文章编号:1673-5005(2009)04-0103-04

非停输管道焊接修复极限压力设计

仝兴华^{1,2},田旺生^{1,3},薛世峰¹,曹宇光¹

(1. 中国石油大学 储运与建筑工程学院,山东东营 257061; 2. 山东大学 威海分校机电工程学院,山东 威海 264209;
 3. 海洋石油工程(青岛)有限公司,山东 青岛 266520)

摘要:打孔盗油管线在焊接修复过程中产生的局部高温使热源周边材料强度降低,因此在非停输状态下进行焊接可 能导致管道在内压作用下发生破裂事故。基于 ANSYS 有限元软件平台,对焊接修复过程中的温度场进行数值模拟, 并根据模拟结果,计算管道的有效壁厚,从而确定在非停输状态下焊接修复时管道所能承受的极限压力,并进一步 分析了焊接速度对极限压力的影响。结果表明,随着焊接速度的减小,管道承压能力降低。 关键词:焊接;输油管道;温度场;有效壁厚;极限压力

中图分类号:TG 402: TE 88 文献标识码:A

Determination of extreme pressure for in-service welding of pipelines under repair

TONG Xing-hua^{1,2}, TIAN Wang-sheng^{1,3}, XUE Shi-feng¹, CAO Yu-guang¹

College of Transport & Storage and Civil Engineering in China University of Petroleum, Dongying 257061, China;
 School of Mechanical & Electrical Engineering of Shandong University, Weihai 264209, China;
 Offshore Oil Engineering (Qingdao) Company Limited, Qingdao 266520, China)

Abstract: During the course of repairing drilled pipelines, local high-temperature generated by welding leads to strength degradation of the materials surrounding the heat source, and the in-service pipelines will blast if the internal pressure of the pipeline exceeds some pressure limit. Based on ANSYS, dynamic finite element numerical simulation of welding for in-service pipeline was carried out and the effective wall thickness was calculated according to the distribution of temperature field. Based on the effective wall thickness, the extreme pressure that pipelines could bear was determined. Also, the effects of welding speed on extreme pressure were discussed. The results show that the extreme pressure of pipelines decreases with the decrease of the welding speed. **Key words**: welding; oil transmission pipeline; temperature field; effective wall thickness; extreme pressure

一些不法分子在输油管线上打孔盗油,导致国 家财产损失,危及管道安全运营。对于被打孔的输 油管道,由于盗油孔穿透了管壁,通常只能采用焊接 的方法抢修。非停输状态下对盗油孔进行焊接修复 可以避免由于泄压停输造成的巨大损失,但非停输 状态下进行焊接容易出现两方面的问题:一是焊接 过程中的局部高温,使局部材料强度降低,从而导致 管道不能承受管内压力作用出现烧穿管壁现象,引 起油气泄漏和爆炸;二是管内油气的流动增加管壁 散热,易产生氢致裂纹,降低焊接接头的承载能 力⁽¹⁾。笔者对烧穿问题进行讨论,通过数值模拟分 析打孔盗油管道"扣帽子"焊接修复(用一段一端封 闭另一端开放的圆管将盗油分子焊接在管道上的盗 油阀封闭)过程中的温度场分布,通过强度等效确 定局部高温下管道的有效壁厚,设计非停输状态下 管道修复焊接时的管内极限压力,确保管道修复施 工的安全性。

1 焊接修复温度场数值模拟

1.1 数学模型

焊接传热过程属于典型的瞬态热传导问题,瞬 态温度场的场函数不仅是空间域的函数,而且还是

收稿日期:2009-01-02

作者简介: 仝兴华(1960 -), 男(汉族), 山东无棣人, 教授, 博士, 博士生导师, 主要从事油气储运管道强度方向的研究。

时间域的函数^[2]。基于能量守恒原理的三维瞬态 温度场控制方程为

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla (k \nabla T) + \rho Q, 在 \Omega 内$$

边界条件:
$$T = f(x, y, z, t), 边界 \Gamma_1 上;$$

$$-k \frac{\partial T}{\partial n} = g(x, y, z, t), 边界 \Gamma_2 L;$$

$$-k \frac{\partial T}{\partial n} = \alpha (T - T_f), 边界 \Gamma_3 L.$$

式中, ρ 为材料密度, kg/m^3 ;c为材料比热容, $J/(kg \cdot \mathbb{C})$;T为温度, \mathbb{C} ;t为时间,s;k为热传导系数, W/($m \cdot \mathbb{C}$);Q为物体内部的热源密度, W/m^3 ;f(x, y,z,t)为已知温度函数;n为边界外法线的方向余 弦;g(x,y,z,t)为热流密度函数; α 为换热系数, W/($m^2 \cdot \mathbb{C}$); T_t 为与物体接触的流体介质温度, \mathbb{C} 。

将模型在空间及时间域进行离散,由迦辽金法 建立瞬态热平衡的矩阵方程:

 $[C] \{T'\} + [K] \{T\} = \{Q\}.$

式中,[*C*]为比热矩阵;{*T*}为温度对时间的导数 矩阵;[*K*]为热传导矩阵;{*T*}为节点温度矩阵; {*Q*}为温度载荷矩阵。

1.2 理论计算

物理模型由输油管道、盗油阀、焊帽及焊缝组成 (图1,盗油阀位于焊帽内部)。整个模型轴向长度 L= 1 m,管体内直径 d = 704 mm,焊帽内直径 d_i = 160 mm,壁厚 δ = 8 mm。



图1 焊接修复模拟物理模型

Fig. 1 Physical model for weld repairing simulation

模拟计算时设定管体初始温度为室温25 ℃,自 然对流换热系数为13.9 W/(m² · ℃)。利用 ANSYS"单元生死"技术模拟焊接时热源的移动及 焊料的逐步填充^{[341},"杀死"有限元模型中单元,不 是将单元从模型中删除,而是将其刚度(或传导,或 其他分析特性)矩阵乘以一个很小的因子(缺省值 为1×10⁻⁶),"死"单元的单元载荷将为0,从而不对 载荷向量生效。同样,"死"单元的质量、阻尼、比热 和其他类似效果也设为0。焊接温度场模拟中,焊缝 区单元初始时不存在,是在焊接过程中逐渐被"焊 接"上去的,由于焊接区单元数量众多以及其空间 位置的复杂性,这个过程中单元生死的操作是不可 能通过手工实现的,所以利用 APDL 语言编写程序 完成整个模拟分析过程。为了改善收敛和提高精度, 采用欧拉向后时间积分法,在每一时间步上使用修 正的牛顿 一 拉夫森迭代法进行平衡迭代。时间步长 主要由温度变化梯度决定,焊接开始和冷却开始为 0.01 s,在随后的冷却过程中逐渐增大^[5]。

1.3 结果讨论

图 2 为焊接速度 v = 5 mm/s, 焊接时间 t =91.233 s 时的温度场云图。最高温度位于焊接热源 中心,达到1200 °C,当与热源的距离增加时,热源前 方温度的下降最为剧烈,而热源后方则较为缓慢,热 源两边为中等梯度,表现出了明显的"拖尾"现象。 焊缝区某节点温度随时间的变化曲线如图 3 所示。 加热前此节点温度为室温 25 °C,加热和冷却初始阶 段温度变化剧烈,后期变化缓慢。该计算结果符合热 传播规律。





node 218 in welding zone

为了研究管壁厚度方向上的温度分布情况,取 焊缝热影响区输油管壁厚度方向上4个节点(图 4),不同焊接速度时点1~4在100s内的温度变化



图 4 模型剖面网格 Fig.4 FEM mesh of model

曲线如图5所示。由图5(a)可以看出,0~50s时焊 接没有进行到点1~4的上方区域,节点温度保持室 温25℃,大约50s时热源移动到点1~4的上方区 域,对点1~4进行加热,升温阶段温度变化曲线较 陡,随后热源移走而节点降温,降温阶段温度变化曲线相对平缓,降温初始阶段相对降温后期,温度下降快。最靠近焊缝区的点1最先达到其最高温度1200
℃,而离焊缝区最远的点4最后达到其最高温度
602.326 ℃,离焊缝越近,其最高温度值越大。

焊接速度影响焊接时的热输入量,速度越快,焊 接热源在某点上停留的时间越短,热输入量越小。在 v = 5 mm/s时,点 1 ~ 4 达到的最高温度分别为 1200,751.90,635.68,602.33 ℃,达最高温度分别为 1200,751.90,635.68,602.33 ℃,达最高温度对应 的时间分别为 55.29,58.06,60.82,60.82 s;v = 10mm/s时,点 1 ~ 4 达到的最高温度分别为 1 200, 648.76,546.64,517.05 ℃,达最高温度对应的时间 分别为 27.65,30.41,32.49,33.18 s。可见,随着焊 接速度的提高,节点最高温度值下降。





2 焊接修复时管道压力设计

非停输管道焊接修复首先要保证的就是施工的 安全性。由于材料在焊接局部高温作用下其强度降 低,焊接区未熔化金属没有能力承受它所受应力的 作用,就会出现烧穿泄漏现象,油气泄漏极有可能引 起爆炸,威胁焊接工人的人身安全和管线的安全运 行。美国 Battle 焊接研究所开发了以焊接参数和工 作条件为函数的计算机模型来预测管内表面温度, 根据该模型计算结果,管道内表面温度低于 982 ℃ 是不会发生烧穿的,但事实上管内压力对烧穿的影 响很大,压力越大烧穿的可能性也越大。本文中通过 将高温下金属材料的强度损失转换为常温下管道的 体积型缺陷的方法,以中华人民共和国石油天然气 行业标准《含缺陷油气输送管道剩余强度评价方法 第一部分:体积型缺陷》为依据,判断修补焊接时管 道发生烧穿的可能性。 取图4 所示截面进行研究^[68],由于材料强度随 着温度的升高而降低,当焊接热源移动到点1时,该 截面处于最危险状态,故对此时情形进行分析。根据 强度等效把高温状态下的管道壁厚转换为常温下有 效管壁厚度:

$$\delta_{\rm eff} = \frac{\sum \sigma_i \delta_i}{\sigma_{\rm o}} \,. \tag{1}$$

式中, σ_i , σ_o 分别为材料在温度为 T_i 时的屈服强度, 常温下输油管道屈服强度, $MPa_i\delta_i$ 为材料在温度为 T_i 时的管壁厚度, mm_o

将对温度场模拟的计算结果以及管道材料在各 温度下的屈服强度参数代入式(1),可以求得有效 管壁厚度。当焊接速度 v = 5,10 mm/s时,有效管壁 厚度分别为4.236,4.685 mm。

根据《含缺陷油气输送管道剩余强度评价方法 第一部分:体积型缺陷》对局部金属损失的评价方 法可以获得剩余强度因子 R_{sr},表达式为

$$R_{\rm SF} = \frac{R_{\rm t}}{1 - \frac{1}{M_{\rm t}}(1 - R_{\rm t})}$$

其中

$$R_{t} = \frac{\delta_{min} - F_{CA}}{\delta_{min}} ,$$

$$M_{t} = (1 + 0.48\lambda^{2})^{0.5} ,$$

$$\lambda = \frac{1.285s}{\sqrt{D_{i}\delta_{mm}}} .$$

式中, R_t 为剩余厚度比; M_t 为傅里叶因子; δ_{min} 为最 小测量壁厚; δ_{min} 为基于管道设计压力计算的管道 最小要求壁厚; F_{CA} 为未来腐蚀裕量; λ 为壳体参数; D_i 为管道内径;s 为危险厚度截面的轴向尺寸。

取安全系数为1.5,许用剩余强度因子为0.9, 则非停输状态下焊接修补时的设计压力为

$$p = \frac{R_{\rm SF}p^*}{1.5 \times 0.9}$$

其中

$$p^* = \frac{2\sigma_{\rm s}}{\sqrt{3}} \ln\left(\frac{D_{\rm o}}{D_{\rm i}}\right) \,.$$

式中,p* 为无缺陷管道的极限压力。

本文中所研究管道的 σ_s = 410 MPa,则极限压 力 p^* = 10.64 MPa。当焊接速度为5,10 mm/s时,设 计压力分别为 7.70,7.82 MPa。可见设计压力随着 焊接速度的降低而降低,管道焊接修复时应该把管 内压力降到设计压力以下,否则存在烧穿的危险。

3 结 论

(1)利用 ANSYS 有限元软件的"单元生死"技术可以较好地模拟焊接热源的移动,并可通过 AP-DL 语言编写程序,大大减少工作量。

(2)高温下管道材料的强度损失可以等效转换 成常温管壁上的体积型缺陷,然后根据石油天然气 行业标准计算管道的剩余强度和极限承载能力。

(3)焊接速度的降低使焊接时热输入量增大, 管道有效壁厚减小,造成非停输状态下管道焊接修 复时所能承受的极限压力降低。

参考文献:

[1] 陈玉华,王勇,董立先,等. 高压油气管线的在役焊接

修复技术进展[J]. 压力容器,2005,22(2):36-40.

CHEN Yu-hua, WANG Yong, DONG Li-xian, et al. Advance on repair of pressurized oil and gas pipelines by inservice welding technology [J]. Pressure Vessel Technology, 2005,22(2):36-40.

- [2] 张朝晖. ANSYS 8.0 热分析教程与实例解析[M]. 北 京:中国铁道出版社,2005:10-52.
- [3] 徐济进,陈立功,倪纯珍,等. 厚板对接多道焊温度场的三维数值模拟[J]. 上海交通大学学报,2006,40 (10):1687-1690.

XU Ji-jin, CHEN Li-gong, NI Chun-zhen, et al. The three dimensional simulation of temperature distribution of thick plate multipass welding [J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2006,40(10):1687-1690.

- [4] CARMIGNANI C, MARES R, TOSELLI G. Transient finite element analysis of deep penetration laser welding process in a singlepass butt-welded thick steel plate[J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 1997, 179(3):197-214.
- [5] 罗金华,王晓熙,胡伦骥. 基于 ANSYS 的中厚板焊接 有限元三维数值模拟[J]. 华中科技大学学报:自然科 学版,2002,30(11):83-86. LUO Jin-hua, WANG Xiao-xi, HU Lun-ji. Numerical simulation of welding of mid-thick plates based with three-

simulation of welding of mid-thick plates based with threedimensional finite element on ANSYS [J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology, 2002,30 (11):83-86.

- [6] 薛小龙,朱加贵,桑芝富. 在线焊接管道设计压力的影响因素[J]. 中国科学:E辑. 2006,36(9):991-1001.
 XUE Xiao-long, ZHU Jia-gui, SANG Zhi-fu. The factors influencing pressure of pipes during in-service welding
 [J]. Science in China(Series E),2006,36(9): 991-1001.
- [7] SY/T 647—2000 含缺陷油气输送管道剩余强度评价 方法(第一部分:体积型缺陷)[S].北京:石油工业出版社,2000:12-26.
- [8] SABAPATHY P N, WAHAB M A, PAINTER M J. Numerical model of in-service welding of gas pipelines [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2001,118(1-3):14-21.

(编辑 沈玉英)