

[开关设备]

高压电气壳体翻插结构一体化预孔设计与实现

文/中国西电电气股份有限公司 吴 双
西安西电开关电气有限公司 刘 楠 谭茜茜 贾昕宇 赵向苹 仵文辉 夏永喜

由于紧凑型电站布置的要求，对于高压电气用壳体的加工提出了更高的要求。通过插接与翻边复合结构的一体化预孔设计、翻边模具的设计及壳体强度等试验验证，实现了翻插一体化的加工制造，为壳体加工提供了一种全新的、可靠的加工方法。

气体绝缘金属封闭高压开关设备以 SF_6 气体为绝缘和灭弧介质，对 SF_6 气体泄漏率、电气绝缘距离有严格的要求，因而装载 SF_6 气体的容器（即壳体）制造非常重要和关键。其侧壁常常要留有用于所需管路连接的支管法兰，目前国内壳体与支管法兰广泛采用的连接方式有两种：一种采用马鞍形开孔焊接法兰；另一种采用翻边技术实现主筒与法兰的连接。

采用马鞍形开孔焊接，加工工序简单；采用翻边技术，翻边口具有良好的弧形成型结构，较马鞍形插接结构电场分布更好，焊接壳体外观良好。

近年来由于高压、特高压电站布置趋于紧凑型设计，对于壳体制造也有了更高的要求，以某特高压工程为例，由于电站紧凑型的需求，需将原方案与断路器水平布置的合闸电阻和电阻开关改为上置，与断路器叠放，即将断路器上4个翻边口支管两两对穿的 180° 布置，变化为两两 90° 夹角布置，但是由于翻边比大，改为 90° 翻边后，两个翻边孔会有部分重合、干涉，如图1所示。为实现该结构，且综合翻边结构的优良电场及插接结构加工的便捷、高效性，本文进行翻边和插接结构的复合结构的工艺研究。

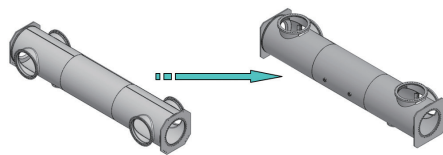


图1 两种壳体法兰空间位置的变化

研究技术准备

1. 研究对象

本研究是依托某特高压工程进行的，研究壳体如图2所示，板材为20铝板5083-O，局部翻边尺寸为 $\phi 1\ 350/\phi 940$ 。

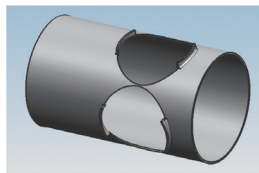


图2 壳体简图

2. 研究方法

进行翻插结构预孔的设计，实现特殊预孔的加工，进行局部翻边，并对焊接成品进行耐压试验考核。

过程与分析

1. 翻边孔干涉模拟

本试验由于板材厚度大，翻边尺寸大，且两

个开孔为90°夹角会产生干涉。图3即为两边孔的翻边干涉模拟结果,红色区域为两孔的干涉区域,因此为既保证电场,又解决干涉问题,本文进行局部翻边,而要实现局部翻边,预孔的设计及翻边模具的设计将成为亟待解决的问题。

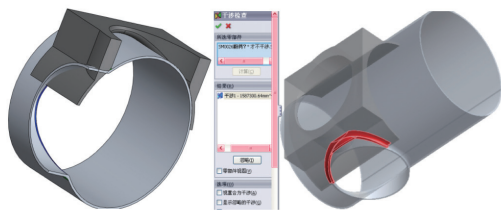


图3 翻边孔干涉模拟

2. 预孔尺寸理论计算

局部翻边预孔设计是实现翻边工艺的核心之一,预孔设计的合理性将直接影响翻边的效果。由于该翻边口为局部翻边,不能完全按照常规翻边预孔进行设计,必须综合考虑翻边与插接。对于翻边预孔计算,根据经验预孔形状为椭圆,椭圆长短轴计算近似采用等线长理论,认为翻边工艺与弯曲工艺近似,长轴可按照圆孔翻边计算为

$$d_{\text{长轴}} = d_m + 0.86r + 1.43t - 2h$$

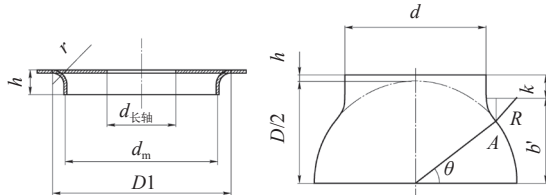


图4 翻边预孔计算图

对于短轴:假设短轴起点为A,则 $x = \frac{D}{2\cos\theta}$;
 $y = \frac{D}{2\sin\theta}$,根据图4,得出计算公式为

$$h + \frac{D}{2} = k + b'$$

$$b' = \sqrt{R^2 - \left(R - \left(x - \frac{d}{2}\right)\right)^2 + y^2}$$

$$k = h + \frac{D}{2} - \sqrt{R^2 - \left[R - \left(x - \frac{d}{2}\right)\right]^2} - y$$

因此变形部分长度为

$$k + R \frac{D}{180} \arcsin \frac{\sqrt{R^2 - \left[R - \left(x - \frac{d}{2}\right)\right]^2}}{D}$$

因此

$$D_{\text{短轴}} = D \frac{\pi(90 - \theta)}{180} - 2\left(k + R \frac{D}{180} \arcsin \frac{\sqrt{R^2 - \left[R - \left(x - \frac{d}{2}\right)\right]^2}}{R}\right)$$

当筒体直径与翻边直径确定则 θ 确定,即可得出短轴尺寸。

对于插接预孔,其投影在壳体中心应为圆形,插接孔半径 $d/2$,任意点A(x_1, y_1),则其坐标为 $x_1 = d/2\cos\alpha$, $y_1 = d/2\sin\alpha$,该点在壳体上X坐标不变,Y坐标为 $D/2\beta$,最终确定该点在壳体表面轨迹为

$$\begin{cases} x = \frac{d}{2\cos\alpha} \\ y = \frac{D}{2} \arcsin\left(\frac{d}{D} \sin\alpha\right) \end{cases} \quad \alpha \in [0, 2\pi]$$

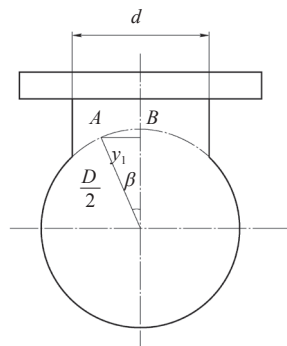


图5 插接孔计算图

3. 预孔实现及优化

根据上述预孔理论,确定翻边、插接部分预孔形状,并调整插接与过渡部分的形状、尺寸,不断优化,最终得到最优预孔尺寸。复合预孔示意图如图6所示。以下即为先后三次预孔设计的优化改进过程。

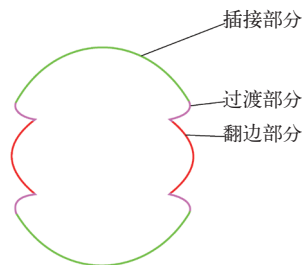
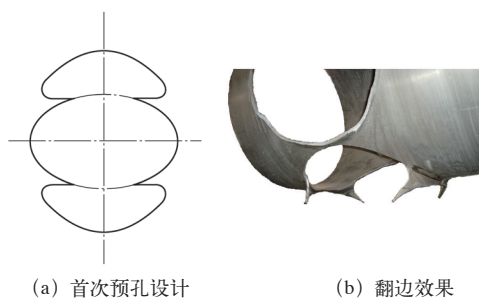


图6 复合预孔示意图

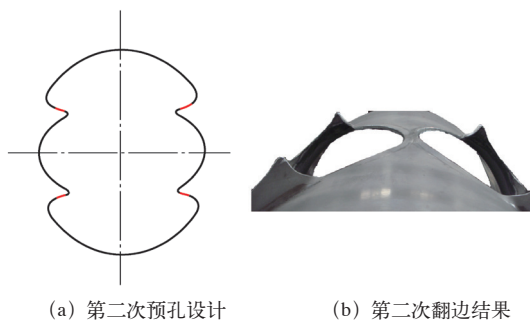
图7为首次预孔设计图及首次现场试制结果,从现场的试制结果来看,翻边口的成型效果不理想,翻边四角严重外伸。这主要是由于首次试验时,预孔设计未充分考虑局部异形翻边与通常的整体翻边有本质不同:整体翻边是在内外模具共同约束下的强制塑性变形;而局部异形翻边的模具对塑性变形是部分约束,沿着内外模的周围缝隙,塑性变形自由流动。



(a) 首次预孔设计 (b) 翻边效果

图7 首次预孔设计及翻边结果

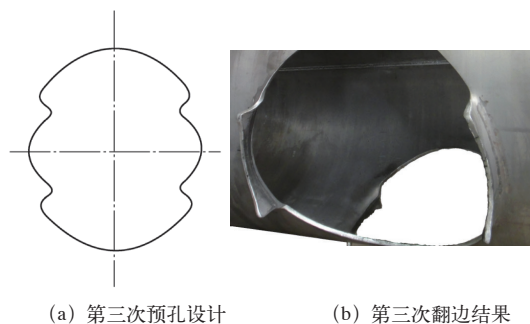
根据第一次的试制结果，为了改变四角外伸的情况，主要调整插接部分与过渡连接部分端点的位置，即连接过渡段红线两短点的位置。且通过制图软件测量对比确定，图8为第二次现场翻边情况，从现场情况来看，本次翻边效果有明显改善。



(a) 第二次预孔设计 (b) 第二次翻边结果

图8 第二次预孔设计及翻边结果

第三次优化仍然沿袭前面的设计思路，优化插接部分与连接过渡部分，主要进行翻边肩部 R 尖角的改善，且本次改善改变了从翻边的效果较前两次结果，有了进一步的改善。如图9所示。



(a) 第三次预孔设计 (b) 第三次翻边结果

图9 第三次预孔设计及翻边结果

4. 模具设计及优化

翻边模具设计也是至关重要的，在前两次的试验中，采用常规翻边模具进行，但由于凸模是完整的工作带，在翻边时会造成不翻边的插接和连接过渡部分的额外变形，如图10所示。因此本次模具设计在原有的模具基础上进行改进，综合

考虑翻边口的尺寸、翻边过程材料收缩率以及原模具翻边后的实际尺寸，将凸模完整工作带改为局部工作带，图11即为凸模改进后的筒体翻边效果图。

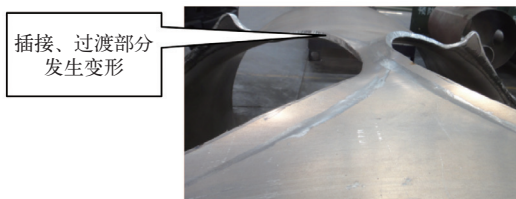


图10 翻边变形



图11 优化后模具

5. 焊接壳体强度考核

采用上述方法焊接的壳体，按照压力容器标准规定进行水压破坏试验检测，以全面验证壳体强度和内在质量。水压破坏试验按照图样及标准进行，例行试验为1.0 MPa，破坏水压试验为2.7 MPa，通过试验筒体达到2.7 MPa未见有泄漏、变形及异常响声等，因此该种工艺加工的壳体其耐压能力符合图样及标准要求。

6. 推广应用

该项目是应某特高压工程设计的一种特殊的壳体，目前已经使用到现场如图12所示。后续还将有多个工程使用该种工艺生产的壳体，且该种工艺加工的壳体为紧凑型的电站布置提供一种全新的布置方式，可以大大节省占地面积。



图12 工程应用

结束语

采用局部异形翻边与局部插接的复合连接加工的壳体尺寸、强度等满足焊接壳体加工及使用寿命要求，该种复合连接结构，解决了支管距离过近产生的大比例翻边干涉问题，达到了优化电场性能目的，为紧凑型电站布置形式提供一种全新的设计方式。该种工艺目前已经应用于近10个工程，运行效果良好。EA

(收稿日期：2019.10.08)

(编辑：朱金凤)