

中大型变压器油箱制作工艺研究及探讨

单新世

保定天威集团特变电气有限公司 河北 保定 071000

摘要：文章聚焦中大型变压器油箱制作工艺展开深入研究。论述传统油箱制作工艺存在的问题。基于此，针对性提出工艺优化策略，涵盖引入先进设备等，为变压器行业油箱制作工艺发展提供参考。

关键词：中大型变压器；油箱制作工艺

1 中大型变压器油箱传统制作工艺存在的问题

传统油箱制作，从原材料下料开始到油箱制作完毕，各种操作多为人工操作完成，材料利用率低，生产效率低，质量不稳定，工人的劳动条件差，工艺改进很迫切。

2 中大型变压器油箱制作工艺探讨

2.1 零部件加工工艺

2.1.1 板材下料

目前中大型变压器油箱金属板材下料环节，多采用数控切割技术，较厚的钢板采用数控火焰切割，较薄的钢板采用数控激光切割和数控等离子切割，还有用剪板机剪切的。随着技术不断进步，功率3万瓦数控激光切割机，质量切割板厚30mm，已经能切割绝大部分变压器油箱所用金属板材；功率6万瓦的数控激光切割机，质量切割厚度已经达到80mm，若不考虑成本等因素，都可以取代火焰切割了。数控激光切割机受欢迎，是因为其切割速度快、精度高、割缝小，对精度不高的通孔，可以在激光下料时直接割出，不用再上钻床加工，效率高且孔的匹配度好；在材料利用率方面，不同的套料软件结果不同，我们用专业版超算兰克特排版套料软件，材料利用率比原来的套料软件提升4.8~10%。数控激光切割机还能实现打标划线功能，可以减少后续油箱组焊过程中的划线工作量。现在的数控切割设备，都安装了切割废气收集和处理系统，能达到室内排放标准，保障工人职业卫生健康。因此，数控激光板材切割机将是变压器油箱板材下料的主导者。

2.1.2 型材下料

变压器用型材有多种，每个变压器生产厂家不尽相同，一般为方管、圆管、方钢、圆钢、槽钢、工字钢、角钢等，通用的下料方式为带锯床下料，有一台带锯床能实现其加工范围内所有型钢的下料，但效率不高，质量也不是很好。为提高效率和质量，可以配置多种型材下料设备，方管、圆管、槽钢等可在型材数控激光型材

切割机上完成加工，下料断面与型材轴线的垂直度好，且型材中的孔、豁口等（例如集气管主管中支管位置的开孔、集流管中管接头的开孔）都能高效、精确加工完成；规格较小且只需断料的方管、圆管、槽钢和较小规格的圆钢、扁钢，可用数控自动进料圆锯机加工，速度快切割质量好。数控激光型材切割机、数控自动进料圆锯机不能加工的规格较大的型钢，可用带锯床加工^[1]。

2.1.3 平面零件毛刺打磨

钢板类零件数控下料后，多少有毛边，需打磨，原来多是人工打磨，环境恶劣且效率低。较为理想的加工设备为通过式挂渣去除机，使用时操作人员只需将切割完的零件放到进料平台上，零件自动进入，通过封闭的打磨区间后到达出料平台，另一端的操作人员将零件收集到零件托盘即可。若经济条件允许，可以安装机械臂，数控切割完毕后，直接由机械臂取件放于进料平台，出料平台端再设置一机械臂，负责零件收集，从而完成上件、打磨、零件收集的整个过程自动化进行。无论是否有机械臂，工作效率都有极大提升。由于打磨区间是封闭的，且有粉尘处理系统，极大改善了工作车间的作业环境。GIRET品牌的挂渣去除机，加工板厚一般6~60mm，宽度可达到1200mm，能满足绝大多数变压器零件的打磨。

2.1.4 零件机加工

对于油箱箱壁、箱盖、箱底等大型零部件的成型加工，主要借助数控折弯机。对于升高座、油柜等圆筒形零件，现在一般用数控四棍卷板机加工，精度和效率比较高。变压器上的连接法兰，圆形的，在车床上加工内外圆、密封面和倒角，螺纹孔或通孔在摇臂钻床加工，原来是普通车床和摇臂钻床，现在都是数控车床和数控钻床了，效率和精度都提高了。方形的法兰，原来要分别在铣床加工密封面和在钻床上加工连接孔，现在密封面和连接孔都在立式加工中心一起加工完成。

2.2 焊前除锈

钢板表面的锈迹，不仅会影响焊接过程电弧的稳定燃烧，增加焊接飞溅，降低焊接效率，还会影响焊缝质量，形成气孔、夹渣等缺陷，因此焊前除锈是焊接的关键步骤，特别是对于油箱的密封性焊缝。通常的除锈方法是机械打磨，比如角磨机打磨、砂带机打磨等，还有将钢板整体喷丸/抛丸除锈处理的。随着激光技术的发展，已有手持激光除锈设备，手持激光发射器照射要除锈的部位即可，无论是直焊缝还是环形焊缝操作都很方便，经照射后钢板表层锈迹和氧化皮就轻松去除，满足焊接去锈要求，且方便快捷，现场工作环境好了很多，是值得推广的除锈工艺和设备^[2]。

2.3 焊接工艺

目前常用的焊接方法有手工电弧焊、气体保护焊和埋弧焊。箱壁、箱盖、箱底等的平板对接长焊缝，主要是采用埋弧自动焊，是成熟工艺，焊缝质量好；对于直径较小的环形焊缝，例如箱盖上的塞座焊缝、箱壁上的片散管接头焊缝等，用手工电弧焊操作性好；对于油箱组焊所需的多数角焊缝，一般采取气体保护焊，原来都是焊工操作焊枪焊接，后来有了半自动焊接小车，就将气保焊枪夹持在半自动小车上，焊接小车通过贴靠工件或沿铺设的轨道行走，焊接长直角焊缝，但焊工要在一旁观察，出现异常及时处理。

随着机器人技术不断进步，油箱自动焊接设备开始逐渐应用和推广。对于中大型油箱，大型龙门结构焊接机械手能焊接油箱绝大部分焊缝，但需求场地大，价格贵；小型龙门结构焊接机械手只能焊接中大型油箱外部的部分焊缝，场地和资金有限时可考虑此种结构；对于资金有限，但又要尽可能多的实现自动焊的情况，只能选择独立可移动的焊接机械手，将油箱焊缝分多个区域逐步焊接。无论哪种结构的焊接机械手，都能解放工人的双手，减少工人操作的不确定性，而且还可以通过焊缝参数跟踪记录系统来实时监测和记录焊接过程中各项参数，为后续的质量分析和工艺优化提供数据支持。

现在的焊接机械手一般能实现的焊接位置包括平焊PA、平角焊PB、立向上焊PF、横焊PC，部分能实现管子相贯线的焊接，但实现斜面上环形焊缝的焊接还比较困难，所以规划组装焊接顺序很重要，要尽可能多的采用平焊PA、平角焊PB，尤其是龙门结构的焊接机械手。

对于油箱箱壁与其外面加强铁的焊接，不同公司有不同的组装焊接顺序。第一种，是将平箱壁平铺在平台上，周围用卡兰或压板固定，将加强铁按图纸位置点焊固定在箱壁上并焊接，焊后用火焰人工矫正焊接变形，然后再与箱底或箱盖等组装在一起。其优点是可以将油

箱生产流程化，分工更细，降低了登高作业的时间占比；另一种，是先将箱壁与箱盖或箱底组装在一起，然后将加强铁按图纸位置点焊固定在箱壁上，油箱内部进行适当支撑后焊接。其优点是焊接变形小，矫正工作量小，但登高作业时间长。具体选用哪一种，要根据公司实际情况来定。

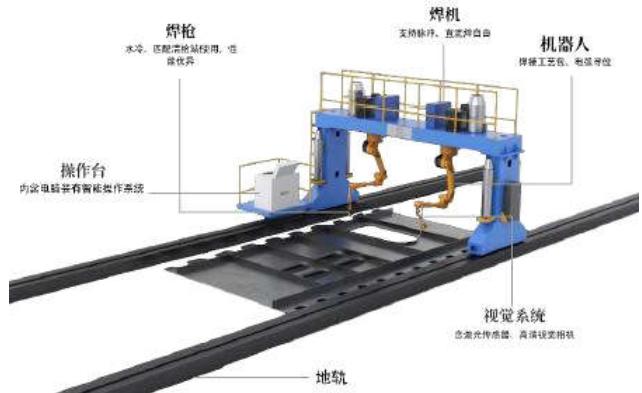


图1 小型龙门结构焊接机械手

2.4 试漏工艺

中大型变压器油箱的试漏，气压试漏比较普遍，将油箱密封，内部充入压缩空气，在外侧密封焊缝位置刷涂/喷涂肥皂水等易产泡液体，贯通缺陷部位就会产气泡。在内部焊缝全部满焊后再进行气压试漏，对于迂回路径很长且较小的缺陷不易发现，经常是好长时间才冒一个气泡，容易漏掉，这时候的处理措施就是多浇试漏液，勤观察，试漏后再增加一项保压要求，油箱内充气达到设定的压力后，在一定时间之内压降不能超过一定数值且再浇一次试漏液没有气泡，就认为试漏合格。

为了减少内部焊缝对于气压试漏的影响，可以内部焊缝暂时不焊或只焊接一部分，目的是要保证外部密封焊缝都能与油箱内部气体有贯通的空间，这样气压试漏时气体就容易达到外壁密封焊缝位置，试漏效果就好，外部密封焊缝试漏完毕再将内部未焊接的焊缝焊完。这种试漏方法的内部焊缝暂时不焊接或不满焊，一般是针对不能焊透的角接焊缝，对于焊透的对接焊缝就不适用了，这就要在焊接箱壁、箱盖、箱底等的对接焊缝时，一面焊完后就采取荧光试漏的方法确认此面焊缝没有贯穿缺陷，或两面焊接完毕后采取超声波探伤检测焊缝缺陷^[3]。

若希望试漏效果更好、更直观，可以将油箱外部焊缝全部满焊，但内部的角焊缝先都不焊接，在内部未焊接的角焊缝部位刷涂荧光渗透剂，4~8小时后用荧光手电照射，若有缺陷非常明显。缺陷处理完毕，将内部荧光渗透剂擦拭清洗干净后再焊接内部焊缝。对于对接焊缝，仍需采用上段论述的方法检测。

2.5 除锈工艺

现有中大型变压器油箱在除锈环节，通常采用喷丸或抛丸处理，能有效去除钢板表面的氧化皮、铁锈等杂质，增强涂层与基体的附着力。喷丸或抛丸过程中产生的粉尘，由配套除尘设备过滤。

前些年在喷丸室内人工手持喷头对工件喷丸的设备较多，工人工作环境差。随着科技的进步，出现了多种形式的适用于大中型油箱的自动化喷丸/抛丸设备，效果好、设备费用高的，是一种机械手形式的自动喷丸设备，示例见图2。这种喷丸设备，油箱放置在平车或支架上，油箱顶部有能移动的横梁，横梁上有滑轨，喷丸机械手安装在横梁的滑轨上，喷丸机械手不仅能沿横梁滑轨水平移动，还能沿自身的竖直轨道上下移动，再配合喷丸机械手本身的行动机构，使得喷丸机械手能达到油箱的各个部位，而喷丸机械手末端就是能以一定角度摆动的喷头，从而完成油箱的喷丸除锈工作^[4]。机械手可以人工室外操作，也可以根据油箱三维图按程序自动运行。喷丸机械手臂较长时，甚至能完成油箱内壁的喷丸除锈工作。当然，对于部分死角，喷丸机械手可能喷丸除锈不彻底，还需要人工喷丸除锈进行找补或用其他工具打磨除锈。



图2 自动喷丸机械手

还有一种是通过式的自动化油箱抛丸设备，油箱可沿固定直线轨迹往复运动，与运动轨迹垂直的平面内有多个抛丸头向油箱抛丸，油箱单程或往复运动完成除锈工作，示意图见图3。这种抛丸设备占地面积较大，但综合成本比上述焊喷丸机械手的要低的多，且效率高；在喷丸除锈质量方面，若产品结构复杂、缝隙和死角较多，这种通过式的抛丸除锈设备没有图2所示喷丸机械手结构的喷丸除锈设备效果好。

2.6 涂装工艺

在涂装工艺方面，常见的做法是采用喷涂或喷塑方式来完成油箱等部件的涂装工作。就防腐性能来说，喷漆或喷塑都能满足相应环境要求。喷漆工艺操作相对灵活，但漆膜厚度和质量受工人操作水平和环境因素影

响较大，易出现流挂、橘皮等缺陷。喷塑工艺则能形成均匀、致密的涂层，具有良好的耐腐蚀性和装饰性，对棱角的倒钝要求较低，但喷塑工艺对粉末涂料的质量要求高，对环境的清洁程度和油箱表面的清洁度要求都很高，且喷塑后的固化过程需要精确控制温度和时间，否则会影响涂层性能。在环保方面，粉末涂料中的挥发性有机化合物（VOCs）比传统油漆低。

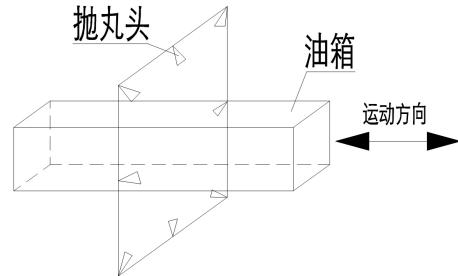


图3 通过式自动抛丸机

我们的一些中小型油箱是喷塑的，实际效果很好，如果是新建油箱生产线，即使是中大型油箱，建议采用喷塑工艺，而且是机器人自动喷塑或手柄操作的机械手喷塑，改善工人的劳动环境。但要注意以下事项：①增加油箱喷丸除锈前表面油污清理过程；②保证喷丸除锈的钢丸的清洁，不能对有油污的产品或零件喷丸除锈；③喷丸后不能接触油污，即使徒手触摸都不可以，而且要清理喷丸残留的粉尘，在生产线工艺流程设计时就设置清理残留粉尘流程；④单独的喷塑区域，且保证喷塑区域的清洁；⑤做好喷塑后的磕碰防护工作。

结语

中大型变压器油箱制作工艺的研究与优化是一项具有重要现实意义的工作。通过对传统工艺问题实施一系列针对性优化措施，成功突破了制作过程中的诸多瓶颈。优化后的工艺不仅在产品质量、成本控制和生产效率上取得显著成效，还顺应了环保与可持续发展的时代要求。未来，随着技术的不断进步，需持续探索创新，进一步优化工艺，推动变压器油箱制作工艺向更高水平迈进，助力电力设备行业蓬勃发展。

参考文献

- [1]庄飞,方向红,李亮.大型电力变压器油箱制作工艺改进分析[J].工艺与装备,2021,(05):56-58.
- [2]张建伟.大型变压器的安装与调试关键技术分析[J].电子技术,2021,50(09):168-169.
- [3]张文静.变压器油箱屏蔽厚度的优化分析[J].机械管理开发,2024,39(7):185-187.
- [4]李鹏,孙建涛,赵义焜,等.大型油浸式变压器油箱防爆技术研究综述[J].中国电机工程学报,2025,45(9):3282-3296.