doi：10.11933/j.issn.1007-9289.2015.06.020

基于激光熔覆的车床主轴再制造*

韩玉勇[1,2]，鲁俊杰[1]，李剑峰[1]，孙 杰[1]，刘云辉[2]

(1.山东大学 机械工程学院 高效洁净机械制造教育部重点实验室，济南 250061；2. 枣庄科技职业学院 机械工程系，山东 滕州 277599)

摘 要： 随着我国可持续发展重大战略的推进，蕴含着高附加值的损伤、退役机床再制造研究越来越受到重视，作为机床的核心部件之一，损伤主轴再制造成为机床再制造的关键。使用 Nd：YAG 固体激光熔覆设备及 FeCr 合金粉料对损伤 45 钢主轴进行修复再制造研究，使用扫描电镜观察了熔覆层组织结构，通过显微硬度测试、摩擦磨损试验分析了熔覆层硬度及耐磨性，使用磨床对主轴熔覆层进行精密磨削加工。结果表明所得熔覆层无气孔裂纹等缺陷，其硬度达 547 $HV_{0.1}$，相同负载条件下熔覆层耐磨性为基体材料的 3.7 倍；磨削加工后再制造主轴完全恢复至设计尺寸，经过相同服役时间后再制造主轴磨损量小于新品主轴磨损量，说明了车床主轴激光熔覆再制造的可行性及有效性。

关键词： 车床主轴；激光熔覆；再制造；磨削；耐磨性

中图分类号： TG174.44；TH17 **文献标志码：** A **文章编号：** 1007-9289(2015)06-0147-07

Lathe Spindle Remanufacturing Based on Laser Cladding Technology

HAN Yu-yong[1,2], LU Jun-jie[1], LI Jian-feng[1], SUN Jie[1], LIU Yun-hui[2]

(1. Key Laboratory of High Efficiency and Clean Mechanical Manufacture, Ministry of Education, School of Mechanical Engineering, Shandong University, Jinan 250061; 2. Department of Mechanical Engineering, Zaozhuang Vocational College of Science and Technology, Tengzhou 277599, Shandong)

Abstract: With the promotion of the sustainable development strategy, remanufacturing research on damaged and retired machine tool containing high additional value is getting increasing attention. As one of the core components of the machine tool, damage lathe spindle remanufacturing becomes the key issue for machine tool remanufacture. The FeCr alloy was deposited on 45 steel spindle used Nd：YAG laser by laser cladding technology. The microstructure, phase constitution, hardness and wear resistance of the cladding layer were investigated by scanning electron microscope, X-ray diffractometer, Vickers digital micro-hardness and sliding wear tester. The laser cladding layer on spindle was ground by the grinder. The results shows that the cladding layer is free of cracks, presents a remarkable hardness up to 547 $HV_{0.1}$, and has excellent wear resistance which is 3.7 times of the substrate. Remanufacturing spindle restore the design size, and has less amount of wear compared with that of a new spindle after the same service time. It illustrates that laser cladding is a promising technology for lathe spindle remanufacturing.

Keywords: lathe spindle; laser cladding; remanufacturing; grinding; wear resistance

收稿日期： 2015-06-30；**修回日期：** 2015-11-19；**基金项目：** *国家重点基础研究发展计划(973 计划)(2011CB013401)；山东省高等学校青年骨干教师国内访问学者项目

通讯作者： 韩玉勇(1975－)，男(汉)，副教授，硕士；**研究方向：** 机床修复；**Tel：** (0632) 5632 617；**E-mail：** yuyonghan@163.com

网络出版日期： 2015-12-09 08：35；**网络出版地址：** http://www.cnki.net/kcms/detail/11.3905.TG.20151209.0835.020.html

引文格式： 韩玉勇，鲁俊杰，李剑峰，等. 基于激光熔覆的车床主轴再制造[J]. 中国表面工程，2015，28(6)：147-153. Han Y Y, Lu J J, Li J F, et al. Lathe spindle remanufacturing based on laser cladding technology [J]. China Surface Engineering, 2015, 28(6): 147-153.

0 引 言

损伤零件的再制造修复是挽回巨大经济与时间损失，提高资源利用率，实现国家经济可持续发展的重要途径[1-2]。我国机床行业是一个潜在且巨大的再制造市场[3]，截止至2013年我国机床保有量约为1300万台[4]，其中役龄超过10年的传统旧机床超过200万台，若按3%的年机床报废淘汰率进行估算，每年将有接近40万台机床面临报废或功能性淘汰，再制造前景广阔[1,3]。用于带动工件或刀具旋转的主轴是机床的关键部件，其运动精度直接影响零件的加工精度[5]；同时因长期服役主轴不可避免的出现偏磨、划痕及腐蚀等损伤。因此，损伤主轴再制造成为机床再制造的关键。

目前已有学者开展了机床再制造的相关研究。Ligang Cai等[6]针对重型机床再制造提出了基于绿色设计、绿色产品开发的适应性设计方法；Yanbin Du等[7-8]从技术可行性、经济可行性及环境收益等角度提出了机床可再制造性集成评价方法，通过刨床再制造对该方法的有效性进行了验证，并通过实例分析了机床再制造的经济、环境效益；陈海峰[9]使用有限元仿真的方法研究了退役机床齿轮零件剩余疲劳寿命预测及可再制造性评估；张旭刚[10]建立了基于质量功能展开、模糊线性回归及0-1目标规划的废旧机床再制造工艺方案决策模型。结合相关研究，考虑再制造的机床设计、废旧机床剩余寿命预估及可再制造性评价、废旧机床再制造方案决策、再制造机床寿命预估成为机床再制造的关键问题。

针对损伤主轴的修复再制造，目前已有学者开展了相关研究。如董文[11]使用电弧喷涂对废旧机床主轴进行再制造；曹华军等[12]使用等离子喷涂技术对滚齿机主轴进行了再制造，并分析了修复引入的涂层残余应力；韩晓玲等[13]采用热喷涂技术对镗床静压主轴的轴颈进行了修复再制造；邓大石[14]等使用热喷涂技术对磨床主轴进行了再制造；吴慧媛[15]采用低温超音速火焰喷涂方法对数控车床损伤主轴进行了表面复合涂层修复。目前损伤主轴再制造手段主要为喷涂技术，该技术虽然成本较低，但所得涂层与基体一般为机械结合，且涂层内容易出现气孔、夹渣等缺陷。其他再制造手段如焊接/堆焊技术成本较低、容易实现，但热影响区较大，影响主轴服役寿命，主要用于精度、性能要求较低的工件；电镀、刷镀等技术可获得纳米复合镀层，但其厚度较小、效率较低，会产生一定污染。激光熔覆作为一种先进表面修复技术，可获得与基体呈牢固冶金结合的熔覆层，且熔覆层稀释率低、热输入和畸变相对较小，可通过多层堆叠获得熔覆成形层。目前已有学者将激光熔覆技术应用于机床再制造，如赵文强等[16]使用激光熔覆技术进行了机床导轨修复研究。亦有学者将激光熔覆技术应用于轴类零件修复，如A. Ray等[17]使用激光熔覆技术进行了连铸机横向轧辊修复研究，有效提高了轧辊硬度、耐磨性，延长服役寿命；T. Torims等[18]进行了船用发动机曲轴激光熔覆修复研究，并指出激光熔覆技术应用于船用曲轴修复具有效率高、成本低等优点。但目前将激光熔覆技术应用于机床主轴再制造的研究还比较少。

为此，文中以出现磨损的某型车床主轴为研究对象，选用性能优异的合金粉料进行激光熔覆修复，分析激光熔覆层宏/微观组织特征及硬度、耐磨性，随后对熔覆层进行磨削加工，并通过装机运行验证该再制造方案的有效性，实现车床主轴的再制造。

1 材料与设备

1.1 试验材料

车床主轴服役过程中由于使用不清洁机油，混在机油中较大的坚硬杂质在主轴表面刻划而留下了擦伤痕迹(如图1所示)，此处轴颈直径为 Φ 70 mm。

图1 主轴轴颈损伤部位

Fig. 1 Injured part of the spindle axis

车床主轴材质为45钢(调质处理248 $HV_{0.1}$)，各组成化学元素成分如表1所示。

激光熔覆用粉体材料一般可分为金属粉末、陶瓷粉末和复合材料粉末，自熔性合金粉末应用广泛，其中 Fe 基、Ni 基及 Co 基合金粉末是自熔性合金粉末中应用最多的 3 种材料。Ni 基粉料具有良好的韧性、抗氧化性，润湿性、耐蚀性和高温自润滑性能好，主要用于局部要求耐磨、耐热腐蚀及抗热疲劳的构件；Co 基粉料具有良好的高温耐磨性能，用于耐磨、耐蚀、耐高温的场合，价格相对较高；Fe 基合金成本低且抗磨性能好，多用于铸铁和低碳钢等材料的激光熔覆。为此研究选用铁基自熔性合金粉料进行车床主轴的激光熔覆修复，其化学元素成分如表 1 所示。

表 1　45 钢及 Fe 基合金粉料的元素成分

Table 1　Element composition of 45 steel and powder material of Fe-based alloy　　(w/%)

Materials	C	Mn	Si	Mo	Cr	Ni	Cu	P	S	B	Fe
45 steel	0.42-0.50	0.50-0.80	0.17-0.37		≤0.25	≤0.30	≤0.25	≤0.035	≤0.035		Bal.
Fe-based alloy	0.15		1.1	1.0	17.35	1.35				≤1.26	Bal.

1.2　激光熔覆修复及熔覆层性能测试

由于主轴表面存在油渍、污垢、锈蚀等杂质，修复前采用喷砂高压清洗及超声波清洗的方法对主轴表面进行清理。使用 Nd：YAG 固体激光器进行激光熔覆修复，基于激光器生产厂商提供的工艺参数及课题组前期基础工艺试验，选择熔覆工艺参数如下：电流 230 A，脉宽 3.5 ms，频率 17 Hz，扫描速度 340 mm/min；送粉量 9 g/min，搭接量 40%。选择 3 种扫描速度：300、340、380 mm/min，用以探究不同扫描速度对熔覆层性能的影响。通过激光熔覆设备自带数控系统进行四轴联动激光熔覆修复，试验现场如图 2 所示。熔覆完成后，对主轴进行保温处理，通过缓慢冷却来降低残余热应力。

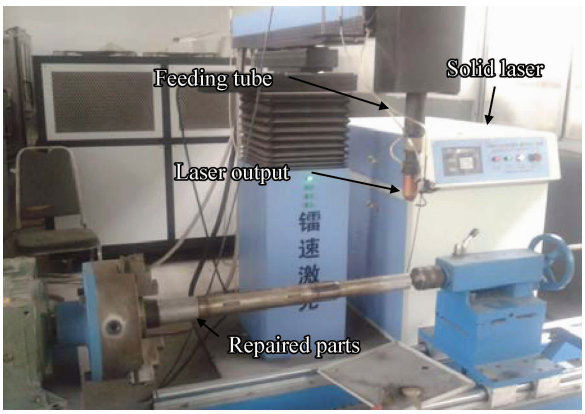


图 2　车床主轴激光熔覆修复现场

Fig. 2　Repaired scene of laser cladding for the lathe spindle

使用扫描电镜对经镶嵌、研磨、抛光的激光熔覆修复层试样剖面进行微观织形貌分析，使用 X 射线衍射（XRD，$2\theta=20°\sim90°$）对熔覆层物相进行了测试。使用 MH-6 显微硬度计对激光熔覆修复层剖面硬度分布进行测试，加载为 0.98 N，载荷保持时间为 10 s。使用摩擦磨损试验机在室温、无润滑条件下对激光熔覆层试样和 45 钢基体试样分别进行滑动摩擦试验，试验时工件表面作用 0.147 N 竖直载荷，滑动速度为 5 mm/s，总时间为 20 min，摩擦试验进行时设备自动记录摩擦因数曲线，计算激光熔覆层及 45 钢试样磨损率并以此为指标进行耐磨性评价。

1.3　激光熔覆修复层后续加工及服役性能测试

具有较高硬度、耐磨性的激光熔覆修复层一般需经过后续机械加工方可满足装配精度要求，对于回转体零件而言，磨削是实现高效、精密加工的有效手段。因此，使用磨削加工的方法对车床主轴激光熔覆层进行后续精密加工，使其恢复原有尺寸及性能；为验机床主轴激光熔覆再制造的有效性，选择两台同型号新机床，将其中一台原装主轴用再制造主轴替代，二者在大致相同工况下服役，每天根据工厂实际情况执行大致相同的生产任务，每天工作时间为 16 h。在运行 1 500 h后对两台机床的主轴磨损量进行测试，使用磨损量对车床主轴再制造有效性进行评价。

2　激光熔覆层组织形貌及主要性能

2.1　熔覆层组织形貌及物相

图 3 为扫描速度为 340 mm/min 时车床主轴激光熔覆修复层宏观形貌，熔覆层表面平滑、搭接紧密，无裂纹等缺陷。图 4 为各扫描速度下激光熔覆层剖面微观组织形貌，可以看到 3 种扫描

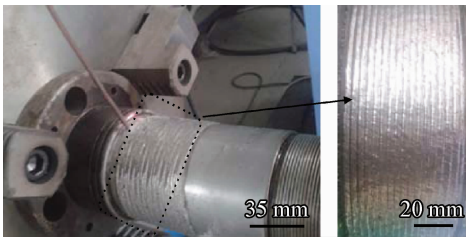


图 3 车床主轴激光熔覆修复层宏观形貌

Fig. 3 Macroscopic feature of the laser cladding layer

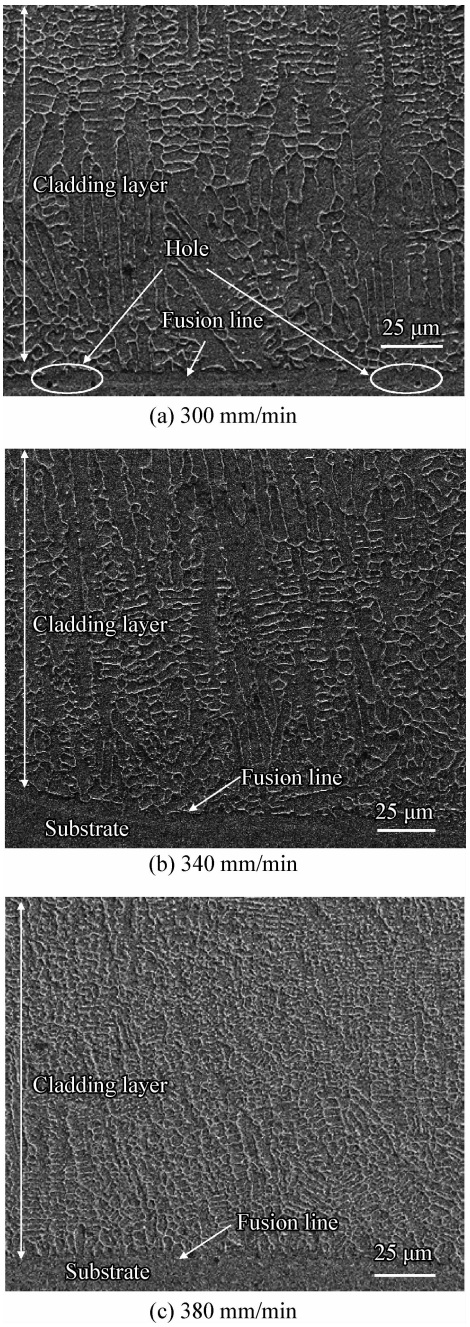


图 4 不同扫描速度下激光熔覆层剖面微观组织形貌

Fig. 4 Cross section morphologies of the laser cladding layer with different scanning speeds

速度下得到的熔覆层剖面内部均无裂纹、气孔等缺陷;3 种扫描速度下的熔覆层均可观察到胞晶生长、胞状枝晶生长及等轴枝晶生长。这是因为熔覆层从与基体交界处到熔覆层表面的组织变化主要是受熔池凝固过程中固液界面处温度梯度与凝固速率的比值的影响,在熔覆层与基体交界面处温度梯度与凝固速率的比值趋向于无穷大,随着到熔覆层表面距离的减小,两者的比值变小;在合金成分一定的条件下,随着两者比值的减小,晶体形态从胞状晶、胞状枝晶向等轴枝晶转变。

同时可以看到随着扫描速度升高熔覆层晶粒逐渐变得细小。这是因为扫描速度增加后相同时间、单位面积的热输入量减弱,冷却速度提高,过冷度增大,形核率增加,晶粒数量增加,致使熔覆层组织变细。

扫描速度为 340 mm/min 时,激光熔覆层 XRD 衍射图谱如图 5 所示,通过比对分析可知熔覆层所含主要物相为 Fe-Cr、$Fe_{9.7}Mo_{0.3}$、$Cr_{9.1}Si_{0.9}$、$Fe_{0.64}Ni_{0.36}$,可见合金粉料中 Cr 元素在熔覆层中形成了富 Cr 相。

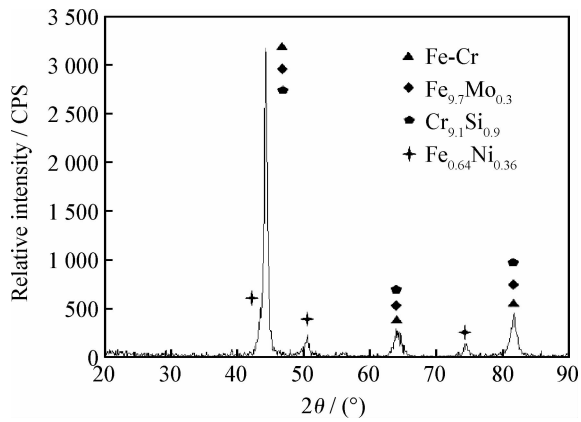


图 5 340 mm/min 扫描速度下激光熔覆层 X 射线衍射图谱

Fig. 5 XRD patterns for the laser cladding layers with scanning speed of 340 mm/min

2.2 熔覆层显微硬度分布

使用显微硬度计对各扫描速度下激光熔覆修复层显微硬度进行了测试,获得不同深度的硬度平均值及误差并绘制成硬度分布曲线,如图 6 所示。可以看到扫描速度为 340 mm/min 时熔覆层相对硬度较高,这是因为此时熔覆层组织较致密,通常来说细晶粒金属比粗晶粒金属有更高

的强度、硬度[19]；扫描速度 380 mm/s 时获得的熔覆层虽然具有更致密的组织，但因为扫描速度继续增大时，粉末吸收激光能量减少，熔覆层显微组织不均匀使硬度出现一定幅度下降。

扫描速度为 340 mm/min 时激光熔覆修复层平均硬度为 547 $HV_{0.1}$，45 钢基体整体调质处理 248 $HV_{0.1}$，激光熔覆修复层硬度为基体材料的 2.2 倍。Fe 基合金粉料中 Cr 元素含量较高，熔覆层中形成了较多的富 Cr 物相，因此硬度有了较为显著的提高。

通过上述分析看到，当扫描速度为 380 mm/min 时熔覆层与基体结合处存在微小气孔缺陷；扫描速度为 300、340 mm/min 时所得熔覆层界面结合处无气孔缺陷，但扫描速度为 340 mm/min 时得到的熔覆层硬度相对较高，同时考虑到再制造生产效率，应选用扫描速度为 340 mm/min 的扫描速度进行机床主轴再制造。因此，文中仅针对扫描速度为 340 mm/min 时得到的熔覆层进行摩擦磨损特性、后续磨削加工及装机验证试验。

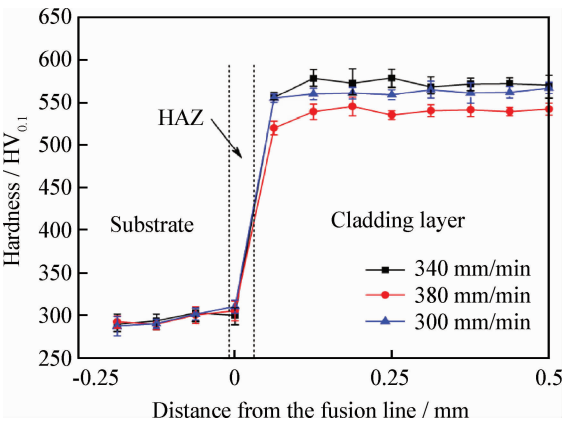


图 6　不同扫描速度下各激光熔覆层显微硬度分布

Fig. 6　Microhardness distribution of the laser cladding layer with different scanning speeds

2.3　熔覆层耐磨性

扫描速度为 340 mm/min 时制得熔覆层及基体材料 45 钢的摩擦因数曲线如图 7 所示。45 钢材料磨合期较短，摩擦因数经过磨合期后升至 0.6 左右并保持稳定，平均摩擦因数为 0.61；激光熔覆层在滑动距离达到 2 300 mm 时摩擦因数升至 0.7 左右并进入稳定磨合期，平均摩擦因数为 0.7。由于激光熔覆层硬度高于基体材料，因此摩擦试验中经历的磨合期比基体材料更长，摩擦因数较基体材料更大。

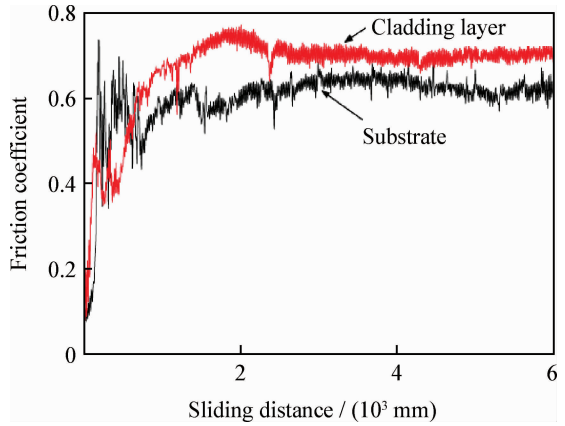


图 7　340 mm/min 扫描速度下的激光熔覆层及基体材料 45 钢的摩擦因数

Fig. 7　Friction coefficient of the laser cladding layer and 45 steel substrate with scanning speed of 340 mm/min

由摩擦磨损试验获得的 45 钢基体及扫描速度为 340 mm/min 时制得激光熔覆层磨损率如图 8 所示，可以看到激光熔覆层磨损率较小，耐磨性有显著提升，相同负载条件下熔覆层耐磨性约为基体材料的 3.7 倍。激光熔覆修复层中含有较多的 Cr 元素，其中有相当一部分对 Fe 基合金起到固溶强化作用，并且对碳化物起到很好的保护和支撑作用，同时提高了熔覆层的硬度，因此激光熔覆修复层的耐磨性优于基体材料。

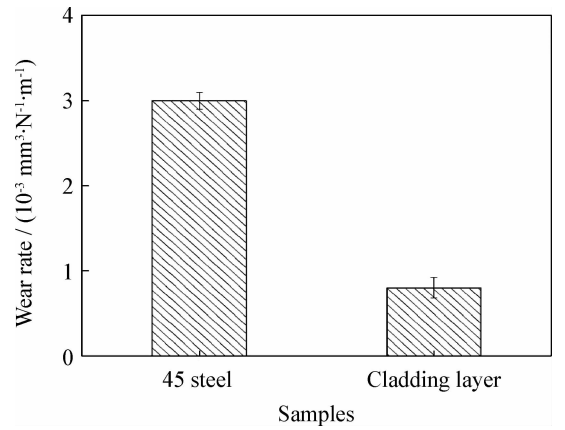


图 8　340 mm/min 扫描速度下的激光熔覆层及 45 钢的磨损率

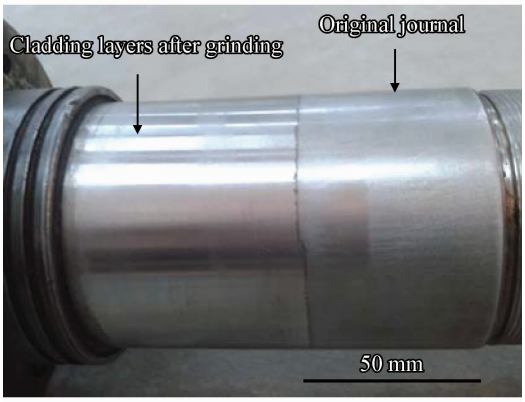
Fig. 8　Wear rate of the laser cladding layer and 45 steel with scanning speed of 340 mm/min

3　激光熔覆修复主轴磨削加工及服役性能

使用磨床对经激光熔覆修复的主轴进行后

续精密加工，磨削加工现场如图 9(a)所示。磨削后 340 mm/min 扫描速度下激光熔覆层宏观形貌如图 9(b)所示。可以看到磨削后熔覆层表面质量较好，已完全恢复至主轴设计尺寸，达到技术要求，表面粗糙度 Ra 为 0.8 μm。将主轴放入 50 ℃机油箱进行 2～3 h 浸泡处理后取出，车床主轴激光熔覆再制造工序完成。

(a) Scene of grinding



(b) Macroscopic feature after grinding

图 9 激光熔覆修复后主轴颈的磨削加工

Fig. 9 Grinding of the lathe spindle after laser cladding

通过文献[12，20]中车床轴类零件等离子喷涂、氧乙炔火焰喷涂涂层扫描电镜图片可以看到，喷涂得到的涂层有较明显的气孔缺陷，这对需要长时间稳定服役的主轴来说是不利的，而文中制得的激光熔覆层无气孔缺陷；同时可以看到喷涂涂层硬度相对于基体材料提升并不显著，而文中制得的激光熔覆层硬度相对基体材料有显著提升。因此，从修复层自身质量的对比来看，激光熔覆技术更适合于车床主轴再制造。

为定量验证文中再制造方法的有效性，将再制造车床主轴重新装车使用，在进行 1 500 h 的正常服役后，测得主轴磨损量为 0.000 2 mm，并且激光熔覆层未出现开裂、剥落等情况；新品主轴 45 钢在经历相同的服役时间后磨损量一般为 0.000 7 mm。通过装机验证充分说明了车床主轴激光熔覆再制造的可行性及有效性。

4 结 论

使用激光熔覆及磨削加工相结合的方法对损伤车床主轴进行了再制造研究。制得的熔覆层无气孔、裂纹等缺陷，同时具有优异的硬度及耐磨性；磨削加工后主轴熔覆层表面质量优异，恢复至设计尺寸；通过装机运行验证了再制造方案的有效性，实现了车床主轴的再制造，为激光熔覆技术在车床主轴再制造的应用提供指导。

参考文献

[1] 徐滨士. 中国再制造工程及其进展 [J]. 中国表面工程，2010，23(2)：1-6.
XU B S. Remanufacture engineering and its development in china[J]. China Surface Engineering，2010，23(2)：1-6 (in Chinese).

[2] 徐滨士，马世宁，刘世参，等. 21 世纪的再制造工程 [J]. 中国机械工程，2000，11(1)：36-39.
Xu B S，Ma S N，Liu S C，et al. Remanufacturing engineering in the 21th century [J]. China Mechanical Engineering，2000，11(1)：36-39 (in Chinese).

[3] 曹华军，杜彦斌，张明智，等. 机床再制造与综合提升内涵及技术框架 [J]. 中国表面工程，2010，23(6)：75-79.
Cao H J，Du Y B，Zhang M Z，et al. Connotation and technology framework of machine tool remanufacturing and comprehensive upgrading [J]. China Surface Engineering，2010，23(6)：75-79 (in Chinese).

[4] 罗百辉. 我国数控机床保有量达 1300 万台，行业升级迫在眉睫[EB/OL]. http:// www. chinavalue. net/BookInfo/Comment. aspx? CommentID=51357.
Luo B H. Ownership of machine tools in China is 13 million，industry to upgrade is imminent[EB/OL]. http:// www. chinavalue. net/BookInfo/Comment. aspx? CommentID=51357 (in Chinese).

[5] 丁文政，黄筱调，朱松青，等. 数控机床精度衰退的研究进展 [J]. 机床与液压，2012，40(15)：141-144.
Ding W Z，Huang X T，Zhu S Q，et al. Research progress on accuracy failure of CNC machine tool [J]. Machine Tool & Hydraulics，2012，40(15)：141-144 (in Chinese).

[6] Cai L G，Li K，Cheng Q，et al. Adaptable design methodology of heavy duty machine tool for green remanufacturing [J]. Applied Mechanics & Materials，2014，496-500：2672-2678.

[7] Du Y B，Cao H J，Liu F，et al. An integrated method for evaluating the remanufacturability of used machine tool [J]. Journal of Cleaner Production，2012，20(1)：82-91.

[8] Du Y B, Li C B. Implementing energy-saving and environmental-benign paradigm: machine tool remanufacturing by OEMs in China [J]. Journal of Cleaner Production, 2014, 66(3): 272-279.

[9] 陈海峰. 退役机床齿轮零件剩余疲劳寿命预测研究及其可再制造性评估 [D]. 重庆：重庆大学，2014.
Chen H F. Study on gears' remaining fatigue life prediction and remanufacturability of used machine tool [D]. Chongqing: Chongqing University, 2004 (in Chinese).

[10] 张旭刚. 废旧机床再制造性评估与再制造工艺方案决策方法研究 [D]. 武汉：武汉科技大学，2014.
Zhang X G. Stufy on remanufacturability evaluation and remanufacturing process decision methods of machine tool [D]. Wuhan: Wuhan University of Science and Technology, 2014 (in Chinese).

[11] 董文. 电弧喷涂技术在机床主轴再制造中的应用 [J]. 机械制造，2009，49(8)：70-72.
Dong W. Application of arc spraying technology in remanufacturing of machine tool spindle [J]. Machinery, 2009, 49(8): 70-72 (in Chinese).

[12] 曹华军，童少飞，陈海峰，等. 基于热喷涂的轴类零件再制造工艺及其残余应力分析 [J]. 中国机械工程，2014，25(24)：3368-3372.
Cao H J, Tong S F, Chen H F, et al. Analysis of remanufacturing process and residul stress of axis parts based on thermal spraying [J]. China Mechanical Engineering, 2014, 25(24): 3368-3372 (in Chinese).

[13] 韩晓玲，刘霞. 基于热喷涂的镗床静压主轴的修复方法 [J]. 制造技术与机床，2013(2)：98-100.
Han X L, Liu X. The repaired method of hydrostatic spindle of boring machine based on thermal spraying[J]. Manufacturing Technology & Machine Tool, 2013(2): 98-100 (in Chinese).

[14] 邓大石，石强. 基于热喷涂的磨床主轴再制造工艺及其涂层性能研究 [J]. 金属加工(热加工)，2014(18)：64-66.
Deng D S, Shi Q. Research of coating performance and remanufacturing process for grinding machine spindle based on thermal spraying [J]. MW Metal Forming, 2014(18): 64-66 (in Chinese).

[15] 吴慧媛. 数控机床主轴的多元复合涂层改性研究 [J]. 热加工工艺，2013，42(16)：165-167.
Wu H Y. Study on multi-component coating modification of numercial control machine spindle [J]. Working Technology, 2013, 42(16): 165-167 (in Chinese).

[16] 赵文强，苗鸿宾，江敏. 机床导轨激光熔覆修复技术的研究 [J]. 制造技术与机床，2012(12)：94-97.
ZhaoW Q, Miao H B, Jiang M. Research of laser cladding repair technology on machine tool[J]. Manufacturing Technology & Machine Tool, 2012(12): 94-97 (in Chinese).

[17] Ray A, Arora K S, Lester S, et al. Laser cladding of continuous caster lateral rolls: Microstructure, wear and corrosion characterisation and on-field performance evaluation [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2014, 214(8): 1566-1575.

[18] Torims T, Pikurs G, Ratkus A, et al. Development of technological equipment to laboratory test in-situ laser cladding for marine engine crankshaft renovation [J]. Procedia Engineering, 2015(100): 559-568.

[19] 张凌峰，熊毅，张毅，等. 高锰钢在激光冲击作用下的微观特征 [J]. 中国激光，2011，38(6)：226-229.
Zhang L F, Xiong Y, Zhang Y, et al. Microstucture of high mangness steel by laser shock processing [J]. Chinese Journal of Lasers, 2011, 38(6): 226-229 (in Chinese).

[20] 童少飞. 退役机床轴类零件热喷涂再制造工艺及涂层性能研究 [D]. 重庆：重庆大学，2014.
Tong S F. Study on thermal spraying remanufactuing process and coating performance of used machine tool shaft parts [D]. Chongqing: Chongqing University, 2014 (in Chinese).

（责任编辑：陈茜）