

[新设备·新材料·新方法]

DOI:10.3969/j.issn.1005-2895.2015.02.021

# 基于 ANSYS 的安全阀工况条件 温度场的数值模拟

张学辉, 朱海清, 郭爱民

(江南大学 机械工程学院, 江苏 无锡 214122)

**摘 要:**针对安全阀离线检验所得整定压力与其在工作条件下整定压力存在差异这一问题,文中利用 SolidWorks 建立三维模型,将所建模型导入 ANSYS 软件并将安全阀在工况条件下的温度场实现了数值模拟,并在此条件下将安全阀产生的热变形进行理论计算。理论分析结果表明:安全阀在工况温度下各施力部件会产生热变形,其整定压力也随之发生变化,应在工作状况下注意该影响因素,保证安全阀的有效运行。

**关 键 词:**安全阀;温度场;热变形;数值模拟

中图分类号:O242.21

文献标志码:A

文章编号:1005-2895(2015)02-0085-04

## Numerical Simulation of Temperature Field of Safety Valve Working Conditions Based on ANSYS

ZHANG Xuehui, ZHU Haiqing, GUO Aimin

(School of Mechanical Engineering, Jiangnan University, Wuxi, Jiangsu 214122, China)

**Abstract:** The safety valve set pressure of offline test is different from the set pressure in the working conditions. The changes of safety valve structure in the condition of the working temperature were simulated by SolidWorks and ANSYS, and in the simulation condition the thermal deformation of the safety valve was calculated. The analysis results show that the safety valve produces thermal deformation in different temperature, and the setting pressure changes. The influencing factors under working condition should be valued to ensure the effective operation of safety valve.

**Key words:** safety valve; temperature field; thermal deformation; numerical simulation

安全阀是锅炉、压力容器与压力管道等承压设备的重要安全附件之一,其动作可靠性和性能好坏直接关系到设备和人身安全。

安全阀的校验方法主要有在线校验和离线校验,现在,离线校验应用比较广泛,离线校验是指安全阀在校验台上,通入校验介质使阀瓣与阀座开启,通过观察压力表来确认开启压力。在这一过程中,安全阀是在室温条件下校验,校验合格后被送回生产车间进行工作,然而工作条件下的温度与离线校验环境下的温度是不同的,工况条件下安全阀的整定压力与离线校验的整定压力存在差异<sup>[1-2]</sup>。

### 1 温度变化对安全阀各部件的影响

为了研究温度对安全阀整定压力的影响,假定安

全阀在工作状态下(此时弹簧处于压缩状态),由于工作介质温度的升高,安全阀内各部件也将发生变化:

1) 弹簧的温度将随着介质温度的升高而发生变化,这将使得弹簧的刚度在一定范围内减小,弹簧通过施力部件(阀杆、弹簧座等)作用在阀瓣上的力将会减少。

2) 阀座、阀瓣、阀杆以及弹簧座等部件在温度作用下发生热变形,使得弹簧作用在阀瓣上的压缩载荷增大。

3) 阀体沿垂直方向的膨胀使支架和调整螺杆向上移动,因此减小了弹簧的压缩量,同时也降低了传递到阀瓣上的载荷。

4) 调整螺杆和上弹簧座受温度的影响 将增加弹

收稿日期:2014-11-02;修回日期:2014-12-10

作者简介:张学辉(1988),男,江苏无锡人,硕士,主要研究方向为安全阀校验。E-mail:772841299@qq.com

簧的压缩量,并使阀瓣上的载荷增加。

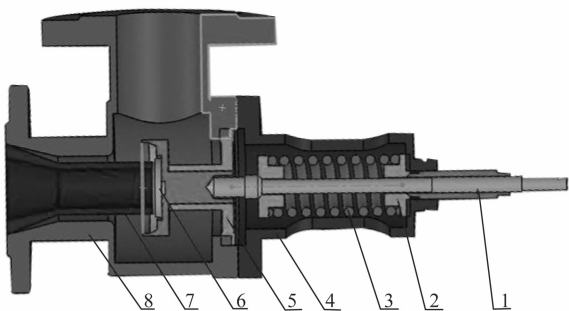
5) 阀瓣和阀座的径向热膨胀将影响有效密封面积,并改变阀门维持原来开启压力所需要的弹簧力。

上面所提到的温度因素都将对已完成离线校验的安全阀整定压力产生影响,本文采用 ANSYS-Workbench 等三维软件对安全阀在工作状况温度下产生的温度场进行模拟,进而对该温度场下安全阀主要部件产生的热变形进行理论计算,从而得出温度因素对安全阀整定压力产生的影响规律,得到了可供参考的结论<sup>[3]</sup>。

## 2 安全阀有限元模型建立

### 2.1 SolidWorks 建模

研究所用模型为 DN50 型弹簧式安全阀,为了保证安全阀模型的精度和有限元分析的准确性,根据阀体的几何形状及结构特点,本文首先采用 SolidWorks 三维软件对安全阀进行建模,所建模型图如图 1 所示。



1—阀杆;2—弹簧座;3—弹簧;4—上阀体;5—导向套;6—阀瓣;  
7—阀座;8—下阀体

图 1 安全阀 SolidWorks 模型图

Figure 1 SolidWorks model diagram of safety valve

### 2.2 网格划分

将建立好的 SolidWorks 模型导入到 ANSYS-Workbench 模块中,以整个阀体为研究对象,对其进行网格划分。在网格划分过程中采用基于 TGRID 算法的四面体网格,这种方法都考虑了几何体上的面以及边界(包括边界层上的网格的设置),其特点是同一几何体上可以有不同网格类型,同时为了保证分析的准确性,对安全阀中的不同构件分别进行网格划分,网格划分情况如图 2 所示。

### 2.3 设定边界条件

在网格划分的基础上,还需要确定安全阀热分析的边界条件。安全阀在稳定热负荷状态下,介质流入和流出的热量之差等于安全阀散出热量。介质作为热源,与安全阀进行对流换热,安全阀与大自然中的空气形成了对流换热,同周围环境形成了辐射换热。安全

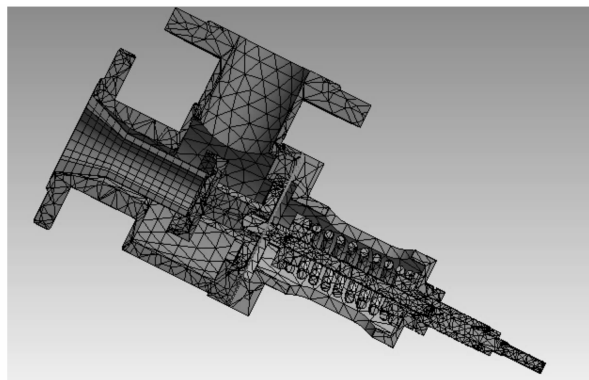


图 2 网格划分模型

Figure 2 Mesh model

阀内部传热遵循傅立叶定律,其热量来源为介质,因此安全阀温度场分析属于无内热源,稳态热分析。取微元体进行分析,热力学平衡方程如下:

$$\frac{\partial}{\partial x}(\lambda_x \frac{\partial T}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(\lambda_y \frac{\partial T}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z}(\lambda_z \frac{\partial T}{\partial z}) + q_v = \rho c_p \frac{\partial T}{\partial t}$$

本文模拟计算的边界条件包括:

1) 添加给定壁面温度

给定壁面温度为介质温度(此次模拟过程假定介质温度  $T$  为  $500\text{ }^{\circ}\text{C}$ )

2) 添加对流传热系数

对流传热系数由以下与实验相关的公式得出:

$$Nu = C (Gr \cdot Pr)^n, \quad (1)$$

$$Gr = \frac{g \beta \cdot \Delta t \cdot L^3}{\nu^2}. \quad (2)$$

式中:  $Nu$  为努塞尔数,  $Gr$  为格拉晓夫系数,  $Pr$  为普朗克数,  $C$  为比热容,  $g$  为万有引力常数,  $\beta$  为容积膨胀系数或者体膨胀系数/ $\text{K}^{-1}$ , 对于可当作理想气体处理的气体,  $\beta = \frac{1}{T}$ ,  $\Delta t = T - T_0$ ,  $L$  为换热面的特征的长度。

假设介质温度为  $500\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 外界的空气温度为环境温度  $T_0$ , 其值为  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 首先由定性温度确定空气的物性值  $t_m = 0.5(T + T_0) = 0.5(500 + 20) = 260\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 查阅赵镇南编写的《传热学》附录可得到该温度下空气的物性参数值如表 1 所示<sup>[4]</sup>。

根据格拉晓夫准则可得

$$\beta = \frac{1}{T} = \frac{1}{273 + 500} = 1.293 \times 10^{-3} \text{ K}^{-1},$$

$$Gr = \frac{g \beta \cdot \Delta t \cdot L^3}{\nu^2} =$$

$$\frac{9.8 \times 1.293 \times 10^{-3} \times (500 - 20) \times (0.35)^3}{(45 \times 10^{-6})^2} = 1.29 \times 10^9,$$

(3)

表1 空气物性参数值  
Table 1 Air parameter value

| 温度<br>$T/^{\circ}\text{C}$ | 密度 $\rho/$<br>$(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$ | 比热容 $C_p/$<br>$(\text{kJ} \cdot \text{kg} \cdot \text{K}^{-1})$ | 导热率 $\lambda \times 10^{-2}/$<br>$(\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$ | 热扩散系数 $\alpha \times 10^{-2}/$<br>$(\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$ | 黏度 $\eta \times 10^{-6}/$<br>$(\text{Pa} \cdot \text{s})$ | 运动黏度 $\nu \times 10^{-6}/$<br>$(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$ | 普朗克数<br>$Pr$ |
|----------------------------|-------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------|--------------|
| 250                        | 0.674                                           | 1.038                                                           | 4.27                                                                                  | 61.0                                                                                   | 27.4                                                      | 40.61                                                          | 0.677        |
| 300                        | 0.615                                           | 1.047                                                           | 4.60                                                                                  | 71.6                                                                                   | 29.7                                                      | 48.33                                                          | 0.674        |

$$Gr \cdot Pr = 1.29 \times 10^9 \times 0.675 = 8.71 \times 10^8. \quad (4)$$

对于流体在竖壁和水平圆柱的自然对流,一般认为是  $R = Gr \cdot Pr > 10^9$  的时候为紊流,根据式(4)可知本次研究为层流,则指数  $n$  的值为 0.25(紊流  $n$  为 1/3),代入式(1)得

$$\begin{aligned} Nu &= 0.686(Gr \cdot Pr)^n = \\ &0.686 \times (8.71 \times 10^8)^{0.25} = 117.85, \\ h &= \frac{\lambda_f}{L} Nu = \\ &\frac{4.45 \times 10^{-2}}{0.35} \times 117.85 = 14.98 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}. \end{aligned}$$

式中:  $\lambda_f$  为差值运算所得导热率,  $h$  为对流传热系数。

将所得壁面温度与对流传热系数添加到 Workbench 中的 setting 模块中。

## 2.4 温度场计算结果

在划分网格、添加边界条件的前期处理下,通过 Workbench 中的 solution 模块计算得到安全阀温度场的模拟结果,见图 3。

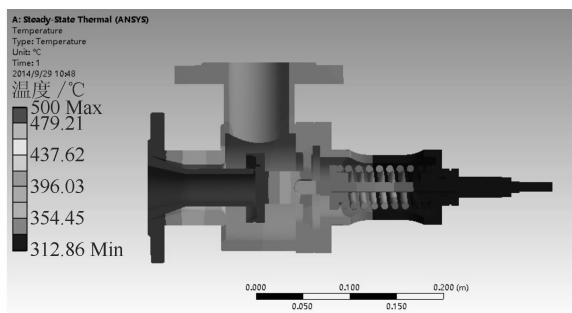


图3 温度场模拟结果

Figure 3 Simulation results of temperature

通过分析以上温度场模拟结果可以得到以下几点结论:

1) 各区域主要存在轴向温差,且外壁温度低于内壁温度。

2) 入口处温度场分布密集,说明此处由于入口管内表面放热系数较大,内壁温升较快。

3) 在工况条件(高温条件)下,安全阀内部构件在热传导作用下产生温度变化,温度由入口处沿轴向逐渐降低<sup>[6-11]</sup>。

## 3 安全阀主要部件热变形计算

在得到的安全阀温度场分布情况下,进一步理论计算安全阀的主要施力部件的热变形。

查表得不锈钢线膨胀系数  $\alpha$  如表 2 所示。

表2 不锈钢线膨胀系数

Table 2 Expansion coefficient of stainless steel wire

| 温度/ $^{\circ}\text{C}$ | 线膨胀系数/ $(^{\circ}\text{C}^{-1})$ | 温度/ $^{\circ}\text{C}$ | 线膨胀系数/ $(^{\circ}\text{C}^{-1})$ |
|------------------------|----------------------------------|------------------------|----------------------------------|
| 20 ~ 100               | 0.000 016 6                      | 300 ~ 400              | 0.000 017 5                      |
| 100 ~ 200              | 0.000 017 0                      | 400 ~ 600              | 0.000 017 9                      |
| 200 ~ 300              | 0.000 017 2                      |                        |                                  |

### 1) 阀座

阀座模型简化为长  $L_1$  的管件,温度  $T_1$  为  $500^{\circ}\text{C}$  (由模拟的温度场得出),环境温度  $T_0 = 20^{\circ}\text{C}$ ,则由热变形公式  $X = \alpha \cdot L \cdot (T_1 - T_0)$  (以下计算中  $\alpha_1, \alpha_2$  分别为不同温度下材料的线膨胀系数),得阀座线性热变形为:

$$X_1 = \alpha_1 \cdot L_1 \cdot (T_1 - T_0)。$$

### 2) 阀座、反冲盘

模型简化为高  $L_2$  的圆柱体,上端面温度  $T_1$  为  $500^{\circ}\text{C}$ ,下端面温度  $T_2$  为  $396^{\circ}\text{C}$ ,则长度方向上某一点  $x$  的温度为  $T_x = \frac{x}{L_2}(T_1 - T_2)$ ,则热变形可由如下积分公式所得:

$$X_2 = \int_0^{L_2} \alpha_1 \left[ \frac{x}{L_2}(T_1 - T_2) - T_0 \right] dx = \frac{1}{2} \alpha_1 L_2 (T_1 - T_2 - 2T_0)。$$

### 3) 阀杆

模型简化为高  $L_3$  的圆柱体,其中  $L_3$  为阀杆下端面到阀杆套之间的距离,而不是整个阀杆的长度。上端面温度  $T_3$  为  $437^{\circ}\text{C}$ ,下端面温度  $T_4$  为  $400^{\circ}\text{C}$ ,则长度方向上某一点  $x$  的温度为  $T_x = \frac{x}{L_3}(T_3 - T_4)$ ,则阀杆的热变形可由如下积分公式所得:

$$\begin{aligned} X_3 &= \int_0^{L_3} \alpha_1 \left[ \frac{x}{L_3}(T_3 - T_4) - T_0 \right] dx = \\ &\frac{1}{2} \alpha_1 L_3 (T_3 - T_4 - 2T_0)。 \end{aligned}$$

### 4) 阀杆套

模型为长  $L_4$  圆管, 温度  $T_4$  为  $400\text{ }^\circ\text{C}$ , 则其热变形量为:

$$X_4 = \alpha_2 \cdot L_4 \cdot (T_4 - T_0)。$$

#### 5) 弹簧座

2 个弹簧座分别简化为长  $L_5$  的圆管, 温度  $T_5$  为  $400\text{ }^\circ\text{C}$ ,  $T_6$  为  $320\text{ }^\circ\text{C}$ , 则其热变形分别为:

$$X_5 = \alpha_2 \cdot L_5 \cdot (T_5 - T_0),$$

$$X_6 = \alpha_2 \cdot L_5 \cdot (T_6 - T_0)。$$

#### 6) 弹簧

弹簧两端温度  $T_7$  为  $400\text{ }^\circ\text{C}$ ,  $T_8$  为  $320\text{ }^\circ\text{C}$ , 常温下弹簧在一定工作载荷  $F$  下的变形量为

$$f_0 = \frac{8nD^3F}{Gd^4}。$$

式中:  $f_0$  为工作载荷  $F$  下变形量,  $n$  为弹簧有效圈数,  $D$  为弹簧中径,  $F$  为工作载荷,  $d$  为弹簧材料直径,  $G$  为切变模量。

在不同温度环境下弹簧切变模量将发生变化, 弹簧温度修正公式为

$$G_t = K_t \cdot G,$$

式中  $K_t$  为温度修正系数。

则在温度  $t$  下弹簧的变形量为

$$f_t = \frac{8nD^3F}{G_t d^4} = \frac{8nD^3F}{aK_t G d^4},$$

热变形量为

$$X_7 = f_t - f_0 = \left( \frac{1}{K_t} - 1 \right) \frac{8nD^3F}{Gd^4}。$$

#### 7) 上阀体

模型简化为高  $L_6$  的圆柱体, 上端面温度  $T_9$  为  $390\text{ }^\circ\text{C}$ , 下端面温度  $T_{10}$  为  $320\text{ }^\circ\text{C}$ , 则长度方向上某一点  $x$  的温度为  $T_x = \frac{x}{L_6}(T_9 - T_{10})$ , 则上阀体的热变形可由如下积分公式所得

$$X_8 = \int_0^{L_6} \alpha_2 \left[ \frac{x}{L_6}(T_9 - T_{10}) - T_0 \right] dx = \frac{1}{2} \alpha_2 L_6 (T_9 - T_{10} - 2T_0)。$$

## 4 结语

从以上计算过程可以看出, 安全阀在工作状态下,

由于高温环境的影响, 安全阀内主要部件会发生尺寸变化, 进而影响到安全阀的整定压力的确定。文献[6]中研究内容只是针对安全阀中弹簧进行分析, 没有考虑其他部件对整定压力的影响, 具有片面性, 本文综合考虑了安全阀各施力部件在温度变化下的热变形, 研究了温度因素对整定压力的影响规律, 对安全阀在实际工作状态下的使用具有一定的指导意义。

可以采取以下措施来降低温度对安全阀整定压力的影响:

1) 在进行安全阀校验时, 校验介质温度应尽量等同于安全阀在实际工况中的环境温度。

2) 安全阀校验过程中, 应该保证安全阀处于热稳定状态再实行校验。

3) 在调整安全阀整定压力时, 阀门 2 次开启之间应保持一定时间间隔, 以确保阀门处于热稳定状态。

总之, 应该充分考虑温度因素对安全阀整定压力的影响, 才能保证安全阀在实际使用中的有效运行。

## 参考文献:

- [1] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. GB/T 12241-2005 安全阀一般要求[S]. 北京: 中国标准出版社, 2005.
- [2] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. GB/T 12243-2005 弹簧直接载荷式安全阀[S]. 北京: 中国标准出版社, 2005.
- [3] 彭震中, 丁祝顺, 王璋奇. 汽机调节阀阀体三维瞬态温度场及应力场分析[J]. 热能动力工程, 2002, 17(1): 80-83.
- [4] 赵镇南. 传热学[M]. 4 版. 北京: 高等教育出版社: 219-228.
- [5] TILL L T, WENDEL G. Application of computational fluid dynamics analysis in improving valve design[R]. SAE Technical Paper, 2002: 102-113.
- [6] 王进, 唐利辉, 孙成刚. 温度对安全阀整定压力影响的试验研究[J]. 云南电力技术, 2012, 40(6): 89-92.
- [7] 李玉洁. 电动调节阀的三维稳态热分析及强度计算[M]. 北京: 北方工业大学, 2009.
- [8] 莱昂斯 J L. 阀门技术手册[M]. 袁玉求, 译. 北京: 机械工业出版社, 1991: 193-240.
- [9] 钟世梁, 黄荣国, 许冰. 600MW 机组高压旁路减温减压阀热应力计算及寿命估算[J]. 中国动力工程学报, 2005, 25(2): 267-270.
- [10] 薛明德, 丁宏伟, 王利华. 柴油机活塞的温度场、热变形与应力三维有限单元分析[J]. 兵工学报, 2001, 22(1): 11-14.
- [11] 刘红, 梁华, 蒋兰芳. 阻燃式防爆阀散热特性与压力特性的仿真研究[J]. 轻工机械, 2013, 31(3): 32-35.

(上接第 84 页)

- [7] 许锐敏, 潘骏, 陈文华, 等. 筒子染色机染缸碟形封头的可靠性优化设计[J]. 浙江理工大学学报: 自然科学版, 2014, 31(1): 6-10.
- [8] 周鹏飞, 董金善, 杨溢清, 等. 基于 ANSYS 的异形封头可靠性分析

及优化设计[J]. 机械设计与制造, 2012(1): 28-30.

- [9] 余伟炜, 高炳军. ANSYS 在机械与化工装备中的应用[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2007: 341-346.
- [10] 刘翀, 路智敏, 汪琳琳, 等. 固体火箭发动机壳体强度可靠性分析[J]. 内蒙古工业大学学报: 自然科学版, 2010, 29(1): 42-45.