

# 超声振动对低搭接率激光熔覆层质量的影响

王战\*\*, 孙文磊\*, 黄海博, 于江通, 刘金朵

新疆大学机械工程学院, 新疆 乌鲁木齐 830047

**摘要** 在施以超声振动的条件下进行熔覆实验的变搭接率实验,以弥补现有超声振动下激光熔覆实验搭接率选取较为单一的缺陷,并针对低搭接率的熔覆层进行进一步的性能探究。初始搭接率分别设定为 33%,50%,66%,观察并比较 33%低搭接率熔覆层与其他搭接率熔覆层的宏观样貌,随后在 33%低搭接率下进一步进行不施加超声振动的对比实验。将对实验样件用电火花切割后进行处理,观察 2 个切割试件的显微金相组织,并测评试件的硬度和耐磨性。结果表明,33%低搭接率下施加超声振动样件的熔覆道宏观样貌会出现波浪状条纹,而 50%和 66%搭接率下施加超声振动熔覆层宏观样貌平整无波纹。在 33%低搭接率下对比添加超声振动与不添加超声振动的熔覆层质量,发现不施加超声振动的熔覆效果相对较好。该研究结果对超声振动下熔覆实验的搭接率选取具有一定参考意义。

**关键词** 激光加工; 超声振动; 搭接率; 金相组织

**中图分类号** TG439.4

**文献标识码** A

**doi:** 10.3788/LOP56.141402

## Effect of Ultrasonic Vibrations on Quality of Laser Cladding Layer with Low Overlap Rate

Wang Zhan\*\*, Sun Wenlei\*, Huang Haibo, Yu Jiangtong, Liu Jinduo

*School of Mechanical Engineering, Xinjiang University, Urumqi, Xinjiang 830047, China*

**Abstract** The variable overlap rate is investigated on the basis of ultrasonic vibrations in the cladding experiment to improve the current limitations in the overlap rate selection. Furthermore, the performance of cladding layer with a low overlap rate is investigated. The initial overlap rates are set to 33%, 50%, and 66%, and observations and comparisons of the macroscopic appearance between the 33% overlap rate and other overlap rates of the cladding layer are conducted. A comparative experiment that employs a 33% overlap rate of the cladding layer without ultrasonic vibration is also performed. The comparative samples are first processed via electrical discharge machining, followed by observations of their metallographic microstructures and evaluations of their hardness and wear resistance. The results show that the macroscopic appearance of the cladding layer of the sample with a 33% overlap rate exhibits wavy stripes, whereas no wavy stripes are observed at the other overlap rates. The good cladding effect is obtained using a 33% overlap rate, with the ultrasonic vibrations deteriorating the quality of laser cladding layer. This analysis outlines a useful approach for selecting the overlap rate when applying ultrasonic vibrations to laser cladding experiments.

**Key words** laser processing; ultrasonic vibration; overlap rate; metallographic microstructure

**OCIS codes** 140.3390; 140.0140; 140.3460; 160.0160; 160.3900

## 1 引言

激光熔覆技术是近些年出现并发展的一种表面增材制造技术,可对一些机械设备如叶片、齿轮或其

他关键受损的零件进行修复,是表面工程改性技术的一个分支<sup>[1-2]</sup>。它使用高能密度激光束,通过熔化送达到基材的粉末来完成二者的结合,最终的熔覆层成型可以更好地提高基材表面的耐磨性和耐腐蚀

收稿日期: 2019-01-02; 修回日期: 2019-01-26; 录用日期: 2019-02-25

基金项目: 新疆克拉玛依重大专项(2018ZD002B)、新疆高技术研究发展项目(201513102)

\* E-mail: sunwenxi@163.com; \*\* E-mail: wz1123spl@163.com

性,具有良好的实用性<sup>[3-4]</sup>。与堆焊、电镀等技术相比,激光熔覆技术具有易实现自动化、畸变小、可选区间断熔覆等优势<sup>[5]</sup>。

熔覆包层受到不同材料和工艺参数等因素的影响,会形成影响其性能的裂纹、孔隙等缺陷。为此需要寻求一种能细化晶粒、减少气孔和裂纹的方法。国内外为改善金属的性能,采用了一些物理场方法,如电流、磁场和超声波处理等<sup>[6-7]</sup>。而超声波技术由于其在铸造领域成功地细化了晶粒,抑制并减少了气泡,因此逐步过渡到了激光熔覆领域并取得了一定的成效<sup>[8]</sup>。陈畅源等<sup>[9]</sup>研究了用超声振动来辅助激光焊接的工艺,发现熔覆包层裂纹的发生可以减少;王玉玲等<sup>[10]</sup>在熔覆 3540Fe/CeO<sub>2</sub> 涂层加入超声振动后发现熔覆层平均硬度增加了 62%;李德英等<sup>[11]</sup>讨论了超声振动和扫描速度对涂层熔覆过程中温度场的影响,发现超声振动下其温度场分布更均匀。

表 1 45 号钢各元素成分(质量分数,%)

Table 1 Element composition of No. 45 steel (mass fraction, %)

Element	C	Mn	Si	Cu	Ni	Cr	P/Fe
Value	0.42-0.5	0.50-0.80	0.17-0.37	≤0.25	≤0.30	≤0.25	Bal.

本实验使用 Ni60 作为熔覆粉末,基础元素占比如表 2 所示。为了防止镍粉受潮结成微小的粉末块而影响实验结果,在熔覆之前对其进行烘干处理。

表 2 Ni60 自熔性合金粉末各元素成分(质量分数,%)

Table 2 Element composition of Ni60 self-melting alloy powder (mass fraction, %)

Element	C	Cr	B	Si	Fe	Ni
Value	0.6-1.0	14-17	2.5-4.5	3-4.5	≤15	Bal.

## 2.2 实验设备

本实验所使用的设备有:1) 激光发生器(YLS-2000,IG 公司,德国),2) 超声波发生器(KMD-K1-B,科美达公司,中国),3) 正置金相显微镜(MJ-21,明美科技有限公司,中国),4) 数字显微硬度计(HV-1000 型,上海冶帅精密科技有限公司,中国),5) 磨损试验机(M-2000,宣化试验机厂,中国),6) 场发射扫描电镜(SEM,Quanta FEG 250,FEI 公司,美国)。

## 2.3 搭接率的选取

通过多次实验对比选取搭接率。图 1 给出搭接率的选取方式<sup>[14]</sup>。搭接率是指相邻两熔覆道搭接部位的重合距离  $W$  与单道熔覆宽度  $D$  的比值,即

$$\eta = W/D = (D - d)/D, \quad (1)$$

式中: $d$  为激光头移动的距离。

激光熔覆过程中辅以超声波技术,超声波的空化效应和声流效应会细化晶粒,改善熔覆涂层性能<sup>[12]</sup>。但考虑到熔覆过程中由于高能密度激光束的离开,熔覆粉末会迅速凝固,而它的机械效应会迫使熔池发生强烈的震动<sup>[13]</sup>,有可能影响熔覆效果。现有的文献多是研究在某一固定搭接率下添加超声振动与否对实验结果的影响,而对不同搭接率的对比鲜有介绍,未进行变搭接率实验,已得出的结论不够全面。因此本文主要探究在搭接率改变的情况下,使用超声技术对熔覆涂层性能的影响。

## 2 实验方法

### 2.1 实验材料

本实验基体材料采用尺寸规格为 110 mm × 60 mm × 6 mm 的 45 号钢板。其各元素成分参数如表 1 所示。在实验前先用砂纸对 45 钢表面进行打磨,用丙酮清洗表面,使其表面光亮平整。

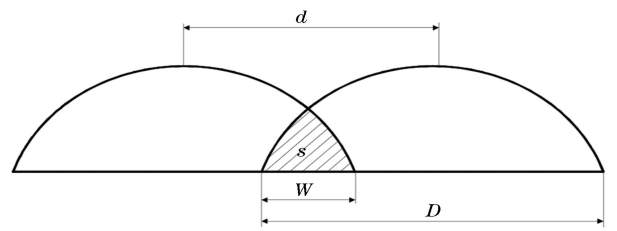


图 1 搭接率示意图

Fig. 1 Schematic of overlap rate

进行单道熔覆实验,发现选取表 3 所示工艺参数能得到较好的熔覆效果。经测量,此时熔覆宽度  $D = 3$  mm。通常认为搭接率 40%~55% 为适中搭接率,高搭接率值大于此范围,低搭接率值小于此范围,为此熔覆实验选取搭接率分别为 33%,50%,66%。经计算此时激光头移动距离  $d$  分别为 1.0,1.5,2.0 mm。

表 3 激光熔覆工艺参数

Table 3 Parameters of laser cladding process

Laser power / W	Spot diameter / mm	Pulverized speed / (g · s <sup>-1</sup> )	Defouce / mm	Spot diameter / mm
1400	4	1.2	16	2

### 2.4 实验过程

熔覆时用夹具将基材板固定在底振式超声振动板上,使超声波以纵波的形式在试件中进行传播。

超声波发生器的额定频率为 28 kHz, 设置功率为 900 W。实验中的送粉方式为同轴送粉, 熔覆结束后, 观察低搭接率与其他不同搭接率下试件的熔覆形貌, 并进行与其工艺参数相同但不施加超声振动的实验, 得到一组对比熔覆件。

将对对比熔覆件线切割成 2 组试快, 2 组试块的规格分别为  $10\text{ mm} \times 8\text{ mm} \times 8\text{ mm}$  和  $31\text{ mm} \times 7\text{ mm} \times 8\text{ mm}$ 。对  $10\text{ mm} \times 8\text{ mm} \times 8\text{ mm}$  的试块用打磨、抛光、以及用浓盐酸 (HCl) 和浓硝酸 ( $\text{HNO}_3$ ) 按体积比为 3 : 1 组成的混合物 (俗称王水) 进行腐蚀, 在正置金相显微镜下观察组织, 并用数字显微硬度计进行硬度测试; 对  $31\text{ mm} \times 7\text{ mm} \times 8\text{ mm}$  规格的试块进行耐磨性实验。

### 3 实验结果及分析

#### 3.1 低搭接与其他搭接率熔覆层宏观形貌

图 2 为搭接率分别设定为 66%, 50%, 33% 时辅以超声振动冶金涂层的宏观形貌。从图中可以明显地看到, 搭接率为 33% 时, 冶金涂层的宏观表面出现了波浪状的熔覆道, 其余搭接率未出现。分析可知, 该现象主要是超声波的机械振动效应引起的。高斯热源温度中点附近不均匀的温度分布<sup>[15]</sup>使粉末熔化速率不同。对于熔覆过程中未落在基材还在空中的粉末, 靠近激光中点附近的温度升高得快, 远离中点的粉末温升相对较慢, 这样的粉末落入受到振动的基材时路径会发生轻微的变化; 另一方面, 基材的振动加以透光率的变化, 使得到达基材并对其加热的激光能量密度发生变化, 从而使有效直径发生变化, 在此条件下外加超声振动对其作用, 超声波的机械振动会对熔覆道产生影响。这些影响在搭接率较大的情况下, 使得相邻两熔覆道结构紧凑, 熔池间能良好的结合而没有突显出来。当搭接率逐渐变小时, 这种缺陷逐渐放大并显现出来。

为此在搭接率为 33% 的条件下进行比对实验。比对实验过程不施加超声振动, 其余实验参数均保持不变。实验结果如图 3 所示, 在该搭接率下施加超声振动, 熔覆层表面的熔覆道出现明显的波浪形, 而不施加超声振动时涂层宏观表面平整。根据这组结果, 进一步设计实验探究 33% 的搭接率下施加超声振动与否的效果。

#### 3.2 低搭接率熔覆层微观组织分析

选用上述 33% 搭接率进行对比实验, 在光学显微镜下样件熔覆层剖面放大 100 倍的形貌如图 4 所

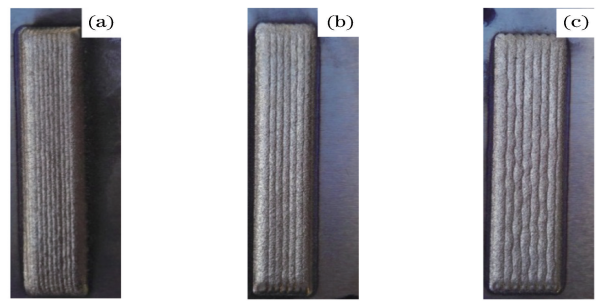


图 2 超声振动下不同搭接率熔覆层的宏观形貌。

(a) 66%; (b) 50%; (c) 33%

Fig. 2 Macroscopic morphology of cladding layers with different overlap rates under ultrasonic vibration. (a) 66%; (b) 50%; (c) 33%



图 3 33% 搭接率下熔覆层宏观形貌对比。

(a) 施加超声振动; (b) 不施加超声振动

Fig. 3 Comparison of macroscopic morphology of cladding layer at 33% overlap rate. (a) With ultrasonic vibration; (b) without ultrasonic vibration

示。从图中可以看出, 致密结合的白亮带<sup>[16]</sup>均出现在基材与冶金涂层的交界处。但施加超声振动的样件中反而出现了气泡, 如图 4(b) 所示。其原因是较小的搭接率下相邻熔覆道搭接区域较少, 在搭接处附近更易与空气接触, 此时未施加超声振动的样件相对而言散热渠道少, 受到环境的影响相对较小, 有利于涂层与基材的结合。

图 5 为 2 个样件在扫描电镜下放大 1000 倍的形貌。熔池凝固期间, 会有过冷区域存在于固-液相界面的前方。起初, 固-液界面偶然扰动产生的任何一个凸起都将会受到过冷区域的影响而迅速向前生长, 但此时过冷区域狭窄, 使其不能自由向熔体前方生长; 生长中的凸起会向外排出溶质, 继而富集在相邻两凸起的凹入部位的附近, 降低此部位的过冷度, 进一步抑制凸起的横向生长。这两种抑制作用使界面胞状向前生长, 少量的胞状晶得以出现。

凝固过程继续进行, 随着温度梯度与界面生长比值的减小, 过冷区域逐渐加宽, 胞状生长方式发生变化。此时凸起前端不稳定, 逐渐成为具有晶体学



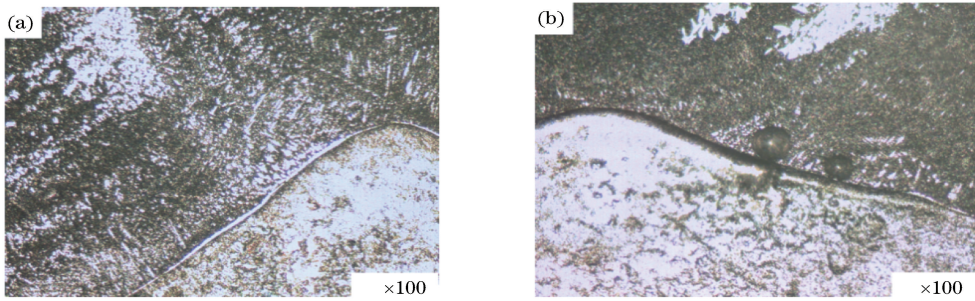


图 4 33%搭接率下熔覆层剖面的光学显微图。(a)不施加超声振动;(b)施加超声振动

Fig. 4 Optical micrographs of cladding layer profile with overlap rate of 33%. (a) Without ultrasonic vibration; (b) with ultrasonic vibration

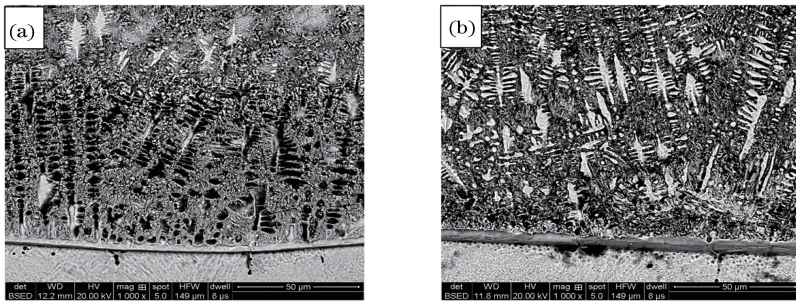


图 5 33%搭接率下熔覆层的 SEM 图。(a)不施加超声振动;(b)施加超声振动

Fig. 5 SEM images of cladding layer with overlap rate of 33%. (a) Without ultrasonic vibration; (b) with ultrasonic vibration

特性的凸缘结构。随后凸缘前端开始分化出锯齿状的二次分支,其中伸向熔池方向的主干会在生长过程中继续分出二次分支,如此循环分支,直至溶质富集致使过冷消失。此时生长了大量的具有明显方向性的,板状排列的柱状枝晶。生长过程中分支晶体根部紧靠主干,富集的溶质不易排出从而抑制其生长;同理,远离根部的其他部位易于排出溶质使得所遭受的过冷影响更大,因此其生长速度相对而言更快。由于这种因素,2个样件形成柱状枝晶过程中产生了明显的“缩颈”现象。施加超声振动时,脆弱的缩颈处易断开,被声流效应均匀地搅拌到熔池的其他部位。

随着过冷区域的进一步扩大,界面前形成等轴晶且与柱状枝晶的生长同时进行。此后熔体以等轴晶向前推进的方式凝固,这也使柱状晶的单相生长得以抑制。

### 3.3 低搭接率熔覆层硬度对比分析

图 6 是 33%低搭接率下实验组的显微硬度对比图。从熔覆层顶部到基体方向每隔 0.2 mm 作为一个测量高度,每个高度上取 3 点测量硬度,取它们的平均值并记录。

从图 6 中可以看出硬度变化的整体趋势:冶金

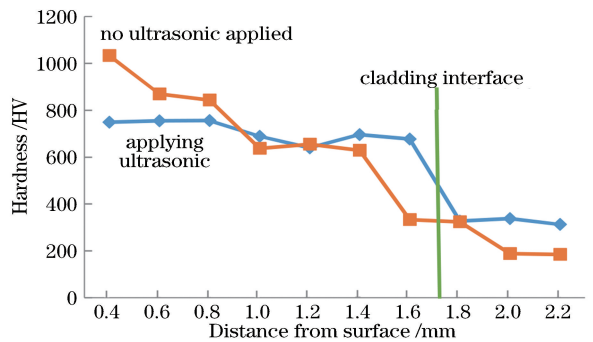


图 6 33%搭接率下显微硬度的变化

Fig. 6 Change of microhardness with overlap rate of 33% 结合熔覆涂层的表面硬度明显大于基材硬度,说明熔覆 Ni60 可以强化基材表面硬度;在涂层中下部,施加超声振动的样件显微硬度稍大。就涂层顶部而言,未施加超声振动的试件硬度稍大。

在熔覆层中下部,熔池凝固时的散热条件相近,此时在熔池中辅以超声振动,其产生的空化效应会碎化晶粒;同时上述“缩颈”现象产生的部分细小晶体也会在声流作用下被搅拌均匀。

霍尔-佩奇关系式为

$$\sigma_y = \sigma_0 + k_y / \sqrt{d}, \quad (2)$$

式中: $\sigma_y$  可用材料显微硬度 HV 表示; $\sigma_0$ 、 $k_y$  在此实验中可视为某一常数; $d$  表示晶粒平均尺寸。由

(2)式可知, $d$  越小 $\sigma_y$  越大,因此熔覆层中下部施以超声振动的试件硬度相对较大;而较小搭接率下,熔覆层顶部凝固时,相邻两熔覆道接触小,堆垛效果差且更易与空气接触,所以在此基础上辅以超声振动会使熔池凝固的效果变差。

### 3.4 低搭接率熔覆层的耐磨性比较

实验磨砺一次时间为 15 min,磨轮转速设置为 180 r/min,施加 100 N 的载荷。进行 5 次磨损实验,每次磨损后,用电子天平记录样件质量的变化,最终得到磨损量的对比图,如图 7 所示。从图中可以看出基体熔覆合金粉末后更加耐磨,但搭接率较小,导致施加超声振动样件的熔池上方凝固后效果略差,因此耐磨性相对于不施加超声振动的样件要差一些。

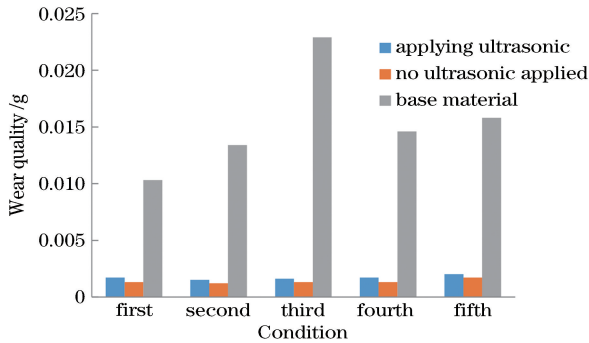


图 7 33%搭接率下的耐磨性对比

Fig. 7 Comparison of wear resistance with overlap rate of 33%

## 4 结 论

为弥补现有超声振动下激光熔覆实验搭接率选取较为单一的缺陷,搭建变搭接率实验,详细探究了低搭接率下使用超声技术对熔覆涂层性能的影响。通过观察对比实验中试件的显微金相组织,测评试件的硬度和耐磨性,可得以下结论。

1) 激光熔覆过程中辅以超声振动,在搭接率较小为 33%的情况下,熔覆表面的熔覆道会出现波浪状条纹,而搭接率为 50%和 66%时,熔覆层宏观样貌较好且不会出现波浪状条纹。这为搭接率的选取提供了一定的范围。

2) 在 33%低搭接率下进行超声振动添加与否的对比实验。宏观上发现不施加超声振动的样件宏观形貌相对较为平整且熔覆道未出现波纹;微观上施加超声振动样件的涂层内部出现少量的气孔。

3) 测评低搭接率下样件的耐磨性与显微硬度。考虑到工作区域多为熔覆层上部和表面,分析可知

在 33%搭接率下,熔覆对两样件均起到了表面强化作用,但不施加超声振动的熔覆件熔覆效果相对较好。

综上所述,施加振动时,应避免选择较低的搭接率进行熔覆。

## 参 考 文 献

- [1] Liu Q C, Janardhana M, Hinton B, *et al.* Laser cladding as a potential repair technology for damaged aircraft components [J]. *International Journal of Structural Integrity*, 2011, 2(3): 314-331.
- [2] Liu J D, Sun W L, Huang Y. Trajectory planning of curved surface subdivision robot arm and positioner by laser cladding [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2018, 55(7): 071402.  
刘金朵, 孙文磊, 黄勇. 激光熔覆曲面分片机械臂与变位机的轨迹规划[J]. *激光与光电子学进展*, 2018, 55(7): 071402.
- [3] Chen Y, Sun W L, Huang Y, *et al.* Path planning of laser cladding for curved surface parts [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2016, 53(6): 061405.  
陈影, 孙文磊, 黄勇, 等. 曲面零件的激光熔覆路径规划 [J]. *激光与光电子学进展*, 2016, 53(6): 061405.
- [4] Kathuria Y P. Some aspects of laser surface cladding in the turbine industry [J]. *Surface and Coatings Technology*, 2000, 132(2/3): 262-269.
- [5] Li Y J, Li J N. *Laser welding/cutting/cladding technology* [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2012: 202-205.  
李亚江, 李嘉宁. *激光焊接/切割/熔覆技术* [M]. 北京: 化学工业出版社, 2012: 202-205.
- [6] Zhang M X, Liu C M, Shi X Z, *et al.* Residual stress, defects and grain morphology of Ti-6Al-4V alloy produced by ultrasonic impact treatment assisted selective laser melting [J]. *Applied Sciences*, 2016, 6(11): 304.
- [7] Chen C Y, Deng Q L, Song J L. The influence of ultrasonic vibration on the process of laser cladding [J]. *Electromachining & Mould*, 2005(3): 37-40.  
陈畅源, 邓琦林, 宋建丽. 超声振动对激光熔覆过程的影响 [J]. *电加工与模具*, 2005(3): 37-40.
- [8] Wang T, Zhang A F, Zhang W L, *et al.* Review on ultrasonic vibration assisted laser metal forming technology [J]. *Applied Laser*, 2015, 35(6): 733-736.  
王潭, 张安峰, 张文龙, 等. 超声振动辅助激光金属成形技术研究进展 [J]. *应用激光*, 2015, 35(6):

733-736.

- [9] Chen C Y, Deng Q L, Song J L, *et al.* Influence of Ni content and ultrasonic vibration to cracks in process of laser cladding [J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2005, 37 (S1): 44-48.  
陈畅源, 邓琦林, 宋建丽, 等. Ni 含量及超声振动对激光熔覆中裂纹的影响[J]. 南京航空航天大学学报, 2005, 37(S1): 44-48.
- [10] Wang Y L, Liu S Y, Zhang X Y, *et al.* Experiments and analyses of 3540Fe/CeO<sub>2</sub> coatings by ultrasonic vibration assisted laser cladding [J]. China Mechanical Engineering, 2018, 29(21): 2600-2605.  
王玉玲, 刘善勇, 张翔宇, 等. 超声振动辅助激光熔覆 3540Fe/CeO<sub>2</sub> 涂层实验及分析[J]. 中国机械工程, 2018, 29(21): 2600-2605.
- [11] Li D Y, Zhao L Z, Zhang J, *et al.* Influence of ultrasonic vibration on temperature field of TiC/FeAl composite coating in laser cladding [J]. Heat Treatment of Metals, 2015, 40(3): 190-194.  
李德英, 赵龙志, 张坚, 等. 超声振动对激光熔覆 TiC/FeAl 复合涂层温度场的影响[J]. 金属热处理, 2015, 40(3): 190-194.
- [12] Wang W, Guo P F, Zhang J Z, *et al.* Ultrasonic effect on laser cladding BT20 titanium alloy process [J]. Chinese Journal of Lasers, 2013, 40 (8): 0803004.  
王维, 郭鹏飞, 张建中, 等. 超声波对 BT20 钛合金激光熔覆过程的作用[J]. 中国激光, 2013, 40(8): 0803004.
- [13] Zhang X Y. Study on the coating technology of 3540Fe/CeO<sub>2</sub> with ultrasonic vibration assisted laser [D]. Qingdao: Qingdao University of Technology, 2018.  
张翔宇. 超声振动辅助激光熔覆 3540Fe/CeO<sub>2</sub> 涂层工艺研究[D]. 青岛: 青岛理工大学, 2018.
- [14] Zhang J Q. Resesarch of laser cladding on 45 steel [D]. Jinzhou: Liaoning University of Technology, 2016.  
张吉庆. 45 号钢激光熔覆技术研究[D]. 锦州: 辽宁工业大学, 2016.
- [15] Fu F X, Chang G R, Zhao X X, *et al.* Influence of laser spot diameter on cladding layer cracking [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2015, 52 (3): 031401.  
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.
- [16] Liu P L, Sun W L, Huang Y, *et al.* Effect of laser power on properties of cladding Ni based coatings[J]. Machinery Design & Manufacture, 2018(S2): 149-152.  
刘鹏良, 孙文磊, 黄勇, 等. 激光功率对熔覆 Ni 基涂层性能的影响[J]. 机械设计与制造, 2018(S2): 149-152.