

文章编号: 1006 - 2106( 2012) 11 - 0038 - 05

# 美国铁路激光熔凝钢轨的在线试验<sup>\*</sup>

张准胜<sup>\*\*</sup>

( 郑州铁路局, 郑州 450052)

**摘要:** 研究目的: 我国重载货运线路年运量目前已接近 5 亿吨, 利用激光表面工程技术来改善轮轨关系, 延长钢轨大修周期, 已成为一个迫切的任务。当今我国该领域在实验室和现场研究应用较多的是激光相变硬化技术、激光熔覆技术, 轮轨表面激光熔凝技术的研究应用在国内还鲜有资料。本文详细介绍美国联邦铁路局研究发展处 2007 年 5 月公布的激光熔凝钢轨的环线铁路试验及事后分析研究报告, 以供国内研究者参考和借鉴。

**研究结论:** ( 1) 激光熔凝钢轨失效的原因是源于激光加工引起的裂纹在疲劳条件下的不断扩展; ( 2) 激光重熔搭接带是残余应力促进裂纹形成和传播最敏感的区域; ( 3) 激光熔凝钢轨上道前一定要进行完整的金相评价以决定它们的完整性。

**关键词:** 激光熔凝; 激光熔覆; 激光相变硬化; 钢轨; 试验

**中图分类号:** U216.42 + 4      **文献标识码:** A

## Online Test on Laser Glazing Rail of American Railway

ZHANG Zhun - sheng

( Zhengzhou Railway Administration , Zhengzhou , Henan 450052 , China)

**Abstract: Research purposes:** At present , the annual traffic volume of the heavy - haul railway in China has been approach to 500 million tons. Using the laser surface engineering technology to improve the wheel/rail relationship and prolong the rail overhaul interval has already become a pressing task. Nowadays , in this field , the laboratory test and the on - site research and application in China mainly include the laser transformation hardening technology and laser cladding technology have been more frequently used , while there is little information on the laser glazing technology and its application in glazing the wheel/rail surface. This paper in detail introduces the research on the laser glazing rail test in FAST at TTC and its ex - post analysis report announced by the office of federal railway administration in May 2007 for the purpose of giving the reference to domestic researchers.

**Research conclusions:** ( 1) The reason for failure of laser glazing rail is the continuous extension of cracks induced by laser glazing in fatigue conditions. ( 2) The laser re - melting overlapping zone is the most sensitive area where the residual stresses promote crack formation and spreading. ( 3) The laser glazing rails must undergo a complete metallurgical evaluation to determine their integrity before installation on track.

**Key words:** laser glazing; laser cladding; laser transformation hardening; rail; test

## 1 概述

激光表面工程技术在许多工业领域已是一项成熟技术,但在铁路轮轨表面利用激光技术制造适宜的硬

化层,有应用前景的研究问题。激光表面工程技术在轮轨表面的工业应用价值有:激光相变硬化技术、激光熔凝技术、激光合金化技术、激光熔覆技术。目前我国该领域在实验室和现场研究应用较多的是激光相变硬

<sup>\*</sup> 收稿日期: 2012 - 09 - 27

<sup>\*\*</sup> 作者简介: 张准胜, 1954 年出生, 男, 高级工程师。

化技术、激光熔覆技术、轮轨表面激光熔凝技术的研究应用在国内还鲜有资料。

为减少轮轨接触面的摩擦和损耗,美国联邦铁路局计划用激光熔凝技术在钢轨轨距角制造一个硬化层,替代在钢轨轨头涂润滑油,并进行先前未进行过的现场试验,以全面评价激光熔凝钢轨的使用性能。联邦铁路局研究发展处 2007 年 5 月公布了激光熔凝钢轨的环线铁路试验及事后分析研究报告。原文中“laser-glazing”,直译为激光上釉,其本意是用高功率激光器在钢轨表面制造熔池,快速熔化后又迅速凝固,形成一个又薄又亮的熔凝硬化层。本文取其意将“laser-glazing”译为激光熔凝。这份报告资料翔实,方法齐全,图片丰富,可供国内铁路现场技术人员参考,以推动我国该领域研究应用的进展。

## 2 试制及铺设

### 2.1 激光熔凝钢轨试制

#### 2.1.1 试验钢轨

试验钢轨由美国国际钢铁集团提供,钢轨头部热处理硬化,钢轨型号 141AB 2 根,长度各 40 ft;其中一根中间切开,然后用铝热焊焊接到一起形成一个铝热焊接头并准备激光加工,另一根作为对照。

#### 2.1.2 加工要求

含有铝热焊接头的钢轨在工厂进行激光加工。按照合同要求,激光熔凝硬化层长度沿轨节 40 ft,宽度约 1 in,厚度至少 0.5 ~ 1 mm;激光熔凝硬化层的部位是钢轨轨距角两侧,其中轨头内侧平直部 1/2 in,向轨顶的弯曲面 1/2 in。

#### 2.1.3 优化参数

为满足加工要求,正式加工前,工厂对激光加工参数进行优化。在激光头焦距 94 mm 固定的前提下,分别对激光器功率 3 500 W 时激光头运动速度 0.5 m/min、0.6 m/min、0.8 m/min 三种组合及在激光器功率 3 800 W 时激光头运动速度 0.4 m/min、0.5 m/min、0.6 m/min、0.8 m/min 四种组合进行试验;其中激光器功率 3 800 W、激光头运动速度 0.6 m/min 时熔凝硬化层厚度 0.9 mm,激光器功率 3 800 W、激光头运动速度 0.5 m/min 时熔凝硬化层厚度 1.5 mm。优化后最佳工艺参数是:激光器功率 3 800 W,激光头运动速度 0.5 m/min,激光头焦距 94 mm。

#### 2.1.4 正式加工

钢轨加工前,用一定功率的钢丝刷清理钢轨头表面的氧化皮。钢轨加工时放在一个超出钢轨长度的钢平台上,钢轨不动并与激光头运动的轨道保持平行,为满足加工轨距角的要求,钢轨分为直立和平放两种状态,激光头始终与钢轨头加工面保持垂直。为完成

1 in 宽的激光熔凝层,激光头要加工三次形成三条激光熔凝带,相互搭接形成了两道激光重熔区。

### 2.2 激光熔凝钢轨铺设

#### 2.2.1 试验环线

现场试验在运输技术中心(TTC)的快速试验环线(FAST)上进行。环线长度 2.7 mi,重载列车运行速度 40 mi/h,各节车辆重约 315 000 lb,10 h 列车运行 125 圈,通过总重约 1 MGT。比较来看,一个典型的北美铁路货运线年通过总重约 60 ~ 90 MGT。

#### 2.2.2 试验地点及铺设

试验地点选择在环线 07 区 5°曲线的外股钢轨上,不用润滑油,以按照 FAST 重轴荷载的程序评价激光熔凝钢轨的减磨效果。激光熔凝钢轨在铺设前,进行外观检查 and 无损检查。激光熔凝钢轨外观检查表面粗糙,无损检查见本文第 4 节。激光熔凝钢轨上道前 TTC 截下约 1 ft 并保留用于以后的实验室分析,余下的 39 ft 和对照钢轨一起安装在试验地点。

## 3 观测及结果

### 3.1 现场观测

由于激光熔凝对钢轨性能的影响不确定,为确保安全,每天在列车运行后对激光熔凝钢轨进行外观检查。激光熔凝钢轨和对照钢轨在上道前后同时进行横剖面、硬度和钢轨摩擦的现场检测及数据采集。由于受对照钢轨表面氧化皮和激光熔凝钢轨表面粗糙度影响,摩擦计数据采集受到影响,有限的数字不能证明激光熔凝钢轨能显著地减少摩擦。

### 3.2 过程及结果

在重载列车运行一夜通过总重约 1.2 MGT 后,重新采集各项数据。表 1 展示了此时收集的硬度数据,激光熔凝区布氏硬度(Bhn)平均约 670,而非激光熔凝区和对照组布氏硬度平均约 340,高约 2 倍。此时对照钢轨没有发现问题,但激光熔凝钢轨出现几个掉块和剥落。

表 1 现场硬度(Bhn)测试表

位置	2005. 10. 14/0MGT		2005. 10. 17/1.2MGT	
	轨顶	轨距面	轨顶	轨距面
07-567	347	-	353	-
07-574	353	-	350	-
07-581	348	-	341	-
07-591	340	680	360	658
07-595	350	668	346	650
07-604	354	653	368	650

在重载列车运行第四个晚上通过总重约 5.6 MGT 后,对照钢轨仍没有发现问题,此时激光熔凝钢轨轨距角出现严重的剥落,沿 39 ft 长度上有 12 块大的剥落。

虽然当时还没有危及安全,为防止进一步的裂纹扩展进而影响系统安全,激光熔凝钢轨被迫下道并进行专门的失效分析和金相评估。下道的激光熔凝钢轨在 TTC 被分割用于分析,其中一部分送到美国阿贡国家实验室,一部分保留在 TTC 为了将来可能的调查,一部分用于目前的分析。

## 4 失效分析

### 4.1 裂纹无损检查

激光熔凝钢轨外观检测没有裂纹,然而,用染料渗透剂和磁粉的方法检查,可以发现裂纹存在。激光熔凝钢轨在未上道前用染料渗透剂的方法检测出裂纹沿着整个轨节激光熔凝的条带上,中间轻微,二条搭接重熔带裂纹严重。激光熔凝钢轨下道后的磁粉分析照片表明,裂纹沿钢轨轨距角延伸。不同截面的磁粉分析表明在横断面无裂纹。通过比较激光熔凝钢轨上道前和下道后的无损检查结果表明在轨距角的损伤更加严重。

### 4.2 金相分析

激光熔凝钢轨金相分析试件分为非上道和下道两类,每类一组 6 个试件,其中 3 个试件取自轨头内侧激光熔凝轨距角(该区域用 G 表示),3 个对称取自轨头外侧非熔凝区(该区域用 F 表示)。对下道试件,3 个中 2 个切割接近剥落区域以分析重载引起严重损伤的钢轨断面。继初始的外观检查之后,金相试件通过低倍和高倍放大的显微图片进行检查。金相试件遵循标准的规程抛光和蚀刻。

#### 4.2.1 立体镜检查

通过非上道激光熔凝钢轨低倍放大图片,发现裂纹沿着 G 区的激光熔凝区域,在所有的情况下,这些裂纹传播不越过激光熔凝区域和钢轨基体材料之间的界面。相比之下, F 区没有裂纹出现。

通过下道的激光熔凝钢轨低倍放大图片,在 G 区的激光熔凝区发现裂纹,不仅有垂直于熔凝区域的裂纹,而且进入钢轨基体材料的裂纹分叉扩展,导致了一个裂纹网络。分叉扩展的裂纹能作为一个应力集中推进器,在疲劳条件下特别地促进钢轨过早的失效破坏。图片也表明,自非上道和下道试件中 F 区选出的试件不含有裂纹区域或不含有与激光熔凝加工关联的其他损伤。

#### 4.2.2 光学显微镜检查

激光熔凝试件的显微结构在光学显微镜多种放大倍数下观察。试件被抛光和蚀刻。腐蚀剂用 NITAL2%,在室温下 3 s。显微图片显示,非上道试件激光熔凝区域含有马氏体、非晶区,未受影响的基体区则显示完全的珠光体结构。在激光熔凝区马氏体和未

影响的基体区珠光体之间的界面,能观察到裂纹终止。沿激光熔凝搭接带区域界面能发现一些孔隙,这些孔隙大概在激光熔凝期间产生并且对钢轨的整体性是有危害的。

图 1、图 2、图 3 为下道试件的激光熔凝区的抛光显微结构。下道试件激光熔凝区轨距边观察到的裂纹数量、位置、严重性是大大地增加。图 1 表明结束在熔凝区和基体材料界面之间的裂纹和一个进入基体材料中分叉的裂纹。图 2 表明下道试件熔凝区的一个裂纹,这个裂纹产生可能源于重载列车作用下激光熔凝表面的剥落。图 3 表明一条裂纹横穿二条激光熔凝搭接带,在两端裂纹分叉成网状(箭头所示界面),这是一个由激光熔凝处理制造的可能的残余应力的好例子,激光熔凝处理创造了对裂纹高度敏感的区域。上面提到残余应力促进对裂纹形成的敏感性,特别是开裂在轨距角激光熔凝区和基体材料之间的界面上,加速了剥落的发展。

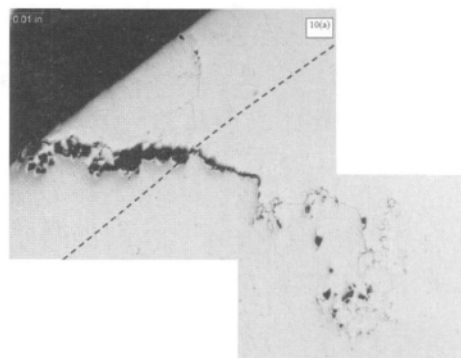


图 1 裂纹进入钢轨基体分叉

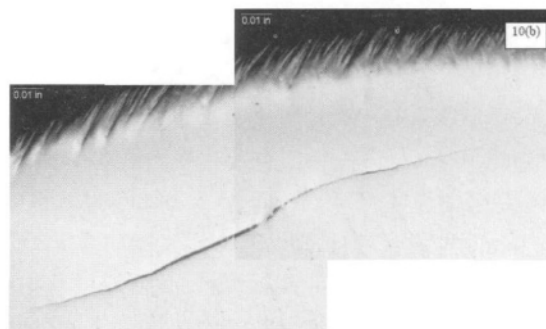


图 2 沿激光熔凝区的裂纹

对非上道和下道的 F 区试件,在任何情况下,在各种放大倍数直到 500x 显微结构没有显著区别。蚀刻显微结构是所料的完全的珠光体结构。

### 4.3 力学测试

#### 4.3.1 显微硬度检测

激光熔凝钢轨非上道和下道的 4 个试件用于显微硬度测量, G 区、F 区轨距角测量部位如图 4 所示, L、

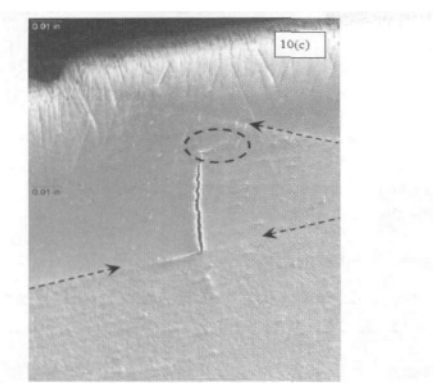


图 3 裂纹横穿搭接区分叉

R、C、E 线表示测点的位置。显微硬度测量结果汇总在表 2 中。钢轨基材显微硬度平均( 414.1 ±27.2) HV 激

光熔凝轨距角区显微硬度平均( 881.75 ±92.12) HV。激光熔凝轨距角区高的标准偏差主要是由非晶和马氏体组成的激光熔凝区整体性和均匀性缺乏的结果产生的。

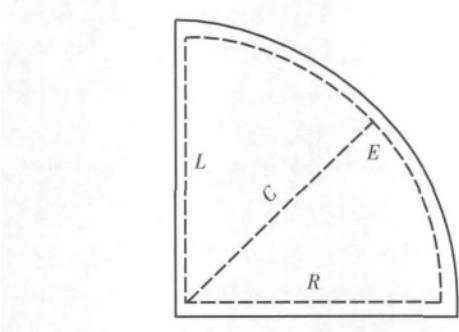


图 4

表 2 试件显微硬度( Hv) 分析表

分类 测位	测 值	非上道 F 区		下道 F 区		非上道 G 区		下道 G 区	
		平均	标准偏差	平均	标准偏差	平均	标准偏差	平均	标准偏差
左边 L		389.8	22.6	418.4	26.4	429.2	23.2	404.8	18.9
中间 C		404.6	24.5	421.7	23.2	424.8	23.6	420.5	27.3
右边 R		385.8	40.3	436.6	19.5	418.1	21.6	49.4	17.7
边缘 E		—	—	400.6	26.1	857.1	56.3	917.9	121.3

4.3.2 夏比冲击试验

激光熔凝钢轨冲击强度试件分类和选取与金相分析同。机加工依据 E370( 美测试和材料) 标准。每个试件在不同的温度( -30 ℃ 0 ℃ 65 ℃) 下试验,以研究极端环境条件对激光熔凝钢轨断裂机理的影响。表 3 为在冲击试验期间试件吸收的能量,表中 G、F 的意义同硬度检测。由表 3 可推断:在冲击试验期间,吸收的能量随着温度增加;激光熔凝减少了试件的冲击韧性。观察到试件全部的断裂是脆性的。由于熔凝区内部伤损严重,导致一个试件断裂离开切口区,这表明激光熔凝形成的应力集中比加工缺口引起的应力集中更大。

表 3 冲击试验数据表

试件	温度	吸收能/( lb/ft <sup>2</sup> )		
		-30 ℃	0 ℃	65 ℃
非上道		3.8G	5.0G	8.0G
		4.2F	5.5F	8.0F
下道		3.5G	4.3G	6.0G
		4.5F	5.75F	8.5F

4.4 失效分析

4.4.1 失效原因

为了更好地理解激光熔凝钢轨的失效机理,一系列实验室计划代替了连续的在线试验。激光熔凝钢轨

下道的原因是沿着轨距角熔凝区发展的众多剥落,而对照轨没有。剥落产生的原因是源于激光处理过程中引起的裂纹在疲劳条件下的不断生长。此外,激光熔凝加工轻微改变了轨头轮廓,粗糙度和突起的小疙瘩引起更频繁、更高的接触应力,加速了裂纹的长大和扩展,甚至向下进入钢轨基体进而导致剥落和激光熔凝钢轨的迅速失效。

钢轨的相是与其耐磨等特性一样的重要。激光熔凝引起珠光体相转变到 900 ℃ 以上的奥氏体区域,甚至温度大于 1 200 ℃,呈半固体和液体;迅速冷却时碳原子来不及扩散,奥氏体转变成比珠光体硬的马氏体,这种无扩散机制形成的相是由大量原子协同剪切完成的。这个过程绝对创造了残余应力,在两条激光熔凝搭接带中的残余应力将拉伸或压缩,结果导致对裂纹的形成和传播极其敏感的区域。

4.4.2 优化目标

上述分析不是要废除激光熔凝钢轨而是鼓励对激光熔凝技术优化。一个优化的技术可理想地将钢轨面激光加热到奥氏体温度,避免过热到半固体或液体,可保持钢轨表面的完整,最小化或消除裂纹和残余应力。这样处理的区域显微组织将是贝氏体、马氏体或其组合,同时形成一个光滑的硬壳。鉴于现场裂纹检查是困难的,针对激光熔凝的裂纹检查必须在工厂解决。

## 5 思考及借鉴

为促进激光熔凝技术的进一步优化,TTC 首席研究员 F. H. Robles 在这个报告末尾提出下面 4 个问题:

- (1) 存在能使钢轨磨损寿命最大化的更硬的相吗(珠光体除外)?
- (2) 一旦激光熔凝硬化层磨穿将发生什么?
- (3) 高硬度的激光熔凝层将迅速的磨损车轮吗?
- (4) 有在线对运营钢轨激光熔凝加工的方法吗?

上述(1)、(3)问题涉及新钢轨设计和轮轨关系,(2)、(4)问题涉及轮轨激光表面工程大规模工业应用技术的研发,详细解答这些问题已超出本文的范围。事实上我国工程师和研究人员早就意识到,采用激光表面工程技术可以在轮轨表面制造多种耐磨的硬化层并有效地改善轮轨关系,并在该领域作出了有成效的工作。进入本世纪以来,郑州铁路局率先在这个领域内获得多项专利,并在郑州大学进行钢轨激光相变硬化研究和激光相变硬化护轨长达 16 个月的现场铺设试验;此后济南钢铁公司激光相变硬化尖轨在多家钢厂线路上铺设和销售;济南铁路局激光相变硬化道岔尖轨、护轨现场试验通过局级鉴定;武汉铁路局激光强化(相变硬化和熔覆)道岔部件和小半径曲线钢轨技术通过局级鉴定;北京工业大学通过新型激光器对激光相变硬化和激光融覆钢轨进行室内研究;沈阳大陆公司对激光熔覆修理车轮裂纹进行室内外试验。我国多家室内研究和现场试验证明,激光相变硬化道岔部件表面光滑,没有裂纹,维修简便,使用安全,硬化层厚度约 0.8 mm,显微组织主要是硬相细晶马氏体,使用寿命可以延长 1 倍。此外激光相变硬化产生的残余应力是压应力,而钢轨表面的疲劳开裂通常是由拉应力引起的,所以激光相变硬化后,硬化层的疲劳强度也得到提高。

国内上述结果正好可以与这份试验报告结果相比较。比较来看铁道工业最具有大规模应用前景的可能是激光相变硬化技术。为此,笔者曾设计了一种铁路轨道激光维修车,可以对运营钢轨进行在线、就地、周期性激光维修。我国重载货运线路如国铁大秦铁路年运量目前已接近 5 亿 t,钢轨大修周期我国规定是 6~9 亿 t,这意味着铺轨运营一年后钢轨病害将大量出现,两年内钢轨就要换轨大修。这显然不现实。因此,利用激光表面工程技术来改善轮轨关系,延长钢轨大修周期,已成为我国铁道工程师面临的一个艰巨、迫切的任务。

## 6 结论

激光熔凝钢轨失效的原因是源于激光加工引起的裂纹在重载疲劳条件下的不断扩展。本试验激光加工工艺形成的两条激光重熔搭接带是残余应力促进裂纹

形成和传播最敏感的区域。TTC 建议今后激光熔凝钢轨上道前一定要进行完整的金相评价以决定它们的完整性。这份报告警示我们在轮轨表面采用激光表面工程技术时要更加审慎,尤其在激光熔凝、熔覆时。

## 参考文献:

- [1] U. S. Department of Transportation Federal Railroad Administration Office of Research and Development. In - Track Demonstration of Laser - Treated Rail to Reduce Friction and Wear [R]. Springfield: National Technical Information Service, May 2007: 1 - 68.
- [2] 张淮胜,吕杰胜,袁明振. 一种激光表面熔凝的铁道钢轨 [P]. 中国: ZL01219892.7 2002 - 01 - 30  
Zhang Zhunsheng, Lv Jiesheng, Yuan Mingzhen. A Kind of Laser Surface Glazing Railway Rail [P]. China: ZL01219892.7 2002 - 01 - 30
- [3] 郑州铁路局新乡工务段. 国铁 1/12 提速道岔激光相变硬化直护轨试验报告 [R]. 河南新乡: 郑州铁路局新乡工务段 2002.  
Zhengzhou Railway Department Xinxiang Track Division. The Manufacture and Laying of Laser Transformation Hardening Turnout Straight Guard Rail [R]. Xinxiang: Zhengzhou Railway Department Xinxiang Track Division November 2002.
- [4] 尹维一. 应用激光相变硬化工艺技术提高尖轨使用寿命 [J]. 冶金设备管理与维修 2003(6): 47 - 48.  
Yin Weiyi. Application of Laser Transformation Hardening Technology to Improve the Tongue Rail Service Life [J]. Metallurgical Equipment Management and Maintenance 2003(6): 47 - 48.
- [5] 济南铁路局工务器材段. 激光淬火提速道岔曲尖轨和护轨研制报告 [R]. 济南: 济南铁路局工务器材段 2004.  
Jinan Railway Department Work Equipment Maintenance and Repair Shop. Laser Quenching Turnout Tongue Rail and Guard Rail Research Report [R]. Jinan: Jinan Railway Department Work Equipment Maintenance and Repair Shop 2004.
- [6] 张淮胜,吕杰胜,铁路轨道激光维修车 [P]. 中国: ZL02100096.4 2006 - 12 - 20.  
Zhang Zhunsheng, Lv Jiesheng. Railway Track Laser Maintenance Car [P]. China: ZL02100096.4 2006 - 12 - 20.
- [7] 杨胶溪,刘华东. U71Mn 钢轨表面激光融覆 Fe 基合金组织与性能研究 [J]. 铁道工程学报 2010(7): 34 - 37.  
Yang Jiaoxi, Liu Huadong. Research on the Microstructure and Properties of Laser Cladding Fe - based Alloy on U71Mn Rail Surface [J]. Journal of Railway Engineering Society 2010(7): 34 - 37.
- [8] 郭战伟. 大秦重载铁路大修换轨周期的探讨 [J]. 铁道建筑 2011(11): 106 - 109.  
Guo Zhanwei. Discussion on Da - Qin Heavy Haul Railway Overhaul in Rail Cycle [J]. Railway Construction 2011(11): 106 - 109.