

GIS 分支母线骑坐式焊接接头结构分析及应满足的技术要求

刘建军, 卞超, 张建国, 陈大兵

(江苏省电力公司电力科学研究院, 南京 211103)

摘要: 结合一例 GIS 主母线与分支母线焊接接头断裂故障案例, 通过受力状况分析, 对焊接接头在短路电力作用时的结构强度进行了力学核算, 并通过设计的模型对焊接接头部位的强度性能进行了验证。笔者从材料力学和焊接结构两方面对骑坐式角焊缝结构的安全性及科学性进行了分析, 指出采用焊接方式连接 GIS 母线与分支母线时应采用开单边坡口的结构, 在结构设计时必须明确焊接件相贯线的加工和装配精度, 并校核电动力的冲击载荷, 设计的焊接工艺应进行评定试验验证。

关键词: GIS; 焊接接头; 结构分析; 技术要求

中图分类号: TM24 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-1609(2012)07-0109-05

Mechanics Analysis and Technical Requirements of Welding T-joint on GIS's Branch Bus

LIU Jian-jun, BIAN Chao, ZHANG Jian-guo, CHEN Da-bing

(Jiangsu Electric Power Company Research Institute, Nanjing 211103, China)

Abstract: The mechanic property of main bus and branch bus's welding T-joint in GIS equipment is analyzed based on a case of welding joint fracture. A model is designed to validate the welding joint's intensity under the effect of short circuit electrodynamic force. The security and rationality of welding T-joint is analyzed from metal material mechanical property and welding structure. Single groove is needful in the structure design and processing of T-jointing main bus and branch bus using welding in GIS, machining precision and assembly accuracy of line of intersection should be defined and shock load of short circuit electrodynamic force should be checked. The qualification of welding procedure is a requirement rule for main bus and branch bus's welding T-joint in GIS.

Key words: GIS; welding joint; mechanics analysis; technical requirements

0 引言

在 GIS 结构设计中, 有些厂家将分支母线与主母线之间采用焊接的方式进行连接, 形成如图 1 所示的结构。此种采用骑坐式角焊缝连接的焊接结构, 焊缝形状为相贯线, 多用于承受轴向拉、压的场合, 在承受弯曲及扭转的场合较少应用。近期, 在一起 GIS 内部故障中, 就出现了一例此种结构的焊接连接方式。GIS 分支母线与主母线的焊接接头在外力的作用下, 沿熔合线断裂, 见图 2。

骑坐式角焊缝的焊接结构在 GIS 母线连接方式中属于一种新的形式^[1-6]。在故障分析的过程中发现

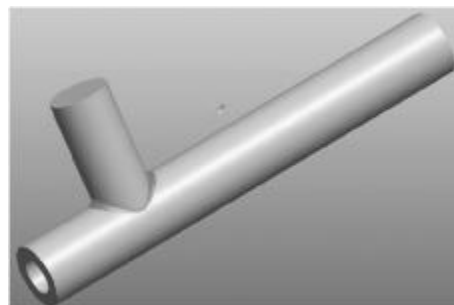


图 1 分支母线与主母线焊接结构示意图

Fig. 1 Structure sketch of welding T-joint

制造厂家对此种焊接结构的设计缺乏专业的技术研究, 设计施工前未进行充分的技术论证, 对于焊接接

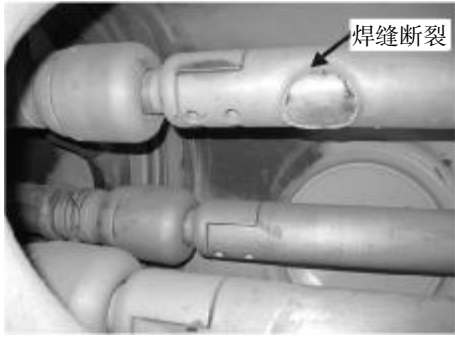


图 2 分支母线与主母线焊接接头处断裂

Fig. 2 Fracture of welding T-joint

头成品也未进行相关的力学性能试验,致使产品质量缺乏充分的技术保证。笔者结合实例从材料力学和焊接结构两方面对骑坐式角焊缝结构的安全性与科学性进行了分析,同时提出了相应的技术要求。

1 结构受力分析

该案例结构在正常运行工况下,主母线与分支母线均受绝缘盆子或触头的支撑,焊接接头部位主要起通路作用,受力很小,仅在发生短路电流的情况下,才会承受较大的电动力。

各分支母线承受的电动力包括分支母线受主母线影响的电动力和分支母线之间的电动力,电动力合力 P 即为结构承受的力,力的方向垂直于分支母线的轴向。在这种情况下,焊接接头部位实际上承受一个偏心冲击导致的弯曲,见图 3 简化示意。

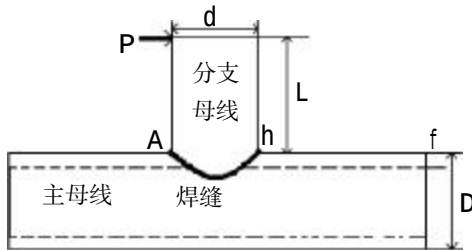


图 3 分支母线受力示意图

Fig. 3 Force analysis sketch of branch bus

2 结构强度校核

发生短路故障时,分支母线承受由短路电流导致的电动力冲击作用。材料受冲击载荷作用时,其屈服强度和抗拉强度都会有所提高,但其缺口敏感性却增大,通常仍采用静载作用下材料的许用应力来建立强度条件。动载荷强度计算比静载荷强度计算复杂的多,通常是采用一个动载系数后按静载荷进行计算,并相应提高安全系数^[7-10]。

$$|\sigma_d|_{\max} = K_d |\sigma_j|_{\max} \leq [\sigma'] \quad (1)$$

式(1)中: K_d 为动载系数; $[\sigma']$ 为焊接接头处材料许用拉应力。

因此,要计算焊接接头在冲击作用下的应力状况,需要计算静载应力 σ_j 和动载系数 K_d 。

以该案例中的实际数据进行强度校核,经计算发生 50 kA 短路电流时 B 相分支母线承受电动力最大,为 $P=4\ 180.8\text{ N}^{[1]}$ 。已知主母线直径 $D=100\text{ mm}$,主母线厚度 $t=25\text{ mm}$,B 相分支母线直径 $d=100\text{ mm}$,集中力位置距焊缝距离 $L=233.5\text{ mm}$,肩部焊脚尺寸 $h_f=10\text{ mm}$,焊缝计算厚度 $h_e'=10/\sqrt{2}=7\text{ mm}$ (考虑到焊脚尺寸的不均匀性,取平均有效计算厚度 $h_e=5\text{ mm}$)。结构材质为铝合金 6063,依据标准,母材抗拉强度 $R_m=205\text{ MPa}$,屈服强度 $R_e=170\text{ MPa}^{[12]}$ 。

2.1 静载荷应力计算

在力 P 的作用下,焊缝截面承受由 P 导致的弯矩 $M(M=P \cdot L)$ 产生的垂直于焊缝截面的弯曲正应力分量 σ ,以及由 P 产生的平行于焊缝截面的剪切应力分量 τ 。对于焊缝截面,通常采用正应力 σ 和剪切应力 τ 的合力 $\sigma_{\text{折}}$ 来进行计算。即静载荷应力 $\sigma_j=\sigma_{\text{折}}$ 。

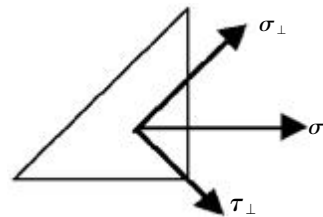
根据国际焊接学会推荐的角焊缝强度计算公式,由电动力 P 产生的焊缝截面的合力为

$$\sigma_{\text{折}} = \beta \cdot \sqrt{\sigma_{\perp}^2 + 3(\tau_{\perp}^2 + \tau_{\parallel}^2)} \quad (2)$$

式(2)中: β 为材料屈服强度系数,当 $R_e=170\text{ MPa}$ 时, $\beta=0.67$; $\sigma_{\perp}$ 为垂直作用于计算断面的正应力; $\tau_{\perp}$ 为计算断面上与焊缝垂直的剪切应力; $\tau_{\parallel}$ 为计算断面上与焊缝平行的剪切应力。

由短路电动力 P 导致的弯矩 $M(M=P \cdot L)$ 产生的垂直于焊接截面的应力分量 $\sigma = \frac{4 \cdot P \cdot L \cdot (r+h_e)}{\pi \cdot [(r+h_e)^4 - r^4]} = 23.58\text{ MPa}$ 。

将 σ 沿图 3 所示 A 位置分解为垂直于焊缝计算截面的拉应力 $\sigma_{\perp}$ 和焊缝计算截面上垂直于焊缝方向的剪切应力 $\tau_{\perp}$,见图 4,且 $\sigma_{\perp} = \tau_{\perp} = \frac{\sqrt{2}}{2} \sigma = 23.5 \times 0.71 = 16.74\text{ MPa}$ 。

图 4 $\sigma_{\perp}$ 和 $\tau_{\perp}$ Fig. 4 $\sigma_{\perp}$ and $\tau_{\perp}$

由 P 产生的计算断面上与焊缝平行的最大剪切应力 $\tau_{\parallel} = \frac{2 \cdot P}{l_w \cdot h_e}$ 。由于焊缝计算长度 l_w 取焊缝的实

际长度(相贯线的长度) $l_w=3.64 \cdot d$, 则 $\tau_{\parallel} = \frac{2 \times 4180.8}{3.64 \times 100 \times 5} =$

4.60 MPa。

焊缝截面的合力 $\sigma_{折} = \beta \cdot \sqrt{\sigma_{\perp}^2 + 3(\tau_{\perp}^2 + \tau_{\parallel}^2)} = 23.06$ MPa。

2.2 冲击载荷应力计算

短路电流的电动力是瞬时产生的, 相当于突然加载在图 3 所示力 P 的位置, 可以近似认为重量为 P 的质点在高度为 $h=0$ 时的自由落体冲击, 动载系数的计算式为^[13]

$$K_d = 1 + \sqrt{1 + \frac{2h}{\delta_j}} \quad (3)$$

当 $h=0$ 时, $K_d=2$, $\sigma_d = K_d \cdot \sigma_j = 46.12$ MPa。

2.3 安全系数计算

依据《DL/T 754—2001 铝母线焊接技术规程》要求, 焊接接头的强度应不低于母材强度的 60%, 因此, 取焊接接头处的失效应力为 60% 的母材失效应力, 即有 $\sigma' = 0.6 \times \sigma$ 。

焊接接头设计安全系数 n 计算为

$$n = \frac{\text{失效应力 } \sigma'}{\text{计算工作应力 } \sigma_d} = \frac{0.6 \times 170}{46.12} = 2.2$$

该结构设计要求安全系数应不小于 2, 可见该焊接接头设计的安全系数满足要求。

需要注意的是, 在计算安全系数时, 前提是假定了该焊接接头性能优良, 强度可以满足母材强度 60% 的要求。实际情况中, 焊接质量会受到很多因素的影响, 因此, 有必要对实际的焊接质量进行试验验证, 确信接头的焊接质量可以满足标准要求。

3 焊接质量验证

焊接工艺设计与实施过程中, 焊接质量的验证是非常重要的一个环节^[14-15]。由于焊接质量受焊接材料、焊接方法、焊接电流电压、焊接速度、保护气体的流速、操作人员的技能等因素影响巨大, 因而在焊接工艺确定前, 都需要按照设计的工艺参数进行预试验, 将预试验的样品进行力学性能试验, 用以确认设计的焊接工艺可以保证焊接质量, 这个过程通常称为焊接工艺评定。只有经过评定合格的工艺才可以被用于设备的批量焊接生产。国家和相关行业标准中已对特定设备的焊接工艺评定的流程和内容有较为明确的要求, 如锅炉、压力容器、钢结构、电气设备的铝母线等。

在该案例中, 由于设备制造方未进行相关的焊接工艺评定工作, 以至于焊接质量及焊接接头的性能存在很大的不确定性。由于设备已经投运, 而且焊接接头出现了断裂的情况, 所以更有必要对此结构

进行焊接质量的验证。

结合标准要求和验证的等效性, 设计了如图 5 所示的焊接接头进行拉伸试验, 通过检验拉断力来评判焊接接头的性能是否达到了标准规定的母线强度的 60% 要求。

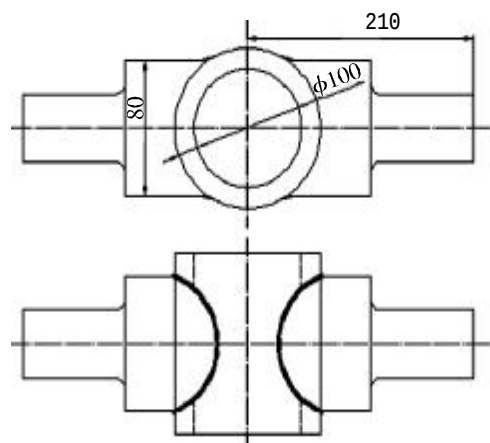


图 5 焊接接头质量验证试样

Fig. 5 Quality validate model of welded joint

焊接接头的截面应力 $\sigma = \frac{N}{h_e \cdot l_w}$; 焊缝计算长度 (相贯线长度) $l_w = 3.53 \cdot d$; 焊缝平均有效计算厚度 h_e 同前, 取 5 mm。试验力 $N = \sigma \cdot h_e \cdot 3.53 \cdot d = 173.68$ kN。

因此, 当试验力大于等于 173.68 kN 时, 可以认为焊接接头的强度满足母材 60% 强度的要求, 同时也保证了安全系数的要求。

4 焊接接头结构分析

焊接接头的设计, 一方面必须满足力学要求, 如强度、刚度等, 另一方面是焊接结构的合理性和科学性, 比如焊接接头的焊脚尺寸、坡口形式、应力集中状况等。优良的焊脚尺寸和坡口形式不仅可以保证强度、刚度等力学要求, 同时也有助于减小结构的应力集中状况, 提高焊接工作的经济性^[16-17]。

4.1 坡口形式

在 T 形角焊缝中, 通常有图 6 所示的 3 种形式, 从结构受力和焊接经济性考虑, 优先选用开坡口的 (b)、(c) 结构形式, 不开坡口的贴脚焊 (a) 在 T 型接头中一般不推荐使用, 只有在受力很小的联系焊缝中才用到。电力行业标准对角焊缝的坡口形式也做类似参考规定^[18], 见表 1。

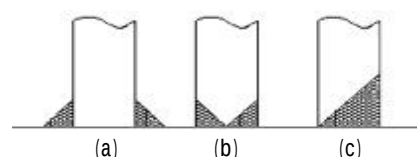


图 6 T 形接头角焊缝坡口形式

Fig. 6 Groove type of welding T-joint

表1 角接头焊缝坡口形式
Tab.1 Groove type of corner joint

图形	焊件厚度 δ/mm
	3~12
	> 10
	>15

4.2 焊脚尺寸

无论是承受载荷的工作焊缝还是承力很小的联系焊缝,为减小焊脚部位的应力集中,相关规范(《焊接工程师手册》)对角焊缝的最小焊脚尺寸做了规定,如在焊件厚度在 19~38 mm 范围之内时,焊角尺寸的最小值为 8 mm;焊件厚度在 38~55 mm 范围之内时,焊角尺寸的最小值为 10 mm^[19]。

4.3 加工装配精度

焊接接头的成型质量不仅仅取决于焊接过程,焊件的加工及装配精度也会直接影响到焊接接头的强度和焊接成型质量。如相贯线的加工精度、不等径相贯时平台区的处理、装配精度、焊接对口间隙等都会影响到焊接施工以及焊缝熔覆金属量。焊接接头中的夹渣、未熔合、未焊透、焊缝焊脚尺寸超标、焊接残余应力集中往往也与不合格焊件加工和装配精度有关。

4.4 案例分析

该结构主母线为直径 100 mm、壁厚 25 mm 的圆管,分支母线为直径 100 mm(或 80 mm)的实芯圆棒,根据相关技术资料推荐的焊接接头坡口形式和焊脚尺寸,应选用在分支母线侧开单边坡口的角焊缝形式,焊脚尺寸应在 10~13 mm(考虑相贯线的影响)为较为科学的焊接结构形式。在该案例中,制造方选择了不开坡口的贴角焊,焊脚尺寸设计值为 10 mm,而产品的实际值并未达到 10 mm,这说明制造方在焊接结构设计、焊件加工装配以及焊接实施的环节上都存在不规范,从而导致了焊接接头在承受外力时的安全性不足,出现失效。

5 结语

GIS 主母线与分支母线之间的焊接结构关乎整

个设备的安全性,GIS 在投运时,不可避免地会出现短路的情况,而承受短路电流冲击之后的焊接接头又无法进行检验,因而要求焊接接头的安全性在设计和制造时要充分得到保证。结合实例的分析,可以明确采用骑坐式焊接接头连接主母线和分支母线时,应满足以下要求:

1)焊接接头应采用开单边坡口的结构,保证一定的熔深,不推荐采用不开坡口的贴脚焊形式;

2)焊缝的焊脚尺寸应在满足最小要求的情况下通过强度校核予以确定,强度校核时需要考虑电动力的冲击动载,并相应提高安全系数;

3)焊接接头部位材料的许用应力或失效应力应通过工艺评定试验进行验证,以保证实际的焊接接头成型质量;

4)骑坐式焊接件相贯线的加工精度、焊接接头装配尺寸等参数应在结构设计时予以明确,并在加工装配时进行过程监控,良好的加工装配精度是焊接成型质量的基本要素之一,必须在零件图和部件图图样或技术要求中做出明确要求,并严格检验以保证部件质量;

5)由于 GIS 母线与分支母线的骑坐式焊接接头在焊接成型后难以进行内部焊缝质量的无损检测,因而在其焊接结构设计、焊件加工装配、焊接工艺评定试验以及焊接操作等各个环节中做到结构设计合理、工装尺寸精准、工艺评定有效、操作严守规程是保证此种焊接接头安全性的必要举措。

参考文献:

- [1] 陈飞. GIS 设备的发展和应用研究[D]. 杭州:浙江大学, 2007.
CHEN Fei. Investigation of GIS development and application[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2007.
- [2] 孙永恒, 张铎, 孟维东, 等. 新沈高 1 100 kV GIS 的结构及计算[J]. 高压电器, 2007, 41(5): 354-357.
SUN Yong-heng, ZHANG Duo, MENG Wei-dong, et al. Introduction of 1 100 kV GIS of Shenyang High Voltage Switchgear Co., Ltd.[J]. High Voltage Apparatus, 2007, 41(5): 354-357.
- [3] 夏文, 胡旭辉. 550 kV 气体绝缘金属封闭组合电器及其应用[J]. 高压电器, 2010, 46(12): 89-92.
XIA Wen, HU Xu-hui. 550 kV hybrid gas insulated switchgear and its application[J]. High Voltage Apparatus, 2010, 46(12): 89-92.
- [4] 张猛, 申春红, 张库娃, 等. 智能化 GIS 的研究[J]. 高压电器, 2011, 47(3): 6-11.
ZHANG Meng, SHEN Chun-hong, ZHANG Ku-wa, et al. Research of intelligent GIS[J]. High Voltage Apparatus, 2011, 47(3): 6-11.

- [5] 张小勇, 贾涛, 王韵. 特高压电器设备绝缘试验技术研究[J]. 高压电器, 2007, 43(2):106-108.
ZHANG Xiao-yong, JIA Tao, WANG Yun. Study on insulation test techniques for ultra-high-voltage equipment [J]. High Voltage Apparatus, 2007, 43(2):106-108.
- [6] 钟振蛟. 国产高压交流隔离开关的发展和向特高压的跨越[J]. 高压电器, 2007, 43(4):265-269.
ZHONG Zhen-jiao. Discussion of development of EHV and UHV disconnector in China[J]. High Voltage Apparatus, 2007, 43(4):265-269.
- [7] 马少健, 陈炳辰. 冲击力的测定及其数学建模研究[J]. 广西大学学报, 2001(1):63-65.
MA Shao-jian, CHEN Bing-chen. Determination and modeling of impact force[J]. Journal of Guangxi University, 2001(1):63-65.
- [8] 叶四桥, 陈洪凯, 唐红梅. 落石冲击力计算方法[J]. 中国铁道科学, 2010, 31(6):56-62.
YE Si-qiao, CHEN Hong-kai, TANG Hong-mei. The calculation method for the impact force of the rock fall[J]. China Railway Science, 2010, 31(6):56-62.
- [9] 叶四桥, 陈洪凯, 唐红梅. 落石冲击力计算方法的比较研究[J]. 水文地质工程地质, 2010, 37(2):59-64.
YE Si-qiao, CHEN Hong-kai, TANG Hong-mei. Comparative research on impact force calculation methods for rock falls[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2010, 37(2):59-64.
- [10] 杨雪春, 卢怀亮, 黄树槐, 等. 螺栓的冲击载荷分析[J]. 机械强度, 2003, 33(6):628-631.
YANG Xue-chun, LU Huai-liang, HUANG Shu-huai, et al. Analysis of impact load on bolts[J]. Journal of Mechanical Strength, 2003, 33(6):628-631.
- [11] 徐国政. 高压断路器原理和应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2000.
XU Guo-zheng. High voltage circuit breaker principles and applications [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2000.
- [12] GB/T 3880.2—2006. 一般工业用铝及铝合金板、带材 第2部分: 力学性能[S].
GB/T 3880.2—2006. General industrial aluminum and aluminum alloy plate, with the materials-Part 2: Mechanical properties[S].
- [13] 梁治明. 材料力学[M]. 北京: 高等教育出版社, 1995.
LIANG Zhi-ming. Mechanics of materials [M]. Beijing: Higher Education Press, 1995.
- [14] GB 50586—2010. 铝母线焊接工程施工及验收规范[S].
GB 50586—2010. Specification of aluminum bus welded construction and acceptance[S].
- [15] 张彦华, 夏凡, 段小雪. 焊接结构合于使用评定技术[J]. 航空制造技术, 2011(11):54-56.
ZHANG Yan-hua, XIA Fan, DUAN Xiao-xue. Fitness for service assessment of welded structures[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2011(11): 54-56.
- [16] GB/T 22086—2008. 铝及铝合金弧焊推荐工艺[S].
GB/T 22086—2008. Recommended process for aluminum and aluminum arc welding[S].
- [17] 黎兴文, 黎敏杰, 谢炳源, 等. 输变电钢结构焊评标准对比分析[J]. 广东电力传输技术, 2009(6):37-40.
LI Xing-wen, LI Min-jie, XIE Bing-yuan, et al. Contrast analysis of welding procedure qualification standards for manufacturing transmission and substation steel structures [J]. Guangdong Power Transmission Technology, 2009(6): 37-40.
- [18] DL/T 754—2001. 铝母线焊接技术规程[S].
DL/T 754—2001. Technical regulations aluminum bus welding[S].
- [19] 陈祝年. 焊接工程师手册[K]. 北京: 机械工业出版社, 2007.
CHEN Zhu-nian. Welding engineers' handbook[K]. Beijing: Mechanical Industry Press, 2007.

刘建军(1979-), 男, 汉族, 高级工程师, 从事电力设备材料性能分析及焊接专业工作。

简讯

国内首个风电输送 500 kV 变电站通过审批

近日, 通榆 500 kV 变电站及配套送出工程项目获国家发改委批复核准, 标志着通榆风电送出瓶颈问题将得到彻底解决。该变电站也将成为我国电网建设史上第一个由风电企业集资, 第一个专门用于风电输出的项目。

据了解, 通榆县 500 kV 变电站工程线路长度为 201 km, 涉及白城市、松原市、双辽市、四平市及内蒙古自治区的通榆市科左中旗等地。项目由吉林省电力公司、吉林省瞻榆风电资产经营管理有限公司共同投资建设。目前, 变电站主体建设已经基本完成, 正在进行设备的最后调试, 预计 2013 年 10 月前, 可完成全部建设任务并投产运行。