

桥梁钢结构圆柱头焊钉焊接常见质量问题及 解决措施

朱庆菊, 范军旗, 徐向军, 宋红飞, 胡广瑞

中铁山桥集团有限公司 河北秦皇岛 066200

摘要: 螺柱焊接在桥梁钢结构制作过程中应用广泛, 但桥梁钢结构圆柱头焊钉的焊接一直采用人工螺柱焊接, 不仅焊接环境恶劣, 焊工劳动强度大, 而且焊接生产效率低, 焊接质量不稳定。随着人工智能的不断发展, 研发创新的不断投入, 圆柱头焊钉焊接生产的自动化程度越来越高, 焊接质量稳定性和焊接生产效率进一步提高。但无论人工螺柱焊接, 还是智能化焊接, 圆柱头焊钉的焊接仍然存在一些焊接缺陷和焊接质量问题。介绍了圆柱头焊钉的质量标准, 总结了圆柱头焊钉人工螺柱焊接和机器人焊接两种焊接方法在焊接试验和焊接生产过程中出现的共性焊接缺陷和焊接质量问题, 查找分析了产生的原因, 并提出了修补工艺和质量保证工艺措施, 希望在桥梁钢结构制造中进一步提高圆柱头焊钉的焊接智能化程度及焊接生产效率, 进一步加强圆柱头焊钉的焊接质量管理。

关键词: 桥梁钢结构; 螺柱焊接; 智能化焊接; 焊接缺陷; 工艺措施

Common quality problems and technical measures of stud welding for steel bridge structures

ZHU Qingju, FAN Junqi, XU Xiangjun, SONG Hongfei, HU Guangrui

China Railway Shanhaiguan Bridge Group Co., Ltd., Qinhuangdao 066200, Hebei, China

Abstract: Stud welding is widely used in the production of steel bridge structure. However, the stud welding has been using manual welding for a long time, which short comings are worse welding environment for welder and operator around, larger labor intensity for welding operator, lower efficiency of welding production, and more unstable in welding quality. With the continuous development of artificial intelligence and huge investment of innovation, the automation of stud welding production is increasing sharply, and the welding quality stability and welding production efficiency are further improved. But whether manual stud welding or intelligent stud welding, the stud welding still has some welding defects and welding quality problems during the welding test and the welding production. It introduces quality standard of stud welding, summarizes the common welding defects and welding quality problems during the welding test and the welding production, finds and analyzes the causes, and proposes the repair process and quality assurance measures, hoping to further improve the degree of welding intelligence and welding production efficiency, and further strengthen the welding quality management of stud welding during the manufacturing of steel bridge structure.

Keywords: steel bridge structure; stud welding; intelligent welding; welding defects; technical measures

第一作者: 朱庆菊, 高级工程师, 主要从事桥梁钢结构焊接技术研究, E-mail: 1009839000@qq.com。

1 序言

螺柱焊接是将螺柱一端与板件（或管件）表面接触，通电引弧，待接触面熔化后，给螺柱一定压力完成焊接的方法，其在桥梁钢结构制作过程中有着广泛的应用。但一直以来，桥梁钢结构圆柱头焊钉（以下简称“焊钉”）的焊接采用瓷环保护，焊接设备为专用螺柱焊机^[1]，通过手工操作焊枪完成，因此不仅焊接环境恶劣，焊工劳动强度大，而且焊接生产效率低，焊接质量不稳定。随着我国桥梁钢结构制造规模和生产水平的不断提高，作为钢混结合部位关键传力构件的焊钉在桥梁钢结构中用量越来越大，其焊接效率和焊接质量直接决定着桥梁钢结构的施工进度、制造成本，以及整座桥梁的维护成本和运营寿命，传统生产方式越来越难以满足不断增长的焊钉焊接生产需求。

随着智能和数控技术的发展，焊接机器人技术日益成熟，桥梁钢结构焊钉的智能化焊接装备也得到了迅速发展和应用。狮子洋大桥工程索塔钢壳壁板单元的生产制造，拉开了桥梁钢结构焊钉智能化焊接生产的序幕，后期在京雄高速白沟引河大桥、安罗大桥等钢结构制造过程中纷纷使用，使我公司桥梁钢结构焊接自动化水平显著提高，具有重大的经济效益和社会效益。与人工螺柱焊接相比，焊钉智能化焊接实现了钢板智能化除锈（见图1）、设备自动定位、焊钉自动上料、瓷环自动上料、焊钉与瓷环自动组装及智能化焊接（见图2）的全自动作业流程，适用于大批量焊钉焊接生产的桥梁工程，焊接质量稳定，焊接生产效率高。



图1 智能化除锈



图2 智能化焊接

2 焊钉的焊接质量要求

2.1 焊接生产中的质量标准

焊钉在焊接生产过程中的焊缝检测包括两项，分别是外观检查和30°弯曲试验。JTG/T 3651—2022《公路钢结构桥梁制造和安装施工规范》第

7.3.2条规定如下。

1) 焊钉焊接完成后，应及时敲掉焊钉周围的瓷环，并应进行外观检测；应保证焊钉底角360°周边挤出焊脚，焊缝应饱满，无气孔、夹渣、裂纹等缺陷；咬边深度应 $\leq 0.5\text{mm}$ ，且最大长度应不大于一倍的焊钉直径。

2) 焊缝外观检查合格后，应随机抽取各部位圆柱头焊钉总数的1%进行30°弯曲试验，弯曲后焊钉的焊缝和热影响区不应有肉眼可见的裂纹，检查合格的焊钉可保留其弯曲状态；不合格时应加倍取样进行检测。

2.2 焊接工艺评定试验中的质量标准

焊钉在焊接工艺评定试验时的焊缝检测包括3项，分别是外观检查、30°弯曲试验和拉伸试验。JTG/T 3651—2022附录D中有如下规定。

1) 焊钉焊缝的外观质量应符合JTG/T 3651—2022中第7.3.2的规定。弯曲与拉伸试验应符合当时现行的GB/T 10433—2002《电弧螺柱焊用圆柱头焊钉》的规定。

2) 焊钉评定试验的数量应为6个，一组3个进行30°弯曲试验，另一组3个进行拉伸试验。

3) 焊钉评定试验时的外观检查和30°弯曲试验的质量标准同在焊接生产中的质量标准要求是一致的。

4) 评定试验时还有拉伸试验要求，焊钉拉伸试验无论断裂在何处，若拉力载荷满足GB/T 10433—2002的有关规定，则焊钉焊缝应判定合格，否则应判定不合格。

2.3 焊钉的合格案例

焊钉应满足焊接工艺评定试验中外观检查、弯曲试验和拉伸试验的标准要求，同时应满足在焊接生产中外观检查和弯曲试验的标准要求，焊钉的合格案例见表1。

3 焊钉的质量问题

焊接机器人螺柱焊接若严格经过生产前焊接工艺评定试验、每班生产前试焊后，则正式焊接过程中质量稳定，除非突发设备故障；而人工螺柱焊接受环境条件和人为因素的影响，在生产前试验和生产过程中出现焊接质量问题的概率是一样的。但无论人工螺柱焊接，还是智能化螺柱焊接，焊钉的焊

表1 焊钉的合格案例

序号	检测项目	合格案例图片	备注
1	外观检查		在焊接工艺评定试验时、焊接生产过程中进行
2	拉伸试验		在焊接工艺评定试验时进行
3	弯曲试验		在焊接工艺评定试验时、焊接生产过程中进行

接都存在一些焊接缺陷和焊接质量问题，尤其是目前的机器人螺柱焊接还处于研发试验、初步生产应用阶段，因此机器人螺柱焊接的优势还没有充分展现出来。

3.1 外观检查中的焊接缺陷

焊钉在焊接完成后，及时敲掉保护用的瓷环，进行外观检查；外观检查出现的常见焊接缺陷有焊缝偏弧、焊接气孔、焊接飞溅和焊缝不饱满^[2]，以及焊接裂纹、咬边、焊瘤、未熔合及尺寸偏差过大（高度、倾斜角度）等（见表2）。其中，焊缝偏弧、焊接气孔、焊接飞溅和焊缝不饱满这4种焊接缺陷是最常见的焊缝外观质量问题，需要特别关注。

3.2 焊钉断裂和脱落

焊钉的焊缝质量必须内外兼控，在进行外观检查并合格的基础上，才能进行30° 弯曲试验和拉伸试验，在焊接工艺评定试验过程中还需要进行焊钉30° 弯曲试验、拉伸试验^[3]，而在焊接生产过程中只需要进行30° 弯曲试验。

弯曲后，若在焊钉的焊缝或热影响区有肉眼可见的裂纹或断裂，弯曲试验不合格；焊钉拉伸试验无论断裂在何处，若拉力载荷不满足GB/T 10433—2002的规定，则焊钉焊缝应判定不合格。常见的焊钉断裂见表3。

4 焊接缺陷原因分析

4.1 外观缺陷

（1）焊缝偏弧原因 磁偏吹影响；瓷环中心未对正；焊钉不垂直；钢板表面不平；接地线钳的数量、接线位置、导电性等因素的影响等^[4]。

（2）焊接气孔原因 瓷环受潮；瓷环未按照规定烘干并保温；焊钉提升高度过大；钢板表面焊前清理不彻底，仍然附着水分、油污、铁锈及预涂底漆等。

（3）焊接飞溅原因 瓷环损坏破坏不能保护焊缝；焊接电流太大等。

（4）焊缝不饱满原因 焊接电流过低；焊接时间短；焊钉引弧端受损；焊接参数选择不当；人工焊接操作人员操作不当；螺柱焊机故障或者焊接机器人故障等。

4.2 焊钉断裂

在焊接工艺评定试验的30° 弯曲试验或拉伸试验中出现焊钉断裂，均需要重新进行螺柱焊接。出现以上问题的主要原因如下。

- 1) 焊前打磨或清理不到位。
- 2) 焊接参数组合不合理。
- 3) 人工焊接的操作人员操作不当。

表2 外观检查中的焊接缺陷

序号	焊接缺陷	典型案例图片
1	焊缝偏弧	
2	焊缝不饱满	
3	焊接气孔	
4	焊接飞溅	

4.3 焊钉脱落

焊钉脱落的主要原因如下。

1) 在板单元或杆件上的焊钉焊接完成且外观检查合格后，吊装或运输过程中受到大力挤压或严重

碰撞，因保护不当而导致焊钉脱落。

2) 钢板厚度大，钢板材质特殊（如复合钢板、高强钢等），或者施工环境温度 $<5^{\circ}\text{C}$ ，尤其是冬期施工，均易导致焊钉脱落。

表3 焊钉断裂

序号	质量问题	质量问题案例图片	备注
1	弯曲试验断裂		30° 弯曲试验出现的问题，断口处存在焊接未熔合区，该焊接缺陷直接导致了弯曲试验断裂在焊钉焊缝根部
2	拉伸试验不合格		在焊接工艺评定试验中焊钉拉伸试验不合格，断口处存在焊接未熔合区，该焊接缺陷直接导致了拉伸试验断裂在焊钉焊缝部位且拉力荷载不满足标准规定

5 焊接缺陷的修补及质量保证措施

5.1 外观缺陷和质量问题的修补

所有外观检查不合格的焊钉均需要修补。

1) 对于焊缝偏弧和焊缝不饱满，采用焊条电弧焊或者CO₂气体保护焊补焊，角焊缝的焊脚尺寸K应满足JTG/T 3651—2022中7.2.11的有关规定，焊钉直径为10mm、13mm时，K=6mm；焊钉直径为16mm、19mm、22mm时，K=8mm；焊钉直径为25mm时，K=10mm。

2) 对于焊接气孔，采用打磨方法进行清除，在原位置重新进行螺柱焊接或者采用焊条电弧焊、CO₂气体保护焊补焊，角焊缝的焊脚尺寸满足标准要求，达到预热要求的，应进行焊前预热。

3) 对于焊接飞溅，在保证外观成形的情况下，用砂轮打磨清除。

4) 对于焊钉断裂，需要对原钢板表面进行打磨并采用磁粉检测，确认钢板表面的质量完好，再重新进行螺柱焊接。

5.2 焊接质量保证措施

(1) 焊接生产前进行焊接工艺评定试验 按照JTG/T 3651—2022附录D中的有关规定进行焊钉焊接工艺评定试验，制定焊接工艺指导书，选取合理的焊接参数或者参数组合，调整优化主要焊接参数，包括焊接电流、焊接时间、焊钉提升高度及焊钉伸出长度等，经过反复对比试验研究，总结每种规格焊钉的焊接工艺特点，确保圆柱头焊钉的良好焊接性，进行各项焊接技术准备工作，这是保障圆

柱头焊钉焊接生产质量的前提条件。

(2) 严格执行焊接工艺 具体要求如下。

1) 焊前注意事项。对待焊接部位（大于2倍焊钉直径）进行砂轮打磨或者采用智能化激光清理工艺，清除油污、水分、底漆、铁锈及氧化皮等有害物，露出金属光泽。同时，桥梁钢结构焊钉的焊接应采用相应直径的瓷环保护，瓷环应按规定烘干并保温后才能使用。

2) 生产前试焊。按照JTG/T 3651—2022中7.2.11.6的规定，每工班开始生产前，应按照已经评定合格的焊接工艺或规定的焊接工艺在单独的试板上试焊2个焊钉，进行外观检查和30° 弯曲试验，全部合格后方可在实际钢结构产品上进行正式焊接；若不合格，应分析原因，调整工艺重新施焊，直至合格。

3) 严格执行焊接工艺规程。应严格按照已经评定合格的焊接参数或生产前试焊合格的焊接参数，在板单元或杆件上进行焊钉焊接，严格执行焊钉焊接工艺规程的规定。每种规格的焊钉所选取的焊接电流、焊接时间、焊钉提升高度及焊钉伸出长度等焊接参数或者参数组合不同，也需要在焊接试验和生产实践中不断调整优化，以满足桥梁钢结构的结构形式、钢板材质及设计要求。

4) 外观检查。必须严格执行焊钉的焊缝外观检查要求，这一点比钢板与钢板间焊缝外观检查还要重要，因为钢板与钢板间对接焊缝或角焊缝还可以进行无损检测，以确保焊缝质量，但焊钉的焊缝目

前还无法实现无损检测。如果在外观检查过程中发现外观焊接缺陷,应立即停止螺柱焊接,查找分析原因,并重新施焊;对于已经产生的焊接缺陷按照上文所述进行焊缝外观缺陷的修补。

5) 30° 弯曲试验。按照JTG/T 3651—2022中7.3.2的有关规定,焊缝外观检查合格后,应随机抽取1%进行30° 弯曲试验,焊缝和热影响区不应有肉眼可见的裂纹,合格的焊钉可保留其弯曲状态;不合格时应加倍取样进行试验。

(3) 其他质量保障措施 当严格执行每一个工程项目的焊接工艺时,会减少绝大部分的焊接缺陷和焊接质量问题,但也应该注意到其他质量保障措施。

1) 焊前应检查并确保所用焊接设备及仪器仪表正常运行。

2) 采用操作简便,且导电性能好和安全性高的焊接地线钳。

3) 加强手工螺柱焊接操作人员、焊接机器人操作人员的专业培训,开展专业考试及业绩考核等。

4) 存放、吊装和运输过程中正确保护焊钉。

5) 制定特殊焊接环境条件下的专项施工方案。

6 结束语

1) 在焊钉焊接试验和焊接生产中出现的质量问题,比如焊缝外观的焊接缺陷、焊钉断裂等问题,

大部分通过一些工艺措施是能够成功解决或可以避免的;少数还需要在焊接装备及辅助设备的进一步升级改造和研发创新过程中更好地解决,需要不断试验研究和改进创新。

2) 加强桥梁钢结构焊钉质量控制,建立健全质量管理体系,重视焊接生产环节的质量管理,是桥梁钢结构制造过程中降本增效的重要措施之一。

3) 在桥梁钢结构制造中进一步提高焊钉的焊接智能化程度和焊接生产效率,提高焊钉焊接质量的稳定性,可以提高钢桥制造质量和运营寿命,降低桥梁工程的维护成本,具有显著的经济效益和社会效益。

参考文献:

- [1] 陆建勇,张宣关,吴成材.栓钉焊接头中的缺陷及其对工程质量的影响[J].工程质量,2007(17):43-45.
- [2] 梁成信,陈长礼.螺柱焊技术在桥梁上的应用[J].焊接技术,1997(6):10-11.
- [3] 洪保麒,李松.芜湖桥栓钉焊接技术[J].钢结构,2001(5):29-31.
- [4] 俞众.正确选用螺柱焊机 确保车身焊接质量[J].电焊机,2010,40(5):160-161.
- [5] 齐绍荣,叶振忠,王芸.影响电弧螺柱焊焊接质量的几个问题[J].焊接技术,2002(4):27-28.

(收稿日期:20250109)

(上接第53页)

程中面临的问题点进行阐述,为诸多计划使用机器人离线编程技术的用户明确了应用概念及技术水平现状,对工程项目可能发生的潜在风险作出预警;同时,对机器人制造厂家及离线编程软件厂商,也具有一定的参考意义。随着智能制造的不断升级,机器人本体制造及校准精度持续提高,运动控制算法不断改进,未来再配合持续优化升级的各类传感器辅助校准,一定能够将离线编程技术的优势发挥到激光切割实践中,使机器人离线编程技术得到行业内的普遍认可及更加广泛的应用。

参考文献:

- [1] 陈俐,巩水利,何恩光.激光去除与连接技术发展研究[J].中国工程科学,2020(3):86-92.
- [2] 孙加强,焦俊科,张文武,等.基于ABB机器人的

的光纤激光切割与焊接系统研究[J].应用激光,2014,34(6):584-588.

- [3] 马少龙,梁舒,陈明辉.基于离线编程技术的工业机器人绘图系统研究[J].现代制造技术与装备,2020,56(7):65-66.
- [4] 解海亮,黄思,王天正,等.双机器人紧协调焊接路径规划与离线编程[J].机械设计,2022,39(8):96-103.
- [5] 程晓飞,高胜,李军,等.马鞍形焊缝焊接机器人设计与建模分析[J].焊接学报,2022,43(3):95-100,126-127.
- [6] 郭澄若,村井融.三维激光切割加工中若干问题探讨[J].金属加工(冷加工),2016(21):39-40.

(收稿日期:20250209)