

激光熔覆修复 15-5PH 不锈钢的拉伸性能及组织研究

刘海涛¹, 司超阳¹, 霍登平¹, 张青绒¹, 杨东辉²

(1. 航空工业西安飞行自动控制研究所, 西安 710065;

2. 西安铂利特激光成形技术有限公司, 西安 710072)

[摘要] 研究了激光熔覆修复 15-5PH 沉淀硬化不锈钢激光熔覆修复比例(25%、50%、75%、100%)对其力学性能的影响,以及熔覆修复后试样的断口形貌、金相组织、内部缺陷和显微硬度。研究表明,15-5PH 不同比例熔覆修复试样的抗拉强度均高于基材,但塑性随着修复比例的增大而降低,在所研究的 4 种熔覆修复比例的试样中,25% 熔覆比例时抗拉强度最高,力学性能最好。熔覆修复冶金组织致密,分为修复区、热影响区和基材区,其中热影响区的组织呈现明显的方向性,晶粒均匀性好,无粗大晶粒,表面和内部无裂纹缺陷,显微硬度从修复区向基材区整体呈上升趋势,在热影响区内出现硬度峰值。熔覆界面的结合力较基体内部的结合力弱,修复试样的断口均呈 V 字形。
关键词: 熔覆修复; 力学性能; 15-5PH; 金相组织

Study on Tensile Property and Microstructure of Laser Cladding Repaired of 15-5PH Stainless Steel

LIU Haitao¹, SI Chaoyang¹, HUO Dengping¹, ZHANG Qingrong¹, YANG Donghui²

(1. AVIC Xi'an Flight Automatic Control Research Institute, Xi'an 710065, China;

2. Xi'an Bright Laser Technologies LTD., Xi'an 710072, China)

[ABSTRACT] The affect of cladding reparation rate (25%, 50%, 75% and 100%) on mechanical property of 15-5PH precipitation hardening stainless steel is studied. Cladding repairing samples are also used for testing fractograph, metallographic structure, internal flaws and microstructure hardness. The results show that the tensile strength under different cladding reparation rate is higher than the matrix; however its ductility decreases with the increase of cladding reparation rate. Among all the studied samples, the tensile strength and mechanical property reach the peak under 25% cladding reparation rate sample. The metallographic structures of cladding reparation area, heat-affected zone and undamaged matrix is compact. Among them, the structure of heat-affected zone shows apparent direction, with refined grains and flawless interface and surface. The microstructure hardness rises from cladding reparation to matrix, with peak value in heat-affected zone. The adhesive force of cladding area is weaker than that of inner matrix. The results show that fractograph of samples all resemble V shape.

Keywords: Cladding reparation; Mechanical property; 15-5PH; Metallurgical structure

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2017.10.086

15-5PH 是一种低碳马氏体型沉淀硬化不锈钢,具有强度高、耐腐蚀性好、韧性和低温性能良好等特点,广泛应用于航空航天、兵器工业、船舶制造等领域。尤其在航空制造领域,作动器部件广泛采用 15-5PH 沉淀硬化不锈钢,使作动器具有 10 年以上的服役时间和较长的维修周期^[1]。

作动器部件在长期使用过程中易产生应力开裂、机械磨损等缺陷,在制造过程中也会因误加工而形成过切、啃刀等缺陷,这些缺陷的存在将显著影响整个组件的使用性能,甚至导致报废,从而造成很大浪费。面对

这种情况,国内外对修复技术做了大量研究,常规修复方法如电弧堆焊、氩弧堆焊和等离子弧堆焊等,由于输入的热量巨大,且要求将零件预热到非常高的温度,必将导致零件有较大的变形,甚至内部组织发生变化,修复后的零件经常无法使用。兴起于 21 世纪初的激光熔覆修复技术很好地解决了此类问题,受到普遍关注。

激光熔覆技术是利用大功率高能激光束,结合 CNC 控制技术,在短时间内将预先涂覆在零件表面的涂层或同步送粉与基体表面一起熔化后快速凝固,获得与基体冶金结合的致密覆层,实现零件的增材制造或修

复,后续结合机械加工或打磨,可恢复零件的几何尺寸。在此过程中,激光加热速率极快,并以基体金属作为冷却介质,冷却速率可达 103 ~ 108 K/s,使修复区域瞬间熔化和凝固。既可减小修复区氧化的几率,又使晶粒来不及长大,较大的温度梯度加剧了熔池的对流,使组织进一步细化,还可使其对基体的热效应降至最小限度,将零件变形和开裂的几率控制到最小^[2-3]。

综上所述,激光熔覆技术具有修复质量高、操作方便、热影响区小等优点,是一种非常好的零件快速修复技术。目前该技术在钛合金零件修复上得到一定程度的应用^[4-5],但鲜有 15-5PH 不锈钢零件激光熔覆修复的报道。

本文主要研究了 15-5PH 沉淀硬化不锈钢不同熔覆修复比例(25%、50%、75%、100%)对力学性能的影响,以及熔覆修复后试样的断口形貌、金相组织、内部缺陷和显微硬度。

1 试验材料及方法

激光熔覆修复试验在西北工业大学凝固技术国家重点实验室建立的 LSF-I 型激光立体成形设备上完成。该设备由 RS-850 型 CO₂ 激光器, LMP-408 型 4 坐标数控工作台, DPSF-1 型送粉器,同轴送粉喷嘴和惰性气体保护箱等组成。试验采用的主要工艺参数见表 1。

试验材料为 15-5PH 不锈钢基材和粒径为 75~150 μm 的 15-5PH 球形粉末,基材和粉的化学成分见表 2。15-5PH 基材经 580 °C 时效硬化,硬度为 31~38HRC。试验前将粉末材料在 150 °C 真空条件下(≤ 0.1Pa)进行烘干处理,以减少粉末吸潮对成形质量

表1 激光立体成形工艺参数

工艺参数	参数值
激光功率/W	1600~2200
扫描速度/(mm·s ⁻¹)	4~10
送粉速率/(g·min ⁻¹)	3~5
保护气体流量/(L·h ⁻¹)	200~400
激光斑点直径/mm	2.0~3.0
重叠率/%	30~50
Z轴增量/mm	0.2~0.35

表2 15-5PH基材和球形粉化学成分(质量分数)

基材与粉末	C	Cr	Ni	S	P	Mn	Si	Nb	Cu
基材	0.032	14.90	5.01	0.010	0.024	0.73	0.34	0.31	3.32
粉末	0.041	14.81	4.98	0.010	0.026	0.75	0.31	0.29	3.35

带来的不良影响,用砂纸对基材表面进行打磨处理,再用丙酮清洗干净^[6]。

为反映不同熔覆修复比例对 15-5PH 室温拉伸性能的影响,确定飞机作动器部件激光熔覆修复技术的适用范围,本文设计了缺损体积比分别为 25%、50%、75%、100% 的拉伸试棒。激光熔覆修复前,先加工成槽状试样(见图 1),槽底与中心线距离决定最终车加工后标准试样取样区域的熔覆修复比例。激光熔覆修复后,将槽状试样车加工成图 2 所示的标准试样,取样位置为图 1 中槽型试样横截面中心位置,拉伸试样轴心与槽型试样轴心重合,修复区横截面积分别占试棒径向总横截面积的 25%、50%、75% 和 100%。每种修复比例的试棒各 4 根。在 ZWICK 250 型电子万能试验机上进行室温拉伸试验,分别测量了各试样的抗拉强度、屈服强度、伸长率和断面收缩率,与 15-5PH 基材制成的标准试样拉伸数据进行比对。

5 种类型试样的拉伸性能数据见表 3,其中熔覆修复比例 0 是指利用 15-5PH 原材料加工的对照试棒,100% 是指试样平行段完全由激光熔覆修复材料打印后加工而成的试样。

为研究熔覆修复后材料及其界面的微观组织,特制备了两块尺寸为 10mm × 10mm × 10mm 的 15-5PH 试样,在其中一个面激光熔覆 15-5PH 粉末,熔覆层厚度约 5mm,沿熔覆界面法向制备金相试样。

利用 JSM-6390A 型扫描电子显微镜(SEM)研究不同修复比例拉伸试样的断口形貌特征。利用 OLYMPUS GX71 型倒置式金相显微镜观察金相试样的显微组织形貌,并利用 Duramin-A300 显微硬度计测试金相试样不同区域的显微硬度。

2 试验结果与讨论

2.1 熔覆修复试样力学性能

图 3 为室温拉伸时 5 种试样的抗拉强度、屈服强度、伸长率和断面收缩率的均值变化图。抗拉强度随熔覆修复比例增加呈现先增大后减小的现象;屈服强度无明显变化规律;延伸率和断面收缩率随熔覆修复比例增加呈先减小后增大趋势。

由试验结果可见,不同缺损体积比修复试样的抗拉强度略高于基材和 100% 修复试样,而基材试样和

100% 修复试样的抗拉强度接近。对试样进行修复会提高材料的抗拉强度,该现象与试样修复界面区域的硬度升高有关,这点在 2.5 节中可以看到。不同缺损体积比修复试样的屈服强度并未表现出与抗拉强度相同的变化规律,在所研究的 4 种熔覆修复比例的试样中,75% 熔覆修复比例时屈服强度最高。不同缺损体积比修复试样的延伸率和断面收缩率均低于基材和 100% 修复试样,修复试样的延伸率和断面收缩率随着修复比例的增加而降低。由于基材和 100% 修复试样上不存在修复界面,修复界面会降低试样塑性,因此基材和 100% 修复试样的延伸率和断面收缩率均高于不同比例的修复试样。

2.2 熔覆修复试样断口形貌

缺损体积为 25%、50%、75% 的熔覆修复试样断口均为 V 型断口,断口形貌相似。V 型断口的两个断面方向分别沿修复界面和与轴线夹角呈 45°。以 50% 熔覆修复试样断口形貌为例,其断口的扫描电镜照片如图 4 所示。其中修复界面是断口的稳定形成面,表明修复界面的结合力弱于基体内部的结合力。100% 缺损体积比的熔覆修复试样的断口与基材制成的标准试样断口一致。断口特征为:心部受三向应力的作用产生裂纹,裂纹由中心向四周扩展导致断裂。在断口上存在断裂过程中产生的二次裂纹(见图 5 和 6)。

2.3 熔覆修复试样微观组织

图 7 为熔覆修复 15-5PH 试样金相组织,可以看出熔覆修复试样组织共分为 3 个区域:基材区、热影响区

和修复区。

热影响区是修复区和基材区的过渡区域,深度约为 1mm,在靠近修复区和靠近基材区的不同区域显微组织有较明显的差异。热影响区由尺寸较小的 α 板条长大合并所形成的粗大 α 板条构成,等轴 α 基本消失,趋于形成新的晶界。热影响区晶粒沿修复区至

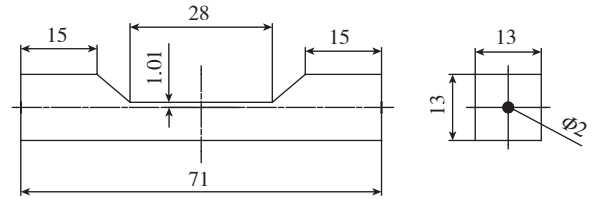


图1 缺损体积比为25%的槽修复试样尺寸
Fig.1 Sample with 25% cladding layer

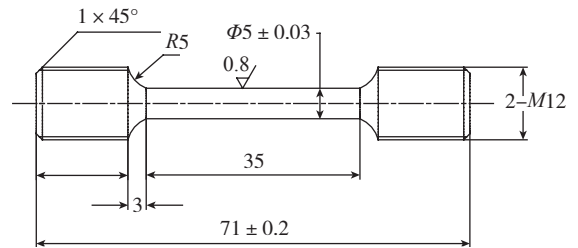


图2 拉伸试样尺寸
Fig.2 Tensile test specimen

表3 试样拉伸性能数据

参数		熔覆修复比例 /%				
		0	25	50	75	100
抗拉强度 /MPa	1	1112	1141	1159	1165	1117
	2	1123	1179	1173	1174	1122
	3	1123	1185	1176	1181	1125
	4	1125	1226	1190	1188	1135
屈服强度 /MPa	1	1082	1036	1040	1091	1034
	2	1085	1067	1097	1109	1047
	3	1084	1039	1089	1099	1071
	4	1091	1072	1099	1118	1081
延伸率 A/%	1	12	4.5	3	0.5	10.5
	2	13	7.5	4	1.5	11
	3	13.5	13	4.5	2.5	11.5
	4	14.5	15.5	5	2.5	11.5
断面收缩率 Z/%	1	57	42	30	25	59
	2	59	48	39	29	61
	3	60	60	39	40	62
	4	60	63	50	42	63

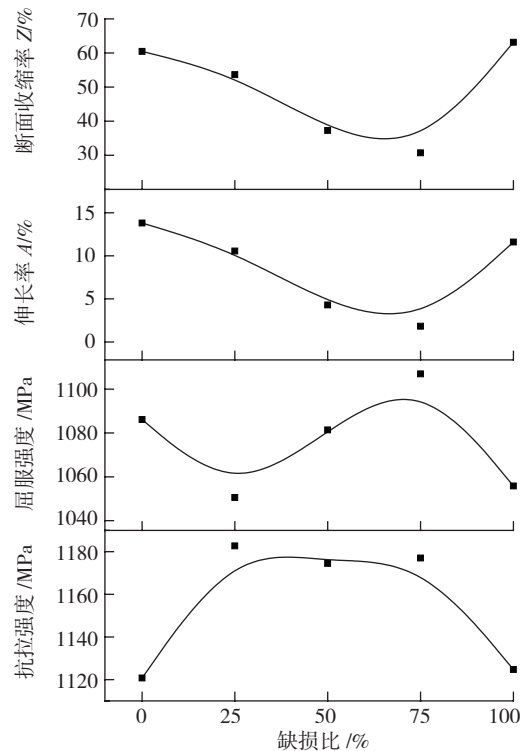
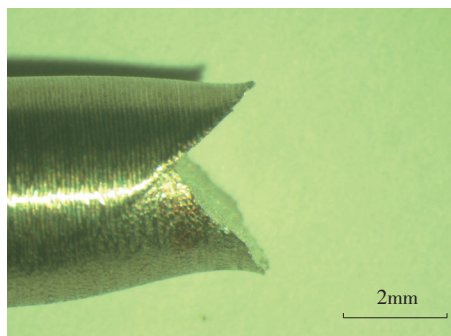
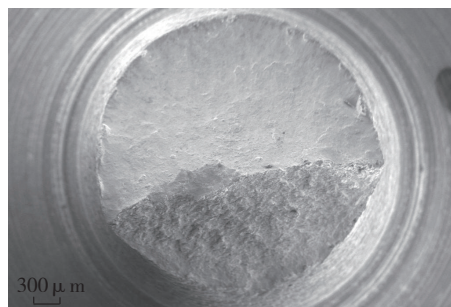


图3 不同缺损体积比15-5PH在室温下的抗拉强度、屈服强度、延伸率、断面收缩率均值
Fig.3 Average tensile strength/yield strength/elongation/reduction of 15-5PH with different cladding rates at room temperature

基材区方向长大,呈现明显的定向生长规律,该现象因熔覆过程中的热量由修复区至基材区传递导致。基材区为沉淀硬化马氏体组织,呈等轴状和板条状的双态组织^[7-10]。



(a) 轴向



(b) 径向

图4 缺损体积比50%的熔覆修复试样断口

Fig.4 Fracture of a sample with 50% cladding layer

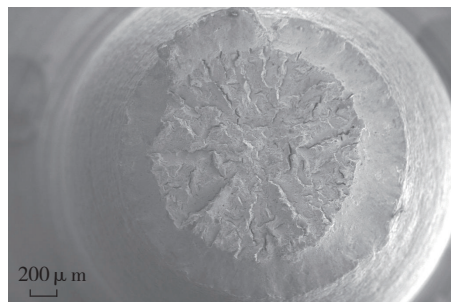


图5 缺损体积比100%的熔覆修复试样断口

Fig.5 Fracture of a sample with 100% cladding layer

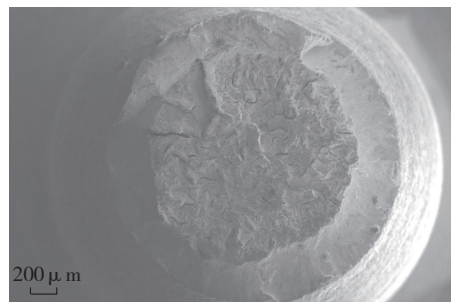


图6 基材试样断口

Fig.6 Fracture of 15-5PH sample

2.4 熔覆修复试样表面和内部缺陷

经 X 射线检测,熔覆修复试样内部未发现裂纹、气孔。按 ASTM E1444-2001 进行磁粉探伤检查,熔覆修复试样内部未发现缺陷,符合 MIL-STD-1907 A 级验收要求。

2.5 熔覆修复试样显微硬度

激光成形修复零件中修复区、热影响区和基材区的硬度及其分布情况将对修复后零件的性能带来很大影响。如果修复区较基材区硬度过高,会导致韧性严重降低,甚至在局部产生微裂纹,导致整个零件失效。

从图 8 可以看出,修复区硬度为 313~324HV,基材区硬度为 354~362HV,热影响区硬度为 355~452HV,其中修复区的硬度略低于基材区。值得关注的是,热影响区的硬度明显高于另外两个区域,其原因是激光熔融修复过程中热影响区组织重新加热,所受影响相当于进行了时效处理,因此硬度较高。

3 结论

(1) 15-5PH 不同熔覆比例试样的抗拉强度均高于基材,但塑性随着修复比例的增大而降低。25% 熔覆比例时抗拉强度最高,力学性能最好。

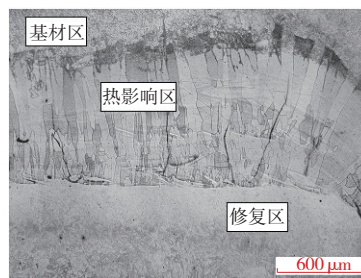


图7 修复区微观组织

Fig.7 Microstructure of cladding repairation

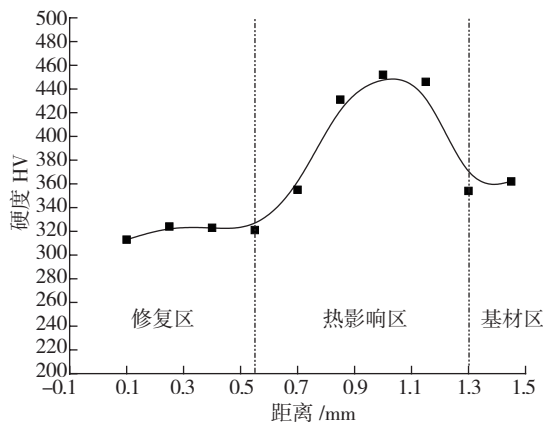


图8 15-5PH熔覆试样显微硬度

Fig.8 Microstructure hardness of 15-5PH cladding sample

(2) 熔覆界面的结合力较基体内部的结合力弱, 修复试样的断口均呈 V 字形。

(3) 15-5PH 熔覆试样的微观组织分为修复区、热影响区和基材区, 其中热影响区的组织呈现明显的方向性。

(4) 15-5PH 熔覆试样不同区域的硬度值有差异, 其中热影响区的硬度最高。

参考文献

- [1] 李树梁, 周贤良, 华小珍, 等. 15-5PH 不锈钢长时效时间对组织和力学性能的影响[J]. 失效分析与预防, 2013, 8(6):331-332.
- LI Shuliang, ZHOU Xianliang, HUA Xiaozhen, et al. Influence on microstructure and mechanical properties of long-term aged 15-5PH stainless steel[J]. Failure Analysis and Prevention, 2013, 8(6): 331-332.
- [2] 贺运初, 潘树林, 胡祖汉. 大型往复压缩机曲轴裂纹的激光熔覆修复[J]. 化肥工业, 2007, 34(5): 52-53.
- HE Yunchu, PAN Shulin, HU Zuhuan. Repair by laser fusion coating of cracks in crank-shaft of large reciprocating compressor[J]. Chemical Fertilizer Industry, 2007, 34(5):52-53.
- [3] 贾治国, 邓琦林. 铸钢零件激光熔覆修复试验研究和工程应用[J]. 电加工与模具, 2012(6): 56-57.
- JIA Zhiguo, DENG Qilin. The experimental researches and engineering applications on repairing cast-steel components by laser cladding[J]. Electromachine & Mould, 2012(6): 56-57.
- [4] HUANG W, CHEN J, LI Y. Laser rapid forming technology of high performance dense metal compents with complex structure[J]. Proceedings of SPIE, 2005, 5629:67-75.
- [5] 陈静, 张强, 刘彦红, 等. 激光成形修复 Ti17 合金组织与高温性能研究[J]. 中国激光, 2011, 38(6): 205-211.
- CHEN Jing, ZHANG Qiang, LIU Yanhong, et al. Research on microstructure and high temperature properties of Ti17 titanium alloy fabricated by laser solid forming [J]. Chinese Journal of Lasers, 2011, 38(6): 205-211.
- [6] 张方, 陈静, 薛蕾, 等. 激光成形修复 Ti60 合金组织与性能研究[J]. 应用激光, 2009, 29(2): 87-88.
- ZHANG Fang, CHEN Jing, XUE Lei, et al. Study on micro structure and mechanical properties of laser solid repaired Ti60 alloy[J]. Applied Laser, 2009, 29(2): 87-88.
- [7] 王俊伟, 陈静, 刘彦红, 等. 激光立体成形 TC17 钛合金组织研究[J]. 中国激光, 2010, 37(3): 848-851.
- WANG Junwei, CHEN Jing, LIU Yanhong, et al. Research on microstructure of TC17 titanium alloy fabricated by laser solid forming [J]. Chinese Journal of Lasers, 2010, 37(3):848-851.
- [8] SESHACHARYULU T, MEDEIROS S C, FRAZIER W G, et al. Microstructural mechanisms during hot working of commercial grade Ti-6Al-4V with lamellar starting structure[J]. Materials Science & Engineering A, 2002, 325(1-2): 112-125.
- [9] STEFANSSON N, SEMIATION S L, EYLON D. The kinetics of static globularization of Ti-6Al-4V[J]. Materials Science & Engineering A, 2002, 33:3527-3534.
- [10] STEFANSSON N, SEMIATION S L. Mechanisms of globularization of Ti-6Al-4V during static heat treatment[J]. Metallurgical

and Materials Transactions A, 2003, 34: 691-698.

通讯作者: 刘海涛, 硕士, 工程师, 研究方向为熔覆修复技术, E-mail: 443951170@qq.com. (责编 逸飞)

(上接第85页)

宽度的敏感程度近似相同。

(3) 以获得较大残余压应力为优化目标, 较优的切削参数组合为 $v_c=50\text{m/min}$, $f_z=0.06\text{mm/z}$, $a_p=0.6\text{mm}$, $a_e=0.4\text{mm}$ 。

参考文献

- [1] C. 莱茵斯, M. 皮特尔斯. 钛与钛合金[M]. 陈振华, 译. 北京: 化学工业出版社, 2005:79-83.
- LEYENS C, PETERS M. Titanium and titanium alloys[M]. CHEN Zhenhua, tran. Beijing: Chemical Industry Press, 2005:79-83.
- [2] BERANOAGIRRE A, LACALLE L N L D. Turning of gamma TiAl intermetallic alloys[J]. AIP Conference Proceedings, 2012, 1431(80):526-532.
- [3] SHARMAN A R C. Workpiece surface integrity considerations when finish turning gamma titanium aluminide[J]. Wear, 2001, 249:473-481.
- [4] PRIARONE P C, RIZZUTI S, ROTELLA G, et al. Tool wear and surface quality in milling of a gamma-TiAl intermetallic[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2012,61(1):25-31.
- [5] 陈建岭, 李剑锋, 孙杰. 钛合金铣削加工表面残余应力研究[J]. 机械强度, 2010, 32(1): 53-57.
- CHEN Jianling, LI Jianfeng, SUN Jie. Surface residual stress of titanium alloy induced by milling[J]. Mechanical Strength, 2010,32(1):53-57.
- [6] MANTLE A L, ASPINWALL D K. Surface integrity of a high speed milled gamma titanium aluminide[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2001, 118(1-3): 143-150.
- [7] MANTLE A L, ASPINWALL D K. Cutting force evaluation when high speed end milling a gamma titanium aluminideintermetallic alloy[J]. Intermetallics and Superalloy, 2006, 10:209-215.
- [8] HOOD R, ASPINWALL D K, SOO S L, et al. Workpiece surface integrity when slot milling γ -TiAl intermetallic alloy[J]. CIRP Annals-Manufacturing Technology, 2014, 63(1):53-56.
- [9] 田荣鑫, 姚倡锋, 黄新春, 等. 面向加工表面粗糙度的钛合金高速铣削工艺参数区间敏感性分析及优选[J]. 航空学报, 2010, 31(12):2464-2470.
- TIAN Rongxin, YAO Changfeng, HUANG Xinchun, et al. Process parameter interval sensitivity and optimization of machined surface roughness for high-speed milling of titanium alloys[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2010,31(12):2464-2470.
- [10] 刘振学, 黄仁和, 田爱民. 实验设计与数据处理[M]. 北京: 化学工业出版社, 2005:62-67.
- LIU Zhenxue, HUANG Renhe, TIAN Aimin. Experimental design and data processing[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2005:62-67.
- 通讯作者: 刘维伟, 副教授, 研究方向为精密制造技术, E-mail: liuwv@nwpu.edu.cn. (责编 逸飞)