

石膏煅烧装备箱体组件的焊接变形与控制分析

晁阳

(泰安路发节能环保设备有限公司 山东 泰安 271000)

摘要：中部箱体组件是石膏流化煅烧机的结构和功能核心部分，该组件焊接变形会导致石膏粉煅烧时间的缩减、设备后续制造工序的困难和换热排管的有害的位移以及保温、密封不良，引发焊缝疲劳断裂等。结合中部箱体组件所用板材特点以及使用安装特性，提出了一系列与其相适应的焊接变形控制措施及必要矫正方法。

关键词：流化煅烧机；中部箱体组件；焊接变形控制；变形矫正

1 石膏流化煅烧机工作概述

石膏流化煅烧机（以下称煅烧机）是目前建筑石膏生产领域主流装备产品，建筑石膏原料在煅烧机内部脱水后，物料呈现水状沸腾状态，因此这种设备又被形象地称作“沸腾炉”。煅烧机主流外观形式为立式结构，其结构核心本体是设备中部一座立式长方体箱式容器，其内部装有大量的加热排管，管内的加热介质为饱和蒸汽或有机载热油，热量通过管壁传递给管外处于流化态的石膏粉，使石膏粉脱水分解。设备上部为一套集汽收尘罩，负责将石膏粉脱水后的水蒸气和沸腾逃逸的粉料集合进入除尘系统。底部结构是一个包含布风板的锥形布风箱，其作用是煅烧机在工作时使气流从底部均匀地进入床层，另外一个作用是在煅烧机停止工作时支撑固体粉料不致下落。

由此可见，中部箱体是煅烧机结构和功能的核心，该部分在承担石膏粉物料换热脱水功能的同时，还要衔接上下收尘、布风功能，并在设备吊装、安装时起到受力承重的重要作用，所以煅烧机中部箱体组件的加工制作质量的好坏，尤其是焊接变形量的大小，就直接决定了煅烧机换热效率和工作性能。

2 中部箱体组件的变形特点及危害

煅烧机中部箱体组件一般选择 6mm~8mm 碳素结构钢焊接制作，这是考虑了设备工况，物料腐蚀强度，加工工艺性和设备成本多方面因素后最佳选材方案。在国标一般规格标准下，薄板是指厚度不大于 3mm(电工钢板除外)；中板是指厚度在 4mm~20mm 区间内，考虑到板材公差的存在，煅烧机实际所用的 6mm~8mm 板材正好处于薄板的上限与中板下限区间范围，在钢结构生产当中，薄板焊接与中板焊接在工艺上有所差异，也正因为如此，煅烧机中部箱体组件的焊接也体现了薄板焊接与中板焊接两种焊接工艺的过渡特性，同时焊接后变形也兼具薄板与中板部分特点，也就是说，虽然煅烧机中部箱体组件所用板材虽然名义上为中板材料，但同样大概率会出现薄板焊接所特有的一些变形特征。

煅烧机中部箱体变形主要对设备存在以下几个危害。

第一，过量的凹陷变形导致石膏粉无法在设备内有足够停留时间。基于“低温慢烧”工艺准则下的建筑石膏粉

生产线，充足的煅烧时间是保证脱硫石膏粉三相组成稳定的重要手段。煅烧机箱体的过量凹陷变形会导致设备有效容积的下降，使得物料停留时间减少，由于微观层面粉料的停留时间长短分布不具备线性规律，使得煅烧机溢流产生的石膏熟粉三相组成混乱，质量难以保证。实践证明，煅烧机有效容积的变化，对煅烧时间影响非常显著。

第二，箱体组件板面的变形可能导致后续焊接工序无法进行。受制于装车尺寸限制，设备存在一部分需要在现场焊接的组件，如支腿、各种工艺开口法兰等。箱体板面的变形为后续组件焊接带来了施工困难，尤其是支腿的焊接，难以保证其配合面的相互完全贴合。支腿位置的焊接精度直接决定了煅烧机整机安装的位置精度，同时箱体板面的变形会导致设备两侧支腿受力不均匀。设备就位后，这种不均匀的受力会进一步加剧箱体板面的变形幅度，同时带来安全隐患。

第三，箱体组件板面的变形会造成设备内换热管排的有害位移。换热管排装配基准是箱体板面预先加工好的等距均布孔系，箱体板面变形后会破坏已加工孔系设计布局，相应内部相邻换热管排间隙也会发生位置的靠近和远离。在脱硫石膏煅烧工艺过程中，虽然设有过筛和破碎工序，但在烘干设备运转和输送设备传输过程中，仍然会产生一定量的团状物料，由于板面变形导致间隙缩小后，会存在部分团状物料夹嵌在相邻两管排之间，随着煅烧机持续工作，夹嵌的团状物料不断积累，使得实际换热面积减小，换热效果难以保证，最终增加了系统热耗。

第四，箱体组件板面的变形不仅影响设备出厂外观，也影响设备保温效果。箱体板面不平整使得保温材料无法与设备紧密接触，最终形成空气间隙，在设备在工作状态下形成空气对流，导致保温材料的达不到预期的保温效果。无论是设备制造中形成的变形还是使用中残余应力缓慢释放导致的变形，都会使保温外观不平整，保温材质疏松，最终导致实际能耗增加。

第五，煅烧机中部箱体组件的上部收尘罩以及下部锥形布风箱是煅烧机两个必不可少的辅助功能组件，三者通过矩形法兰以及法兰上的均布孔系实现结构上的连接，煅烧机中部箱体组件的焊接变形会导致法兰孔系的对中不良

继而影响相邻两组件的密封性。上部收尘罩密封不良会导致除尘器引风机效率的下降；下部锥形布风箱若密封不良，使得煅烧机内部物料沸腾效果大幅缩水或者无法正常沸腾换热，石膏粉的流化状态直接影响产品质量。同时在停机状态下，未能完全排出的水汽会在密封间隙冷凝成水，对法兰配合面造成锈蚀以至于发生漏粉。

第六，罗茨风机和除尘器引风机的开停会造成煅烧机内部正压和负压的交替出现，如上文所述，煅烧机箱体组件所用板材具备一定薄板特性，由于其上下几何尺寸较大，板面刚性不足，交替出现的正负风压引起了煅烧机中部箱体板面交替、周期性凹凸变形，材料的变形使得焊缝内部出现交变应力，在一些频繁开停机的工况场合，循环交变应力的存在会引起焊缝周期受载，最终引发疲劳断裂失效，使得煅烧机中部箱体结构受损引发安全生产事故。

3 煅烧机中部箱体组件变形控制

综上所述，煅烧机中部箱体的变形对设备本身结构以及产品质量的负面影响是显而易见的，同时应当考虑到电弧焊接是一个快速加热和冷却的过程，无论是焊接过程中及焊接完成后，焊接组件都会产生焊接变形。针对煅烧机的结构特点，以及实际使用工况，可以把煅烧机箱体组件的变形控制措施归纳为以下几个方面。

3.1 箱体组件焊接的热变形因素影响

3.1.1 焊材和箱体板材的热物理特性

板材不同的材质，导热系数、热膨胀系数等均存在显著差异。导热系数小，温度梯度大，变形越显著；热膨胀系数越大，热变形幅度也大。因此可采用焊接性好、塑性优、对应力集中敏感性低的板材材质，同时考虑机械制造经济性，以及材料来源广泛，优先采用广泛使用的低碳合金结构钢系列。

3.1.2 焊接工艺参数

焊接工艺参数即焊接电流、电弧电压和焊接速度。电压影响熔宽，电流影响熔深，同时大的电流输入会带来板材合金元素的烧损和焊缝过热，线能量越大，焊接变形越大，故而焊接变形与焊接电流和电弧电压成正比例关系；如能保证外形尺寸，熔合良好，变形量与焊接速度成反比例关系。因此低能量输入、快速的焊接施工变形较小。

3.1.3 焊接工艺方法

不同的焊接工艺，会产生不同的温度分布场，对应的热变形也不相同。比较而言，自动焊比人工焊加热面集中，受热升温区域窄，变形相对较小。二氧化碳气体保护焊焊丝较细，焊接电流强度大，加热面集中，变形也小。在刚性大的工艺系统约束下焊接结构产生的变形比较小，因此在焊接施工中应优先考虑采用焊接刚性固定夹具。

3.1.4 焊缝几何因素

煅烧机中部箱体组件主体结构一般以直角角接接头为主，基于密封的需要，煅烧机中部箱体组件上下尺寸跨度较大，焊缝为长整连续焊缝，焊缝层数越多，则可能发生的焊接变形也就越大，施工以及工艺人员应验证在满足质

量要求前提下所需要的合理焊层数目；箱体板件搭接时控制装配间隙，间隙越小，焊缝的收缩也小；在满足强度要求条件下，应考虑减小焊缝截面积，尽可能采用较小的坡口的角度和间隙尺寸。

3.1.5 施工方法

在非必要连续焊的结构，可采用变形较小的断续焊方式。煅烧机中部箱体角接部位如设计加强板等结构的，焊接时可采用间断焊接法。另外，需要板面拼接工序的部分组件，由于中部箱体所用板材型号呈现过渡性特点，即具有一定的薄板特性，可以根据实际需要尝试采用预拉伸法、等效降低热输入等，均可有效地降低焊接残余应力，控制焊接变形。

3.2 设备制造过程的人为因素

3.2.1 工人技术水平

焊接工作是一项专业性极强的技术工种，对于煅烧机生产制造人员，应具备国家规定的职业资格，在煅烧机箱体的焊接工作中，应了解煅烧机整体结构特点，尤其是对相关组件焊后变形特点应有足够的预见性，在实际施工中能准确掌握坡口的大小，自主掌握焊缝数量和焊层深浅，灵活掌握焊接能量输入，优化焊接顺序，在保证焊接质量前提下适当提高焊接效率。除了具备较好的单人施工能力以外，也应具备团队观念，协同施工素养，如煅烧机某箱体板面为了控制焊接变形量，需要两侧焊接工作同时对称施工，在此情况下，良好的团队协作意识，也是控制煅烧机箱体组件焊接变形的一大利器。

3.2.2 生产管理影响

煅烧机中部箱体组件变形的控制是一个由生产管理牵头的系统工作，针对煅烧机的制造工艺特点，对人员进行有针对性的培训考核，其次根据煅烧机不同结构位置和部件的焊接难易程度、焊后变形发生的概率大小，合理的分配人员安排，做到人尽其用；生产管理方面还要主导刚性工艺夹具设计工作，引入行业内先进的焊接工艺和工艺装备，实践证明自动焊相对手工焊更容易实现对焊接质量的过程控制；鼓励焊接施工人员针对煅烧机组件变形提出新点子、新办法，形成积极向上的经验交流气氛等。最终目的是结合生产现场实际，建立一套能够对焊接质量检测和覆盖的全程覆盖的保障体系，最大程度抵消人员因素导致的焊接变形偏差。

3.2.3 煅烧机整机安装误差

石膏煅烧机安装工作是指大型吊装车辆将设备整机放置于配套的钢结构架体平台之上，作为建筑石膏粉生产线的功能主机之一完成设备的就位。煅烧机中部箱体是整个设备就位后最终承力单元，与之配合的钢结构承重平台如果存在安装误差（如水平度等），会导致设备支腿受力不均，这种不均匀的受力也会经支腿传导至中部箱体，造成煅烧机中部箱体板面的外力受迫变形。除了钢结构施工造成的尺寸误差以外，后续辅助工作，比如支腿焊接位置的误差也会造成受力不均现象的发生，使煅烧机中部箱体板面变

形进一步加剧。

基于以上若干因素, 煅烧机的安装工作质量是控制其变形重要步骤之一, 对于吊装车辆操作人员而言, 除了具备国家规定的从业资质以外, 也应对石膏煅烧机的结构特点、重心分布等有所了解, 设备安装人员要具备石膏粉生产线必要专业知识, 在安装准备工作中仔细核验钢架结构的安装精度, 确认安装误差满足吊装要求, 施工过程中与吊装车辆操作人员紧密配合, 保证石膏煅烧设备准确就位, 防止煅烧机中部箱体出现受迫变形。

3.2.4 从设计源头统筹考虑控制变形

从机械设计初始阶段就应该考虑优化焊缝布置, 防止图纸中焊缝的布置与工艺性不匹配而导致的焊接变形。设计人员应当有意识的使箱体相应板面焊缝的布置与板面截面中性轴对称或接近; 其次, 对于主要结构的关键性焊缝, 通过必要强度计算, 在满足要求前提下尽可能减小的所需的焊脚尺寸, 适当缩短焊缝长度。在此基础上完善组件的制造工艺方案, 避免焊缝交叉, 或布置过于集中; 再次, 机械设计人员尽可能统筹考虑板材下料外形或者从结构形式上减少焊缝数量, 如有必要, 将各组件单元分为若干小部件或将构件分段, 使焊接变形分散在每个部件上。

对于焊接组件因薄板特性导致的局部变形, 可以采用必要的矫正工艺予以矫正, 但对于组件结构的整体变形, 如纵向和横向收缩, 若导致总尺寸缩小, 只能通过下料或装配时预放余量来补偿, 补偿余量的预估以及分配工作同样需要机械设计人员在设计阶段统筹兼顾。

3.2.5 给予重点结构必要的加固措施应对变形

流化煅烧机的工作机制本质是一种专用换热装置, 其换热功能的核心是若干数量的换热管排, 如前文所述, 换热管排的安装定位基准为箱体板面预先加工好的等距均布孔系, 由于换热管排是高温、承压组件, 换热管排因箱体板面变形而发生的有害位移, 会带来安全上的隐患, 除了在生产制造过程中采取必要工艺手段控制变形以外, 仍需额外设计其他加固措施, 使核心、关键位置多一层应对变形危害的措施。

可以针对板面的薄板特性, 整体采用更大厚度单位的板材, 但原始结构和工艺需要调整; 也可以采用局部加固方式, 即在需预防部位焊接筋格加固, 防范变形危害; 另外也可以考虑在板面定位孔系位置焊接敷盖厚度大于等于 20mm 厚板, 在厚板上机械加工与原板面定位孔系重合的工艺通孔, 该方案避免了更换板材型号带来的设计调整, 也减少了焊接筋格的焊接量, 其最大优点在于提高了换热管排装配定位基准的刚性, 因为根据安装现场制定的吊装方案, 在某些特殊条件下, 吊装过程中钢丝绳会对换热排管的集汽管造成压迫, 同样会引起换热管排的有害位移, 因此在板材定位孔处敷盖厚板的加强方案, 同时解决了箱体组件关键位置的焊接变形和受迫变形。

3.2.6 不可控变形的矫正

不可控变形是指煅烧机在生产制造过程中充分考虑了

已知各种变形因素以及采取了防治措施后, 设备在生产现场或者安装现场就位后仍然发生的变形, 其原因有可能是板材材质非标准, 吊装受力不规范, 季节温差等不可控因素影响。

3.2.6.1 生产现场的矫正

煅烧机设备在生产制造过程中, 下一道工序在开始之前应仔细核验上一道工序制造几何尺寸, 如出现较大偏差, 应首先考虑设备焊接变形的可能。煅烧机中部箱体组件变形的矫正, 可考虑设计开发矫正工艺装备, 根据主要生产厂家的经验, 矫正工装可设计为矩形框架结构, 将煅烧机箱体组件置于该工艺装备中, 可实现对焊接变形的拉伸、压平等矫正处置。煅烧机组件变形在生产现场的矫正条件相比安装现场, 具备良好的客观条件, 首先生产现场必要的工具比较齐备, 其次由于变形时间短且变形量有限或者轻微, 矫正工作劳动量较小。但焊接变形幅度会随着时间的不断增加, 因此应尽量在生产现场检查并消除设备变形的趋势, 对变形位置及时矫正或者加固, 减小现场安装工作量, 也为现场创造良好的安装条件。

3.2.6.2 安装现场的矫正

设备就位后的变形, 矫正前应先确定变形位置, 一般情况下, 对于非支座受力两侧箱体板面出现的变形, 外凸面可轻微矫正或不做矫正; 对于承力支座所在两侧箱体板面, 以支座支撑平面为界, 平面以上内凹变形, 可在变形面处焊接拉环, 现场可采用倒链等工具, 一侧固定一侧勾连拉环将内凹面矫正, 矫正完成后应在原变形处用适当型号槽钢或角钢焊接加强筋网格; 支撑平面以下变形处理原则与非支座受力两侧板面变形的处理方式遵循相同处理原则, 同时应注意避免采用锤打等冲击方式修正, 以防造成结构损坏。

由于焊接变形幅度无法精确定量计算, 变形位置也无法提前预知, 同时煅烧机箱体组件的几何尺寸相对较大, 其焊接变形也无法像其他种类焊接组件一样通过退火等热处理方式去应力达到抑制焊接变形的目的, 因此对于煅烧机箱体组件的变形应早发现, 早处置, 生产现场处置为主, 安装现场矫正为辅。

4 结语

在煅烧机中部箱体组件的焊接过程中, 与焊接变形相关的影响因素是相互叠加影响的, 并不是单独作用的。因此只有从生产、管理、技术、施工、安装等全方面分析、评估影响焊接变形的各种作用机理, 掌握其影响发生规律, 才能有的放矢并采取合理有效的措施手段来控制焊接变形, 使石膏流化煅烧装备创造最大化经济效益。

参考文献:

- [1] 赵云龙. 建筑石膏生产与应用技术 [M]. 北京: 中国建材工业出版社, 2019.
- [2] 夏改锋. 机械焊接工艺探索与实践分析 [J]. 工程管理前沿, 2020(9):1-3.
- [3] 王志华, 杜双明. 焊接工艺 [M]. 5 版. 北京: 北京师范大学出版社, 2011.