

地铁轨道裂缝成因分析与修复技术探讨

● 李 坤



[摘要] 地铁轨道裂缝是轨道系统在长期运行中常见的结构性问题,其成因主要包括钢轨材料疲劳、轮轨之间的反复冲击、温度变化引起的热胀冷缩以及环境因素(如湿度、腐蚀等)。裂缝的发生不仅影响轨道的整体稳定性,还可能对地铁安全运营构成威胁。本文分析了钢轨裂缝的主要成因,并探讨了几种常见的修复技术。针对轻微裂缝,采用钢轨打磨可以有效去除表面缺陷;对于较轻的裂缝,夹板修复可起到加固作用;铝热焊修复则适用于较深裂缝的处理,能够恢复钢轨的结构强度;当裂缝严重时,更换轨道是唯一的解决方案。不同修复方法具有不同的适用范围和优缺点,合理选择修复技术对于保障地铁安全运营至关重要。

[关键词] 地铁轨道;裂缝成因;修复技术

地铁轨道作为城市交通系统的重要组成部分,其安全性和稳定性直接影响着城市的运行效率。随着使用时间的增加,轨道因地质条件、交通荷载、环境变化等因素的作用,常常出现裂缝等损伤问题。这些裂缝不仅影响轨道的结构安全,还可能引发更严重的故障,威胁地铁系统的正常运行。因此,深入研究地铁轨道裂缝的成因及其修复技术,对保障地铁运营的安全性与长期稳定性具有重要意义。本文将分析地铁轨道裂缝的主要成因,并探讨几种现代修复技术的应用与发展趋势。

Q 地铁轨道裂缝成因分析

(一)钢轨材料的质量问题

钢轨裂缝的一个主要原因是钢轨材料的质量问题。钢轨的生产过程涉及高温冶炼和长时间的冷却过程,任何环节的缺陷都会影响钢轨的最终质量。如果钢轨的冶炼过程中加入了不合格的原材料,或者在冷却过程中未能有效控制温度,可能导致钢轨表面或内部出现夹杂物、气孔或应力集中等缺陷,这些缺陷成为裂缝发生的潜在源点。钢轨的化学成分、组织结构以及硬度等参数也对其耐用性和抗裂性有直接影响。若钢轨的碳含量过高,钢轨的硬度较大,但相对脆性也增加,容易在受力较大的位置形成裂缝。相反,若钢轨的碳含量过低,钢轨虽然更具韧性,但耐磨性较差,容易产生早期损坏。材料中的微观缺陷或杂质可能引起局部应力集中,形成微裂缝,经过长时间的地铁运行,裂缝逐步扩展,最终导致钢轨断裂。钢轨材料的生产质量、成分配比、表面处理等方面的控制,直接影响钢轨裂缝的发生频率

和严重程度。

(二)轨道安装和维护不当

轨道安装和维护质量直接影响钢轨裂缝的产生。在地铁轨道的安装过程中,若施工工艺不当或质量控制不严格,会导致轨道结构不均匀,产生应力集中。例如,轨道对接时接头的精度不高、轨道枕木的安装不规范,或是在铺设过程中未能充分调节轨道的应力状态,可能使得某些钢轨位置受到过大的局部压力,这种不均匀的受力状态极容易引发裂缝的形成。另外,地铁轨道在长期使用过程中,若没有得到及时和有效的维护,也会加速钢轨裂缝的生成。地铁运营过程中,随着轮轨间的磨损,轨道的形变和松动会逐渐加剧,这会导致钢轨在某些局部受力不均,从而使裂缝更容易发展。特别是在轨道出现几何形变,沉降或曲线半径较小的地方,裂缝的扩展速度会大大加快。轨道的定期检查和及时维修至关重要。尤其是在高频率、高载荷的地铁系统中,定期对轨道进行检查,及时修复轨道损伤,确保轨道结构的平整性和均匀性,有效避免裂缝的产生。

(三)轮轨接触应力与地铁运行条件

地铁运行过程中,列车的速度、载荷以及轮轨接触的状态对钢轨的损伤影响极大。轨道裂缝的一个常见原因是轮轨之间的不均匀接触应力所致。列车在行驶时,车轮和钢轨接触的部位会承受极大的压力,尤其是在轨道曲线或进站刹车时,局部的接触应力会增加。如果轮轨之间的接触面存在不均匀或接触面积过小,局部应力集中就容易导致裂缝的生成。另外,地铁运行的负荷也是一个重要因素。随着列车载重的增大,轨道的受力也会增大,这可能导致钢轨发

生塑性变形、疲劳损伤及裂缝。尤其是在高频率的轨道使用环境下，长时间的反复应力作用会使得钢轨在某些区域积累疲劳损伤，进而导致裂缝的产生。地铁的高速行驶也可能加剧轮轨的磨损，导致钢轨表面出现微裂缝或凹陷，进一步影响轨道的整体结构。地铁的运行环境对钢轨裂缝的产生也有影响。在高温、湿度或恶劣气候条件下，钢轨材料可能发生热膨胀或应力腐蚀，这些因素会增加轨道裂缝的发生概率。

Q 地铁轨道裂缝检测技术

(一) 超声波探伤技术

超声波探伤技术是通过向被检测物体发射超声波，利用超声波在物质内部传播时的反射、折射和衰减特性，来判断物体的内部缺陷。超声波探伤常使用压电换能器发射高频声波，当声波遇到缺陷(如裂缝、空洞等)时，会发生反射，反射波被接收器接收。通过分析这些反射波的时间差、强度等参数，判断裂缝的位置、大小和形态。选择合适的超声波探伤仪，并将换能器接触或靠近钢轨表面。然后，通过调整频率和扫描角度，发送超声波信号到钢轨中。当遇到裂缝或不规则缺陷时，反射波将返回探伤仪并显示在屏幕上。通过分析反射信号，可以精确地定位缺陷并测量其大小，确定是否需要修复。

(二) 涡流检测技术

涡流检测是基于电磁感应原理的一种无损检测方法。当交变电流通过探头时，探头周围会产生交变的磁场，磁场会在导体表面产生涡流。若被检测材料表面存在裂缝或缺陷，会改变涡流的分布，导致探头感应电流发生变化。通过分析这种变化，可以判断缺陷的存在及其性质。涡流探伤仪通常配备了探头，检测时将探头置于钢轨表面，使用交变电流激发涡流。探头会检测由于裂缝或其他缺陷导致的涡流变化，并通过仪器进行处理，输出缺陷的位置和大小。涡流检测主要用于表面和近表面的缺陷检测，适合检测磨损、裂缝、腐蚀等问题。

(三) 磁粉检测技术

磁粉检测技术是一种非破坏性检测方法，广泛应用于铁路钢轨的表面及近表面缺陷检测，特别适用于发现表面裂缝和其他表面缺陷。其原理基于钢轨的磁性特性，通过磁场的变化来检测缺陷。具体过程是将钢轨磁化，常用的方法包括电磁铁或永磁体。磁化后，钢轨表面或近表面如果存在裂缝、孔洞等缺陷，钢轨的磁场线会发生畸变，导致漏磁现象的发生。漏磁区域会导致磁力线外泄，吸引周围的磁粉，从而在裂缝位置形成明显的磁粉聚集，形成清晰的可视痕迹。在操作过程中，首先将钢轨表面磁化，然后均匀撒布磁粉。磁粉在漏磁处会被吸附，形成线状或斑点状的痕

迹，这些痕迹能够显示裂缝的具体位置、形状及大小。检测完成后，通过目视检查或使用紫外线灯照射，能够更清晰地观察到磁粉聚集的区域，进一步评估裂缝的形态和严重程度。磁粉检测技术特别适用于检查表面裂缝，尤其是垂直和横向裂缝。由于其检测过程简单、直观，且能够快速找到裂缝位置，因此在铁路检修中得到了广泛应用。不过，这种方法的局限性在于只能检测到表面或近表面的缺陷，对于较深层的裂缝或缺陷无法有效识别。

Q 地铁轨道裂缝修复技术探讨

(一) 钢轨打磨修复

钢轨打磨是对表面微小裂缝进行修复的常用技术，尤其适用于初期形成的微裂缝或表面缺陷。其原理是通过专门的轨道打磨机，使用磨轮对钢轨表面进行均匀打磨，去除钢轨表面的裂缝、磨损层或变形，恢复钢轨的平整度和完整性。打磨修复不仅能够消除表面缺陷，还能改善钢轨的接触面，减少轮轨之间的磨损，延长轨道的使用寿命。在检测到钢轨表面有轻微裂缝时，首先需要使用超声波探伤、涡流检测等技术对裂缝进行精确定位。确认裂缝未深入钢轨内部后，就可以进行打磨处理。打磨机通过旋转和施压作用，将裂缝部位去除，使得钢轨表面平滑。修复后，需再次检测确认裂缝是否完全消除，以及钢轨表面是否存在新的不规则痕迹。钢轨打磨修复适用于裂缝较浅、范围较小的情况，尤其是对表面磨损、微小裂缝和坑洞等缺陷有较好的修复效果。钢轨打磨修复的优点是操作简便、成本较低，适用于不影响钢轨结构完整性的裂缝。缺点是对于较深或较大面积的裂缝修复效果有限，且容易导致钢轨表面磨损加剧，因此需要定期检测和维护。

(二) 夹板修复技术

夹板修复技术常用于处理轻微裂缝和表面损伤的钢轨。该技术通过将夹板固定在有裂缝的钢轨位置，起到加固钢轨和减轻裂缝扩展的作用。夹板一般由高强度钢材料制成，能有效分散载荷，防止裂缝进一步扩展。夹板修复的优点是能够在不更换钢轨的情况下，短期内控制裂缝发展，适合于轻微裂缝或暂时无法进行大规模修复的场合。夹板修复技术通常用于裂缝没有深入钢轨内部且钢轨整体结构尚未受到影响的情况。在进行夹板修复时，首先需要使用检测设备对钢轨进行超声波或磁粉检测，确认裂缝的具体位置和范围。然后，在裂缝位置上安装适合尺寸的夹板，并通过螺栓或焊接将夹板紧固到钢轨上。夹板的设计应保证钢轨两侧承受均匀的压力，避免新的裂缝或变形。夹板安装完毕后，需再次检查安装质量，并进行载荷测试，确保修复后钢轨的稳定性。夹板修复的优点是能够加固裂损钢轨的强度和稳定性，避免因换轨造成的高昂费用。它对裂缝的扩展

有抑制作用，且操作较为简便。缺点是只能作为临时修复方案，不能长时间使用，且无法消除裂缝，需要定期检查和更换夹板，避免夹板本身产生疲劳或损坏。

(三) 铝热焊修复技术

铝热焊修复技术常用于处理较为严重的裂缝，尤其是当裂缝已经深入钢轨内部，且其他修复方法无法满足要求时，铝热焊是一种较为有效的修复手段。铝热焊技术是通过将铝粉与氧化铁反应，产生高温熔融金属来修复钢轨裂缝。该技术能迅速修复裂缝并恢复钢轨的力学性能，特别适用于修复较深的裂缝或损伤较大的钢轨。铝热焊修复操作前，首先需要对接缝进行详细检查，确定其深度和范围。通常采用超声波探伤、X射线检查等技术，确保裂缝的具体位置和状态。接着，在裂缝处进行清理，去除污垢、锈蚀和其他杂质。然后，使用铝热焊设备加热焊接部位，使得熔化的铝金属与钢轨结合，修复裂缝。铝热焊修复后，焊接部位需要进行冷却和后处理，确保焊接质量。焊接完成后，需对修复部分进行无损检测，确认裂缝已完全修复，钢轨恢复了原有的强度。铝热焊修复的优点是能够有效修复深度较大的裂缝，恢复钢轨的力学性能，修复后的钢轨可直接投入使用，具有较高的可靠性。缺点是成本较高，且需要专门的设备和技术，操作过程中对环境和温度要求较为严格，且焊接后的钢轨需要经过仔细检查，以避免由于焊接质量问题导致新的裂缝或破坏。

(四) 更换轨道技术

当钢轨发生严重裂缝，且裂缝扩展至钢轨深层，无法通过常规的修复手段如打磨、夹板修复或铝热焊进行修复时，最有效且必要的措施便是更换整个钢轨。更换轨道技术主要针对那些已经无法修复的钢轨裂缝，特别是当裂缝可能影响到轨道的整体承载能力和稳定性时，采取彻底更换轨道的方式，确保地铁的安全运营。钢轨裂缝的形成通常是由于长时间的使用、负荷过大、环境因素等原因所导致的，若裂缝扩展至钢轨深层，常规修复手段可能无法有效解决问题。此时，必须对轨道进行彻底更换，以防止裂缝对列车行驶安全带来潜在的威胁。更换轨道不仅仅是替换损坏部分的钢轨，更是确保地铁系统整体结构和行车安全的一项重要工作。在进行轨道更换之前，需要对钢轨的状况进行全面的检测与评估，确保裂缝的范围和钢轨的承载能力达到了更换

的标准。当前，常用的检测技术包括超声波探伤、涡流检测等，这些技术能够对轨道内部和表面的裂缝进行精确定位，并评估裂缝的深度与扩展趋势。超声波探伤通过高频声波传递，检测钢轨内部的裂缝或缺陷，涡流检测则可以有效检测钢轨表面和近表层的裂缝情况，这些检测手段可以为轨道更换提供科学依据，确保更换决策的准确性。轨道更换的过程通常比较复杂，涉及钢轨设备的搬运、拆卸、定位、安装等一系列操作。首先，需要对原有钢轨进行拆卸，将损坏的轨道部分移除，并对轨道基础进行检查和维护。拆卸过程中，必须确保工作区域的安全，防止施工过程中的意外事故。接下来，新轨道需要进行精确的定位和安装，以保证轨道的平整度和稳定性。钢轨的安装需要严格遵循技术标准，确保轨道的纵向、横向和垂直度符合要求。更换完成后的新轨道，还需要经过一系列的质量检测和验收，确保其质量符合使用标准。这些检测包括钢轨的表面硬度、尺寸精度、质量均匀性等方面的检查。此外，安装后的新轨道还需要进行动态测试，确保在实际行车过程中具有足够的稳定性和承载能力。

Q 结束语

地铁轨道裂缝的检测与修复技术在保障轨道运行安全和延长使用寿命方面发挥着重要作用。通过结合现代无损检测技术和创新修复方法，能够高效、准确地发现并处理轨道裂缝问题，提升修复效果和成本效益。未来，随着技术的不断发展，地铁轨道的检测与修复将更加精细化与智能化，为城市交通系统的安全稳定运行提供更加坚实的保障。

参考文献

- [1]尹晓珍.基于特征分析的地铁隧道裂缝图像处理技术研究[D].兰州交通大学,2019.
- [2]周睿,刘宾文,宋浩天,等.地铁高架段整体道床裂缝原因分析及处理措施[J].安装,2021(07):70-72.
- [3]江珊珊.基于深度学习的地铁隧道裂缝病害图像检测[D].华东师范大学,2022.

作者简介:

李坤(1985—),男,汉族,山东菏泽人,本科,工程师,大连地铁运营有限公司,研究方向:城市运营地铁轨道、隧道专业技术。