

浅析铝热焊、闪光焊两种钢轨接头焊接方法及应用

王 朋

国能包神铁路集团安全监察与应急救援中心 内蒙古自治区 包头 014010

摘 要：比较铝热焊、闪光焊两种钢轨接头焊接方法，浅析公司现役铝热焊接头质量现状，介绍移动式闪光焊工艺流程及在国内的发展应用，提出移动式闪光焊应用的建议。神朔铁路横跨晋陕蒙三省，全线沟壑纵横、地形复杂，曲线多（半径小）、桥隧多（桥、隧、涵占线路总长的30%）、坡度大、是神朔铁路的最大特点，目前在役的钢轨现场焊接方式主要以铝热焊为主。随着神朔铁路运量逐年递增，线路通过总重也在不断增加，再加上重载铁路轴重大、行车密集等因素，钢轨铝热焊（焊接）接头极易发生伤损甚至折断病害，极大地威胁铁路行车安全。2024年11月，神朔线上行213km³00m处一铝热焊接头服役仅29天就发生折断现象，钢轨接头铝热焊已不能满足工务线路设备“保证列车按照规定速度安全、平稳和不间断地运行”的问题愈加凸显，目前移动式闪光焊焊接工艺及质量已十分成熟，在国内推广运用最为广泛，其焊接质量高、稳定性好的优点，完全能够满足神朔铁路运输生产的需求。本文就以神朔（重载）铁路运煤专线为例，围绕钢轨铝热焊、闪光焊两种焊接方法及应用，展开几点思考。

关键词：铝热焊；移动式闪光焊

引言：截至2025年1月，神朔铁路全线在役铝热焊接头8339个，约占全线现场焊接头总量的95%，在每年钢轨伤损中，铝热焊接头伤损约占86%。根据现阶段运能发展情况，为保证行车安全，神朔铁路需要权衡利弊，选择最适合的钢轨焊接方法。

1 铝热焊、闪光焊两种焊接方法对比

铺设无缝线路的基础是线路钢轨的接头焊接，其焊接质量是无缝线路铺设的重要环节。

目前，我国钢轨的现场焊接方法主要有铝热焊、闪光焊和气压焊三种。神朔铁路全线现场焊接头主要以铝热焊接头为主，闪光焊接头仅有2024年神维公司更换曲线长轨条时焊接的几对，气压焊接头已全部退役。

1.1 从接头缺陷及解决方法比较

随着我国铁路建设的飞速发展，现场闪光焊焊接设备不断开拓发展，其焊接质量的稳定性得到很好的优化，相比其它焊缝接头而言，出现伤损的概率较低，但也存在一些缺陷，如：1、焊接时接头顶锻力不足，导致熔融金属层排除不到位造成的火坑，此情况需结合前期试焊数据，对设备顶锻装置进行参数调整，即可保证顶锻工艺的正常完成；2、钢轨在高温作用下氧化形成的硅酸盐夹杂物易形成灰斑，该问题只需要在焊接过程中严格控制各项施工参数，及时清理掉氧化夹杂物即可。

铝热焊需要人工在现场完成焊接工作，受人的客观因素影响较大，其主要缺陷形式有：1、由于焊剂存储不当或者焊轨工具受潮导致气孔的产生，这类问题没有特殊的办法解决，只能通过操作人员在焊接前对设备、材

料进行全面、仔细地检查来控制；2、夹砂，夹砂指在砂锅安装操作过程中砂锅的型砂进入焊缝后造成的缺陷，此情况需要按照严格的要求来选用型模砂（生产厂家负责）和有着较高业务能力的焊工操作，方可减少夹砂现象的出现；3、操作人员的业务技能水平参差不齐，焊轨作业操作不规范，导致焊缝材质疏松，此情况需要加强操作人员的业务技能培训，以减少接头材质疏松现象。

综上所述，闪光焊接头焊接以操控机械设备为主，其缺陷较为可控；铝热焊接头焊接以人为主，其缺陷可控性要从操作工艺、材料使用等方面考虑，受人的客观因素影响较大不易控制。此外，铝热焊接头是铸态组织，接头强度仅有钢轨母材强度的70%，而熔态组织的闪光焊接头强度目前已达到900MP以上，与母材强度相当。

1.2 从接头外观质量方面比较

因现场闪光焊是采用先进的大型机械车焊接，其配有先进的红外自动对中系统、温湿控制系统、高精度的传感器和物联网系统等技术，所以接头外观质量最好；铝热焊接头采用人工对接，钢轨端面校正时预留的拱度偏大或者偏小极易造成的焊缝接头上拱或下沉，导致外观形状尺寸超标，受人的客观因素影响较大，外观质量不易得到较好的控制。从焊接接头质量稳定性方面比较，闪光焊以机械设备操作为主各项操作精度较高，其焊接接头质量稳定性较好，铝热焊受人的客观影响因素多，其稳定性不易控制。

2 铝热焊接头焊接质量现状分析

钢轨铝热焊在我公司已推广十余年，其焊接方法操作相对简便，容易掌握、焊接时间短、无需外部电源。但是随着神朔铁路的运量不断增加，铝热焊接头成型差、内部易出现缺陷、接头强度和韧性不足等缺点日益突显，同时，铝热焊在技术方面和管理方面也存在一些不足之处，已不能适应我公司运量逐年递增的需求。

2.1 技术方面

2.1.1 焊剂型号影响铝热焊的质量稳定性

国内现有多种型号的钢轨铝热焊焊剂，不同型号的焊剂有着不同的操作要求，其质量稳定性也不同。特别是在焊接高强度钢轨（PG4、PG5）时，差异尤为明显，因此需要对焊剂型号的使用方面不但要配套还要结合在役钢轨的材质进行评估。^[1]

2.1.2 对不同钢种焊接评价不够充分

不同的钢轨材质，当采用不同的焊接方法时，材料内部的组织转变机理也就不同，铝热焊是填充金属焊，闪光焊是熔化压力焊，这两种焊接方法的机理不同，焊接时产生的缺陷敏感性也不同。目前，公司对钢轨焊接性的评价偏重于焊接的使用性，对其工艺过程和热焊接的研究不够充分。^[2]

2.2 管理方面

2.2.1 管理体制不健全，不能完全执行标准

一是现场焊接出现问题时，未能及时沟通、正确研判、解决问题。有的在焊轨过程中主要施工负责人员履职不到位；有的焊轨班组在焊轨现场没有专业技术人员监督指导；有的是非专业技术人员在现场盯控作业安全而缺少技术监督，甚至有些焊轨施工班组隶属外包单位，技术力量匮乏（作业人员仅有1-2名有焊工证，其他人员仅参加过钢轨焊接工作）；有的焊轨施工班组不能规范执行铁路行业标准，对标准中规定的试验项目，仅完成部分内容就上线作业，缺乏质量控制数据的完整性。^[2]二是管理制度中缺少过程控制的内容。我公司的现行管理制度侧重接头使用性能的要求，缺少过程控制的内容。过程控制不仅应包括焊接过程中关键的技术要求，也应包括施工资质、检验及批准的程序等广义的控制要求。^[2]

2.3 焊轨设备使用保养不良

目前，我公司对焊轨工区配备了先进的焊接设备，如：切割机、除锈机、推瘤机、矫直机等设备，在设备保修期过后，常规保养、检修都由焊轨工区内部员工自行解决，导致在设备保养、检修方面做得不够到位，如：电气连接件没有定期检查、润滑油标号不符等现象在不同程度上降低了设备的精度或造成设备损伤，再加

之长期使用后缺少必要的检查和标定，使设备运行状态不稳定甚至带病作业，直接影响接头焊接质量。^[2]

上述几点情况皆会影响铝热焊接头焊接质量，随着神朔铁路运量不断增加，多方面因素引发铝热焊接头缺点日益突显，已不能适应我公司现阶段运量发展的需求。

3 移动式闪光焊工艺流程

3.1.1 闪光焊工艺原理

闪光焊是将钢轨紧固在两电极之间施以电流，利用电流流经钢轨接触面及邻近区域产生的电阻热效应，将其加热到熔化状态，再借助设备的顶锻压力，从而形成稳固的焊接接头。^[3]

3.1.2 焊接前的准备

要在焊轨车进入区间前，完成钢轨接头除锈、打磨等准备工作；检查推瘤刀的侧板与钢轨轨腰的间隙是否一致；操纵机器将焊机落到待焊接头上。

3.1.3 施焊过程

操作焊机进行焊轨，推瘤后保压；在接头的表面温度低于400℃后，松开焊机钳口；利用钢丝刷、吹尘枪等工具及时清除焊机电极、焊剂钳口、推瘤刀上的飞溅物和焊渣等杂物，以备焊接下个接头；在钢轨接头温度低于250℃后，确认所有作业机构已复位，整车低速走行至下一对焊头位置。

3.2 后续处理

辅助作业人员要相继完成线路的恢复、探伤等工作。

目前，移动式闪光焊轨车已实现机械化操作进行现场钢轨焊接，为现场焊轨提供了良好的作业环境，在保证焊接质量的情况下，极大程度地减轻了现场作业人员的劳动强度。^[4]

4 移动式闪光焊在国内发展应用

4.1 移动式闪光焊在国内的发展。

20世纪90年代，通过引进设备，国内企业开始研究闪光焊技术，逐步掌握其核心原理和操作流程；2000年初期，国产设备在高铁、地铁等项目中陆续投入使用，焊接质量和效率较之前得到较大改善；到2010年代，设备的自动化程度有了较大的提高，焊接精度和稳定性显著提升，更能适应复杂的施工环境，此时，移动式闪光焊轨车已成为铺设高铁无缝线路的核心设备；从2020年至今，移动式闪光焊轨车不但用于高速铁路，还在城市地铁、重载铁路以及既有线路改造中得到广泛普及，通过引入物联网、大数据分析等智能化技术，实现设备运行状态监控以及对接头焊接质量的实时评估。

4.2 移动式闪光焊在国内的应用。

4.2.1 接头质量方面。在2017年北京铁路局相关部门分别对攀钢75N·U95Cr(PG5)热处理钢轨和包钢75N·U20Mn(贝氏体)钢轨进行移动式闪光焊接,并进行落锤、硬度、冲击、拉伸、疲劳、静弯等试验检测,数据显示其焊接质量满足TB/T1632-2014《钢轨焊接》的标准要求,焊接接头具有良好的稳定性。试验数据如下:

4.2.2 PG5 钢轨接头冲击功均值11.1 J,抗拉强度1090 MPa,断后延伸率8%,硬度呈对称分布,HJ/HP值为0.91,HJ1/HP值为0.81,晶粒细小,无马氏体等硬脆组织,晶粒度在8.5级以上,接头综合性能良好。

4.2.3 贝氏体钢轨接头冲击功均值38.3 J,抗拉强度1081 MPa,断后延伸率7%,硬度呈对称分布,HJ/HP值为1.02,HJ1/HP值为0.86,晶粒度在8级以上,接头硬度与母材相当。^[5]

以上数据标志着,移动式闪光焊焊接接头强度高、质量稳定,能够满足重载铁路的要求。

4.2.4 设备技术特点。移动式闪光焊轨车适应性强,该设备采用模块化设计,便于在不同环境中快速组装和拆卸,适应多种施工条件;支持多种焊接模式(如连续闪光焊、脉冲闪光焊等),适应不同轨道类型(如高铁、地铁、重载铁路等);可根据钢轨材质和环境条件自动调节焊接参数(如电流、电压、压力),确保焊接质量稳定,单次焊接时间 ≤ 30 分钟,其焊接接头强度 ≥ 900 MPa;该设备配备了高精度对中装置,通过激光扫描和图像识别技术,实现轨道的自动定位和对中,减少人工干预,确保在复杂环境中轨道对接的准确性,轨道对接误差 ≤ 0.2 mm;设备配备温湿度控制系统,可在 -20°C 至 50°C 的环境温度下正常工作,适应高寒、高温地区作业;设备在防尘防水设计上采用IP65及以上防护等级,确保在隧道、雨雪等恶劣环境中稳定运行;设备结构还经过抗震优化,适应山区、隧道等振动较大的环境;配备了高精传感器和物联网系统,实时监控焊接过程和环境参数,及时调整设备工作状态。

综上所述,移动式闪光焊轨车通过模块化设计、高精度焊接、温湿度控制、智能化监控等关键技术应用,使设备能够在山区、隧道、高寒地区等复杂环境中高效稳定运行,完全可以满足神朔铁路地形复杂、曲线多、线路坡度大、桥隧相连等复杂环境下钢轨接头焊接作业需求。

5 闪光焊在我公司的应用建议

由于神朔铁路位于偏远山区,沿线地形复杂,桥梁

隧道较多,特别是三岔至神池南区间、上亿佬、九圪塔、阴塔等地段昼夜温差较大(冬季最低气温可达零下 30°C),对钢轨接头的焊接质量有着较高的要求,因此,移动式闪光焊轨车是我们的重要保障。

5.1 低温条件下焊接质量控制

钢轨闪光焊现场焊接时,受外界不同环境的影响因素较多,

其中有些因素是无法控制的,如在寒冷(昼夜温差较大)地区采用常规的现场焊接方法,难以保证接头焊接质量,甚至会发生焊接接头断裂的情况。通过对往年焊接接头伤损及其发展情况分析,采取以下措施进行焊接作业,可以较大幅度减少焊缝伤损产生。

5.1.2 当现场气温低于 10°C 时,钢轨在焊接时需要吸收大量的热量,但焊接的能量有限,焊接接头热能不足会造成焊缝相对较硬易断裂,必须在焊接前对钢轨进行预加热处理,使钢轨表面预热升温为 35°C – 50°C ,以补充这部分热量;在对钢轨进行预加热后及时采用保温措施,防止钢轨温度快速下降;低温环境,焊接接头存在冷却过快产生冷裂纹现象,所以在正火前要对加热设备(气瓶、仪表)采取保温措施,确保正火时气体均匀火焰稳定,在焊接正火完成后,也要对焊接接头做保温处理。^[6]

5.1.3 当现场气温低于 0°C 大于 -10°C 时,对焊轨电气和液压系统的运行也会产生影响,导致焊接工艺产生波动。对此,在焊接前要让焊机的液压系统得到充分预热,使焊机运行稳定;为确保焊机平稳运行,焊机的冷却水温度不能太低,至少为 15°C 。

5.2 潮湿环境下焊接质量控制

5.2.1 当现场环境为小雨、小雪时,应采取防潮措施,若打磨前待焊钢轨已经被雨雪浸湿,用喷枪将待焊接头 0.5 m范围内的钢轨烤干再进行打磨除锈处理,并采取防止钢轨表面遇水氧化生锈的措施。^[6]特别要注意:在焊接中要防止雨雪飞入焊缝,使高温焊缝及热影响区温降速度加快产生局部马氏体组织,造成焊缝接头机械性能降低;如果现场伴有刮风,焊接时要将焊机四周保护好,以防外来空气进入焊道污染焊缝。焊接后接头还处于高温状态,必须采取有效的保温措施,防止高温焊缝及其热影响区温降速度过快,使接头出现马氏体组织,影响接头焊接质量。

5.2.2 当现场环境为中雨、中雪及以上时,为保证焊接质量,不应进行焊轨作业。^[6]

5.3 焊接接头检测

钢轨焊接后应在接头温度冷却至 40°C 以下时,及时进行超声波探伤,并实时填写探伤记录。探伤时宜选用

回波频率较高的 ($f \geq 4\text{MHz}$) 的超声波探头, 扫查灵敏度可在现场探伤灵敏度的基础上再增益4-6 (dB)。

特别注意: 当采用单探头法扫查时, 一可用折射角 60° 至 80° 的斜探头对焊缝轨头从正面及侧面分别进行扫查、对轨底从轨底斜面 II 区部位进行扫查; 二可用折射角为 35° 至 45° 斜探头从钢轨两侧面对轨头、轨腰及轨底进行扫查。

当采用双探头法扫查时, 一可用折射角为 35° 至 45° 斜探头, 从轨头顶面对轨腰上下投影部分进行串列式扫查, 此时应该注意: 根据使用的探头折射角、待探钢轨轨型等正确计算出扫查次数和两个探头的入射点位置, 也可从轨顶面和轨底面采用专用探头架对轨腰投影部分进行 K 型扫查; 二可用折射角为 45° 至 70° 斜探头, 从轨头两侧采用专用探头架对轨头进行 K 型扫查; 三可用折射角为 60° 至 80° 斜探头, 从轨底两侧采用专用探头架对轨底进行 K 型扫查。

采用上述几点措施后进行钢轨焊接作业, 能够有效防止和减少冬季寒冷 (昼夜温差较大) 地段因温度影响、焊后接头温度急剧冷却, 产生焊接接头断裂的风险。

结束语

移动式闪光焊轨车在国内的应用, 不但解决了高速铁路、重载铁路对钢轨焊缝高质量要求与现阶段铝热焊缝质量不稳定的矛盾, 还满足了铁路线路无缝化焊接以及线上、线下焊接和锁定焊接的各项要求。它通过

模块化设计、高精度对中焊接、大数据分析、温湿度控制、智能化监控等关键技术, 使钢轨焊接质量达到厂焊接头质量水平, 实现了现场钢轨焊接的机械化操作, 为现场作业提供了良好的作业环境, 较大程度减轻现场劳动强度, 它能够在山区、隧道、高寒地区等复杂的环境中高效稳定运行, 其已成为高速铁路、重载铁路、城市地铁等领域不可或缺的设备, 也是解决我公司对钢轨焊缝质量高标准、高要求问题的最佳选择。^[7]

参考文献

- [1]. 《高速铁路无缝线路钢轨焊接技术的研究》周奕; -《上海铁道科技》- 2009-08-15
- [2]. 《钢轨焊接质量的现状及对策》高文会, 李力, 丁韦 -《中国铁路》- 2004-02-10
- [3]. 焊接工艺培训-百度文库 -《互联网文档资源 (<http://wenku.baidu.c>)》
- [4]. 《YHG-1200 移动式闪光焊轨车现场焊工艺》陈龙; -《科技视界》- 2014-07-15
- [5]. 《重载线路用新型钢轨闪光焊质量研究》赵曦; -《电焊机》- 2018-05-20
- [6]. 《高速铁路无缝线路钢轨焊接技术研究》王亮明 -《西南交通大学硕士论文》- 2011-09-01
- [7]. 《全路首台国产化移动式闪光焊轨车投入使用》记者 王胜健 通讯员 姚鸿源 杨际清 -《人民铁道》- 2009-03-17