

激光熔覆 Ni625/WC 涂层的减振降噪和摩擦磨损性能*

王书文 廖玉红 王腾迪
(上海理工大学机械工程学院 上海 200093)

摘要: 为了提高汽车和高铁制动盘的耐磨性和减振降噪性能,对激光熔覆 Ni625 和 WC 复合涂层的减振降噪和摩擦磨损性能进行研究,其中粉末配比和熔覆加工工艺参数方案采用均匀分布法设计。利用 UMT-Tribolab 摩擦磨损试验机进行摩擦磨损试验,并分析摩擦因数的稳定性;在摩擦磨损试验的同时,利用北京东方振动噪声研究所开发的数据采集分析系统,采集并分析处理振动和噪声信号;通过白光干涉仪表征熔覆层磨损形貌及磨损量;在对摩擦磨损和振动噪声试验结果分析的基础上,建立模糊综合评价模型,并确定出最优激光熔覆工艺参数为:激光功率 2 kW、进给速度 600 mm/min、送粉盘转速 4.5 r/min、保护气体流量 15.1 L/min、送粉气体流量 5.4 L/min、WC 的质量占比 10%。研究成果对汽车和高铁铸铁制动盘的表面改性具有重要意义。

关键词: 激光熔覆; 摩擦磨损; 振动噪声; 均匀分布法; 表面改性

中图分类号: U463

Properties of Vibration and Noise Reduction and Friction/Wear Performance of Laser Cladded Ni625/WC Coatings

WANG Shuwen LIAO Yuhong WANG Tengdi

(College of Mechanical Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract: In order to improve the wear resistance and vibration and noise reduction performance of automobile and high-speed railway brake discs, the vibration and noise reduction and friction and wear properties of laser cladding Ni625 and WC composite coatings were studied. The powder ratio and laser cladding parameters were designed by using the uniform distribution method. Friction and wear tests were performed by means of a UMT-Tribolab friction and wear tester. During the tests, the data acquisition and signal processing system developed by Beijing Oriental Institute of Vibration and Noise was employed to collect and analyze the measured vibration and noise signals. After the experiments, the variation of the coefficients of friction was analyzed, and the tested surfaces were characterized by a white light interferometer. Based on the analysis of the experimental results of friction, wear, and vibration and noise, a fuzzy comprehensive evaluation model was developed, and the optimal laser cladding process parameters were determined as follows: laser power 2 kW, feed speed 600 mm/min, powder feeder speed 4.5 r/min, shielding gas flow 15.1 L/min, powder feeding gas flow 5.4 L/min, and WC mass ratio of 10%. This study is of great significance to the surface modification of automobile and high-speed train cast iron brake discs.

Keywords: laser cladding; friction and wear; vibration and noise; uniform distribution method; surface modification

0 前言

伴随激光技术的飞速发展,激光表面改性因其具有变形小、热影响区小、表面粗糙度低等特点而引

起了广泛的关注和应用^[1]。激光表面改性包括激光淬火^[2]、激光表面织构^[3]、激光熔覆^[4]等,已在航空航天、汽车工业、生物医药等方面取得了广泛的应用^[5-6]。其中利用激光熔覆技术制备耐磨、耐腐蚀

* 上海市科委重点支撑(18060502400)和国家自然科学基金(51275126)资助项目。

Fund: Supported by Key Project of Science and Technology Commission of Shanghai City (18060502400) and National Natural Science Foundation of China (51275126).

20200302 收到初稿, 20210222 收到修改稿

层,并对其进行摩擦学、力学、机械、物理化学、以及其他性能的研究,已经成为近年研究的热点。

激光熔覆是利用高功率密度激光束使涂层材料和基材表面发生熔合,然后快速凝固。SUN 等^[7]在蠕墨铸铁上模拟穿山甲鳞片制备了仿生激光熔覆层,仿生熔覆层的耐磨性远高于基体。GUO 等^[8]在列车的车轮上进行激光熔覆处理,发现经过处理后的车轮只发生轻微的磨损,并且有效地减少了滚动摩擦因数。ZHANG 等^[9]在不锈钢基体表面激光熔覆 Ni/hBN 混合粉末发现,在高温时涂层只发生了轻微的磨损,当试验温度低于 300 ℃ 时还起到了很好的润滑作用。ARIAS-GONZÁLEZA 等^[10]使用激光熔覆在灰铸铁和球墨铸铁的平面基体生成 NiCrBSi 涂层,研究了加工工艺参数的影响,发现在相同的工艺参数下,灰铸铁的稀释率高于球墨铸铁,涂层和基体的弹性模量相似,而得到的镍基涂层硬度明显优于铸铁基体。KHORRAM 等^[11]对 IN718 高温合金进行激光熔覆,采用响应面法成功地研究了激光工艺参数对熔覆层硬度的影响,得到最佳样品的平均硬度值约为 1 050 HV,约为基体硬度的 2.5 倍。李信等^[12]采用 9 种不同的激光工艺参数在 316 L 不锈钢基板上熔覆形成了 Co 基 WC 复合涂层。研究发现,激光功率为 1.6 kW 和 10 mm/s 扫描速率的试件组织和性能最优,硬度最高达到 1 698 HV,摩擦因数为 0.73。除此之外还进行了一系列的显微组织测试,分析其强化机制。张敏等^[13]在 40Cr 基体上激光熔覆一层 Fe 基和 Ni 基合金涂层,研究了涂层的力学性能和耐蚀性,及其组织和成份分布。程国东等^[14]在 35CrMo 基材表面激光熔覆 TiC/Ni60 涂层,对熔覆层宏观形貌、硬度、磨损后的微观形貌进行了观察和研究,其耐磨性和显微硬度明显提高。靳鸣等^[15]在 16 Mn 钢表面激光熔覆了 2205 双相不锈钢/TiC 复合涂层,对其进行微观组织、显微硬度及摩擦磨损性能的研究,发现随着 TiC 含量增大,熔覆层的稀释率逐渐增大。江国业等^[16]在蠕墨铸铁表面激光熔覆 WC 为增强相的镍基高温合金,对其进行组织和成份分析,发现 WC 颗粒在涂层中的分布及溶解程度均呈现非均匀性,WC 的存在提高了涂层硬度,同时有助于涂层中的颗粒相与

镍基合金溶剂牢固结合,对提高涂层的硬度及耐磨性具有正向作用。XU 等^[17]在 316 L 不锈钢表面进行激光熔覆,粉末中添加不同配比 CeO₂,对其进行显微组织分析发现,加入 CeO₂ 可显著细化晶粒,降低涂层孔隙率,并有效地限制了局部腐蚀的出现。ZOU 等^[18]在 Invar 合金上激光熔覆了纳米结构的碳化物强化钴基熔覆层,在微观组织分析后得出的结论是,Invar 合金熔覆层的强化机理是元素扩散、碳化物强化,以及碳化物/基体界面处的塑性变形的界面强化。

从大量文献研究发现,目前对激光熔覆的研究主要是关心熔覆层的摩擦磨损性能,尚未发现有关对激光熔覆层减振降噪性能的研究文献。考虑到汽车制动盘的减振降噪问题是多年来学术界和企业一直关心但尚未解决的世界难题,并且制动粉尘的污染问题也是急需解决的世界性环保问题。本文在铸铁表面进行激光熔覆 Ni625 和 WC 的混合粉末,以提高其耐磨性和减振降噪性能。其中,粉末配比和加工工艺参数采用均匀分布法设计,共加工出 10 组不同工艺参数和不同粉末配比的试件,同时进行减振降噪和摩擦磨损性能试验,通过模糊综合评价法选出最优加工工艺参数和混合粉末配比,为进一步开展汽车和高铁铸铁制动盘以及其他零部件的激光表面熔覆处理提供技术参考。

1 激光熔覆配方设计和加工

1.1 激光熔覆配方设计

摩擦表面需具有较高的耐磨性和力学性能,根据表层性能需求,熔覆材料选用镍基 625 粉末和碳化钨(WC)的混合粉末^[19],碳化钨的硬度高且很耐磨,而镍基 625 是以镍为主要成份的合金,具有很好的耐腐蚀和耐高温性能。所以镍基 625 与碳化钨的混合粉末熔覆层具有耐腐蚀、耐高温、硬度高、结合性好的特点。镍基 625 粉末的成份如表 1 所示,其粒度均为 80~270 目,具有良好的流动性。图 1a 和 1b 分别为镍基 625 粉末和碳化钨粉末微观形貌。分别称取质量分数为 5%、10%、15%、20%、25%、30%、35%、40%、45%、50% 的碳化钨粉末,配制 Ni625 和 WC 混合熔覆粉末并在 100 ℃ 环境下进行 2 h 烘干预处理。

表 1 镍基 625 粉末化学成份表

Table 1 Chemical composition of Ni625 powder

Chemical element	C	Si	Mn	Cr	Ni	Fe	Co	Mo	P	S	Nb	Al	Ti	Cu
Mass fraction/%	0.04	0.16	0.04	20.9	61.52	4.46	0.01	8.56	0.003	0.001	3.31	0.01	0.18	0.06

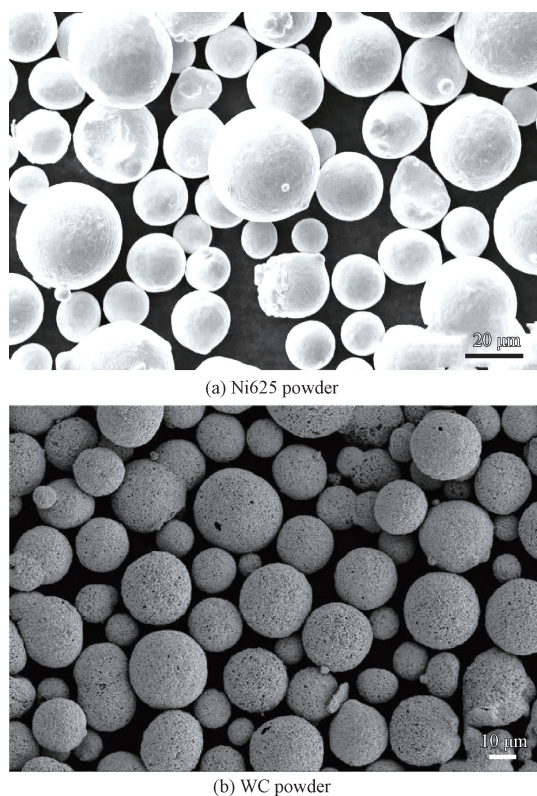


图1 激光熔覆粉末微观形貌

Fig. 1 Micro morphology of laser cladding powder

1.2 激光熔覆设备

激光熔覆设备主要包括激光器、机器人手臂和送粉器。熔覆方式采用图2所示的同步送粉方式进行激光熔覆。

熔覆系统激光器为德国通快(TRUMPF)公司的TruDisk4002 碟片式激光器,该激光器功率在 80 ~ 4 000 W 连续可调,功率输出稳定,产生的光束质量优良,具有高脉冲能量和高平均功率的优势,不仅能承受恶劣的环境条件,还具有高功能性的智能控制。

机械人手臂所使用的是灵活度较高的六轴类手臂型的机器人,这种机器人的自由度很大,其主体包

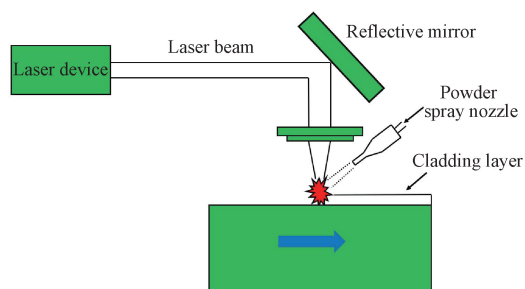


图2 激光熔覆方式—同步式送粉示意图

Fig. 2 Illustration of laser cladding mode-synchronous powder feeding

括臂部、腕部、手部,具有 6 个自由度。驱动系统使执行机构产生相应的动作,控制系统则按照输入的程序对驱动系统和执行机构发出指令并进行控制。使用这种类手臂的工业机器人,在激光熔覆工作中既可以替代人工手动操作避免人为的误差,又可以准确地设定加工参数实现即时有效地控制,还可以避免工作中环境因素对人体的伤害。

熔覆采用螺旋线型加工,每次进给 1.8 mm,共加工 10 圈,送粉器选用气体同步式送粉器。熔覆搭接率对熔覆层的性能具有重要影响,搭接率是多道熔覆时,相邻熔覆道间的搭接宽度与单道熔覆层宽度之比。本熔覆加工的搭接率为 55%。

1.3 激光熔覆涂层的加工

熔覆层的材料性能不仅受到激光功率、进给速度等加工工艺参数的影响,而且粉末配比也十分重要。考虑到试验的经济性和可行性,采用试验次数较少的均匀设计法^[20]进行激光工艺参数设计。选取激光功率、进给速度、送粉盘转速、保护气体流量、送粉气体流量以及碳化钨含量 6 个因素作为试验变量,每个变量 10 个水平,确定的激光熔覆工艺参数水平如表 2 所示。

表2 激光熔覆工艺参数水平

Table 2 Laser cladding parameter level

Laser power/W	Feed speed/(mm/min)	Rotating speed of powder feeder/(r/min)	Protective gas flow/(L/min)	Powder feed gas flow/(L/min)	WC powder content/%
800	480	4.1	15.1	4.0	5
950	500	4.2	15.2	4.2	10
1 100	520	4.3	15.3	4.4	15
1 250	540	4.4	15.4	4.6	20
1 400	560	4.5	15.5	4.8	25
1 550	580	4.6	15.6	5.0	30
1 700	600	4.7	15.7	5.2	35
1 850	620	4.8	15.8	5.4	40
2 000	640	4.9	15.9	5.6	45
2 150	660	5.0	16.0	5.8	50

根据试验所需的因素和水平,选取 8 因素 10 水平 $U_{10}(10^8)$,从其对应的使用表^[20]中,可以查到当

因素为 6 时的均匀设计表,得到最终的激光熔覆工艺参数均匀设计表,如表 3 所示。

表 3 熔覆加工工艺参数
Table 3 Laser cladding parameter

Program	Laser power/W	Feed speed / (mm/min)	Rotating speed of powder feeder/(r/min)	Protective gas flow/(L/min)	Powder feed gas flow/(L/min)	WC powder content/%
1	1(800)	2(500)	3(4.3)	5(15.5)	7(5.2)	10(50)
2	2(950)	4(540)	6(4.6)	10(16.0)	3(4.4)	9(45)
3	3(1 100)	6(580)	9(4.9)	4(15.4)	10(5.8)	8(40)
4	4(1 250)	8(620)	1(4.1)	9(15.9)	6(5.0)	7(35)
5	5(1 400)	10(660)	4(4.4)	3(15.3)	2(4.2)	6(30)
6	6(1 550)	1(480)	7(4.7)	8(15.8)	9(5.6)	5(25)
7	7(1 700)	3(520)	10(5.0)	2(15.2)	5(4.8)	4(20)
8	8(1 850)	5(560)	2(4.2)	7(15.7)	1(4.0)	3(15)
9	9(2 000)	7(600)	5(4.5)	1(15.1)	8(5.4)	2(10)
10	10(2 150)	9(640)	8(4.8)	6(15.6)	4(4.6)	1(5)

激光熔覆加工试样按照表 3 方案实施。试样的材料为灰铸铁 HT250,尺寸为直径 69 mm,厚度 10 mm 的圆盘,激光熔覆制备前用丙酮对试样进行清洗。加工所得熔覆层厚 1 mm,再对熔覆层表面进行磨削和抛光,得到无裂纹、无气孔的光滑熔覆层表面,如图 3 所示。

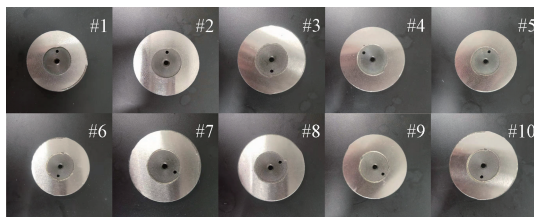


图 3 表面经抛光后的激光熔覆试样

Fig. 3 Laser cladded specimen after surface polishing

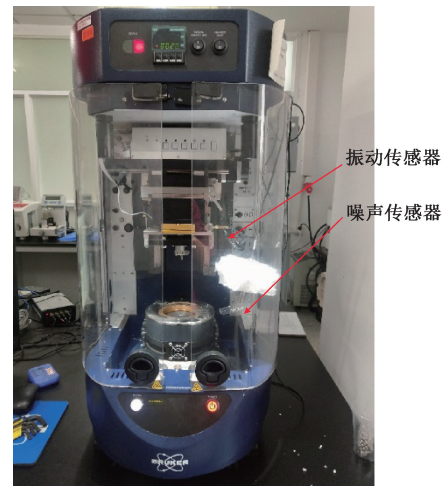


图 4 UMT-Tribolab 摩擦磨损试验机

Fig. 4 UMT-Tribolab friction and wear testing machine

2 试验设备与方法

2.1 试验设备

将熔覆加工后的试样进行表面磨削和抛光处理,之后用石油醚进行表面清洗。将处理好的试样,利用 UMT-Tribolab 摩擦磨损试验机进行干摩擦磨损试验。

利用北京东方振动噪声研究所开发的 DASP (Data acquisition & signal processing) 智能数据采集分析仪采集并处理振动和噪声信号。UMT-Tribolab 摩擦磨损试验机和振动噪声传感器的安装如图 4 所示。

2.2 试验方法

试验所用的对偶副是直径为 6 mm 的不锈钢球,该钢球固定不动,动试样是熔覆后的试件,以一定的速度旋转,同时通过气动加载装置施加压力,实

现干摩擦滑动。在试验过程中,动摩擦因数由内置扭矩传感器测量并采集,通过 DASP 数据采集仪记录各种工况下的振动和噪声信号。

为了研究不同熔覆参数对熔覆层表面性能的影响,10 个试件均采用相同接触压力 20 N、相同线速度 0.5 m/s、相同滑动摩擦距离 100 m 进行试验。

3 试验结果与分析

3.1 激光熔覆工艺对摩擦噪声的影响

从图 5 可以看出,10 个加工试件产生的摩擦噪声声压值均比未经熔覆加工试件(原件)的摩擦噪声值有不同程度的降低。原件的摩擦噪声集中在 0~4 kHz 的频率内,且以 2 kHz 频率左右的噪声为主,噪声峰值为 0.84 Pa。通过对比分析可以看出,激光熔覆加工具有明显的降噪效果,尤其在 0~2 kHz 范围内,其中 3 号、5 号、6 号、8 号、9 号的降

噪效果尤为明显,而 3、8、9 号试样的降噪效果最明显并且接近。

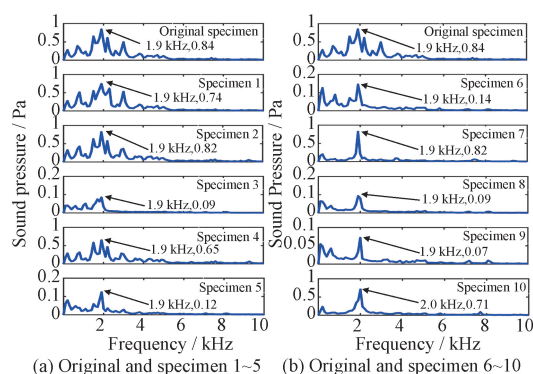


图 5 激光熔覆试件与原件摩擦噪声频谱

Fig. 5 Frictional noise spectrum of laser clad and original specimen

3.2 激光熔覆工艺对振动的影响

在测试摩擦噪声的同时也对摩擦引起的振动信号进行了采集,并进行了频谱分析,如图 6 所示。从图 6 可以看出,原件在摩擦磨损试验时的振动峰值频率为 700 Hz,振动峰值为 174.7 m/s^2 。而其他熔覆件的振动峰值频率为 700 Hz 或 800 Hz,但振动峰值均有明显减小。通过对比分析看出,激光熔覆加工有着明显的减振效果,3、5、8、9 号试样的减振效果尤为明显,而 9 号试样的减振效果最好。

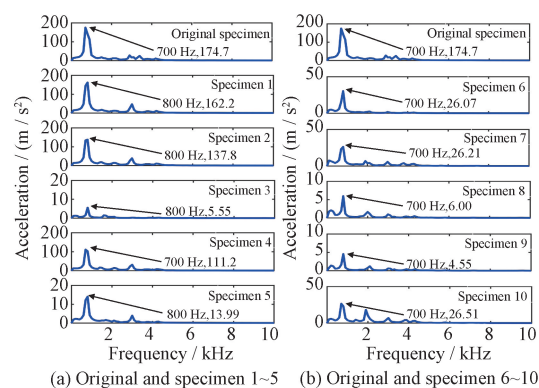


图 6 激光熔覆试件与原件摩擦振动频谱

Fig. 6 Frictional vibration spectrum of laser clad and original specimen

3.3 激光熔覆工艺对表面磨损的影响

通过观察试样的表面磨损形貌可以研究激光熔覆表面材料的耐磨性能。因此,在摩擦磨损试验结束后,用超声波清洗 11 个试样表面,使用 BRUKER 表面形貌白光干涉仪对试样的表面形貌进行测量和分析。图 7a 为原件、图 7b~7k 分别为 1~10 号熔覆加工试样在摩擦磨损试验后的表面形貌。可以清楚地观察到,原件的磨痕深且宽,磨损程度较大,并且存在严重的犁沟磨损痕迹。经过表面熔覆加工后的试样,其磨痕均有不同程度的变窄变浅,磨损程度均有所减小。由此可见,经过激光熔覆加工后的试样其耐磨性能得到较大提高。

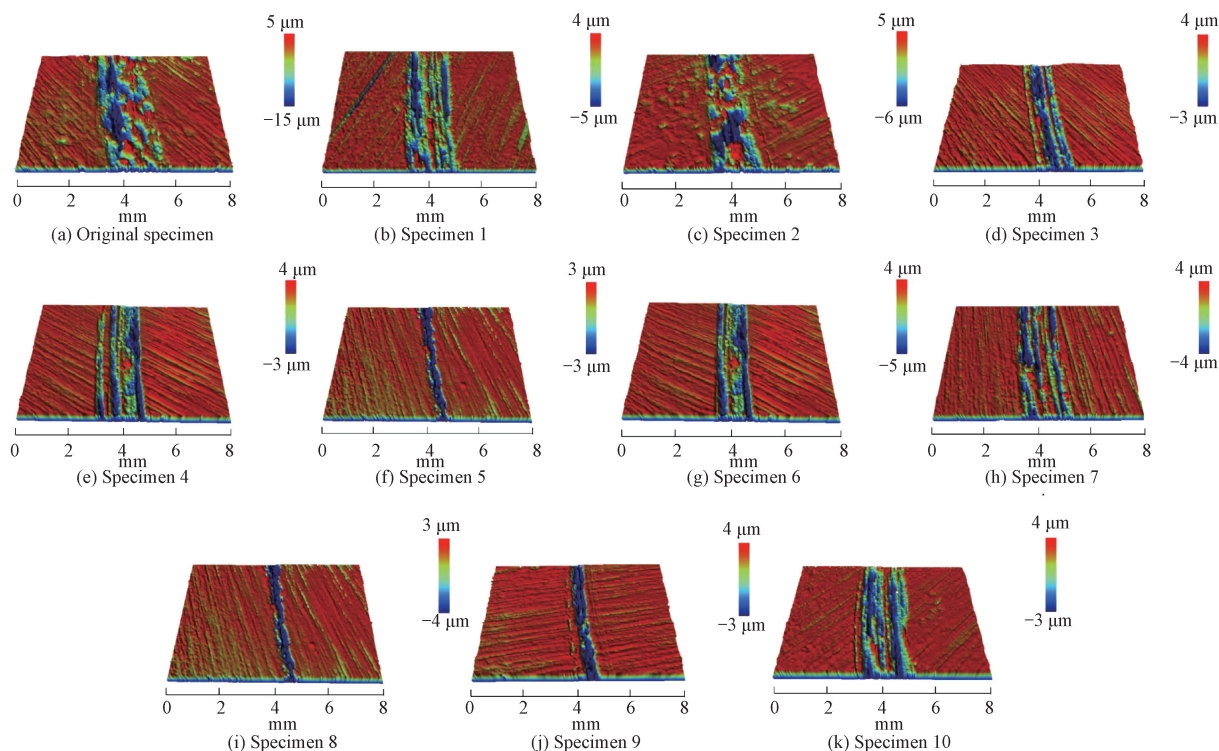


图 7 试样表面形貌

Fig. 7 Topography of specimen

经测试,11个试验试样的磨损量如图8所示。从图8中可以看出,原件的磨损量约为 0.1 mm^3 ,激光熔覆试件的磨损量均得到显著降低,其中5号试件的抗磨效果最为显著,其磨损量只有原件磨损量的5%。很明显,经激光熔覆加工后试样的表面耐磨性大大优于未经熔覆加工的试样。

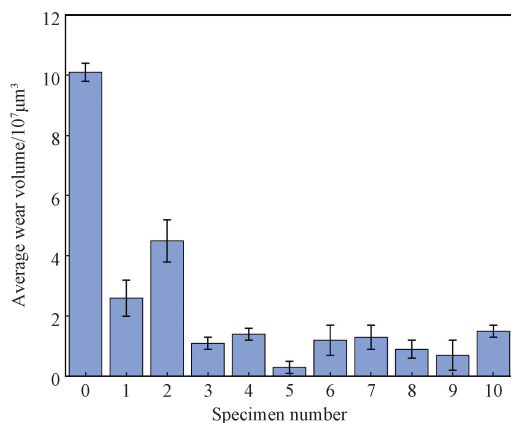


图8 试验试样的磨损量

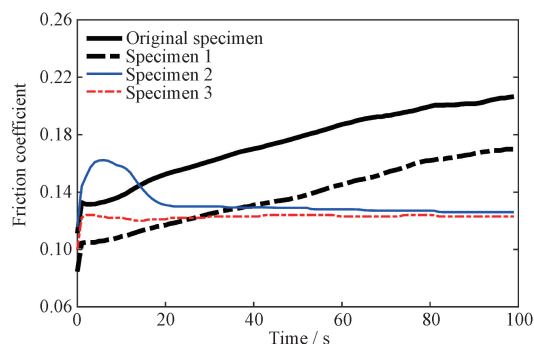
Fig. 8 Wear volume of tested specimen

3.4 激光熔覆工艺对摩擦因数的影响

摩擦因数是摩擦副的重要摩擦学性能指标之一。文中每个试件的摩擦因数,是在同一工况下重复试验3次,每次试验滑动摩擦时间100 s,3次试验得到的摩擦因数的平均值。由图9可知,原件的摩擦因数由0.13随时间呈明显上升趋势至0.21;经激光熔覆加工后的试件在前20 s出现不同程度的波动后,2、3、4、5、6号试件的摩擦因数趋于0.125的稳定状态;试件1的初始摩擦因数较低,但是其摩擦因数也跟原件一样呈明显增加趋势至0.17,其主要原因是由于激光功率过小,粉末与基体没有良好结合。而7、8、9、10号试件的摩擦因数则稳中略有升高,即从0.12升到0.14左右。由试验结果可以看出,试样2、3、4、5、6的摩擦因数比较稳定,说明这几个试样的摩擦性能较好。

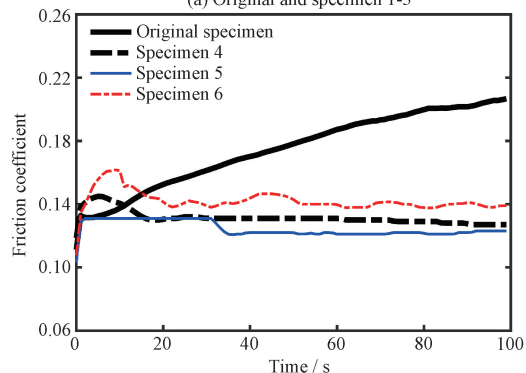
3.5 加工表面的硬度

材料的硬度可以在一定程度上反映出材料的抗磨性能。布氏硬度仪压头直径较大,经常用来测量组织结构不太均匀的材料(铸铁)的硬度。所以,本研究采用布氏硬度仪对10个激光熔覆加工试件以及未加工试件进行表面硬度的测量,均采用直径为10 mm的硬质合金球对试样进行1 500 kg和15 s的挤压。每个试件进行5次测量,去除最大值、最小值,对其余3次测量值计算平均值,该试样的



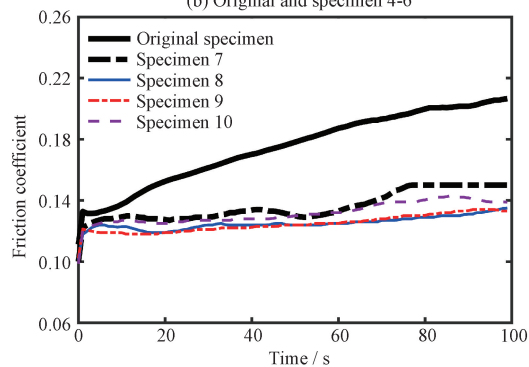
(a) 原件和试样1~3

(a) Original and specimen 1-3



(b) 原件和试样4~6

(b) Original and specimen 4-6



(c) 原件和试样7~10

(c) Original and specimen 7-10

图9 摩擦因数

Fig. 9 Coefficient of friction

表面平均硬度值。由图10可以看出,激光熔覆对表面硬度有显著提高,除2号试样外其余激光熔覆试样的表面硬度比未加工试样表面的硬度提高了50%左右。

3.6 激光熔覆层微观组织分析

由于激光熔覆层是经过高能激光短时间加热并冷却而成的,熔覆层的微观组织受激光熔覆加工参数的影响很大。而在研究材料的性能时,其微观组织的变化则是其性能变化的关键所在。本研究采用Hitachi S-3400 N型扫描电子显微镜对熔覆层的表面和断面进行观察研究。通过线切割从熔覆试样和未加工试样上分别截取长35 mm、宽10 mm、高10 mm的长方体试样进行观察。对未加工试样和经

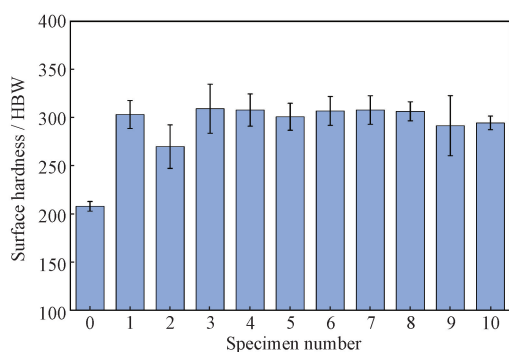


图 10 试样表面硬度测量值

Fig. 10 Measured surface hardness of specimen

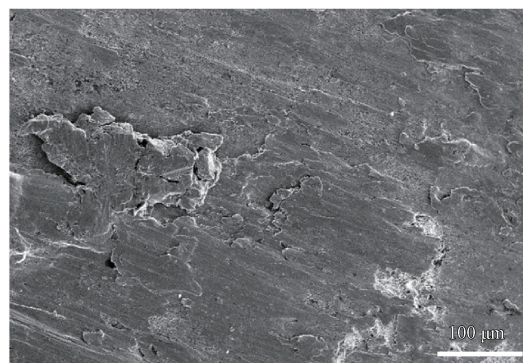
过激光熔覆加工的试样的磨痕处进行电镜扫描,对比观察其磨损形貌并分析其磨损机制。图 11a 和 11b 分别表示 0 号(铸铁)和 5 号熔覆试样磨痕的 SEM 图。从图 11a 中可以看出,铸铁试样在摩擦后产生的磨痕出现大量金属屑脱落,其表面凹凸不平并存在犁沟现象。说明铸铁材料的磨损机制主要是疲劳破坏、磨粒磨损。图 11b 所示的表面较平整光滑,说明熔覆层中的 WC 颗粒作为增强相起到了抗磨作用。图 12 所示是表面性能综合表现较优异的 3 号熔覆试样断面涂层和基体结合处放大 100 倍的扫描电镜 SEM 图。从图 12 可以明显看出,在熔覆层和基体搭接处没有气孔和裂纹,说明当激光熔覆工艺参数适当时,可制备出均匀且与基体材料冶金结合良好的涂层组织,进而提高其耐磨性及其他使用性能。

4 激光熔覆制备方案模糊综合评价

模糊综合评价法是一种基于模糊数学的综合评价方法。利用模糊数学对受到多种因素制约的事物或对象做出一个总体的评价,具有结果清晰,系统性强,能够较好地解决模糊、难以量化的问题。一般分为四个步骤:①构建综合评价指标;②构建权重向量;③构建评价矩阵;④评价矩阵的权重合成,进行综合评价。

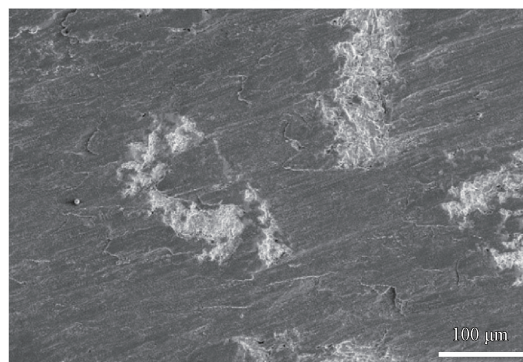
4.1 构建评价指标

本文主要研究试件的减振降噪和摩擦磨损性能。评价指标中的降噪性能用摩擦过程中产生的噪声频谱能量的最大值表示;减振性能用摩擦过程中产生的振动能量最高值来反映;试件的摩擦性能用滑动摩擦过程中平均摩擦因数的大小和稳定性来表示;试件的耐磨性能用磨损量的大小来反映。结合本文的研究目的将上述五项指标作为评价指标。



(a) 0号试样表面磨痕形貌

(a) Wear surface topography of specimen No. 0



(b) 5号试样表面磨痕形貌

(b) Wear surface topography of specimen No. 5

图 11 未加工试样与熔覆试样表面磨痕形貌

Fig. 11 Surface topography of specimen after wear testing

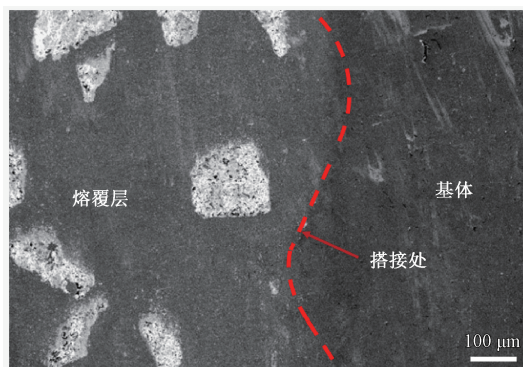


图 12 3号熔覆试样截面形貌

Fig. 12 Topography of the cross-section of cladded specimen No. 3

4.2 构建权重向量

本文将目标层定为:T(性能最优)。准则层选择: G_1 (降噪性能)、 G_2 (减振性能)、 G_3 (摩擦性能)和 G_4 (磨损性能)。指标层则包括: I_1 (噪声能量信号最高值)、 I_2 (振动能量信号最高值)、 I_3 (摩擦因数)、 I_4 (摩擦因数波动系数)以及 I_5 (平均磨损量),由此构建的模型如图 13 所示。

为了按照下层对上层目标影响的重要程度来构建判断矩阵,本文选择 Saaty 的 1~9 标度表^[21],如

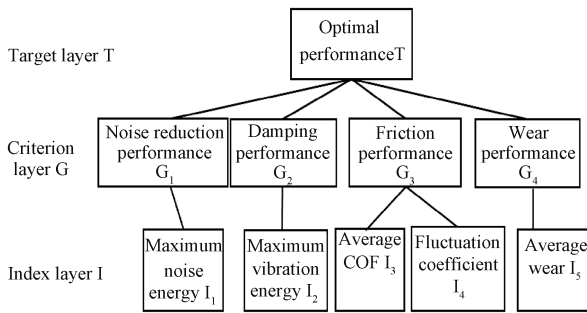


图 13 综合性能结构模型

Fig. 13 Structural model of comprehensive performance

表 4 所示。将重要程度转化为定量的表述,便于得出直观清晰的决策结果,并对各个因素的重要程度的协调性进行检验。对判断矩阵进行一致性指标 (CI) 检验,该值越小,说明得到的判断矩阵就越一致。 CI 值按式(1)来计算。若 $CI=0$,则可以认为判断矩阵绝对一致;若 $CI \approx 0$,则进行能够反映判断矩阵一致性程度的一致性比率 (CR) 检验,当 CR 小于 0.1 时判断矩阵表现出较高的一致性。 CR 值按式(2)来计算,而在本研究中选用方根法计算权重系数 w ,如式(3)所示。

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} \quad (1)$$

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (2)$$

$$w = \left(\prod_{j=1}^m a_{ij} \right)^{\frac{1}{m}} (i = 1, 2, \dots, n) \quad (3)$$

表 4 Saaty 标度表

Table 4 Saaty scale table

Scale	Meaning
1	x is equally important than y
3	x is slightly more important than y
5	x is relatively more important than y
7	x is extremely more important than y
9	x is absolutely more important than y
2, 4, 6, 8	The middle value of two adjacent judgments
Reciprocal	The importance of y over x

由随机一致性指标表^[22]可知一、二、四矩阵的随机一致性 RI 值为 0、0、0.90。 CI 和 CR 分别按式(1)和(2)计算,其中 $\lambda_{\max}$ 与 j 分别为判断矩阵的最大特征值与阶数。从表 5 可以看出判断矩阵 $T-G_i$ 的 CR 明显低于 0.1,为一致性矩阵;其余的判断矩阵都为 0,故均为完全一致矩阵。

表 5 判断矩阵

Table 5 Judgment matrix

	$T-G_i$					G_1-I_i			G_2-I_i			G_3-I_i				G_4-I_i		
	G_1	G_2	G_3	G_4	w	G_1	I_1	w	G_2	I_2	w	G_3	I_3	I_4	w	G_4	I_5	w
T																		
G_1	1	1/2	5	4	0.336	I_1	1	1	I_2	1	1	I_3	1	1/2	0.334	I_5	1	1
G_2	2	1	5	4	0.474							I_4	2	1	0.666			
G_3	1/5	1/5	1	1/3	0.065													
G_4	1/4	1/4	3	1	0.125													
$\lambda_{\max} = 4.158$ $CI = 0.052$ $RI = 0.90$						$\lambda_{\max} = 1$ $CI = 0$			$\lambda_{\max} = 1$ $CI = 0$			$\lambda_{\max} = 2$ $CI = 0$				$\lambda_{\max} = 1$ $CI = 0$		
$CR = 0.059 < 0.1$																		

表 5 中 $T-G_i$ 是准则层对目标层的判断矩阵, G_i-I_i 是指标层对准则层的判断矩阵, w 是其特征向量归一化处理后的结果,代表着下层目标对应的权重系数。

将指标层四个参数的权重系数依次排列成权重向量,归一化处理后的结果为:

$$Q = [0.336 \quad 0.474 \quad 0.021 \quad 84 \quad 0.043 \quad 29 \quad 0.125]^T$$

4.3 确定评价矩阵

设定噪声能量的最高值为 x_i 、振动能量最高值为 y_i 、平均摩擦因数为 f_i 、摩擦因数波动系数为 v_i 、平均磨损量为 w_i 。将 x_i 、 y_i 、 f_i 、 v_i 、 w_i 组合成矩阵,得到初始评价矩阵,考虑到评价指标单位差异,需要对其进行列归一化得到 R 矩阵。波动性系数按照式(4)

计算得:

$$v_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n |f - \bar{f}| \quad (4)$$

$$x_i = \begin{bmatrix} 0.74 \\ 0.82 \\ 0.09 \\ 0.65 \\ 0.12 \\ 0.14 \\ 0.82 \\ 0.09 \\ 0.07 \\ 0.71 \end{bmatrix} \quad y_i = \begin{bmatrix} 162.2 \\ 137.8 \\ 5.55 \\ 111.2 \\ 13.99 \\ 26.07 \\ 26.21 \\ 6.00 \\ 4.55 \\ 26.51 \end{bmatrix} \quad f_i = \begin{bmatrix} 0.138 \\ 0.132 \\ 0.123 \\ 0.131 \\ 0.124 \\ 0.141 \\ 0.136 \\ 0.125 \\ 0.125 \\ 0.132 \end{bmatrix}$$

$$v_i = \begin{bmatrix} 0.017\ 9 \\ 0.005\ 1 \\ 0.000\ 7 \\ 0.002\ 1 \\ 0.002\ 8 \\ 0.001\ 4 \\ 0.009\ 3 \\ 0.003\ 3 \\ 0.004\ 5 \\ 0.005\ 8 \end{bmatrix} \quad w_i = \begin{bmatrix} 0.026\ 1 \\ 0.045\ 3 \\ 0.011\ 1 \\ 0.013\ 6 \\ 0.003\ 3 \\ 0.011\ 8 \\ 0.012\ 9 \\ 0.008\ 7 \\ 0.006\ 7 \\ 0.015\ 1 \end{bmatrix}$$

$$R = \begin{bmatrix} 0.174\ 1 & 0.311\ 9 & 0.105\ 6 & 0.338\ 4 & 0.168\ 8 \\ 0.192\ 9 & 0.265\ 0 & 0.101\ 0 & 0.096\ 4 & 0.293\ 0 \\ 0.021\ 1 & 0.010\ 7 & 0.094\ 1 & 0.013\ 2 & 0.071\ 8 \\ 0.152\ 9 & 0.213\ 8 & 0.100\ 2 & 0.039\ 7 & 0.088\ 0 \\ 0.028\ 2 & 0.026\ 9 & 0.094\ 9 & 0.052\ 9 & 0.021\ 3 \\ 0.032\ 9 & 0.050\ 1 & 0.107\ 9 & 0.026\ 5 & 0.076\ 3 \\ 0.182\ 9 & 0.050\ 4 & 0.104\ 1 & 0.175\ 8 & 0.083\ 4 \\ 0.021\ 1 & 0.011\ 5 & 0.095\ 6 & 0.062\ 4 & 0.056\ 3 \\ 0.016\ 4 & 0.008\ 7 & 0.095\ 6 & 0.085\ 1 & 0.043\ 3 \\ 0.167\ 1 & 0.051\ 0 & 0.101\ 0 & 0.109\ 6 & 0.097\ 7 \end{bmatrix}$$

4.4 模糊综合评价

激光熔覆所加工试样性能的综合得分 S 如式(5)所示。由每个参数的实际含义可知,噪声能量信号最高值越小,降噪效果越好;振动能量信号最高值越小,减振效果越好,平均摩擦因数越小,摩擦因数波动系数越小,其摩擦性能越好,平均磨损量越小,耐磨性越好。所以,依据 S 中的数据可知方案 9 为最优加工方案。

$$S = R \cdot Q = \begin{bmatrix} 0.244\ 4 \\ 0.233\ 4 \\ 0.023\ 8 \\ 0.167\ 6 \\ 0.029\ 3 \\ 0.047\ 8 \\ 0.105\ 7 \\ 0.024\ 4 \\ 0.020\ 8 \\ 0.099\ 5 \end{bmatrix} \quad (5)$$

5 结论

采用了均匀分布法设计对铸铁表面进行激光熔覆 Ni625 和 WC 复合涂层,在进行摩擦磨损试验的同时采集了摩擦振动和噪声信号并进行了频谱分析,并对激光熔覆层的磨痕和断面形貌、磨损量及硬度进行了测量和对比分析。基于对上述试验结果的

分析,建立了模糊综合评价模型并得出如下结论:

(1)在铸铁表面上进行激光熔覆 Ni625/WC 复合涂层,可以有效抑制其产生摩擦噪声和振动。当激光功率为 2 000 W、进给速度为 600 mm/min、送粉盘转速为 4.5 r/min、保护气体流量为 15.1 L/min、送粉气体流量为 5.4 L/min、WC 粉末质量为 10% 时,在最大噪声频率 1 900 Hz 处的降噪率高达 90%,而在最大振动频率 700 Hz 处的减振率则高达 97%。

(2)激光熔覆 Ni625/WC 复合涂层,使铸铁基体的表面硬度提高了 50%,磨损量降低至基体的 5%~10%,从而大大提高了铸铁基体试件的抗磨性能,延长其使用寿命。

(3)激光熔覆 Ni625/WC 复合涂层试样的摩擦因数都有不同程度的减小,并且稳定性有明显提高。

(4)减振降噪效果最明显的 3、5、8、9 号试样的摩擦因数较小且稳定,同时磨损量也减少的最明显。说明激光熔覆 Ni625/WC 复合涂层的减振降噪机理是涂层的摩擦因数减小和稳定以及磨损的减少,而与涂层的硬度没有直接关系。

(5)本研究为进一步对铸铁件,尤其对汽车和高铁制动盘的表面进行激光熔覆改性具有较好的指导意义,也对其他材料表面的激光熔覆具有一定的技术参考价值。

参 考 文 献

- [1] 尹桂敏. 激光加工技术在工程机械制造中的应用研究[J]. 中国设备工程, 2019, 2: 194-195.
YIN G M. Research on the application of laser processing technology in construction machinery manufacturing [J]. China Equipment Engineering, 2019, 2: 194-195. (in Chinese)
- [2] LIU Q B. Experimental study of the laser quenching of 40CrNiMoA steel[J]. Journal of Materials Processing Technology, 1999, 88: 77-82.
- [3] WANG S W, GUO W, ZENG K. Characterization of automotive brake discs with laser-machined surfaces[J]. Automotive Innovation, 2019, 2(3): 190-200.
- [4] LARS H, STAFFAN J. Surface modification of brake discs to reduce squeal problems[J]. Wear, 2006, 261(1): 53-57.
- [5] 赵海龙, 张理. 激光熔覆在再制造中的应用[J]. 自动化应用, 2019(1): 145-146.
ZHAO H L, ZHANG L. Application of laser cladding in remanufacturing[J]. Application of Automation, 2019(1): 145-146. (in Chinese)
- [6] 姜波, 李金朋. 激光熔覆技术研究现状与发展[J]. 科技创新导报, 2018(32): 53-54.
JIANG B, LI J P. Research status and development of laser cladding technology[J]. Science & Technology Innovation Herald,

- 2018 (32): 53-54. (in Chinese)
- [7] SUN N, SHAN H Y, ZHOU H. Friction and wear behaviors of compacted graphite iron with different biomimetic units fabricated by laser cladding[J]. *Applied Surface Science*, 2012, 258: 7699-7706.
- [8] GUO H M, WANG Q, WANG W J. Investigation on wear and damage performance of laser cladding Co-based alloy on single wheel or rail material[J]. *Wear*, 2015, 328-329: 329-337.
- [9] ZHANG S T, ZHOU J S, GUO B G. Friction and wear behavior of laser cladding Ni/hBN self-lubricating composite coating[J]. *Materials Science and Engineering A*, 2008, 491: 47-54.
- [10] GONZALEZ F A, VAL J D, PENIDE J. Fiber laser cladding of nickel-based alloy on cast iron[J]. *Applied Surface Science*, 2016, 374: 197-205.
- [11] ALI K, AKBAR D J, MOSLEM P. Laser cladding of inconel 718 with 75Cr3C2+25(80Ni20Cr) powder: statistical modeling and optimization[J]. *Surface & Coatings Technology*, 2019, 378: 124933.
- [12] 李信, 曲庆文, 崔林. 工艺参数对激光增材熔覆成形 Co 基 WC 复合涂层的影响[J]. *热加工工艺*, 2020, 49(2): 96-100.
- LI X, QU Q W, CUI L. Effect of process parameters on laser additive cladding Co-based WC composite coatings[J]. *Hot Work Process*, 2020, 49(2): 96-100. (in Chinese)
- [13] 张敏, 王刚, 张立胜. 40Cr 钢表面激光熔覆 Fe/Ni 基涂层组织性能研究[J]. *稀有金属*. [2021-03-25]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2111.TF.20191211.0955.001.html>.
- ZHANG M, WANG G, ZHANG L S. Microstructure and properties of laser cladding Fe/Ni based coatings on the surface of 40Cr steel[J]. *Rare Metals*. [2021-03-25]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2111.TF.20191211.0955.001.html>. (in Chinese)
- [14] 程国东, 万举惠. 激光熔覆 TiC/Ni60 镍基涂层磨损特征[J]. *焊接技术*, 2018, 47(12): 28-30.
- CHENG G D, WAN J H. Wear characteristics of laser cladding TiC/Ni60 nickel-based coatings [J]. *Welding Technology*, 2018, 47(12): 28-30. (in Chinese)
- [15] 靳鸣, 贺定勇. 激光熔覆 2205 双相不锈钢 TiC 复合涂层的显微组织与性能[J]. *中国激光*, 2018, 55(11): 285-290.
- JIN M, HE D Y. Microstructure and properties of laser cladding 2205 duplex stainless steel TiC composite coating [J]. *China Laser*, 2018, 55(11): 285-290. (in Chinese)
- [16] 江国业, 谢金蕾, 庞铭. 蠕铁激光熔覆镍基 WC 合金组织和性能非均匀性[J]. *激光与光电子学进展*, 2020, 57(15): 151404.
- JIANG G Y, XIE J L, PANG M. Microstructure and properties of laser cladding Ni-based WC alloys with heterogeneous iron [J]. *Progress in Laser and Optoelectronics*, 2020, 57(15): 151404. (in Chinese)
- [17] XU Z Z, HE Z J, WANG Z Y. Effects of CeO₂ on the Microstructure and properties of laser cladding 316L coating[J]. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2019, 28(8): 4983-4900.
- [18] ZOU Y, MA B H, CUI H C. Microstructure, wear, and oxidation resistance of nanostructured carbide strengthened cobalt-based composite coatings on Invar alloys by laser cladding[J]. *Surface & Coatings Technology*, 2020, 381: 125188.
- [19] 林程, 狄姣, 车显飞, 等. 激光熔覆涂层的研究现状[J]. *中国陶瓷*, 2017, 4(53): 1-6.
- LIN C, DI J, CHE X F, et al. Research status of laser cladding coatings[J]. *Chinese Ceramics*, 2017, 4(53): 1-6. (in Chinese)
- [20] 方开泰, 马长兴. 正交与均匀实验设计[M]. 北京: 科学出版社, 2001: 126-128.
- FANG K K, MA C X. Orthogonal and uniform experimental design[M]. Beijing: Science Press, 2001: 126-128. (in Chinese)
- [21] 熊立, 梁樑, 王国华. 层次分析法中数字标度的选择与评价方法研究[J]. *系统工程理论与实践*, 2005, 3(3): 72-79.
- XIONG L, LIANG L, WANG G H. Research on the selection and evaluation method of digital scale in analytic hierarchy process[J]. *Systems Engineering Theory and Practice*, 2005, 3(3): 72-79. (in Chinese)
- [22] 洪志国, 李焱, 范植华. 层次分析法中高阶平均随机一致性指标(RI)的计算[J]. *计算机工程与应用*, 2002, 38(12): 45-47.
- HONG Z G, LI Y, FAN Z H. Calculation of high-order mean random consistency index (RI) in AHP [J]. *CEA*, 2002, 38(12): 45-47. (in Chinese).

作者简介: 王书文(通信作者),男,1963年出生,博士,教授。主要研究方向为汽车 NVH 和表面工程。

E-mail: shuwenwang66@163.com; wsw@usst.edu.cn