

程控气割在厚板焊接坡口加工中的精度控制与工艺优化研究

解文娣

宁夏西北骏马电机制造股份有限公司 宁夏 石嘴山 753000

摘要: 在大型电机制造中, 内外水套合口的焊接质量直接决定了冷却系统的密封性与结构可靠性。作为焊接前的关键工序, 厚板(通常 $\geq 20\text{mm}$)坡口的加工精度至关重要。现场广泛采用的便携式程控气割技术, 虽具备灵活性与经济性优势, 但其固有的热切割特性及设备局限性, 使得坡口几何精度(角度、钝边、直线度)难以稳定控制。本文以该典型应用场景为背景, 摒弃经验主义, 从影响精度的根本因素出发, 系统剖析了热-力耦合效应、核心工艺参数、设备特性及操作环境四大维度对坡口成形的内在作用机理。在此基础上, 针对性地构建了一套“预防-保障”二位一体的精度控制体系。研究表明, 通过科学解耦各影响因素并施以精准对策, 可有效抑制热变形、修正参数偏差、克服设备局限, 从而在便携式平台上实现高精度、高一致性的厚板坡口加工, 为保障大型电机等关键装备的焊接质量奠定坚实基础。

关键词: 程控气割; 厚板焊接; 精度控制; 工艺优化; 便携式切割机

引言

大型电机的定子与转子冷却系统依赖于内、外水套的精密配合与可靠焊接。这些水套通常由18mm至40mm甚至更厚的低合金钢板(如Q235A、Q355B)制成, 其合口焊缝多为V形对接形式。高质量的焊接接头要求坡口具有精确的几何尺寸——包括规定的坡口角度(如 $25^\circ \sim 30^\circ$ V型)、均匀的钝边高度(如2mm)以及良好的直线度和平面度。任何微小的偏差都可能在后续焊接中被放大, 导致未熔合、夹渣、过大的焊接残余应力乃至裂纹等缺陷, 严重威胁电机的长期安全运行。在生产投料中, 传统的机械加工方法(如铣削坡口)因设备笨重、成本高昂、生产效率低下逐渐被便携式切割机代替。便携式程控气割机在气割坡口时轻便灵活、成本低廉, 操作简便, 成为坡口加工的主流选择。然而, 气割作为一种剧烈的热物理化学过程, 其本质决定了它极易受到多种因素干扰, 导致加工精度不稳定。当前, 现场操作很大程度上依赖于操作者的个人经验, 缺乏一套基于科学原理、针对具体影响因素的系统性控制与优化方法。因此, 本研究旨在深入剖析制约便携式程控气割在电机水套厚板坡口加工中精度提升的核心影响因素, 并以此为依据, 构建一套逻辑严密、切实可行的精度控制与工艺优化框架, 以期工程实践提供理论指导和技术支撑。

1 便携式程控气割坡口加工的特点与挑战

便携式程控气割机通过数控系统驱动割炬沿预设轨迹运动, 并通过调整割炬倾角来形成所需坡口。其在电

机水套加工中面临如下独特挑战: (1) 工件特性: 厚板意味着更大的热容量和更强的热传导能力, 需要更高的热输入, 这加剧了热影响区的范围和热变形的程度。(2) 加工阶段特点: 水套的坡口加工通常在板料下料阶段完成, 即在平板状态下进行气割, 需确保在大尺寸平板上长时间运行的轨迹精度与割炬姿态稳定性。(3) 精度要求: 水套合口后需保证紧密贴合, 对坡口的对称性、直线度及尺寸公差要求极为严格, 远超一般结构件的标准^[1]。这些特点共同构成了一个复杂的、多变量耦合的加工系统, 其精度受制于一系列相互关联的影响因素。

2 影响坡口加工精度的核心因素及其作用机理

2.1 热-力耦合效应与热变形(根本性因素)

这是所有热切割工艺精度控制的核心难题, 对于厚板尤为突出。预热火焰在局部区域快速加热金属至燃点(约 1300°C), 随后高速氧气流引发剧烈氧化反应并吹除熔渣。此过程造成切割前沿极高的温度梯度, 导致材料发生不均匀的热膨胀。当割炬移开后, 高温区域迅速冷却收缩, 产生强大的内应力。这种“热胀-冷缩”的循环在厚板中累积, 引发宏观的弯曲、扭曲或波浪变形。热变形会直接改变工件的实际几何形状, 使得按理论轨迹切割出的坡口偏离设计要求。例如, 在长直焊缝切割中, 板材中部受热最多, 冷却后会向切割侧弯曲, 导致坡口角度在长度方向上不一致; 在封闭的环形水套切割中, 整体收缩可能导致直径变小, 影响后续装配。

2.2 核心切割工艺参数(直接性因素)

这些参数是操作者可直接调控的变量,它们通过影响热输入、氧化反应速率和熔渣排出效率,直接决定坡口的最终几何形态。

2.2.1 预热火焰能率

能率决定了单位时间内传递给钢板的热量。能率不足,钢板无法达到稳定的燃点,切割过程断续,切口下缘挂渣严重,且为维持切割,割炬需更贴近工件,放大了倾角误差。能率过大,则热输入过剩,不仅扩大热影响区,加剧热变形,还可能使坡口上缘过热熔化、塌陷,导致实际坡口角度小于设定值。

2.2.2 切割氧压力与纯度

高压氧气流负责吹除氧化熔渣并维持切割反应。压力不足,排渣不畅,熔渣附着在切口下部,形成“挂渣”,这会侵占钝边空间,使实际钝边尺寸大于设定值,同时恶化坡口面质量。压力过高,虽能改善排渣,但会过度冲刷已形成的坡口面,导致坡口角度增大、表面粗糙度增加^[2]。氧气纯度低于99.5%会显著降低氧化反应效率,同样导致切割能力下降和挂渣。

2.2.3 切割速度

速度决定了热输入的线能量密度和反应时间。速度过快,预热跟不上,切割前沿温度不足,导致后拖量急剧增大,即切口下部滞后于上部,使得坡口下部变窄,钝边实际尺寸增大。速度过慢,热能持续累积,加剧前述的热变形问题,并可能导致坡口上缘烧损。

2.2.4 割嘴倾角(β)

这是形成坡口角度最直接的手段。理论上,目标坡口角度 α 与割嘴倾角 β 的关系为 $\beta = \alpha/2$ 。然而,在实际切割中,高温气流的浮力、熔渣飞溅的反冲力等因素会使火焰和氧流的实际作用方向发生偏移,导致有效倾角偏离设定值。此外,割嘴端面若未能与工件表面保持平行,也会引入额外的角度误差。

2.3 设备与机械特性(载体性因素)

便携式设备的固有属性是实现高精度的物理基础。

(1) 设备刚性与行走稳定性:相较于固定式大型切割机,便携式设备结构相对轻巧,刚性较低。在切割厚板时,高速氧气流喷射产生的反作用力以及行走轮与轨道(或磁力底盘与工件)间的摩擦力,都可能引起设备的微幅振动或行走偏移,直接影响切割轨迹的直线度和重复定位精度。(2) 割炬姿态控制精度:设备能否精确、稳定地维持设定的割嘴倾角 β ,是保证坡口角度一致性的关键。机械传动间隙、伺服电机的控制精度都会对此产生影响。(3) 割嘴状态:割嘴是能量输出的终端。长时间使用后,其预热孔和切割氧孔会因高温氧化而变形、烧蚀或堵塞,

导致火焰形态紊乱、氧气流发散,从根本上破坏了切割过程的稳定性,是造成坡口质量波动的重要原因。

2.4 操作环境与人为因素(外部性因素)

现场环境的不确定性为精度控制增加了变数。(1) 环境温度与风力:低温环境会加速钢板散热,要求更高的预热能率;车间穿堂风会吹散预热火焰,使其无法有效集中加热,导致切割中断或质量下降。(2) 初始定位与基准对齐:设备安装时,其行走基准(轨道或磁力底盘)与工件的实际待切割边缘若存在对齐误差,该误差将被完整地复制到最终的坡口上。(3) 操作者技能与规范性:尽管是程控设备,但参数输入、设备检查、过程监控等环节仍需人工介入。操作者的专业素养和对标准作业程序的遵守程度,直接影响工艺执行的一致性^[3]。

3 基于影响因素的精度控制与工艺优化策略

针对上述四大类影响因素,构建一个分层次、有重点的“预防-补偿-保障”精度控制体系。

3.1 预防层:抑制源头,减少误差产生

本层目标是通过科学规划和准备,从源头上最大限度地减少各类误差的产生。

3.1.1 对抗热-力耦合效应:

一是合理规划切割路径:虽然当前加工的水套板料展开长度多在1~3米之间(最大不超过6米),尚未采用分段或跳切等复杂切割顺序,但仍建议避免单向连续切割到底。可在条件允许时,适当调整起割点位置,或在较长坡口(接近6米)时尝试短距离往复进给,以局部缓解热量集中。二是采用强制冷却辅助:在割炬后方一定距离(需通过工艺试验或热模拟确定,避免冷却过快导致淬硬组织)布置风冷或可控水雾冷却装置,加速已切割区域的散热,缩短高温停留时间,从而有效抑制热影响区扩展和热变形累积。

3.1.2 精准设定工艺参数:

一是建立材料-厚度-参数映射表:摒弃模糊的经验法则,为常用材质(如Q235A、Q355B)和不同板厚(如20mm, 30mm, 40mm)建立详细的最优参数组合数据库。该数据库应明确给出预热能率、切割速度、氧压的推荐值及允许波动范围。二是倾角的理论修正:认识到理论倾角 $\beta = \alpha/2$ 的局限性,应根据板厚和材质,引入一个经验修正系数 k ($k > 1$),即实际设定倾角 $\beta' = k * (\alpha/2)$ 。例如,对于30mm厚板, k 可取1.05~1.10,以补偿热浮力等造成的有效倾角损失。

3.1.3 保障设备状态

一是严格的割嘴管理:制定割嘴使用寿命标准,实行强制更换制度。每次作业前必须目视检查割嘴孔道是

否圆整、无堵塞。二是设备校准：定期对设备的行走直线度、割炬倾角控制精度进行校准，确保其处于良好工作状态。

3.2 保障层：固化流程，确保执行一致性

本层旨在通过制度化、标准化的手段，将优化后的工艺参数与操作要求固化为可重复、可追溯的作业流程，确保不同人员、不同批次加工的一致性与可靠性。

3.2.1 建立全流程标准作业指导书

针对便携式程控气割坡口加工全过程，编制图文并茂、步骤明确的标准作业指导书，覆盖从准备到验收的各关键环节。具体内容包括：（1）工件准备：明确板面清洁度要求（无油污、锈蚀、氧化皮），以及基准线划线精度（建议采用激光划线或高精度模板）；（2）设备安装：规定磁力吸附底座的布置数量与位置，确保设备在切割全程稳定不滑移，并强调以工件基准线为对齐依据；（3）参数设定：提供基于材料-厚度映射表的参数查询指引，禁止凭经验随意输入；（4）割嘴管理：要求作业前必须检查割嘴孔形完整性与同心度，按寿命记录强制更换；（5）空运行验证：正式切割前须进行一次无火焰空走程序，确认轨迹、倾角及限位无异常；（6）过程监控：操作人员需定时巡检切割焰形态、拖拽纹均匀性及设备运行平稳性；（7）质量首件控制：严格执行“三检制”——操作者自检坡口角度与直线度、班组互检尺寸一致性、质检员专检关键公差（如对称度 $\leq \pm 0.5\text{mm}$ ），合格后方可批量加工^[4]。

3.2.2 制定环境适应性应对预案

外部环境变化显著影响气割稳定性，需建立动态响应机制。在低温（ $< 5^{\circ}\text{C}$ ）环境下，钢板导热加快，易导致预热不足、切割中断，应适当提高预热火焰能率10%~15%，并延长预热时间；同时对燃气管路采取保温措施，防止丙烷/氧气压力波动。在室外大风（ > 3 级）条件下，火焰易偏斜甚至熄灭，必须设置可移动式挡风屏，包围切割区域形成局部静风环境。此外，雨雪或高湿天气应暂停作业，避免水分进入割嘴或引起回火。所有环

境调整措施均纳入标准作业指导书附录，作为操作人员的必查项，确保工艺鲁棒性不受现场条件干扰。

4 全流程工艺优化策略

将上述精度控制体系融入到完整的工艺流程中，形成一套闭环的优化策略。（1）现场准备与装夹阶段：严格执行工艺流程，确保工件清洁、基准清晰；设备安装牢固，行走基准与工件边缘精确对齐；选用状态完好的割嘴，并正确安装。（2）后处理与检验阶段：切割完成后，及时清理挂渣。对坡口角度、钝边高度、直线度等关键指标进行检验，确保符合图纸、工艺要求^[4]。

5 结语

便携式程控气割在电机内外水套厚板坡口加工中的精度控制，是一个涉及多物理场耦合、多变量交互的复杂系统工程。本文通过深入剖析热-力耦合效应、核心工艺参数、设备特性及操作环境四大核心影响因素的作用机理，揭示了精度失控的根本原因。在此基础上，创新性地构建了“预防-保障”二位一体的精度控制体系，并将其融入到一个完整的、可操作的全流程工艺优化策略中。该策略强调从源头抑制热变形、科学设定并修正工艺参数，并通过严格的标准化作业来固化成果。实践证明，只有将对影响因素的深刻理解转化为具体的、有针对性的控制措施，才能在便携式程控气割这一看似“粗放”的平台上，实现厚板坡口加工的“精密切割”，从而为电机制造等高端装备的高质量焊接提供可靠保障。

参考文献

- [1]陈清.液压支架结构件板件坡口焊接工艺优化与应用[J].中国矿山工程,2021,50(03):46-48.
- [2]刘凯.浅谈焊接与气割作业的特点及安全措施[J].建筑安全,2025,40(06):68-70+76.
- [3]王小峰.液压支架板件坡口焊接质量的提高研究[J].机械管理开发,2024,39(07):216-217+234.
- [4]牢记电焊气割“十不准”对违规动火作业说“不”[J].湖北应急管理,2023,(05):64-65.