

Current Development of Laser Surface Beam Welding and Its Prospective Forecast on Locomotive Components Repairing Applications

Xinyu You¹, Yang Jiao¹, Minglei Liu², Fang Liu^{2*}

¹Cangzhou Locomotive Vehicle Maintenance Branch, Shenhua Railway Freight Transport Company, Cangzhou Hebei

²School of Materials Science and Engineering, Dalian Jiaotong University, Dalian Liaoning

Email: *sonialf@126.com

Received: Jul. 15th, 2017; accepted: Aug. 6th, 2017; published: Aug. 15th, 2017

Abstract

High hard-wearing, high corrosion resistant and other excellent beam welding alloyed coating can be achieved by laser beam welding, which demonstrates promising applications in the fields of metallurgy, locomotive and boats, etc. Compared with the traditional beam welding technologies, laser beam welding exhibits finer microstructures, thicker welded coating and smaller thermal deformation advantages, as well as good metallurgical bonding between welded coating and substrate, controllable component and dilution of welded coating, selective area welding and automation technology characters. The basic mechanism and technological application of laser beam welding were introduced in this paper, in which the main reasons of crack and porosity of laser processing were clarified. In order to solve the crack and porosity problems of laser processing, the compounded cooperation development trend of laser with electric field, magnetic field and ultrasonic field was analyzed and predicted. Moreover, the possibility and challenge of beam welded repairing for locomotive wheel and rail were analyzed, based on the crack and porosity avoidance and martensite microstructure control, which will provide new ideas for the industrial application of laser repairing of wheel center, wheel flange and other locomotive parts.

Keywords

Laser Beam Welding, Repairing, Compounded Cooperation, Locomotive, Resistance, Crack, Porosity

激光表面堆焊发展现状及机车零部件修复的应用前景展望

尤昕宇¹, 焦杨¹, 刘明磊², 刘芳^{2*}

*通讯作者。

¹神华铁路货车运输责任公司, 沧州机车车辆维修分公司, 河北 沧州

²大连交通大学, 材料科学与工程学院, 辽宁 大连

Email: *sonialf@126.com

收稿日期: 2017年7月15日; 录用日期: 2017年8月6日; 发布日期: 2017年8月15日

摘要

激光堆焊可以获得高耐磨性、高耐腐蚀性等优异性能的合金堆焊层, 在冶金、机车、船舶等领域展现了诱人的应用前景。与埋弧焊、电渣焊、等离子焊等传统堆焊工艺相比, 激光堆焊具有组织较细、堆焊层厚度较大、热变形较小, 以及堆焊层与基体呈冶金结合、堆焊层成分及稀释率可控、易实现选区堆焊和工艺自动化等优势。本文对激光堆焊的基本原理及其工业应用几个方面做了简单介绍; 阐述了激光加工过程中裂纹、气孔产生的主要原因; 为了解决激光加工产生的裂纹、气孔等缺陷, 本文对激光与电场、磁场、超声振动场的复合协同发展趋势做了分析预测。在此基础上, 本文从裂纹、气孔缺陷的抑制以及避免马氏体组织出现等方面探讨了机车车轮、铁轨激光堆焊修复的可行性及可能面临的挑战, 为机车轮芯、轮毂等机车零部件的激光修复工业化应用提供参考。

关键词

激光堆焊, 修复, 复合协同, 机车, 耐磨性, 裂纹, 气孔

Copyright © 2017 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

堆焊是借助热源手段将具有耐磨、耐蚀等特殊使用性能的合金材料熔覆于金属材料或零件表面上的一种工艺方法[1][2]。20世纪50年代, 堆焊开始被应用于机器零件的表面修复。从埋弧堆焊、电渣堆焊、二氧化碳保护堆焊到等离子弧堆焊、激光堆焊, 堆焊技术的种类日益多样化, 而发展速度也越来越快[3]-[15]。目前堆焊技术正被广泛应用于冶金、铁路、汽车等领域的轧辊、曲轴等重要机器零件修复[16]-[21]。

与传统堆焊方法相比, 以激光堆焊为代表的高能束堆焊技术具有能量密度高、热输入准确、热畸变小、堆焊层厚、成分和稀释率可控制性好等优势, 正成为国内外学者的研究热点[22]-[37]; 以激光堆焊为代表的激光增材制造修复技术在铁路机车零部件修复领域具有良好的应用前景。

2. 铁路机车零部件堆焊修复的研究现状

铁路机车在运行过程中存在车轮轮毂、轮缘、轮芯以及铁轨、道岔等部位的摩擦磨损; 高速、重载机车的冲击和碾压甚至造成轮芯等部件的开裂和压溃现象。车轮及铁轨等部件的破坏不但影响了铁路的运输安全, 也为机车公务维修造成了沉重的经济负担。例如, 在机车大修过程中, 由于机车轮芯对在修理时必须进行退轮作业, 常会因此造成轮芯内孔的拉伤, 导致其无法满足轮芯压装的基本要求, 而通过机械加工对轮芯内孔进行表面修复作业, 又会导致齿轮内孔尺寸过大, 超出轮芯内孔使用要求的极限尺寸。仅以SS4B机车为例, 轮芯的单价可达7500元, 每台机车共有16个轮芯, 焊接修复10个轮芯, 则

减少外购轮芯成本 75,000 元, 除去焊丝及设备、作业消耗, 保守估计每台机车可节约成本 65,000 元。按分公司每年 30 台机车检修量计算, 可节约 1,950,000 元。根据分公司机车检修趋势, 未来几年内仍会有 SS4B 机车在分公司进行机车大修, 基于此, 对轮芯进行修复, 将具有非常显著的经济效益和社会效益。

研究符合轮芯性能的焊接修复技术, 轮芯通过焊接修复技术修复后能够达到《机车用铸钢轮芯技术条件 标准 TB T 1400-2005》中的条款要求。2016 年, 中车集团北京二七机车有限公司的朱艳英[38]采用自动气体保护堆焊工艺对机车轮芯进行了修复研究, 获得的堆焊层质量好, 生产效率高。神华集团采用自动气体保护焊接工艺对机车轮芯进行堆焊修复, 获得了以粒状贝氏体为主要组织的堆焊层, 堆焊修复效果较好。从上世纪八十年代开始, 前苏联采用埋弧自动焊工艺对机车轮缘和轮毂进行了堆焊修复。通过火焰加热与电加热的预热装置和双丝埋弧电焊机等装置, 前苏联铁道科学研究院获得了堆焊组织为索氏体、并含有弥散分布钒钼碳化物的堆焊层, 很好地修复了机车轮缘[39]。针对机车轮毂的破坏问题, 莫斯科机车修理厂通过埋弧半自动焊工艺获得了珠光体-铁素体混合组织的堆焊层, 修复效果较好[40]。为了恢复车钩的耐磨性能, 乌拉尔车辆厂采用机械化堆焊工艺对机车车钩进行了堆焊修复[41]。

但是, 传统堆焊工艺受工人操作技术水平影响较大, 很难保证堆焊修复层的质量稳定性; 由于列车运行过程中车轮、铁轨和道岔的受力情况复杂性, 它们的破坏受损部位多为不规则几何形状, 很难采用传统堆焊工艺进行精确尺寸修复, 有待新型制造工艺解决机车零部件的传统堆焊修复问题。

3. 激光堆焊的原理及其应用

激光是通过受激辐射和电子能级跃迁形成的高能量密度光源。激光堆焊是通过激光辐照过程, 使粉体材料外层电子吸收激光光子能量、激发晶格振动产生光热效应, 粉体材料发生熔化、凝固成为合金堆焊层的过程。激光 3D 打印又被称为激光增材制造技术, 是利用激光立体成形方法, 恢复零件局部损伤部位的几何尺寸, 并保证其服役性能不低于原新品零件的激光加工技术。与传统堆焊工艺相比, 以激光 3D 打印为基础的激光堆焊技术因三维形状尺寸可调、材料体系可控和材料性能可控等优势在制造和修复领域独占鳌头。

上海交通大学的彭行金等人[42]对等离子堆焊和激光堆焊的实验结果进行了详细比较。结果发现, 激光堆焊对基体的热影响程度小于等离子堆焊; 与等离子堆焊相比, 激光堆焊的组织更细小, 堆焊层硬度和抗拉强度更高。此外, 轧辊、曲轴等合金钢机器零件的导热性能差。采用传统手工电弧堆焊或氩弧堆焊时, 一般需要将合金钢机器零件预热到很高温度以避免堆焊裂纹的出现。铸钢零件的组织粗大、缩孔和夹杂等缺陷使传统堆焊的开裂倾向尤为明显。贾治国等人[43]采用激光堆焊成功修复了船舶的锚链轴铸钢零件。

清华大学刘文金教授[44]对 5CrMnMo 模具钢进行激光堆焊强化修复, 最高硬度达到了 HRC65; 上海交通大学邓琦林团队[45]在铸钢、铸铁、不锈钢以及铜合金基体表面进行激光复合堆焊修复, 都获得了结合良好、均匀致密的修复层组织。与送粉堆焊技术相比, 激光送丝堆焊技术具有生产效率高、材料利用率高优点, 更容易获得大面积堆焊修复层。浙江工业大学姚建华教授[46]采用激光送丝堆焊技术对铸铁进行特定位置的强化和修复, 使铸铁基体硬度提高了 4~6 倍。

激光堆焊的热输入准确、热畸变小和计算机自动控制特点使其具有形状尺寸可控和组织性能可调的优点, 便于对机车零部件进行精确尺寸修复和保证修复层的质量稳定性。更重要的是, 激光堆焊的高能量密度特点还有助于获得常规堆焊修复条件下不能制备的特殊组织, 有望实现超常规的强度、硬度、韧性等优异力学性能。

4. 机车零部件激光堆焊面临的主要问题

4.1. 裂纹、气孔缺陷

激光器一次性投资昂贵、运行成本高是激光堆焊面临的一个问题。不过, 随着激光设备的逐步普及,

这一问题不再是阻碍激光堆焊工业化应用的主要桎梏。激光堆焊作为一个快速加热和冷却的非平衡过程，面临的主要问题是堆焊层内裂纹、气孔和夹杂等缺陷的产生。

经过研究表明，通过热处理、添加纳米晶相或稀土氧化物的方法可以有效改变堆焊层的组织结构和性能[47] [48] [49] [50]，并对拓展堆焊技术的应用领域起到了积极的作用。但是由于激光堆焊的快速加热和冷却过程使堆焊层内、外产生较大的温度梯度，处于不同温度区间的组织在加热膨胀和冷却收缩时发生不同的体积变化。于是，激光堆焊层内形成应力较大的应力场，从而导致微观裂纹的产生。同时，激光堆焊的快速加热和冷却过程使堆焊层熔池内的气体来不及逸出，形成气孔；熔池内的氧化物、硫化物及其它杂质来不及逸出，成为夹杂。

为了解决激光表面处理产生的裂纹、气孔和夹杂等问题，激光复合协同的研究思路正日趋活跃。将激光高能量密度场与辅助热源场复合，调控堆焊层的温度场，降低温度梯度和热应力、组织应力，可以避免裂纹的产生[51] [52] [53]。华中科技大学曾晓雁教授[54]发现，将感应加热温度场与激光熔覆温度场复合可以有效降低熔覆层及基体的温度梯度，从而降低甚至消除残余应力。由于电弧加热区域较大，电弧与激光复合使激光反应的熔池扩大、冷却速度降低[55]，有利于消除裂纹缺陷。激光加工达到一定能量密度时产生的等离子体云，对激光具有吸收和反射作用，不利于铜、铝等对激光反射率较高材料的激光焊接、熔覆和修复加工。电弧还可以稀释光致等离子体，减少等离子体对激光的吸收和散射作用，提高待加工材料的激光吸收率[56]。德国大众汽车已经将激光电弧复合焊接技术应用于辉腾等汽车车门的焊接[57]。

西北工业大学刘红伟团队[58]采用 COMSOL 软件分析了激光-MIG 复合焊接的电弧等离子体温度场，并与实际焊接的高速摄影结果进行了对比。结果表明，当激光与电弧电极的热源间距为 2 mm 时，在作用区上方的阴极区出现平台式温度(图 1)，这对形成稳定流速和质量的熔滴状态具有重大意义。大连理工大学刘黎明团队[59]分析了激光-TIG 焊复合热源的焊接性，结果发现，由于激光-TIG 复合热源焊接速度快和对熔池的快速搅拌作用，使镁和铝形成的金属间化合物由连续层状变为弥散分布状态，改善了镁和铝异种金属的焊接性。浙江工业大学姚建华教授[60]将超音速沉积与激光熔覆复合，结果发现，激光熔覆多道搭接的沉积层中有明显的宏观裂纹，WC 颗粒聚集，呈不均匀分布；而超音速激光沉积层表面平整，无宏观缺陷，WC 颗粒呈弥散均匀分布。

此外，将激光高能量密度场与电场、磁场、超声振动场等外场复合，驱动熔池内的对流运动，排除气体和夹杂物，可以避免气孔和夹杂的产生。昆明理工大学刘洪喜等人[61]研究了交变磁场对铁基激光熔覆层宏观形貌及微观组织的影响，结果表明，熔池内部产生的电磁力驱动熔体流动使树枝晶熔蚀和机械折断，游离的破碎枝晶成为新的形核核心，增加了形核率，从而促使熔覆层顶部组织由树枝晶向等轴晶转变。西安交通大学张安峰教授[62]研究了超声振动对激光金属成形组织及性能的影响，结果发现，施加超声振动后，成形件的表面粗糙度和残余应力得到显著改善，微观组织得以细化，抗拉强度和屈服强度均有提高。华中科技大学余圣普教授[63]研究了磁场搅拌对激光焊接显微组织的影响，结果表明，旋转磁

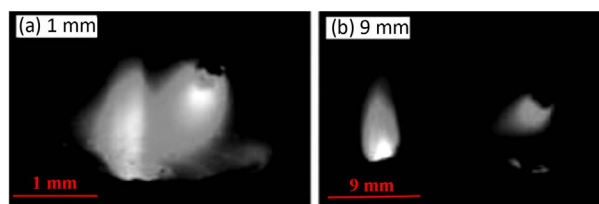


Figure 1. High-speed photography of laser-MIG composite welding arc morphology [58]

图 1. 高速摄影拍摄的激光-MIG 复合焊电弧形貌[58]

场能改变液态 Al-Si 合金的运动状态,产生磁搅拌作用,细化晶粒。而且,在旋转磁场作用下,气泡、夹渣迅速向中心集结、合并、长大;长大的气泡、夹渣在浮力和电磁力作用下,与金属液体脱离、排出,有效防止气孔和夹渣缺陷的形成。这些工作为机车零部件激光堆焊修复的工业化应用提供了很好的理论指导和借鉴。

4.2. 马氏体转变引起的一系列问题

除了裂纹、气孔等缺陷以外,避免马氏体等淬硬组织出现是机车零部件激光堆焊修复面临的另一个问题。从机车轮轨相互摩擦、相互作用的角度考虑,车轮的硬度过高将使铁轨和道岔磨损消耗过大;反之,铁轨和道岔的硬度过高将使车轮磨损消耗过大,这些都会加重铁路公务维修的负担。因此,机车零部件堆焊修复层应避免高硬度马氏体的出现,更多倾向于选择贝氏体或珠光体组织。这一现象不同于常规激光修复时倾向于获得高硬马氏体、提高耐磨性能的研究思路。更重要的是,马氏体等淬硬组织的出现还将增大堆焊修复层的冷裂敏感倾向,导致裂纹缺陷的产生。

冷却速度是决定马氏体转变是否发生的一个重要因素。冷却速度越快,越有利于马氏体转变的发生。激光加工的快速加热、快速冷却特点使激光堆焊修复层内很容易获得马氏体组织。已有的实验结果发现,车轮轮毂或轮缘堆焊修复时的冷却速度超过 $10^{\circ}\text{C}/\text{s}$ [39],堆焊层内就会出现马氏体组织,而激光加工的冷却速度一般是 $10^4^{\circ}\text{C}/\text{s}\sim 10^8^{\circ}\text{C}/\text{s}$ [64] [65],很容易发生马氏体转变。针对机车零部件堆焊修复的特定要求,需要采取预热等辅助手段开展相关工作,才能避免马氏体转变的发生。

堆焊层成分是决定马氏体转变是否发生的另一个重要因素。一般而言,含碳量越高,合金元素的含量越高,焊接时越有利于发生马氏体转变,钢的可焊性越差。机车车轮及钢轨的含碳量及合金元素含量较高,可焊性较差。为了避免马氏体转变的发生、获得符合要求的堆焊层组织,预热工艺是推动机车零部件激光堆焊修复的工业化应用必要手段。

5. 展望

激光堆焊具有能量密度高、热输入准确、堆焊层厚、成分可控制好等优势,在铁路机车零部件修复领域具有良好的应用前景。通过激光堆焊形成珠光体、贝氏体组织,避免常规马氏体组织的出现;利用激光堆焊的高能量密度特点获得常规堆焊修复条件下不能制备的特殊组织,有望实现超常规的强度、硬度、韧性等优异力学性能,推动机车零部件激光堆焊修复的工业化应用。

参考文献 (References)

- [1] 任艳艳, 张国赏, 魏世忠, 等. 我国堆焊技术的发展及展望[J]. 焊接技术, 2012, 41(6): 1-5.
- [2] 童辉, 韩文礼, 张彦军, 等. 表面工程技术在石油石化管道中的应用及展望[J]. 表面技术, 2017(3): 195-201.
- [3] 单雪海, 周建平, 许燕. 金属快速成型技术的研究进展[J]. 机床与液压, 2016(7): 150-154.
- [4] 邓德伟, 陈蕊, 张洪潮. 等离子堆焊技术的现状及发展趋势[J]. 机械工程学报, 2013, 49(7): 106-112.
- [5] 冯占淼, 李福永, 辛小超, 等. 液压支架立柱双丝埋弧堆焊技术经济分析[J]. 焊接技术, 2015(1): 33-35.
- [6] 常云龙, 梅强, 张伟, 等. 低频磁场对轧辊埋弧堆焊组织及性能的影响[J]. 中国表面工程, 2011(6): 98-103.
- [7] 张心保. E347L 不锈钢焊带设计生产及其埋弧堆焊层性能[J]. 中国表面工程, 2011, 24(6): 92-97.
- [8] 包晔峰, 任强, 张志玺, 等. 带极电渣堆焊奥氏体不锈钢耐晶间腐蚀性能[J]. 焊接学报, 2016, 37(6): 65-68.
- [9] 毛骏. 347 不锈钢高速电渣堆焊层退火过程中的组织结构和耐蚀性变化[D]: [硕士学位论文]. 兰州: 兰州交通大学, 2016.
- [10] 时海芳, 张博, 胡世菊, 等. 二氧化碳堆焊铁基合金组织和性能的研究[J]. 兵器材料科学与工程, 2011(6): 64-66.
- [11] 李全, 王欢, 朱荣, 等. 二氧化碳作为连铸保护气体的试验研究[J]. 连铸, 2015, 40(2): 5-9.

- [12] 张伟, 郑炉玉. 激光堆焊 F325 合金粉/钼丝的组织与硬度研究[J]. 应用激光, 2013, 33(5): 473-476.
- [13] 张亚亮, 刘佳, 石岩, 等. 激光-电弧复合焊不同引导方式对其焊接成形质量的影响研究[J]. 应用激光, 2017(2): 229-233.
- [14] 徐国建, 黄雪, 杭争翔, 傅新皓, 于恩洪. 激光和 TIG 堆焊钴基合金的性能[J]. 焊接学报, 2013, 34(8): 22-26.
- [15] 董琦, 胡连海, 任德亮, 齐海波, 刘春涛. 窄间隙坡口激光-MAG 复合焊温度场数值模拟[J]. 电焊机, 2017, 47(4): 15-19.
- [16] 冉英超, 吴晓勇. 大型整体式修边模的堆焊工艺与应用[J]. 模具工业, 2012, 38(9): 70-72.
- [17] 高文良. 大型曲轴模具堆焊制造工艺研究[D]: [硕士学位论文]. 南京: 南京航空航天大学, 2013.
- [18] 武英海, 张光伟. 白合金 TIG 堆焊工艺评定[J]. 焊接技术, 2016(2): 42-44.
- [19] 吴傲宗, 尹松森, 陈博. 双金属堆焊工艺在锻造模具修复中的应用[J]. 金属加工(热加工), 2014(10): 84-85.
- [20] 吕陶梅, 王西建, 陶江平. 曲轴模具的堆焊修复工艺研究[J]. 模具工业, 2014(10): 66-67.
- [21] 王小范, 姚建华, 张群莉. 激光表面堆焊技术的应用及展望[J]. 兵器材料科学与工程, 2005, 28(4): 68-70.
- [22] Grabon, W., Koszela, W., Pawlus, P., et al. (2013) Improving Tribological Behavior of Piston Ring-Cylinder Liner Frictional Pair by Liner Surface Texturing. *Tribology International*, **61**, 102-108. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2012.11.027>
- [23] Braun, D., Greiner, C., Schneider, J., et al. (2014) Efficiency of Laser Surface Texturing in the Reduction of Friction under Mixed Lubrication. *Tribology International*, **77**, 142-147. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2014.04.012>
- [24] Cuccolini, G., Orazi, L. and Fortunato, A. (2013) 5 Axes Computer Aided Laser Milling. *Optics and Lasers in Engineering*, **51**, 749-760. <https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2013.01.015>
- [25] Orazi, L., Montanari, F., Campana, G., et al. (2015) CNC Paths Optimization in Laser Texturing of Free form Surfaces. *Procedia CIRP*, **33**, 440-445. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2015.06.100>
- [26] Düsing, J.F., Eichele, T., Koch, J., et al. (2014) Laser Surface Processing of Integrated Thin Film Systems on Arbitrarily Shaped Components. *Procedia Technology*, **15**, 122-128. <https://doi.org/10.1016/j.protcy.2014.09.063>
- [27] Tangwarodomnukun, V., Likhitangsuwat, P., Tevinpibanphan, O., et al. (2015) Laser Ablation of Titanium Alloy under a Thin and Flowing Water Layer. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, **89**, 14-28. <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2014.10.013>
- [28] Luke, M., Varfolomeev, I., Lütkepohl, K., et al. (2011) Fatigue Crack Growth in Railway Axles: Assessment Concept and Validation Tests. *Engineering Fracture Mechanics*, **78**, 714-730. <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2010.11.024>
- [29] 徐国建, 刘爽, 杭争翔, 等. 激光堆焊单道 Co 基合金与 WC 混合粉末的性能研究[J]. 激光技术, 2014, 38(1): 132-136.
- [30] 李刚, 韩文月, 禹志超, 等. 40Cr 钢平板表面激光堆焊三维温度场数值模拟[J]. 金属热处理, 2012, 37(11): 112-115.
- [31] 杨薇. 航空发动机零部件三维激光堆焊技术工程应用的关键问题[J]. 应用激光, 2012(3): 184-187.
- [32] 姚建华, 刘新文, 张群莉, 等. 基于绿色再制造的多层激光送丝堆焊[J]. 应用激光, 2005, 25(2): 84-86.
- [33] 李正秋, 石珩, 曹驰, 苏艳文. 半导体激光熔覆 Ni 基合金堆焊层组织及性能的研究[J]. 应用激光, 2016(5): 547-552.
- [34] 郑丽娟, 刘会莹, 付宇明, 韩晓娟. WC 耐磨堆焊层表面缺陷的激光熔覆修复[J]. 金属热处理, 2011, 36(12): 95-97.
- [35] 倪加明, 杨学勤, 罗志强, 李宝辉, 黄坚. 压铸镁合金激光堆焊层的组织与力学性能[J]. 热加工工艺, 2015(15): 42-44.
- [36] 王喜, 王爱华, 吴旭浩, 等. 半导体激光熔覆钴基合金的耐磨性[J]. 金属热处理, 2016, 41(3): 125-130.
- [37] 朱宗涛, 祝全超, 李远星, 陈辉. 超声振动辅助 A7N01 铝合金激光-MIG 复合焊接组织及力学性能[J]. 焊接学报, 2016, 37(6): 80-84.
- [38] 朱艳英. 轮芯堆焊[J]. 金属加工(冷加工), 2016, S1: 958-960.
- [39] 魏思宇, 丁韦. 俄罗斯轮对堆焊修复技术的发展与现状[J]. 中国铁路, 2000(1): 46-47.
- [40] Клещев, С.И., 邓国庆. 机车车轮轮毂的堆焊[J]. 国外机车车辆工艺, 1992(6): 40-41.
- [41] Коротков, В.А., 胥金荣. 机车车辆自动车钩机械化堆焊工艺[J]. 国外机车车辆工艺, 2007(5): 15-16.

- [42] 彭行金, 邓琦林, 余民芳, 柴慧君. 等离子、激光堆焊修复实验比较[J]. 电加工与模具, 2007(6): 37-39.
- [43] 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): 56-59.
- [44] 杨义忠. 5CrMnMo 钢及其堆焊材料激光强化层高温性能的研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 清华大学, 2011.
- [45] 高宾. 基于复合堆焊的激光熔覆修复技术实验研究[D]: [硕士学位论文]. 上海: 上海交通大学, 2010.
- [46] 骆芳. 铸铁表面激光送丝堆焊工艺及其应用[D]: [硕士学位论文]. 杭州: 浙江工业大学, 2004.
- [47] 丛树林, 韩彦朝, 刘立新, 时海芳. 热处理对 D256 自制堆焊焊条堆焊层组织与性能的影响[J]. 表面技术, 2013, 42(2): 104-107.
- [48] 杨庆祥, 赵斌, 员霄, 蹇雪梅, 周野飞. 纳米 Y_2O_3 对过共晶 Fe-Cr-C 堆焊合金表面微观组织与耐磨性的影响[J]. 表面技术, 2015(4): 42-47.
- [49] 周焯, 王国红, 贺定勇, 等. 铬含量对 Fe-Cr-B 堆焊合金显微组织及耐磨性的影响[J]. 表面技术, 2017, 46(1): 88-92.
- [50] 刘勇, 王亚军, 杨育林, 杨庆祥. 氧化镧对履带堆焊层合金显微组织与耐磨性的影响[J]. 表面技术, 2017(3): 113-118.
- [51] Yang, G., Guo, P., Wang, W., *et al.* (2013) Propagation Characteristic of Ultrasonic in BT20 Titanium Alloy and Research on Distribution of Ultrasonic Field in Molten Pool of Laser Deposition Repair. *Chinese Journal of Lasers*, **12**, 97-103.
- [52] Qin, L., Wang, W. and Yang, G. (2013) Experimental Study on Laser Metal Deposition of FGs with Ultrasonic Vibration. *Applied Mechanics and Materials*, **271**, 131-135.
- [53] Wu, D., Guo, M., Ma, G., *et al.* (2015) Dilution Characteristics of Ultrasonic Assisted Laser Clad Yttria-Stabilized Zirconia Coating. *Materials Letters*, **141**, 207-209. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2014.11.058>
- [54] 黄永俊, 曾晓雁. 激光感应复合熔覆镍基涂层的裂纹研究[J]. 应用激光, 2009, 29(2): 111-115.
- [55] 姚燕生, 王园园, 李修宇. 激光复合焊接技术综述[J]. 热加工工艺, 2014, 43(9): 16-20.
- [56] 姚建华. 激光复合制造技术研究现状及展望[J]. 电加工与模具, 2017(s1): 4-11.
- [57] 蔡伟乐. 激光电弧复合热源焊接技术及其应用[J]. 新产品新技术, 2013(12): 21-23.
- [58] 刘红伟, 王群, 李京龙, 马志华. 基于 COMSOL 的铝合金激光-MIG 复合焊耦合作用研究[J]. 热加工工艺, 2016(19): 218-222.
- [59] 柳绪静, 刘黎明, 王恒, 宋刚. 镁铝异种金属激光-TIG 复合热源焊焊接性分析[J]. 焊接学报, 2005, 26(8): 40-43.
- [60] 李鹏辉, 李波, 张群莉, 等. 超音速激光沉积与激光熔覆 WC/SS316L 复合沉积层显微组织与性能的对比研究[J]. 中国激光, 2016(11): 76-83.
- [61] 刘洪喜, 蔡川雄, 蒋业华, 张晓伟, 王传琦. 交变磁场对激光熔覆铁基复合涂层宏观形貌的影响及其微观组织演变[J]. 光学精密工程, 2012, 20(11): 2402-2410.
- [62] 王潭, 张安峰, 梁少端, 等. 超声振动辅助激光金属成形 IN718 沉积态组织及性能的研究[J]. 中国激光, 2016, 43(11): 1-6.
- [63] 余圣甫, 张友寿, 雷毅, 等. 非磁性合金激光焊旋转磁场搅拌机理[J]. 焊接学报, 2006, 27(3): 109-112.
- [64] 姚建华. 激光表面改性技术及其应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 2012.
- [65] 陈岁元, 刘常升. 材料的激光制备与处理技术[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2006.

期刊投稿者将享受如下服务：

1. 投稿前咨询服务 (QQ、微信、邮箱皆可)
2. 为您匹配最合适的期刊
3. 24 小时以内解答您的所有疑问
4. 友好的在线投稿界面
5. 专业的同行评审
6. 知网检索
7. 全网络覆盖式推广您的研究

投稿请点击：<http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱：ms@hanspub.org