cladding and then to find the optional range of specific powder and specific energy for cladding layer with column-free structure and good metallurgical junction. A series of single-pass cladding layers were prepared by orthogonal experiments and single control variables. The influence characteristics of the specific powder and specific energy of cladding layer on the column structure, critical combination structure and uniform cylindrical structure were analyzed. When the specific powder of laser cladding was more than 7 vs/mm and the specific energy was more than 200 ws/mm, the ratio of the

收稿日期：2018-09-15；修订日期：2018-11-05

Received：2018-09-15；**Revised**：2018-11-05

基金项目：辽宁省自然科学基金项目（201602371）；辽宁省教育厅项目（L2015231）

Fund：Liaoning Province Natural Science Fund Project (201602371); Liaoning Province Education Department Project (L2015231)

作者简介：李高松（1987—），男，硕士，主要研究方向为现代加工与先进制造技术。

Biography：LI Gao-song (1987—), Male, Master, Research focus: processing and advanced manufacturing technology.

通讯作者：李金华（1978—），男，博士，副教授，主要研究方向为现代加工与先进制造技术。

Corresponding author：LI Jin-hua (1978—), Male, Doctor, Associate professor, Research focus: processing and advanced manufacturing technology.

maximum width to the bonding width of the cladding layer was bigger than 1.41. The gap between the cladding layer and the matrix made the molten alloy powder collapse along the direction perpendicular to the substrate during the cladding process and form a cladding layer with a distinct column structure. When the specific energy was 200 ws/mm and the specific powder was less than 5 vs/mm, the macroscopic morphology of the cladding layer was uniform and appeared cylindrical structure and the ratio of the cladding laser maximum width to the combined width of the substrate and NiWC25 was 1. When the specific powder was larger than 7 vs/mm and the specific energy was less than 100 ws/mm, the NiWC25 and the matrix exhibited a critical cladding layer, and even a matrix and melting NiWC25 alloy powder detachment phenomenon. As long as the specific powder of laser cladding is more than 3~5 vs/mm and the specific energy is within the range of 100~200 ws/mm, it can not only ensure that the cladding layer has no column structure, but also the ratio of the maximum width to the cladding layer is always equal to 1, so as to ensure good metallurgical bonding properties between the matrix and the NiWC25 alloy.

KEY WORDS: specific powder; specific energy; column section; NiWC25; width ratio; cladding

激光熔覆技术作为一种先进的表面改性修复增材制造技术，越来越广泛地被应用到现代工业生产中。由于它克服了传统涂层（电镀、热喷涂与堆焊）稀释率大、变形大、热影响区大、孔槽加工困难、涂层薄的缺点[1-5]，因此越来越受到人们的关注。在应用过程中，为了得到较好的激光熔覆效果，有很多研究人员探究了激光工艺参数对激光熔覆过程中的裂纹和气泡的影响特性[6-7]，也有研究人员通过调节工艺参数或引入增强相[8-9]来改变熔覆层的显微硬度，也有研究人员通过各种各样的加工方法[10-12]来提高 H13 钢耐磨性、强度、硬度以及抗热疲劳性能，还有的通过添加某些微量元素减小或者消除熔覆层裂纹[13-14]的产生，来提高熔覆层的质量。就如何消除激光熔覆 NiWC25 合金表面柱节现象的研究比较少，因此文中探究了比粉和比能对熔覆层柱节、熔覆层增加高度、基体熔化深度和微观组织结构的影响规律[15]，找出了无柱节结构、显微硬度大的激光熔覆 NiWC25 合金粉末比粉和比能的取值范围。

1 实验

1.1 材料

激光熔覆材料为 NiWC25 合金陶瓷，其成分见表 1。熔覆前先用专用金相砂纸对基体进行打磨，然后分别用酒精和丙酮清除体冷模具钢基体表面的油污。

表 1 NiWC25 合金其成分
Tab.1 Composition of NiWC25 alloy

%

C	B	Si	Cr	Fe	Wc	Ni
0.75	—	3.2	9.2	3.6	24.5	Bal.

1.2 激光熔覆测试系统

本实验采用 6 轴 KUKA 机器手臂 KR30，携带 PERCITEC YC52 熔覆送粉头进行熔覆，激光由 IPG 光纤激光器 YLR-3000 提供，配备 FHPF-10 同步送粉器。激光熔覆时，光斑直径为 2.50 mm，送粉气压（N_2）为 0.3 MPa，载气流量为 600 L/h，保护气压（N_2）为 0.1 MPa，激光波长为 1.07~1.08 μm。基体为 60 mm×40 mm×8 mm 的 H13 模具钢，采用 MR5000 倒置金相显微镜观察金相组织。使用 HV-1000 显微式硬度计测熔覆层的显微硬度，所加载荷为 100 g，持续时间为 10 s，测试间距为 0.15 mm，从结合区开始计算。

2 结果分析

2.1 比粉和比能对熔覆层宏观结构影响

2.1.1 比粉对单道熔覆层柱和节的影响

熔覆层随比粉变化的宏观形貌如图 1 所示。由图 1 可知，当比能恒为 300 ws/mm 时，随着比粉的增加，熔覆层从均匀柱状结构（比粉为 5 vs/mm）转变为不

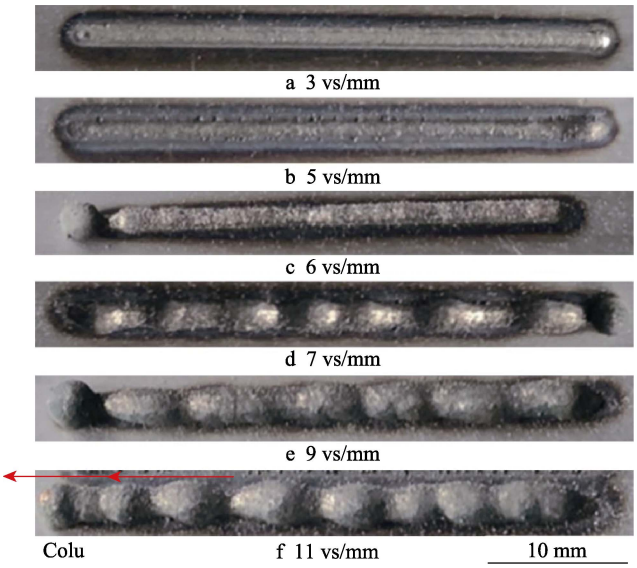
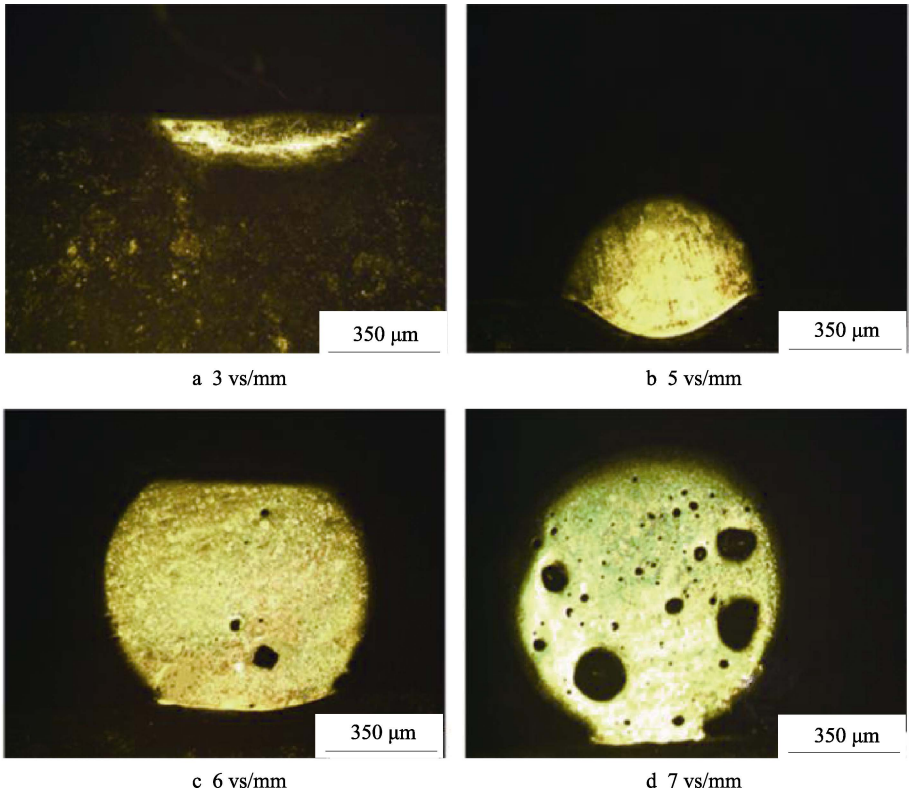


图 1 比能为 300 ws/mm 时不同比粉下熔覆层宏观形貌
Fig.1 Macroscopic topography of the cladding layer at the specific energy of 300 ws/mm and different specific powder

明显的柱节状(比粉为 6 vs/mm),如图 1b 和 1c 所示。随着比粉的继续增大，单道熔覆层的柱和节变得越来越明显，如图 1d—f 所示。在对图 1d—f 的柱节进行对比时发现：熔覆层的节随比粉的增大而变长，柱随比粉的增大而缩短，且在比粉为 9 vs/mm 时，熔覆层的节和柱的长度开始趋于稳定。实验发现：只要单道熔覆层出现节，40 mm 长的单道熔覆层就有 5~7 个节和柱。此外，当比粉达到 11 vs/mm 时，节的长度约为柱的 2~5 倍，如图 1f 所示。

图 2a—d 为图 1a、b、d、e 节处的微观形貌图。由图 2 可知，随着比粉的增大，熔覆层横截面最大宽度与合金粉末和基体结合面宽度比值逐步由图 2a、b 的 1∶1 变为图 2c 的 1.41∶1 和 2d 的 2.59∶1。因此，随着比粉的增大，最大宽度边缘处到基体垂直方向处形成间隙。这是因为随着比粉的增大，增加了合金粉末对能量的吸收量和反射量，从而增大了熔融合金粉末液滴的体积，减小了基体的熔化面积，从而减小了基体熔化面积和液滴到基体平面投影面积的比值，以及基体和熔融合金的液液润引力，造成了液滴聚集成球状，从而形成了熔覆层到基体的垂直间隙。此外，随着液球的变大，熔覆合金粉末所受的重力也变大。当重力大于液体内聚力时，合金熔化液开始沿其到基体的垂直方向塌陷，形成柱，且在合金粉末熔化液下落过程中，由于分子间的内聚力而使熔化液内聚为小液滴形。当基体的熔化宽度大于或等于小液滴的直径时，合金粉末熔化液与基体熔化液的引力大于 NiWC25 的内聚力，彼此之间形成良好的润湿；当基体的熔化宽度小于合金粉末液滴的直径时，基体表面未熔化部分的润湿力小于液滴的张力，从而造成了基体和熔覆层最大宽度间形成间隙。



a 3 vs/mm　　b 5 vs/mm

c 6 vs/mm　　d 7 vs/mm

图 2　不同比粉下熔覆层微观形貌

Fig.2 Microscopic topography of cladding layer at different specific powder

2.1.2　比能对单道熔覆层柱和节的影响

比粉为 7 vs/mm 时，熔覆层宏观形貌随比能的变化如图 3 所示。由图 3 可看出：当比粉为 7 vs/mm 时，熔覆层的节和柱的直径会随比能的增大而增大，且比能大于 300 ws/mm 时，节和柱的区分度越发明显。值得注意的是，过小的比能可能造成熔覆层的不熔现象，如图 3a 所示，比能为 100 ws/mm 时。熔覆层出现了明显的不容现象。当比粉为 7 vs/mm 时，合金粉末的熔化量会随着比能的增大而增多，从而增加了熔覆层最大宽度和基体熔化宽度的比值，间接地为 NiWC25 合金溶液边缘沿垂直基体方向塌陷提供了有利条件。当比能增大到一定程度后，粉末的熔化量达到最大值，基体的熔化宽度也开始随比能的增加而变宽，提高了基体和合金溶液的液液结合引力，从而增大了结合面宽度。过大的能量又容易造成 NiWC25 气泡的形成。因此，为了得到较好的熔覆层，应保持比粉在 3~5 vs/mm、比能在 100~200 ws/mm 内变动，进而保证了单道熔覆层的均匀性，为多道熔覆提供一定的参考。

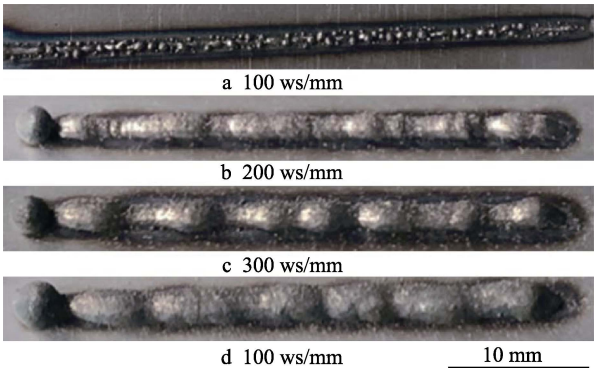


图 3　不同比能时熔覆层的宏观形貌
Fig.3 Macroscopic morphology of the cladding layer at different specific energy

2.1.3　比粉和比能对熔覆层及基体高度的影响

不同比能下熔覆层增加高度随比粉的变化趋势如图 4 所示。由图 4 中曲线 a 和图 3a 可知：当比能恒为 100 ws/mm，比粉增大到 6 vs/mm 时，熔覆层就开始出现明显的不熔颗粒，并且颗粒熔覆层已经能够轻易用手去除。随着比粉增大到 7 vs/mm，基体增加高度突然变为 0。再结合图 4b—d 中熔覆层的增加高度随比粉的变化趋势，可以推测出：当比粉小于 3 vs/mm 时，无论比能如何变动，基体的增高量都无任何变化；而比能不变，比粉大于 3 vs/mm 时，基体的增高量先随比粉的增大而增大，而后减小，甚至突然减小为 0。基体的熔化深度随比粉、比能的变化趋势如图 5 所示，可以看出，比粉一定时，比能越大，基体的熔化深度越大；而比能一定时，基体的熔化深度却随比粉的增大而逐渐减小。在比粉增加的过程中，单位质量粉末所接受到的激光能量相对减小。同时，随着比粉的增加，粉末对激光的遮挡和反射大大

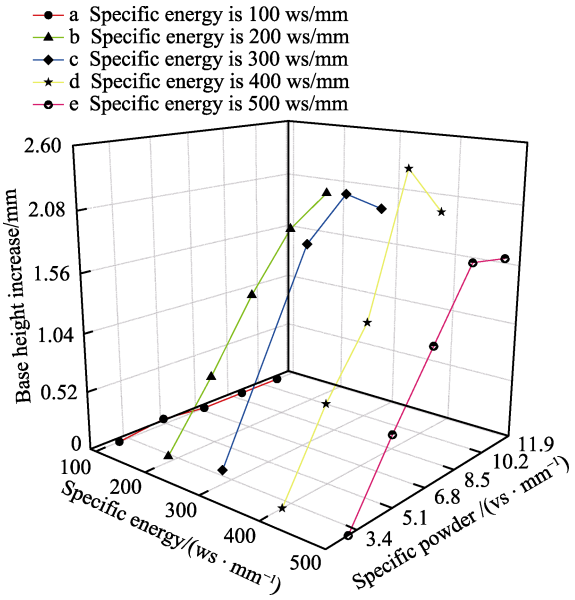


图 4　基体增高量随比粉和比能的变化趋势
Fig.4 Change tendency of matrix height with specific powder and specific energy

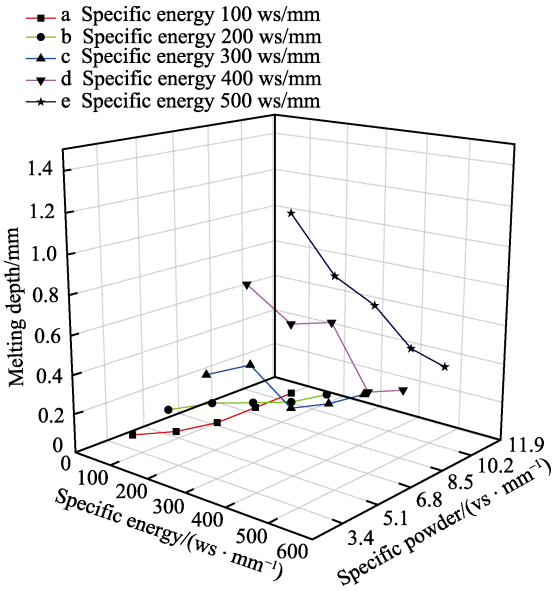


图 5　基体熔深随比能和比粉的变化趋势
Fig.5 Change tendency of matrix penetration with specific energy and specific powder

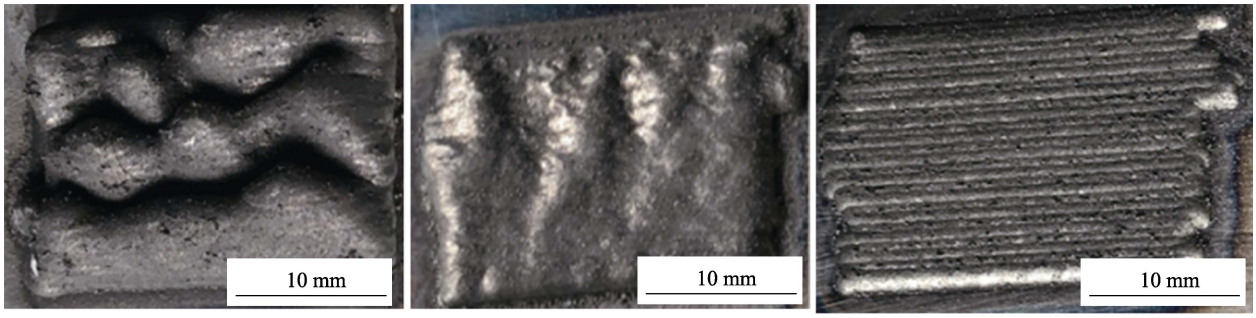
减小了基体所接受到的激光能量。当合金粉末接受的平均相对激光能量减小到不熔粉末占主导地位时，熔覆层开始出现大量颗粒，甚至出现熔覆层和基体不熔现象，也就出现了熔覆层零增加高度的现象。因此，比能一定时，熔覆层增加高度在一定程度上先随比能的增加先增大，而后趋于稳定，最后开始下降，直到熔覆层为 0。

2.1.4　比粉对多道单层熔覆层形貌的影响

当宽度为 20 mm、相邻道之间的距离为 0.8 mm、比能为 200 sw/mm，比粉分别为 7、5、3 vs/mm 时的宏观形貌如图 6 所示。当比粉为 7 vs/mm 时，熔覆层出现三层隔断的斜坡，斜坡的顶端出现极为明显的类似于单道熔覆节柱状的凸起和凹陷，斜坡的底部与基体脱离了冶金结合，出现了明显的宏观孔洞，斜坡间凹和凸的高度差高达 3 mm，熔覆层斜坡的最大高度为 5.7 mm。当比粉减小到 5 vs/mm 时，虽然熔覆层的斜坡和斜坡孔洞消失，但是熔覆层的表面出现了无规律的波浪状，严重降低了熔覆层表面的平整度，熔覆层的高度为 2 mm。当比粉减小到 3 vs/mm 时，熔覆层的斜坡和凸起以及波浪都消失不见，出现了高度为 0.9 mm 的平整熔覆层平面。

2.2　比粉和比能对熔覆层金相组织的影响

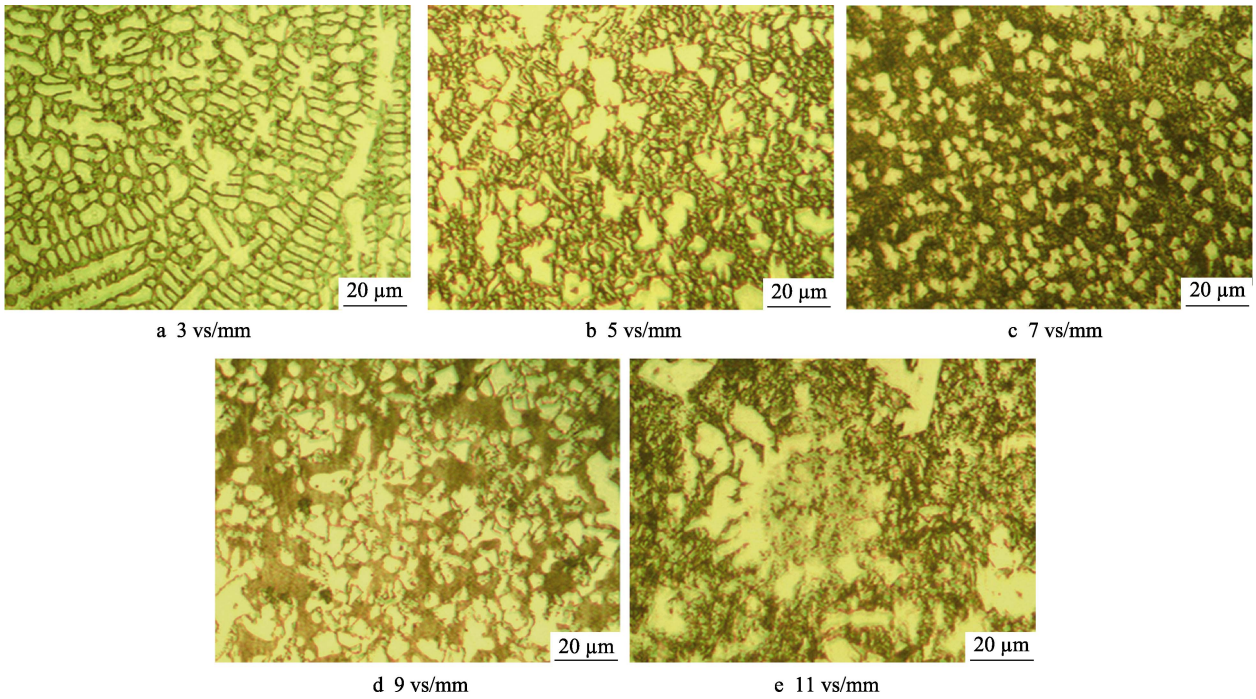
不同比粉下熔覆层中上部的金相组织如图 7 所示。当比能为 200 ws/mm、比粉小于 11 vs/mm 时，随着比粉的增大，熔覆层中上部金相组织逐渐由图 7a 的粒状、柱状晶体变为板条状晶体，再变为图 7b—d 中均匀分散的片状晶体，最后转变为图 7e 中规则的菊花形结构。当比能为 100 ws/mm，比粉由 3 vs/mm 增大到 5 vs/mm 时，熔覆层中上部的金相组织开始



a 7 vs/mm　　b 5 vs/mm　　c 3 vs/mm

图 6　不同比粉对多道熔覆层宏观形貌的影响

Fig.6 Effects of powder on macroscopic morphology of multi-pass cladding layer at different specific powder



a 3 vs/mm　　b 5 vs/mm　　c 7 vs/mm

d 9 vs/mm　　e 11 vs/mm

图 7　比能为 200 ws/mm 不同比粉下熔覆层中上部金相组织

Fig.7 Metallographic structure of the upper part of the cladding layer at specific energy of 200 ws/mm and different specific powder

出现板条状的 WC 晶体。当比粉增大到 7 vs/mm 时，熔覆层增加高度突然变为 0，固熔覆层中 WC 的含量也基本上突然降为 0，WC 的下降将直接影响熔覆层的金相组织。由此可以推断出，熔覆层金相组织除了受比粉的影响外，还受到激光功率的影响，激光功率不仅影响到基体的熔化深度，还关系到粉末是否熔化以及熔化的程度，甚至影响基体和粉末溶体是否和基体相结合，这些都会影响熔覆层的金相组织种类。

3　结论

1）当比粉大于 7 vs/mm、比能大于 200 ws/mm 时，熔覆层最大宽度与基体和合金粉末的结合宽度的比值大于 1.41，造成了熔覆层最大宽度处出现塌陷形成柱节。

2）当比能一定时，随着比粉的增加，熔覆层的增加高度先增加后减小，甚至变为 0。基体的熔化深度随着比粉的增加逐渐变小，且相同比粉下，比能越大，基体的熔化深度越大。

3）比能和熔覆间距一定时，随着比粉的增大，多道激光熔覆层的表面形貌逐渐由平面（比粉为 3 vs/mm）变为波浪面（比粉为 5 vs/mm），最后变为斜坡面（比粉为 7 vs/mm）。

4）当比能一定时，随比粉的增大，熔覆层的金相组织逐步由粒状晶变为片状晶，最后变为规则的菊花形结构。

参考文献：

[1]　殷畅, 蔡志海, 张平. 两种修复磨损齿轮新方法的技术概论[J]. 农业装备与车辆工程, 2016, 54(9): 69-71.
YIN Chang, CAI Zhi-hai, ZHANG Ping. Technology in-

troduction of two new methods to repair worn gears[J]. Agricultural equipment & vehicle engineering, 2016, 54(9): 69-71.

[2] 李养良, 王利. 高温合金表面激光熔覆镍基合金研究[J]. 应用激光, 2015, 35(3): 295-299.
LI Yang-liang, WANG Li. Investigation of nickel-based alloys coatings on super-alloys by laser claddig[J]. Applied laser, 2015, 35(3): 295-299.

[3] 韩剑, 黄旭, 许强, 等. MC3 冷轧辊辊颈激光堆焊与氩弧堆焊修复的对比研究[J]. 热加工工艺, 2018, 47(15): 246-249.
HAN Jian, HUANG Xu, XU Qiang, et al. Comparison study on repair of MC3 cold roller neck by laser cladding and argon arc cladding[J]. Hot working technology, 2018, 47(15): 246-249.

[4] 章坤, 郭华彬, 孟祥瑞, 等. 激光重熔处理对高 Cr 涂层抗高温氧化性的影响及分析[J]. 金属功能材料, 2018, 25(4): 17-21.
ZHANG Kun, GUO Hua-bin, MENG Xiang-rui, et al. Influence and analysis of laser remelting treatment on high temperature oxidation resistance of high Cr coating[J]. Metallic functional materials, 2018, 25(4): 17-21

[5] 张浩敏, 周后明, 秦衡峰, 等. 基体激光熔覆的 35CrMo 钢轴类零件修复再制造试验研究[D]. 湖南: 湘潭大学, 2014.
ZHANG Hao-min, ZHOU Hou-ming, QIN Heng-feng, et al. Test study on remanufacturing of shaft parts in 35crmo steel by laser cladding[J]. Hunan: Xiangtan University, 2014.

[6] 李高松, 李金华, 单鹏超, 等. WC 增强 Ni60AA 对裂纹与硬度的影响特性[J/OL]. 激光与光电子学进展: 1-11 [2018-09-12]. http://kns.cnki.net/kcms/detail/31.1690.TN.20180731.1738.026.html.
LI Gao-song, LI Jin-hua, SHAN Peng-chao, et al. Effect of WC reinforced Ni60AA on crack and hardness[J/OL]. Laser & optoelectronics progress: 1-11[2018-09-12]. http://kns.cnki.net/kcms/detail/31.1690.TN.20180731.1738.026.html.

[7] 张津超, 冯爱新, 薛伟, 等. 激光熔覆 CaF_2/Ni 基合金复合涂层的裂纹敏感性及力学性能研究[J]. 应用激光, 2017, 37(1): 22-26.
ZHANG Jin-chao, FENG Ai-xin, XUE Wei, et al. Research on crack susceptibility and mechanical properties of CaF_2/Ni Composite coating by laser cladding[J]. Applied laser, 2017, 37(1): 22-26.

[8] EMAMIAN A, CORBIN S F, KHAJEPOUR A. The influence of combined laser parameters on in-situ formed tic morphology during laser cladding[J]. Surface & coatings technology, 2011, 206(1): 124-131.

[9] LIN Y H, LEI Y P, LI X Q, et al. Astudy of TiB_2/TiB gradient coating by laser cladding on titanium alloy[J]. Optics and laser sin engineering, 2016, 82: 48-55.

[10] 雷临莘, 叶宏, 崔文语. QPQ 处理后 H13 钢的组织与性能[J]. 金属热处理, 2018, 43(5): 124-127.
LEI Lin-ping, YE Hong, CUI Wen-yu. Microstructure and properties of H13 steel after QPQ treatment[J]. Heat treatment of metals, 2018, 43(5): 124-127.

[11] 王蔚, 刘永贤, JERRY F Y X. ZrO_2 对激光烧结 Al_2O_3/SiO_2/ZrO_2 显微组织和显微硬度的影响[J]. 中国机械工程, 2014, 25(6): 727-730.
WANG Wei LIU Yong-xian, JERRY F Y X. Effect of ZrO_2 on microstructure and microhardness for laser sintered Al_2O_3/SiO_2/ZrO_2[J]. China mechanical engineering, 2014, 25(6): 727-730.

[12] 姚爽, 刘洪喜, 张晓伟, 等. H13 钢表面激光原位自生 TiC 颗粒增强复合涂层的微观结构和摩擦磨损性能[J]. 中国激光, 2014, 41(10): 67-73.
YAO Shuang, LIU Hong-xi, ZHANG Xiao-wei, et al. Microstructure and wear property of TiC particle reinforced composite coatings on H13 steel surfaceby laser in-situ synthesis[J]. Chinese journal of lasers, 2014, 41 (10): 67-73.

[13] 赵静娟, 何占启. 激光熔覆裂纹问题的研究[J]. 新技术新工艺, 2011(10): 58-61.
ZHAO Jing-juan, HE Zhan-qi. Research on status of cracking in laser cladding laser[J]. New technology & new process, 2011(10): 58-61.

[14] QUAZI M M, FAZAL M A, HASEEB A S M A, et al. Effect of rare earth elements and their oxides on tribo-mechanical performance of laser claddings: A review[J]. Journal of rare earths, 2016, 34(6): 549-564.

[15] 李金华, 李高松, 张德强, 等. 激光熔覆 NJ-4 镍基合金涂层显微硬度的探究[J]. 表面技术, 2018, 47(8): 77-83.
LI Jin-hua, LI Gao-song, ZHANG De-qiang, et al. Study on microhardness of laser cladding NJ-4 powder[J]. Surface tecnohlogy, 2018, 47(8): 77-83.