

闪光焊接钢轨在工务部门的应用与研究

邢晓东

中国铁路哈尔滨局集团有限公司佳木斯工务段 黑龙江 佳木斯 154000

摘要：无缝线路作为现代铁路轨道结构的核心技术，其平顺性、稳定性和耐久性直接决定了列车运行的安全与效率。在无缝线路的构建与维护中，钢轨焊接技术扮演着至关重要的角色。其中，闪光焊接凭借其卓越的接头质量、高生产效率和良好的自动化水平，已成为国内外无缝线路钢轨连接的主流工艺。本文系统阐述了闪光焊接的基本原理与核心工艺流程，深入剖析了其相较于气压焊、铝热焊等其他焊接方法的显著优势与适用边界。在此基础上，文章重点探讨了闪光焊接在工务部门——即铁路线路养护维修领域——的具体应用场景，包括基地焊、现场焊及应急修复等，并对焊接过程中可能出现的灰斑、裂纹等典型缺陷的形成机理进行了理论分析。最后，本文展望了智能化、数字化技术在闪光焊领域的融合发展趋势，旨在为提升我国铁路工务部门的钢轨焊接技术水平、保障无缝线路的长期安全运营提供理论参考与实践指导。

关键词：闪光焊接；钢轨；工务部门；无缝线路；焊接缺陷；应用研究

引言

随着我国铁路事业向高速化、重载化方向迅猛发展，传统的有缝线路因其固有的“冲击-振动”效应，已无法满足现代运输对安全性、舒适性和低维护成本的严苛要求。无缝线路通过将标准长度的钢轨焊接成数百米乃至数公里的长钢轨条，极大地消除了轨缝，从而显著提升了轨道的平顺性和整体稳定性。这一技术革新不仅有效降低了轮轨动力作用，延长了轨道部件和机车车辆的使用寿命，还大幅减少了线路养护维修的工作量，是现代铁路建设的标志性成就。在无缝线路的全生命周期中，从初始铺设到后期的养护维修，钢轨焊接始终是一项贯穿始终的关键技术。目前，应用于铁路领域的钢轨焊接方法主要有闪光焊、气压焊和铝热焊三种。其中，闪光焊以其接头力学性能优异、内部质量稳定、生产效率高等综合优势，占据了绝对主导地位。据统计，在我国无缝线路的焊接接头中，闪光焊接头占比高达87%以上，其质量稳定性远超其他焊接方式。工务部门作为铁路线路设备的直接管理者和维护者，其对闪光焊接技术的掌握与应用水平，直接关系到无缝线路的服役质量和安全裕度。因此，深入研究闪光焊接钢轨在工务部门的应用现状、技术难点与未来发展方向，具有极其重要的现实意义。

1 闪光焊接技术原理与工艺

闪光焊接是一种利用强大电流通过对接钢轨端面接触点时产生的电阻热，将金属迅速加热至塑性或半熔融状态，随后施加巨大顶锻力完成连接的压力焊方法。其整个过程伴随着耀眼的火花（即“闪光”），故而得名。

1.1 基本工作原理

闪光焊的核心物理过程是焦耳热效应与塑性变形的结合。当两根待焊钢轨被夹持在焊机的两个电极钳口中并紧密对齐后，强大的低电压、大电流被瞬间通入。由于钢轨端面并非理想平面，微观上仅有少数凸起点相互接触，这些接触点因电阻集中而迅速升温、熔化，形成金属液桥。在电磁力和蒸汽压力的作用下，这些液桥发生爆破，产生飞溅的火花，同时暴露出新的金属表面。这个“接触-熔化-爆破-再接触”的过程周而复始，形成了连续的闪光现象^[1]。在此过程中，热量不断向钢轨内部传导，使端部一定深度的区域达到均匀的高温塑性状态。当加热达到预定程度时，电源被切断，同时液压或气动系统驱动一侧钢轨以极高的速度向另一侧猛烈顶锻。在巨大的压力下，高温塑性金属发生剧烈的塑性变形，将端面上的氧化物、杂质等有害物质挤出焊缝，纯净的金属原子在高压下实现再结晶，最终形成一个牢固、致密的整体接头。

1.2 核心工艺流程

一次完整的闪光焊接过程通常可分为四个关键阶段：首先是闪平阶段，其目的是通过初步的闪光，烧掉钢轨端面上的锈蚀、油污等不洁物，并使两端面初步平整，为后续的稳定加热创造条件。其次是预热阶段（主要在脉动闪光焊中采用），通过周期性的短暂通电和断电，使热量更均匀地渗透到钢轨截面深处，特别适用于含碳量较高、淬硬倾向大的钢轨，能有效防止裂纹产生。再次是烧化（闪光）阶段，这是焊接的主体阶段。在此阶段，通过精确控制电流、电压、烧化速度和烧化

量等参数,使钢轨端部获得足够且均匀的热量,确保整个截面都达到理想的焊接温度。最后是顶锻阶段,这是决定焊接成败的决定性一步。顶锻必须在断电后的极短时间内完成,以保证金属处于最佳的塑性状态。顶锻力、顶锻速度和顶锻量的精确控制,是确保焊缝金属充分塑合、排除杂质、细化晶粒的关键。整个焊接过程由计算机系统闭环控制,确保每一道工序都严格遵循预设的工艺规范。

2 闪光焊与其他焊接方法的对比分析

尽管闪光焊占据主导地位,但气压焊和铝热焊在特定场景下仍有其不可替代的价值。理解三者之间的差异,有助于工务部门在不同工况下做出最优选择。

2.1 闪光焊与气压焊的比较

气压焊是利用氧-乙炔或其他燃气火焰的高温,将钢轨端部加热至塑性状态,然后施加顶锻力完成焊接。与闪光焊相比,气压焊的最大优势在于其设备相对轻便、移动灵活,对现场电力供应依赖小,非常适合于远离基地的野外作业或既有线的插入短轨焊接。然而,其劣势也十分明显:加热过程受环境风力、操作人员技能等因素影响较大,温度场均匀性难以保证,导致焊接质量的稳定性不如闪光焊;同时,其生产效率较低,对操作人员的经验要求极高^[2]。因此,气压焊更多地作为一种现场补充手段,用于处理闪光焊设备无法到达的特殊地段。

2.2 闪光焊与铝热焊的比较

铝热焊则是一种完全不同的化学冶金焊接方法。它利用铝粉与金属氧化物(通常是氧化铁)的放热反应,产生高达2500℃以上的高温钢水,浇注到特制的砂型中,将钢轨端部局部熔化并融合。铝热焊的最大特点是设备最为简单、操作便捷,几乎不受任何场地和电源限制,是道岔区、桥梁、隧道等复杂位置以及断轨应急抢修的首选方案。然而,其焊缝为铸造组织,晶粒粗大,力学性能(尤其是韧性和疲劳强度)远低于母材,也逊色于闪光焊和气压焊的锻造组织。此外,铝热焊剂的质量、砂型的制作精度以及浇注工艺的控制都直接影响焊缝质量,人为因素影响极大。因此,铝热焊通常被视为一种“最后的选择”,主要用于无法使用其他焊接方法的场合。

综合来看,闪光焊以其高质量、高效率、高自动化的特点,是构建无缝线路主干线的基石;而气压焊和铝热焊则凭借其灵活性和适应性,在现场维护和应急处置中扮演着重要的补充角色。工务部门需要根据任务性质、地理位置、时间要求和质量标准,科学合理地选用焊接工艺。

3 闪光焊接在工务部门的具体应用

工务部门对闪光焊接技术的应用贯穿于无缝线路的“建、管、养、修”全过程,主要体现在以下三个方面。

3.1 基地焊接(工厂焊)

这是闪光焊最主要的应用形式。在专业的焊轨基地,配备有大型固定式闪光焊机(如K922型)。工务部门将采购的标准定尺钢轨(通常为100米)运抵基地,由专业团队按照严格的工艺规程,将其焊接成500米或更长的长钢轨条。基地焊接的优势在于环境可控、设备先进、工艺成熟、质量稳定。焊接完成后,接头还需经过精矫直、精磨、超声波探伤等一系列严格的质检程序,确保出厂的每一根长钢轨都符合无缝线路的铺设标准。这种“工厂化”生产模式为后续的高效、高质量铺设奠定了坚实基础。

3.2 现场焊接(移动焊)

当长钢轨条被铺设到线路上后,相邻的长轨条之间以及长轨条与道岔、缓冲区等特殊结构之间仍需进行焊接,以形成真正的无缝线路。此时,就需要使用移动式闪光焊机(如YHGR-1200型)。这种焊机安装在专用的轨道平板车上,具备自走行能力,可以灵活地开赴作业现场^[3]。虽然其功率和自动化程度略低于基地焊机,但其核心焊接原理相同。工务部门的移动焊班组负责执行此项任务,他们需要在有限的“天窗”时间内,完成对位、焊接、推瘤、粗磨、正火(部分机型)、精磨和探伤等全套工序。现场焊接对设备的可靠性、操作的熟练度以及现场组织协调能力都提出了更高要求。

3.3 应急修复与应力放散

在日常养护中,若发现钢轨因疲劳、缺陷等原因发生折断,工务部门需要进行紧急抢修。虽然铝热焊是最快的应急手段,但在条件允许的情况下(如有足够“天窗”时间、现场可接入大功率电源),使用移动闪光焊机进行原位焊接修复,能够获得质量最优、寿命最长的修复效果。此外,在进行无缝线路的应力放散作业时,有时也需要临时锯开钢轨,待应力调整完毕后再重新焊接。此时,闪光焊同样是保证线路恢复后整体性能的最佳选择。

4 闪光焊接典型缺陷及其成因分析

尽管闪光焊技术成熟,但在实际操作中,若工艺参数不当、设备状态不良或原材料存在缺陷,仍可能产生各种焊接缺陷,其中以灰斑和裂纹最为典型。

4.1 灰斑缺陷的形成机理

灰斑是闪光焊中最常见、最具特征性的面积型缺陷。在断口上,它呈现为局部光滑、色泽灰暗的区域,

与周围呈结晶状的正常金属有清晰的界限。研究表明,灰斑的本质是焊接过程中未能被完全挤出的非金属夹杂物,主要是由钢轨母材中的MnS等夹杂物在高温下溶解,并与空气中的氧反应生成的硅酸盐(如SiO₂、MnO等)微小颗粒聚集而成。其形成过程通常发生在烧化末期,当过梁爆破过于剧烈时,会在熔池表面形成瞬时的空洞,使高温金属暴露于空气中,发生氧化。如果随后的顶锻力不足、顶锻速度过慢或顶锻量不够,这些新生成的氧化物就无法被有效地从焊缝中排挤出去,最终残留在焊缝内部,形成灰斑。灰斑的存在严重削弱了焊缝的有效承载面积,并成为疲劳裂纹的起源点,对行车安全构成潜在威胁。

4.2 裂纹缺陷的产生原因

裂纹是另一种危害极大的体积型缺陷,多出现在轨腰或热影响区。其产生原因较为复杂,主要包括:一是材料因素,钢轨本身存在白点、偏析等内部缺陷,或化学成分(特别是碳、硫、磷含量)控制不当,增大了材料的淬硬性和冷裂倾向;二是热过程控制不当,预热不足或烧化不均导致焊接区域温度梯度过大,产生巨大的内应力;三是冷却过程过快,尤其是在低温环境下作业,焊后未采取有效的保温缓冷措施,使得焊缝及热影响区在马氏体相变过程中产生组织应力,超过材料的强度极限而开裂;四是顶锻参数不合理,过大的顶锻力也可能在局部区域诱发裂纹^[4]。预防裂纹的关键在于严格控制原材料质量、优化焊接热循环曲线以及加强焊后热处理。

5 发展趋势与展望

面向未来,闪光焊接技术在工务部门的应用将朝着更加智能、精准和高效的方向发展。

5.1 智能化与数字化深度融合

新一代闪光焊机正逐步集成物联网、大数据和人工智能技术。焊接全过程的数据(电流、电压、位移、压力、温度等)将被实时采集、存储和分析。通过建立焊接质量预测模型,系统可以在焊接完成前就对潜在缺陷进行预警。同时,焊接参数的设定将不再是简单的经验公式,而是基于钢轨材质、环境温度等变量的自适应优

化,真正实现“一轨一策”的精准焊接。

5.2 在线监测与质量评估技术升级

无损检测技术也将同步升级。除了常规的超声波探伤,相控阵超声、TOFD(衍射时差法)等更先进的检测手段将得到更广泛应用,能够对焊缝内部缺陷进行更精确的定位、定量和定性。未来,甚至可能实现焊接与探伤的一体化在线作业,即时反馈焊接质量,形成闭环控制。

5.3 绿色低碳与高效节能

随着“双碳”目标的提出,闪光焊设备的能耗问题也受到关注。研发更高能效比的逆变电源、优化焊接工艺以缩短烧化时间、回收利用焊接余热等,都将成为技术发展的新方向。同时,通过提升一次焊接合格率,减少返工,也是实现绿色制造的重要途径。

6 结语

闪光焊接作为无缝线路的生命线技术,其在工务部门的应用已从单纯的连接手段,演变为一项集材料科学、热力学、机械工程和自动控制于一体的综合性系统工程。本文系统梳理了其技术原理、工艺特点、应用场景及缺陷成因,并指出了未来的发展方向。对于工务部门而言,不仅要熟练掌握现有焊接装备的操作技能,更要深刻理解其背后的科学原理,做到知其然更知其所以然。唯有如此,才能在面对复杂多变的现场工况时,做出科学决策,有效预防和控制焊接缺陷,确保每一个焊头都成为无缝线路坚不可摧的“关节”,为我国铁路网的安全、高效、可持续运行提供最坚实的保障。

参考文献

- [1]胡雨欣,陆鑫,徐昆宇,等.焊后热处理对钢轨闪光焊接头冲击磨损与损伤行为影响研究[J/OL].表面技术,1-19[2026-05-24].
- [2]赵国.钢轨闪光焊接头宏观力学性能与灰斑缺陷特征研究[J].高速铁路新材料,2025,4(06):19-24.
- [3]李金华.现场钢轨闪光焊接恒消耗量工艺控制技术[J].焊接技术,2025,54(12):75-78.
- [4]冯继军.钢轨闪光焊接接头内部缺陷原因分析及措施[J].焊接技术,2025,54(01):49-53.