

智能化焊接技术在平转机复杂部件焊补维修中的应用

刘文东¹ 吴颖东²

1. 包头机械工业职业学校 内蒙古包头 014000

2. 内蒙古电力建设(集团)有限公司 内蒙古呼和浩特 010000

摘要: 作为机械制造、冶金和能源等领域的重要设备,平转机的复杂核心构件大多由35CrMo合金结构钢铸造。该类材料具有高强度、耐高温等优良特性,但其可焊性较差,常规焊接工艺很难满足其高精度焊接维修需求。本研究围绕智能焊接技术开展研究,结合材料性能特点,深入研究智能化焊接技术核心工艺以及其在复杂部件焊接维修中的实践应用。结果显示,智能化焊接技术可有效地解决35CrMo钢焊缝裂纹和组织粗大等问题,保证焊缝区域的机械性能与母材相匹配,从而提高整机的维护质量和运行效率,为提升工业装备的高效维修提供技术支持。

关键词: 智能化焊接技术;平转机;复杂部件;焊补维修

作为机械制造、冶金、能源等行业的核心装备,平转机主轴、箱体等复杂零件长期处于高负荷、交变应力和中温环境下,极易发生裂纹、局部磨损等情况,严重影响装备的正常工作,导致生产连续性下降^[1]。这类零件多为35CrMo系合金结构钢铸造。将机器人、传感和计算机控制相结合的智能焊接技术,可以实现高精度、自动化的焊接工艺调控,为35CrMo钢构件的焊接修复提供新的解决方案。因此,本研究拟对智能焊接技术的优点和核心工艺进行深入剖析,探索其在平型机复杂构件的焊接修复与维护中的应用途径,为提高装备运行效率和延长设备寿命提供技术借鉴。

一、智能化焊接技术的优势

(一) 焊接精度高

智能焊接是一种采用高精度激光定位和伺服驱动的焊接机器人,实现高精度的重复定位,精度达 $\pm 0.05\text{mm}$ 。基于平机主轴、箱壳体等异型零件,通过预先设定的3D建模轨迹,完成对曲面、坡口、狭窄空间等多个位置的精确焊接,有效解决由于人为因素造成的焊缝偏差和成形不良等难题,保证焊缝位置准确、尺寸均匀,满足复杂构件的高精度焊接要求^[2]。

(二) 焊接质量稳定

传统的焊接工艺对操作者的技术水平和经验要求较高,但由于工作人员个体差异较大,很难保证同批次设备维护品质的一致性。智能化焊接技术采用计算机编程

的方法,克服了人工因素对焊缝质量的影响,实现对各工序的精确控制。配套的基于视觉传感、温度传感和超声波传感的焊缝在线检测系统,实现对焊缝成形、温度传感和内部缺陷的实时监控,并在此基础上对焊缝进行在线检测,以保证焊缝质量的稳定性和可靠性。

(三) 生产效率高

平转机是目前应用广泛的工业设备,其停机维修时间长对企业的经济效益影响较大。传统的人工焊接方法效率较低,一个复杂零件的焊接往往要数天完成,而智能焊接机器人可以24小时不间断工作,其焊接效率比人工焊接提高3~5倍。另外,该方法还可以大幅缩短工件的装夹和清理焊缝的时间,优化整个维修流程。如在平转机主轴裂纹焊补时,需要3~5天的人工焊接,而在使用智能焊接技术之后,只需要一天的时间即可完成。在智能化技术应用阶段不需要进行反复进行打磨,进而减少设备的停工时间,提高企业的连续生产能力^[3]。

二、焊接材料及性能

(一) 焊接材料

该机复杂构件由35CrMo系结构钢经过合理的成分配比和热处理而成,具有优异的综合机械性能,能够满足苛刻条件下装备的使用要求。对其材质特性进行深入分析,是实现智能化焊接工艺和保证焊接质量的前提。35CrMo钢的化学成分严格遵循国家标准,各元素质量分数见表1。

表1 35CrMo钢化学成分(质量分数,%)

碳(C)	硅(Si)	锰(Mn)	铬(Cr)	钼(Mo)	磷(P)	硫(S)
0.32~0.40	0.17~0.37	0.40~0.70	0.80~1.10	0.15~0.25	≤ 0.035	≤ 0.035

碳是影响钢铁强度的关键因素，35CrMo钢中碳含量控制在0.32%—0.40%，既能保持较高的强度，又能防止高碳量引起的焊接性下降。硅是一种脱氧剂，经脱氧处理后提高钢材纯净度。锰可以细化晶粒，提高其淬透性和韧性，提升其抗冲击性。铬是改善钢铁淬透性的重要元素，能明显改善钢铁的强度、硬度和抗腐蚀性能，并能在高温条件下提高结构的稳定性。添加钼可以进一步细化晶粒，抑制其回火时的脆化趋势，提高其高温强度和抗疲劳性。磷、硫作为钢铁材料中有害杂质，其含量不得超过0.035%，可以有效避免冷脆、热脆等问题，保证钢铁材料的机械性能和机械性能。

（二）性能分析

1. 力学性能

35CrMo钢经过热处理后，其机械性能得到明显提高，如，直径为100 mm的样品，室温和高温下的力学性能如下。室温性能：淬火+回火后35CrMo钢具有室温力学性能优势显著，其拉伸强度（ σ_b ） ≥ 980 MPa、屈服强度（ σ_s ） ≥ 835 MPa、延伸（ δ_5 ） $\geq 12\%$ 、截面收缩率（ ψ ） $\geq 45\%$ 、常温冲击功（ A_{kv} ） ≥ 63 J。高拉伸强度和屈服强度，能确保平转机零件承受高负荷工作。本身具备较好的伸长率和截面收缩率，使钢材具有较强的塑性变形能力。高温力学性能：35CrMo钢具有耐高温性能，中温温度300~500℃时，其力学性能衰减幅度低。在500℃条件下，材料的拉伸强度约为室温80%左右，比较普通碳钢对比，其性能优势明显。这一特点决定了其成为制造高压螺栓、平转机主轴等零件的理想材料，同时也能解决平转机长期工作中由于摩擦而产生的温度升高问题。

2. 工艺性能

35CrMo钢最佳锻造温度范围为1100~800℃的锻件，对锻压工艺要求较高，需采取慢速升温的方法，以防止由于快速升温而引起钢材内部热应力而引起裂纹等缺陷。锻造完成后，需要通过砂冷等冷却方法降低温度，以减少内应力残留，从而确保锻件的尺寸稳定和机械性能的均匀性。

3. 焊接性能

35CrMo钢是一种可焊接性有待提升，其本身容易出现焊缝开裂。钢铁材料中含有大量的碳和合金元素，在焊接过程中，焊缝和热影响区迅速冷却，容易形成淬硬组织，同时，焊接应力很大，如果不加以控制，易出现冷裂。在进行焊接修理时，需要采取必要的技术措

施，即：在焊接之前，要把被测工件加热到200~300℃，以减少焊缝降温速率，防止产生淬硬组织。为提高焊缝和热影响区的组织和性能，在600~650℃下对其进行回火，消除残余应力。采用E8015-G等低氢型焊条或H13CrMoA等焊丝，有效减少氢在焊缝中的分布，从根源上降低冷裂几率。

4. 热处理性能

35CrMo钢的机械性能与热处理工艺密切相关，常用的热处理方法是淬火+回火。即在850~880℃之间，通过油冷却的方法将钢铁材料的微观结构转化成均匀的马氏体组织，大幅度地提升材料的强度和硬度。回火温度则结合部件实际性能进行调整，一般为550~650℃，经气冷处理后，钢结构转化为回火索氏体，该组织具备高强度和高韧性的特性，可满足平转机复杂零件的服役要求。通过对回火温度的调节，可对钢铁材料的力学性能进行柔性调节，比如，升高回火温度可以增加钢的韧性，而降低回火温度可以提高钢的强度。

5. 切削性能

35CrMo钢的切削性能与其热处理状况关系紧密，退火后钢硬度在200~250HBW左右，这段时间内，切削阻力低，刀具磨损缓慢，切削加工性好。经过淬火和回火后，钢铁的硬度提高到30~35HRC，也提高了切割的难度。因此，需要选择高强度的硬质合金等工具。同时，还需要对切削工艺进行优化，以减少切削速率，避免刀具崩刃，确保加工精度。

三、智能化焊接技术核心工艺

（一）焊接机器人系统

焊接机器人系统是实现智能焊接的核心组件，由机器人本体、控制系统、焊接夹具三部分组成，机器人具有6—8个自由度的多关节串联结构，可以在空间的任何一个位置上进行灵活的移动，适用于平面机主轴、齿轮箱等多角度多方位焊接需求。以可编程逻辑控制器（PLC）和工业计算机结合的组织架构，导入3D建模、优化焊缝路径、实现手工微调，保证焊缝与缺陷的精确匹配。焊接夹具为模块式结构，配有高精度的定位销钉及夹持装置，可根据平转机各零件的外形大小灵活调节，确保焊接过程稳定，防止因工件移位而造成焊接误差。

（二）焊接参数智能调控系统

本系统利用电流、电压、温度等传感器对焊缝进行实时检测，并将采集到的核心参数及时传送至工业计算机，以达到精确控制焊接工艺的目的。通过对35CrMo钢

焊接特点的分析,建立基于35CrMo钢焊接特点的工艺参数模型,实现对焊接电流、电压、速度、进给速度等参数的自动调节,保证焊接工艺流程处于优化的工艺范围内。如检测到焊缝的高温时,可以自动减小焊接电流或者加大焊接速率,以降低输入热量,在焊接深度不足的情况下,通过增加焊接电流,保证焊接接头和母材的良好结合。同时,系统还支持参数预置和储存,可以将各零部件的焊接参数作为加工模板,方便后期批量维修时直接调用,提高了加工复用和焊接效率。

(三) 焊接质量实时监测系统

该系统将视觉传感、温度传感和超声传感技术相结合,对焊接全过程进行实时监测,是保证焊接质量的“智能眼睛”。该机器人的焊枪末端装有视觉传感器,能够实时获取焊缝成形的图像,并对焊缝的宽度、高度、咬边、气孔等表面缺陷进行分析,并对其进行实时的修正。

在焊缝周围布置有温度传感器,对热影响区的温度进行实时监控,保证焊缝内部的温度一直处于预定的范围,防止高温和低温引起组织缺陷。超声波检测器是一种在线检测的方式,可以实现对焊缝内部的实时扫描,及时发现夹杂物、裂纹、未熔合等内部缺陷,并给出报警信号,提示操作者及时采取措施。

(四) 焊后热处理智能控制

35CrMo钢的焊接后热处理是提高焊接质量的重要环节,而与之相匹配的焊接后热处理智能控制系统则可以有效地解决这一难题。根据预先设定好的热处理工艺曲线,实现对加热温度、保温时间和降温速率的控制。以35CrMo钢为研究对象,通过阶梯式冷却方式,保证焊缝和热影响区组织完全向回火索氏体转化,消除残余应力,提高焊接区机械性能,满足35CrMo钢焊接后热处理要求。同时,系统还配置了温度检测装置,对被加工区域内各部分的温度进行了实时监控,确保了各部件温度均匀性,有效地防止由于局部温度的变化而造成的热处理结果不理想的情况。

四、智能化焊接技术在平转机复杂部件焊补维修中的应用实践

(一) 焊前准备

1. 缺陷检测与评估

利用超声波和磁粉探测结合技术,对平转机主轴进行全方位的无损检测,精确测定了裂纹的位置、长度、深度和扩展方向。经过检验,发现主轴轴颈部有一条长80mm,深5mm的横向裂缝,裂缝没有穿过主轴体,可以进行焊接修复。

2. 焊前清理与预处理

用角磨机对开裂部位及其周围20 mm内的表面进行抛光处理,除去油污、铁锈和氧化皮等杂质,直到显露出金属光泽。而后对裂缝进行机加工,在裂缝方向切成V形坡口,坡口角度60度,深6 mm,以保证焊缝材料能完全填满裂缝。针对35CrMo钢的焊接工艺特点,提出利用感应加热装置对沟道区进行预热的方法,温度在250℃,保证温度相对均匀,以规避焊接中出现裂纹。

3. 焊接材料与设备选型

采用与35CrMo钢相匹配的低氢类型焊丝H13CrMoA,其具有与母材相同的力学性能。该焊接装备采用了智能化的弧焊机器人系统,配置了焊接工艺参数的智能调节和焊接质量的实时监控,从而保证了焊接工艺的精确控制。

结束语

智能焊接具有焊接精度高、热输入量可控、质量稳定、生产效率高等优点,可有效解决35 CrMo钢常规焊接工艺难以实现的技术瓶颈。实际应用结果显示,表明,采用智能焊接技术对卧式车床主轴裂纹进行修复和修复,可以明显提高机床的维护质量和工作效率。未来可在此基础上,进一步融合人工智能、数字孪生等前沿科技,建立基于数字孪生的飞机零件焊接修复与维护的数字孪生模型,并对其进行动态仿真和实时优化,促进其在工业设备维护领域的深入应用。

参考文献

- [1]周开明.焊接技术在工业制造中的应用研究[J].时代汽车,2026,(02):124-126.
- [2]陆冬青.高效智能化焊接技术在核岛主设备制造中的应用和发展[J].机械制造,2025,63(08):1-6.
- [3]张映梅.机器人焊接智能化技术在薄壁材料加工中的研究现状与挑战[J].时代汽车,2025,(05):137-139.