

无损检测技术在建筑钢结构检测中的应用与发展

● 黄海军



[摘要] 随着科技的不断发展,无损检测技术在建筑工程中的应用越来越广泛。特别是在钢结构建筑工程的检测中,无损检测技术发挥着越来越重要的作用。本文阐述了建筑钢结构中钢桥焊接的缺陷类型,分析了常规无损检测技术如渗透检测、磁粉、超声波和射线检测的优劣,同时也分析了无损检测新技术,如新兴的超声衍射时差、超声相控阵和电磁超声技术的优势和局限性。旨在为建筑钢结构检测技术的合理选用与发展提供一些参考,推动行业技术进步与质量提升。

[关键词] 建筑钢结构;钢桥焊接;无损检测;检测技术;缺陷

在现代建筑工程领域,建筑钢结构的发展势头迅猛,其中钢桥建设更是呈现出蓬勃向上的态势。钢桥在焊接环节中,会出现一些缺陷,如裂纹犹如隐藏在结构内部的定时炸弹,随时可能因应力集中而导致结构断裂;气孔则像削弱结构强度的微小蛀洞,使钢桥的承载能力大打折扣,这些缺陷危及了钢桥的整体结构安全。常规无损检测技术如渗透检测、磁粉检测、超声波检测和射线检测等一直在发挥作用。随着建筑工程对于钢桥质量要求的不断提高,其在检测精度上无法满足更精准地定位微小缺陷的需求,在效率方面也不能满足大规模钢桥建设快速检测的需求,逐渐暴露出局限性。新兴无损检测技术如超声衍射时差、超声相控阵和电磁超声技术等,在检测能力上有了很大提升,但也带来了新的挑战。比如,技术复杂,需要专业人员花费大量时间学习掌握,且设备购置与维护成本高昂。

Q 建筑钢结构的特点与应用

建筑钢结构是以钢材为主要材料构建而成的建筑结构形式。在力学性能方面,具有高强度特性,能够承受巨大的压力与拉力,为建筑物提供稳固的支撑框架。轻自重这一优势也使得在建筑施工过程中,基础承载压力得到有效减轻,降低了基础建设成本与难度。同时,它具备优越的刚度和抗剪性能,能有效抵御各种外力作用,确保建筑结构的稳定性与安全性。

在现代建筑工程领域,钢结构的应用广泛,无论是超高层建筑、大型商业综合体,还是工业厂房、桥梁等基础设施

建设,都有它的身影。例如,在超高层中,其高强度与轻自重可满足建筑向上延伸的需求,减少结构自重带来的压力。同时,施工周期短的特点可加快工程进度,让项目更早投入使用;在工业厂房方面,其大跨度空间的实现能力,提高了内部空间利用率,便于设备布置与生产流程安排。此外,钢结构还可回收利用,符合节能环保理念。在建筑全生命周期中能减少资源浪费和对环境的影响,施工过程中建筑垃圾的产生也相对较少,也进一步体现了环保优势。

Q 钢桥焊接缺陷类型

(一) 裂纹

在焊接缺陷的分类探讨中,依据产生温度差异可划分出热裂纹与冷裂纹两类。热裂纹出现在焊缝凝固的末期阶段,液态金属会因凝固而收缩,进而承受拉应力,而晶界强度相对较低,便会沿着晶界发生开裂。以高强度钢桥焊接作业为例,当焊接速度过快且热输入量过大时,热裂纹出现的概率会上升,一旦焊接线能量超出特定钢材所推荐数值的30%,其发生率便可能提高约50%。而冷裂纹则是在焊接接头冷却至马氏体转变温度下时形成的。氢原子的聚集、钢材的淬硬以及塑性的降低等因素的共同作用下,厚板焊接结构中如果焊前预热环节未能充分开展,冷裂纹便容易出现。

(二) 气孔

气孔问题产生根源是在焊接过程中熔池内部的气体未能及时溢出。这些气体可能来源焊接材料中的杂质分解,

或是电弧周围空气的卷入。当使用受潮的焊条进行焊接操作时，药皮所含水分会分解形成氢气与氧气，其中氢气难以溶解到液态金属中，就容易在焊缝部位形成气孔。在重要钢桥结构的一级焊缝标准中，规定气孔直径不得超过1.5毫米，并且在每100毫米的焊缝长度范围内气孔数量不得超出2个，否则将会对焊缝的致密性以及力学性能产生不良影响，进而降低钢桥的承载能力与耐久性。

（三）夹渣

夹渣现象表现为熔渣夹杂焊缝金属内部，其来源主要有两方面。一是焊接材料所携带的熔渣未能得到有效清理；二是焊接操作过程中的不当行为致使熔渣被卷入焊缝。在多层多道焊接工序中，如果前一道焊缝的熔渣未能彻底清理干净，那么在后续的焊接过程中便容易被卷入新的焊缝中。夹渣的形状呈现出不规则性，可能为点状、条状或者块状，夹渣会致使焊缝的有效截面积缩减，使得应力集中系数增大。当夹渣总体积占据焊缝体积的5%时，焊缝的抗拉强度便可能降低10%至15%，从而削弱焊接接头的强度，在动载或者疲劳载荷时容易成为裂纹产生的源头。

（四）未熔合

未熔合是钢桥焊接的重大隐患，指母材与焊缝金属未完全熔合，常于坡口面、多层焊层间及焊缝与母材交界处产生。其原因包括焊接电流小、速度快、坡口角度不合理、电弧偏离等。例如，手工电弧焊V形坡口对接焊缝，当电流低于最佳值20%且速度高于推荐值15%，坡口根部易现未熔合。此缺陷使焊接接头力学性能骤降，在剪切力与拉力作用下，因熔合不良形成薄弱点容易产生开裂，会破坏钢桥整体性与稳定性。造成的安全隐患可能引发安全事故，所以在焊接过程中需全力避免未熔合情况出现，保障钢桥质量与安全。

（五）未焊透

未焊透现象即母材未被熔化穿透，这是由焊接参数设置不当所致。例如，电流过小、电弧电压过低，或者是坡口设计不够合理，如角度过小、钝边过大等情况。在钢桥焊接作业中，未焊透现象会显著降低焊接接头的承载能力，当未焊透深度达到焊缝厚度的10%时，接头的抗弯强度便可能降低20%至30%，容易引发应力集中现象。在疲劳或腐蚀作用下，极有可能造成裂纹扩展，最终导致钢桥结构失效，因此在焊接过程中需要对其进行严格把控。

Q 常规无损检测技术

（一）渗透检测

渗透检测是基于液体毛细作用原理而开展的检测方式。在实施过程中，需要先将含有颜料或荧光剂的渗透液均匀地涂覆钢结构的表面上，以便能够充分地渗入到表面开口的缺

陷中，如微小裂纹、气孔等缺陷类型。渗透时间通常会依据构件的材质以及缺陷可能存在的深度来确定，一般处于10至30分钟的区间范围内。接着需要去除多余的渗透液，此环节必须进行严格把控防止将缺陷内部的渗透液带出，在实际操作中常常采用专用的清洗剂并遵循特定的清洗工艺。再施加显像剂，缺陷中的渗透液便会被吸附并在表面进行扩散，进而形成清晰可见的显示痕迹。以对某钢桥焊缝实施渗透检测为例，所选用的渗透液为荧光型，在紫外线的照射下，深度处0.1至0.3毫米间的表面裂纹能够清晰地显现出来。能够有效地检测出宽度仅为几十微米的缺陷，检测精度可满足大多数钢结构表面缺陷检测的需求。但该检测方法对近表面缺陷的检测能力较为有限，并且对检测表面的清洁度有着极高的要求，如果表面油污残留量超出每平方米1毫克，就有可能导致检测失败。

（二）磁粉检测

磁粉检测是专门针对铁磁性材料钢结构的一种有效检测手段。在进行检测前，首先要对构件实施磁化操作，使磁场能够均匀地分布于整个构件之中。而磁化电流也并非一成不变，需要依据构件的具体材质以及形状来精准设定。例如，对于直径为20毫米的碳钢管材而言，通常所采用的磁化电流会处于100至200安培这一区间范围之内。当构件内部存在缺陷时，其原本均匀分布的磁力线将会发生畸变，进而导致磁场泄漏现象的出现。将磁粉均匀地撒在构件表面，磁粉就会在磁场泄漏部位吸附聚集形成磁痕，便能将缺陷情况清晰地呈现出来。磁粉的颜色丰富多样，其中荧光磁粉在紫外线灯的照射下能够展现出极为出色的检测效果，使缺陷更易于被观察和识别。比如在对钢桥连接螺栓进行检测时，运用交流磁化法能够迅速且准确地检测出深度在2毫米以内的表面裂纹，并且单个螺栓的检测时长通常不会超过5分钟，检测效率颇高。这种磁粉检测方法也存在一定的局限性，仅适用于铁磁性材料，且在检测完成后必须对构件进行退磁处理，以确保构件的剩磁强度不超过0.3毫特斯拉。保证构件在后续的使用过程中能够符合相关规范与要求，避免因剩磁问题而对其他设备或部件产生不良影响。

（三）超声波检测

超声波检测借助超声波材料内传播特性实施检测，高频超声波（0.5至10兆赫兹）由探头发入钢结构，遇缺陷则引发反射、折射与散射现象，经深度剖析反射波的时间、幅度与波形等参数，来判定缺陷位置、大小与性质。例如，检测20毫米厚钢板焊缝时，用5兆赫兹直探头，若有3毫米气孔，其反射波幅度高于正常焊缝反射波，依据超声波约5900米/秒传播速度与反射波时间差，可精准算出气孔位焊缝12毫米深处。超声波检测可检多种缺陷，对内部缺陷灵敏度

高，能检出1毫米以上缺陷，相应地对操作人员的技术要求也高，需要能精准识别复杂波形信号。另外，探头与检测面耦合效果也会影响检测结果，耦合剂厚度偏差超0.1毫米可能导致信号失真。

（四）射线检测

射线检测借助X射线或 γ 射线穿透钢结构达成目的。射线源发出射线穿越构件，因构件部位材料厚度与密度有别，对射线吸收程度不同，在胶片或探测器上会形成灰度各异的影像。检测钢桥T形焊接接头时，依15毫米厚钢板选150至200千伏X射线源，射线穿过接头，气孔、夹渣呈亮影，未焊透则为暗影。此检测可直观展现缺陷形状、大小与分布，对小于50毫米厚钢结构焊缝检测具有很好的效果，且定位定量准确，能检出0.5毫米最小缺陷。但设备成本较高，X射线机数万元到数十万元不等，加上射线有害人体，检测时需要2至5毫米防护铅板等进行严格防护，且检测速度慢，每小时仅能检测0.5至1平方米面积。

Q 无损检测新技术

（一）超声衍射时差(TOFD)

超声衍射时差检测技术以超声波在缺陷端点衍射现象为基础，检测时特定发射探头发出2至10MHz超声波，遇缺陷端点产生衍射波，精确测量其到接收探头的时间差，结合碳钢中约5900米/秒的声速，确定缺陷深度、高度和长度等信息。检测30毫米钢桥焊缝，能检出最小2毫米的缺陷，定位精度达 ± 1 毫米，对焊缝裂纹、未熔合等缺陷灵敏度高，不受焊缝形状走向影响，可生成直观D扫描图像助力分析评估。但该技术对检测面要求高，表面粗糙度需在Ra6.3以内，否则会干扰超声波传播与衍射波接收，且数据处理复杂，要专业软件处理大量数据。操作人员需要熟知超声衍射原理与信号处理算法，才能精准解读结果，这对操作人员专业素养要求较高。

（二）超声相控阵(PAUT)

超声相控阵检测控制超声换能器阵列阵元的激励时间与幅度来实现检测。阵元数量几十到几百个不等，如常见的64阵元换能器，经电子控制，阵元按特定顺序、时间延迟发射超声波，实现波束聚焦、偏转、扫描。检测钢桥复杂结构如管节点焊缝时，可依焊缝形状与检测需求灵活调整波束角度。一次覆盖大检测区域，以检测500毫米直径管节点焊缝为例，合适参数设定下，10分钟可完成检测，效率较传统超声检测提高3至5倍。还能生成清晰S扫描图像，直观呈现缺陷位置、形状，分辨率达毫米级，可展现微小缺陷

轮廓。但该技术设备成本高，中等配置系统约10万至20万元，且对操作人员要求严苛，需熟练掌握设备操作并深入领悟相控阵成像原理，才能精准判定缺陷性质与严重程度。

（三）电磁超声(EMA)

电磁超声检测依据电磁感应原理在金属表面产生超声波。高频交变电流经过金属表面线圈时生成交变磁场，其与金属内电子相互作用，使金属晶格振动形成超声波。在钢桥板材检测中，检测频率1至5MHz，能检测出表面下1至10毫米深度的缺陷，如对10毫米厚钢板可有效检出长度达3毫米的表面裂纹。其优势明显且为非接触式检测无需耦合剂，可避免相关影响与不便。检测速度较快，检测大面积钢桥面板时，速度可达每平方米2至3分钟。但电磁超声检测也存在一定的局限，对材料表面状态有要求，表面平整度偏差超 ± 0.5 毫米就可能影响成效。不平整表面会改变磁场分布与超声波激发效率，同时检测深度较浅，一般只能检测距表面10毫米以内缺陷，对更深处缺陷，信号衰减严重难以精准识别。

Q 结束语

在科技浪潮的推动下，建筑钢结构无损检测技术前景广阔。未来，科研力量也将不断突破现有技术瓶颈，如借助新型材料与先进工艺，改善检测设备对复杂环境和微小缺陷的应对能力，使检测精准度迈向新高度。同时，智能化算法的深度应用与自动化检测设备的持续升级，也会让检测效率实现质的飞跃，轻松应对大规模工程检测任务。多种检测技术的有机融合将编织出更严密的检测网络，全方位守护钢结构安全。无损检测技术将深度融入建筑钢结构行业的全生命周期，为其高质量、可持续发展提供强劲动力，引领行业迈向智能化、高效化的未来新境界。

Q 参考文献

- [1]沈雅薇.浅析无损检测技术在建筑钢结构中的应用[J].江西建材,2014(09):101,104.
- [2]杨兴奎.无损检测技术在建筑钢结构中应用与实施策略[J].四川水泥,2019(05):165.
- [3]杨羿,张建东,李昊.钢结构桥梁焊接无损检测技术应用及发展[J].轻工科技,2020,36(12):70-71,114.

作者简介:

黄海军(1990—),男,汉族,江西新余人,本科,助理工程师,深圳市盐田港建筑工程检测有限公司,研究方向:钢结构无损检测。