

# The Study and Application in Roller Surface Repaired of Laser Cladding Technology

Rui Zhou

Rizhao Company in Shandong Iron and Steel Group, Rizhao Shandong  
Email: zhouruijn@126.com

Received: Jul. 3<sup>rd</sup>, 2018; accepted: Jul. 16<sup>th</sup>, 2018; published: Jul. 23<sup>rd</sup>, 2018

---

## Abstract

Laser cladding technology is a new type of surface engineering technology. The research status of the laser cladding is summarized, and the existing problems and solution of the technology are reviewed. Finally, the development trend and industrial application prospect of the technology in the future are put forward.

## Keywords

Laser Cladding, Coating Properties, Powder Particles, Lasers

---

# 激光表面熔覆技术的研究及其在轧辊表面修复中的应用

周 瑞

山东钢铁集团日照有限公司, 山东 日照  
Email: zhouruijn@126.com

收稿日期: 2018年7月3日; 录用日期: 2018年7月16日; 发布日期: 2018年7月23日

---

## 摘 要

激光熔覆技术是一种新型的表面工程技术。本文介绍了激光表面熔覆技术的研究现状, 提出了激光表面熔覆技术领域存在的主要问题及解决途径, 展望了激光表面熔覆技术的发展趋势及工业应用前景。

## 关键词

激光熔覆, 熔覆层性能, 粉末材料, 激光器

---

Copyright © 2018 by author 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. 前言

上世纪中叶,世界上第一台激光器研制成功,随后在各个领域的应用不断拓宽。作为新兴的表面改性技术,激光熔覆技术在进入 80 年代后得到了迅速的发展。激光表面熔覆技术是利用高能密度的激光束所产生的极快速的动态熔化与凝固过程,将预先涂覆或输送到基体表面的涂层材料在其表面形成与基体相互溶合的、具有完全不同成分与性能的合金覆层,与之形成冶金结合,彻底改变表面组成成分,以改善材料表面性能的一种工艺。与传统的机械加工去除法、电弧堆焊法、热喷涂技术[1]等比较,激光表面熔覆技术作为一种新的技术,具有改性层厚度大、工件变形量小、处理层与基体为冶金结合且结合强度高、可在大气中实施且难易程度低等优点[2],覆层具有优异的耐磨、耐蚀、耐热的性能,因此具有广阔的工业应用前景。

轧辊作为轧机的重大关键部件,其表面质量对轧钢的品质和生产效率有很大影响。在轧制过程中轧辊经历力循环和热循环的双重作用,表面会产生氧化、裂纹、磨损、甚至断辊等失效缺陷。如何利用激光熔覆技术对轧辊进行有效修复,是目前轧钢行业一直努力探究的方向。

## 2. 轧辊表面激光熔覆层的组织及性能

合金、陶瓷、复合熔覆粉未经激光束处理后,和轧辊基材表面金属一起溶化,凝固成具有优异性能的熔覆层,其表面硬度明显提高,为熔覆层获得优良的耐磨性提供了保证。除了熔覆材料本身硬度较高外,由于激光熔覆的快速加热和快速冷却远远偏离了平衡过程,所以激光熔覆所具有的过饱和固溶强化、组织细化、弥散强化、沉淀强化也起着不可忽视的作用。陶瓷颗粒增强金属基复合激光熔覆层以金属或合金为基体,陶瓷颗粒作为第二相分布其中,陶瓷颗粒和金属基体发挥各自的优势,使熔覆层材料能兼有二者的良好性能。杨胶溪[3]等用激光熔覆技术对  $9\text{Cr}_2\text{Mo}$  轧辊表面进行修复,制备出了由碳化物、硼化物增强 Fe 基激光熔覆层,熔覆层致密无缺陷,硬度比轧辊高,能够满足轧辊使用条件下的硬度要求。陈长军[4]等在冶金精密轧辊表面激光熔覆了 Ni + WC 粉末,结果表明:熔覆层组织细化,与基材属于冶金结合,硬度高达 HV1076,比轧辊硬度提高了近一倍。

因此激光熔覆技术适用于轧辊这种局部磨损、冲击、剥蚀、氧化腐蚀的表面修复。激光熔覆所形成的涂层具有结合强度高、致密度高、稀释度低、涂层部位可控、组织细小及性能优良等特点,有着广阔的应用前景。利用激光熔覆的手段,在低成本材料表面熔覆金属陶瓷,在保留基体金属高的强韧性的同时,使表面获得耐磨、耐蚀、抗疲劳及良好的高温性能,达到节约贵重材料的目的。

## 3. 熔覆材料、方式及设备的研究

目前应用最广的是粉末材料。熔覆粉末一般根据材料的组分构成可以分为自溶性合金粉末、陶瓷粉末和复合粉末。自溶性合金粉末根据粉末体系的不同,包括 Co 基、Ni 基、Fe 基合金。由于 Fe 基复合材料具有和轧辊成分接近、能够在钢铁、铁合金表面有较好的润湿性、与基材结合牢固、价格低廉等优点,在轧辊的修复或者表面耐磨强化方面应用广泛。陶瓷粉末材料由于其热膨胀系数等热物理性能与轧辊基材差异较大,由于内应力的作用易导致熔覆层开裂甚至局部脱落,限制了陶瓷材料的应用,基本上还处于实验室研究阶段。在金属合金粉末中加入具有各种优异性能的陶瓷粉末组成的金属—陶瓷复合材料是

激光熔覆中应用最为广泛的一种材料,这种结构的熔覆层既具有韧性较好金属基体,又有硬度高、耐磨性和热稳定性好的陶瓷增强相,综合性能较好。

熔覆材料的引入方式主要分预置式和同步送粉式两种。预置涂层法是先采用某种工艺如粘接剂预涂覆、热喷涂、电镀等在基材表面预置一层金属或合金涂层材料,然后用激光束使其熔化并与表面微熔的基材一同快速冷却而获得与基材良好冶金结合的熔覆层。同步送粉法则是在激光束照射基材的同时,将待熔覆的材料送入激光熔池,经熔融、冷凝后在基材表面形成熔覆层的工艺过程。两种工艺方法各有优劣,预置涂层法操作简单,使用方便;同步送粉法具有工艺参数、过程易实现自动化控制,激光能量吸收率高(为预置法所需能量的一半),降低覆层的稀释率和基材的热影响,覆层宏观质量可控,生产效率高优点。在进行激光熔覆的过程中,可以通过调节粉末流速、粉末喷嘴形状以及激光束聚焦点相对基体表面的高度等工艺参数,实现熔覆层和基体的良好结合。

目前应用于激光熔覆的设备主要是 CO<sub>2</sub> 激光器和固体激光器。CO<sub>2</sub> 激光器因其功率高、效率高、光束质量高,成为应用最广、种类最多的一种激光器。固体激光器(光纤激光器、碟片激光器、二极管激光器)具有转换效率高、性能可靠、寿命长、输出光束质量好等特点,而碟片激光器更适合高反射率材料的熔覆。

在光路系统方面国外已研制出矩形积分反射镜、点状振动反射镜和透射式或透反射式的导光系统,且国外光导纤维已可传输的激光功率达千瓦;国内已有适于千瓦级 CO<sub>2</sub> 激光器的宽带熔覆扫描转镜,在 2 kw 下的单道熔覆宽度可达 15 mm。在送粉装置方面,Grünenwald 等[5]设计了一种新的送粉系统,配套测量装置可反馈信息,保证整个处理过程供给速率恒定。由于其高度集成和重量较轻,整个供给装置可安装在激光工作头上。国内由于受送粉设备发展的限制,主要采用预置粉末法,同步送粉法也有一定程度的发展,天津工业大学研制成功转镜宽带涂覆系统,清华大学研制成功 TH 系列送粉激光熔覆系统,文献[6] [7]介绍了自动化送粉装置及其工艺和反射宽带聚焦镜激光熔覆装置。

## 4. 熔覆层质量控制的研究

熔覆层的质量直接影响其性能。影响熔覆层质量的主要因素有材料特性、光束质量、工艺参数、外界环境等。熔覆层的质量问题主要有裂纹、氧化烧损、粗糙度、稀释率等。

### 4.1. 裂纹

在激光熔覆过程中,高能密度的激光束的快速加热熔化使熔融层与基材间产生了很大的温度梯度。在随后的快速冷却中,这种温度梯度会造成熔凝层与基材的体积胀缩的不一致性,使其相互牵制形成了熔凝层的内应力。这种应力通常为拉应力,往往导致熔覆层的开裂和基材的变形。裂纹按产生的位置分成 3 类:熔凝层裂纹、界面基体裂纹、和搭接区裂纹。以界面基体裂纹为最常见。国内外专家围绕如何降低熔覆层的开裂敏感性,开展了许多研究[8] [9] [10]。对熔覆的基体材料进行一定温度的预热和后续处理,将会有效地将低温度梯度,降低热应力,有利于抑制熔覆层裂纹的产生。但预热和缓冷削弱了激光快速加热和快速冷却的优势。增加含 Ni 量,能有效降低 Fe-Cr-Ni-B-Si 熔覆层的开裂敏感性。适当提高能量密度可显著降低开裂倾向,在熔池中施加电磁搅动也可使裂纹减少。每次涂覆尽量降低涂覆层厚度,以平面应力状态代替应变状态,可以降低开裂倾向。复合涂覆技术也可以降低开裂倾向,是目前研究的热点。其原理是在基体与涂覆层间引入一个中间过渡层,使涂层组成与性能沿厚度方向连续梯度变化,金属基体与陶瓷相涂层间无明显界面,可有效地削弱涂层中的应力,提高涂层和基材的结合强度,减少裂纹的产生。但该技术较为复杂,生产成本也很高。

### 4.2. 基材变形

对于防止基材变形,一般采用以下措施:用热处理法消除基材的内应力;尽量选择较薄的熔覆层;

采用预热和后热工艺；采用预应力拉伸、预变形或夹具固定的方法减少或防止基材的变形。

### 4.3. 氧化与烧损

在高能激光的作用下，如何减少合金元素的氧化与烧损也是一个问题。目前最常采用的方法是实施 Ar 气氛保护。但应注意气体流变问题。文献[11]发现氦气保护优于氩气和氮气，能产生最好的表面光洁度，最细化的微观组织，最高的冷却速率，最高的表面硬度，但氦气的成本也最高。

### 4.4. 表面粗糙度

激光熔覆易造成表面凹凸不平，即折皱现象，导致表面粗糙度增大。引起折皱现象的主要原因是激光作用下，合金熔池表面存在大的径向表面张力梯度。这种大的径向表面张力梯度具有双重效应，它不仅引起了高温下合金元素的快速混合，而且导致了其凝固表面的凹凸不平。研究表明[12]，高功率密度 ( $10^7 \text{ W/cm}^2$ )和短的相互作用时间有助于降低表面粗糙度。在功率给定的情况下，表面粗糙度与扫描速度的关系存在一个极大值。也可以采用低功率密度或快扫描速度进行激光二次重熔处理的方法降低表面粗糙度。

### 4.5. 稀释率

降低稀释率也是激光熔覆技术的重要研究方向。众多研究认为，激光熔覆时希望稀释率在 5%以内，以保证获得高性能的表面。采用同步送粉法时，粉末流量是决定稀释率的最重要因素。当送粉速度较小时，随扫描速度的增加，稀释率减小；当送粉速度较大时，随扫描速度的增加，稀释率反而增加，这可通过粉末流产生的热屏蔽效应加以解释[13]。采用矩形光束可以降低熔覆层的稀释率。但稀释率也不宜过小，否则基材熔化不足，与熔覆层的结合力下降，易使涂层剥落。

## 5. 激光熔覆技术的发展趋势及工业应用前景

激光熔覆作为激光表面改性处理的一种最重要的技术，可以在廉价基体上制成高性能表面，代替大量的贵重合金，优化资源配置，降低能源消耗。与传统或新兴的诸多材料表面改性技术如等离子喷涂、火焰喷涂等比较，激光熔覆显示出许多优异之处。激光熔覆技术在近十几年来得到迅速发展，它可应用于机械制造与维修、冶金、汽车、航海与航天和石油化工等领域。在刀具、模具、阀体上熔覆陶瓷涂层已获得广泛的应用。在激光熔覆基础上发展起来的激光快速柔性制造技术能利用计算机 CAD 模型快速制造出立体金属零件。

激光熔覆技术是当前国内外研究应用的热点，国内西北工业大学、清华大学、北京工业大学、上海交通大学和中国科学院等高校或单位在激光熔覆过程控制方面都有很强的研究实力，广州富通公司在冶金行业、沈阳大陆公司在石油行业都走在应用的前列。激光熔覆技术在生产中的推广和应用，是今后的重要攻关方向，如开发商品化的专用熔覆材料，研制合乎工业生产条件的同轴送粉激光熔覆设备，以及熔覆层质量的在线控制等。相信随着问题的不断解决，激光熔覆技术将在工业生产中得到越来越广泛的应用。

## 参考文献

- [1] 潘继岗, 樊自控, 孙东柏, 等. 轧辊修复技术的研究现状和展望[J]. 新技术新工艺, 2005(3): 60-62.
- [2] Ray, A., Arora, K.S., Lester, S., *et al.* (2014) Laser Cladding of Continupus Caster Lateral Rools: Microstructure, Wear and Corrosion Characterization and On-Field Performance Evaluation. *Journal of Materials Processing Technology*, **214**, 1566-1575. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2014.02.027>
- [3] 杨胶溪, 左铁钊, 王喜兵, 等. 9Cr2Mo 冷轧辊激光宽带熔覆修复强化[J]. 应用激光, 2008, 28(1): 1-6.

- [4] 陈长军, 张敏, 张诗昌, 等. 轧辊的失效及其激光修复与强化技术[J]. 物理测试, 2009, 27(1): 1-4.
- [5] Grunenwald, B., *et al.* (1993) New Technological Development in Laser Cladding. ICALEO, 934.
- [6] 曾晓雁, 等. 一种自动送粉激光感应复合熔覆装置[P]. 中国专利: 200720085225.7, 2008-04-30.
- [7] 史建军. 激光宽带熔覆装置及工艺研究[D]: [硕士学位论文]. 苏州: 苏州大学, 2006.
- [8] 傅戈雁, 刘义伦, 石世宏. 激光熔覆层开裂行为的影响因素及控制方法[J]. 光学技术, 2010, 26(1): 84-86.
- [9] 宋武林, 周刚, 曾大文, 等. 铁基合金中  $Cr_{eq}/Ni_{eq}$  对其激光熔覆层组织结构和开裂敏感性的影响[J]. 激光技术, 2009, 23(3): 142-145.
- [10] 刘其斌, 陈江, 朱维东, 等. 稀土含量对激光表面熔铸涂层开裂敏感性的影响[J]. 贵州工学院学报, 1996, 25(6): 71-81.
- [11] 钟敏霖, 等. 45 kW CO<sub>2</sub> 激光器大面积 CSiB + NiMoCo 合金化研究[J]. 金属热处理, 2000(1): 11-15.
- [12] Yadroitsev, I., Gusarov, A., Yadroitsava, I., *et al.* (2010) Single Track Formation in Selective Laser Melting of Metal Powders. *Journal of Materials Processing Technology*, **210**, 1624-1631.  
<https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2010.05.010>
- [13] 樊增彬. WC/Ni 基合金激光熔覆工艺及熔覆层特性研究[D]: [硕士学位论文]. 济南: 山东大学, 2012.

#### 知网检索的两种方式:

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>  
下拉列表框选择: [ISSN], 输入期刊 ISSN: 2160-7567, 即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>  
左侧“国际文献总库”进入, 输入文章标题, 即可查询

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

期刊邮箱: [app@hanspub.org](mailto:app@hanspub.org)