

# Development of High Temperature Spring Self-closing Explosion Relief Valve

Ting Li Yan Ni Yumei Xu Huijie Cai Jie Zhang

Jiangsu Shentong Valve Co., Ltd., Qidong, Jiangsu, 226200, China

## Abstract

The high-temperature spring self-closing explosion relief valve developed this time is applied to the high-temperature electric precipitator of the coal pyrolysis system, the sealing pair is cooled by water cooling, so that the sealing material meets the requirements for use at high temperatures, it is a high-temperature explosion vent, the key factor for the successful development of the valve ensures the safe operation of the electrostatic precipitator system.

## Keywords

electrostatic precipitator; water-cooled; high temperature spring self-closing explosion relief valve

## 高温弹簧自闭泄爆阀的研制

李霆 倪燕 徐玉美 蔡慧杰 张杰

江苏神通阀门股份有限公司, 中国 · 江苏 启东 226200

## 摘要

此次研制的高温弹簧自闭泄爆阀应用在煤热解系统的高温电除尘器上, 通过对其密封副进行水冷却进行降温, 使其密封材料满足高温下的使用要求, 是高温泄爆阀研制成功的关键因素, 保证了电除尘系统的安全运行。

## 关键词

电除尘器; 水冷; 高温弹簧自闭泄爆阀

## 1 概述

中国能源结构特点是富煤、贫油、少气, 且中国也是世界第一煤炭消费国, 煤炭属于一次能源, 近些年中国 80% 煤炭直接燃烧, 而煤炭燃烧后产生大量的尘、硫等污染物和温室气体 CO<sub>2</sub>, 严重污染环境。由此, 2014—2020 年中华人民共和国国务院能源发展战略行动计划包含“制定和实施煤炭清洁高效利用规划, 积极推进煤炭分级分质梯级利用”。浙江大学、中科院、清华大学前后着手研发“煤热解燃烧多联产技术”, 即将煤先热解提取高品质油气, 剩余半焦送锅炉燃烧发电供热, 实现煤炭分级分质梯级利用。

煤热解产生的高温烟气中包含 CO、CH<sub>4</sub>、H<sub>2</sub>、C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>、C<sub>2</sub>H<sub>6</sub> 和尘等, 后续为了得到高品质油气、半焦产品, 热解产生的烟气必须经过“高温电除尘器”将烟气中的尘去除, 此时烟温大约在 525℃。根据国家相关规范要求, 电除尘器净化 CO、CH<sub>4</sub>、H<sub>2</sub> 等易燃易爆时, 需要在电除尘器上

设置泄爆装置, 此次开发的高温弹簧自闭泄爆阀就是应用在此工况, 高温弹簧自闭泄爆阀应用工艺示意图见图 1。目前, 煤热解系统也是首套样机, 此阀门的研制成功是煤热解技术商业应用的关键设备, 此套系统运行成功, 便可推广到全国, 提高国家煤炭资源的高效利用。

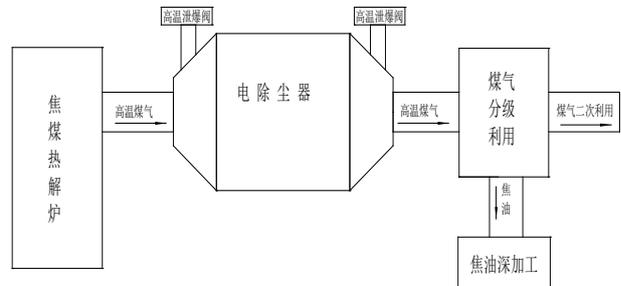


图 1 高温自闭泄爆阀工艺系统简图

## 2 高温弹簧自闭泄爆阀结构设计

高温弹簧自闭泄爆阀是在原干法除尘泄爆阀的结构上进行的优化, 高温多级自闭泄爆阀结构见图 2。在原有阀门

【作者简介】李霆 (1982—), 男, 中国江苏徐州人, 高级工程师, 从事阀门的设计和研发的研究。

的基础上增加了软硬密封结构,金属硬密封结构将大部分的介质阻挡在通道内,少量通过硬密封的介质进入软密封通道内,软密封副内增加水冷却结构,对介质及密封副进行水冷,保证介质最高温度小于密封副的耐高温等级。

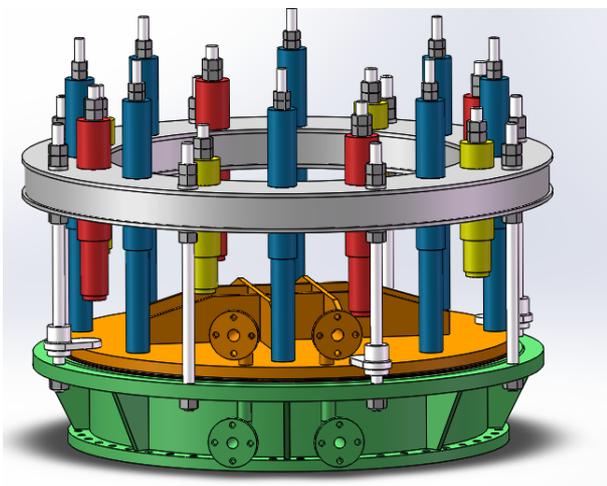


图2 高温弹簧自闭泄爆阀结构简图

第一,在阀体和阀板最内侧增加一道金属硬密封结构,采用上下锥密封的结构,密封副采用堆焊 STL 合金材质以满足耐高温、耐冲刷和耐磨损的要求,密封性能满足泄漏等级IV级,即将介质大部分隔断在通道内,减少介质与软密封的直接接触,因为在介质没有有效降温的前提下,会造成软密封圈的失效。为了保证此处金属密封的有效性,需要特别注意配合尺寸的公差设计,防止累计误差影响装配后的精度,造成金属密封过紧或过松,起不到设计需要的功能,造成整个阀门的可靠性降低。

第二,考虑到阀门使用介质的温度较高,而且金属密封副的泄漏率又较大,所以内侧的软密封必须有耐高温特点,即在金属密封圈外侧(最内侧软密封)设置一道柔性石墨盘根密封圈,采用耐高温、回弹性好的带金属丝加强盘根。盘根需要满足耐高温和压缩变形回弹性大的特点,即可以长期在高温和压缩变形下工作而不失效,金属加强丝既可以加强盘根强度,又可以增加回弹性,通过盘根密封环可以基本将介质隔断在阀体内,避免高温介质与橡胶密封圈的直接接触,造成橡胶密封圈材质老化失效。选择好盘根后,需要考虑盘根的变形量与橡胶变形量的关系,并计算好沟槽的尺寸设计,达到盘根密封性能与橡胶密封性能一致,从而保证所设计的密封副密封性能的一致性。

第三,为了实现阀门的可靠密封,需要采用橡胶密封圈,在盘根的外圈又设计双道橡胶密封圈。橡胶密封采用双道结构,主要是考虑在一道密封失效的前提下,还有一道密封圈

能够提供可靠的保障,即双道密封圈相对单道密封圈主要增加一次失效后的密封保护措施,为设备的检修争取时间。在橡胶的选材上,针对耐高温的工况要求,特别选择了进口的耐高温材料,并结合本公司特殊的胶料配比,实现橡胶圈在耐高温的前提下,还具有较高的弹性,是实现阀门密封的关键,需要在从材料采购、制作、检测及试验等方面做好数据积累,才能实现成品的最终可靠性。

第三,密封副的水冷系统。由于橡胶密封圈的特性决定了使用温度的极限,所以针对本产品的应用工况,需要将橡胶密封圈的运行温度降到其适用的温度。降温常用的方法有风冷、水冷等,结合产品的结构特点,优选水冷结构,而且水冷结构也是阀门常用的冷却方式,阀门的水冷需要根据密封副的结构进行特别设计。本阀门根据密封副的结构特点,设计成长方形水槽式结构,即在密封副的上腔和下腔设计了两个水冷带,并分别设置了进水和出水管路,通过给定的水流速度,将密封副的热量传递出去,即降低介质温度对密封副的热传导,对经过的高温煤气进行冷却,在降低介质的温度的同时,提高了橡胶密封圈的使用寿命。

### 3 耐高温分析

由于在工厂内无法实现对阀门耐高温性能的检测,为了检验阀门的耐高温结构设计的可靠性,下面通过 ANSYS 分析对介质的热传导进行验证。采用四面体带中间节点单元对整体结构进行离散,为保证计算精度,需对有限元模型进行网格无关性验证,当网格进一步细化对计算结果的影响可忽略不计时,说明网格划分合理可行,共划分 1196767 个单元、1974055 个节点。热场分析后通过热固耦合的方式将热场数据导入结构分析模块中,分析法兰和蝶板的热应力和变形。热场分析时在法兰内侧及蝶板施加 550℃ 的温度载荷,法兰和蝶板外表面与空气进行对流换热,换热系数为 12W/(m<sup>2</sup>K),环境温度取 22℃。法兰水冷区对流换热系数取 4100W/(m<sup>2</sup>K),冷却水温 22℃。热分析时保温材料和零件之间设定绑定接触,法兰和蝶板设置不分离接触,保证热传导。热应力分析时,为了与实际工况模拟一致,法兰和蝶板之间不设置接触,对蝶板密封面设置远端约束,约束其竖直方向的自由度,分析其在热载荷下的变形量。具体分析如下:

第一,图3为没有水冷腔的阀座受介质高温后的热传递温度值,从图上我们可以看出,内圈密封槽的温度接近 500℃,最外圈密封槽的温度也达到 450℃,完全满足不了橡胶密封圈的使用温度要求,因为橡胶密封圈的极限耐高温 300℃。

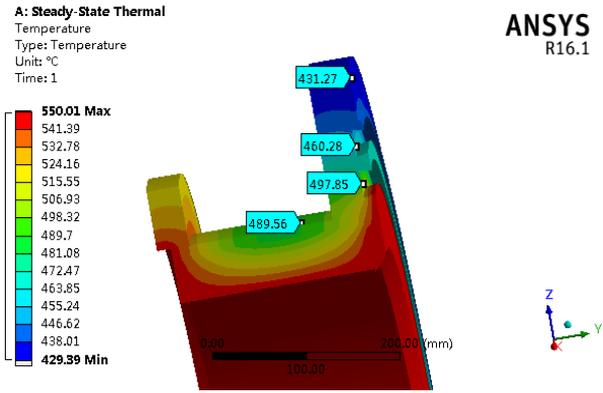


图 3 没有水冷腔的阀座耐温分析

第二，图 4 为增加水冷腔的阀座受介质高温后的热传递温度值，从图上我们可以看出，阀座内圈密封槽的温度接近 200℃，最外圈密封槽的温度基本是常温约 24℃，完全满足橡胶密封圈的耐温要求，从此方案温度的传递值判断，阀座水冷腔冷却设计方案是非常可靠的。

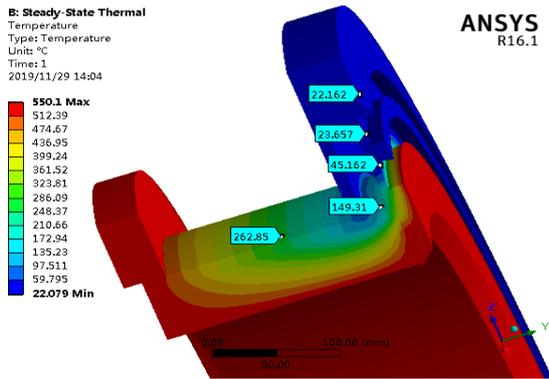


图 4 带有水冷腔的阀座耐温分析

第三，为了使分析更接近阀门使用的实际工况，现将阀门组装后进行热传递分析。图 5 为没有水冷腔的阀门受介质高温后的热传递温度值，从图上我们可以看出，虽然金属硬密封起到了阻碍大部分热量的作用，但是内圈密封槽处的温度接近 400℃，最外圈密封槽处的温度接近 300℃，而橡胶密封圈的耐温极限 300℃，所以此结构满足不了使用要求。

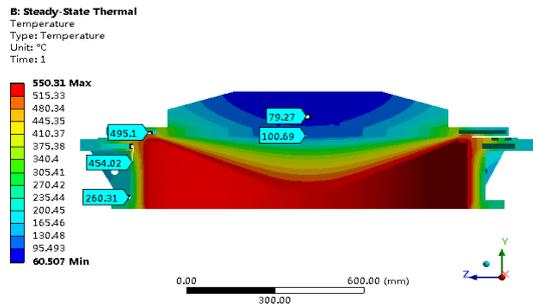


图 5 没有水冷腔的阀门关闭后耐温分析

第四，图 6 为增加水冷腔的阀门受高温介质后的热传递温度值，从图上我们可以看出，在高温介质经过金属密封副后，再经过水冷腔的冷却，到达橡胶密封圈的温度基本就是常温，图上内圈密封槽的温度接近 60℃，最外圈密封槽的温度差不多 30℃，完全满足橡胶密封圈的使用要求，说明此结构设计合理。

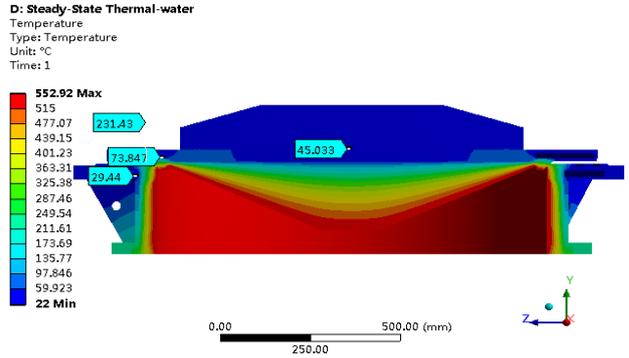


图 6 带有水冷腔的阀门关闭后耐温分析

通过 ANSY 的分析，可以确定结构设计的合理性，并经过分析数据与计算数据的比较，来分析计算数据的偏差，及时修正，减少了通过试验才能确认的数据，缩短了产品的研发周期，可以作为设计的可靠数据使用，提高了市场的相应时间，可以为企业争取更高的经济效益和市场信誉，是目前主流的研发方向。

## 4 弹簧力计算

### 4.1 一级弹簧的刚度计算

系统压力要求介质力达到 5000Pa 时，阀门能够自动打开，开始泄爆，则需要一级弹簧的预紧压力  $F_x$  为：

$$F_x + mg = PS + F_Q$$

采用 8 个一级泄爆弹簧，则每个弹簧上的预紧力为：

$$F = \frac{F_x}{8} = 1750N$$

由于有效工作圈数超出弹簧允许的有效圈数选取范围，故采用 2 个弹簧，由于结构形状的要求，一个弹簧（弹簧 I）的有效工作圈数选取  $n = 14$ ，另一个弹簧（弹簧 II）选取  $n = 12$ 。

由上所述，我们可以选择弹簧参数如表 1、表 2 所示（详细参数见《机械零件设计手册》第三版下册）。

表 1 弹簧 I

直径 d	弹簧中径 D	节距	有效工作圈数	刚度	材料	工作温度
12	80	29	14	28.6	60SiMnA	-40℃ ~ 200℃

表 2 弹簧 II

直径 d	弹簧中经 D	节距	有效工作圈数	刚度	材料	工作温度
12	80	29	12	33.3	60SiMnA	-40℃~200℃

弹簧 I 的刚度为:

$$K_1 = \frac{Gd^4}{8D^3n} = 28.6N \cdot mm$$

弹簧 II 的刚度为:

$$K_2 = \frac{Gd^4}{8D^3n} = 33.3N \cdot mm$$

安装后, 弹簧 I 和弹簧 II 为串连安装, 则串连后弹簧的刚度

$$K = 28.6 \times 33.3 / (28.6 + 33.3) = 15.3N/mm$$

则一级弹簧的预压缩量为:

$$s = \frac{F}{K} = \frac{1750}{15.3} = 114mm$$

安装时, 要先将串连后的以及弹簧压缩 114mm, 然后进行装配, 微调量可在试压调试的时候通过调节螺杆上的螺母进行准确调节。

#### 4.2 二级弹簧

关于二级弹簧, 我们可以选择弹簧参数如表 3、表 4 所示。

表 3 弹簧 III

直径 d	弹簧中经 D	节距	有效工作圈数	刚度	材料	工作温度
14	80	26.7	11	67.4	60SiMnA	-40℃~200℃

表 4 弹簧 IV

直径 d	弹簧中经 D	节距	有效工作圈数	刚度	材料	工作温度
14	80	26.7	9	82.3	60SiMnA	-40℃~200℃

弹簧串连安装后的刚度:

$$K = 2 \times 67.4 \times 82.3 / (67.4 + 82.3) = 74.1N/mm$$

则当达到三级泄爆时, 二级泄爆弹簧的压缩量  $\Delta x$ 。  $14.9 \times (65 + 150 + 75) \times 4 + 231 \times 9.8 + 74.1 \times \Delta x = 63000 \times 3.14 \times 0.625 \times 0.625$ , 可得  $\Delta x = 97mm$ 。

从而得出二级泄爆弹簧的预压缩量为  $97 - 75 = 22mm$ 。

二级弹簧的预压缩量可以通过调节螺杆达到, 根据试验时的具体数据进行调整。

#### 4.3 三级弹簧

关于三级弹簧, 我们可以选择弹簧参数如表 5、表 6 所示。

表 5 弹簧 V

直径 d	弹簧中经 D	节距	有效工作圈数	刚度	材料	工作温度
10	55	18.3	12	49.5	60SiMnA	-40℃~200℃

表 6 弹簧 VI

直径 d	弹簧中经 D	节距	有效工作圈数	刚度	材料	工作温度
10	55	18.3	10	59.3	60SiMnA	-40℃~200℃

弹簧串连安装后的刚度:

$$K = 54N/mm$$

对二级和三级弹簧所采用的计算方法, 存在很大的不足, 其计算结果与实际值之间的误差必然较大。此外, 二级、三级弹簧的主要作用是缓冲, 设计时根据实际情况定。阀门设计参数确定后, 根据弹簧力、泄爆压力、弹簧的变形量就可以绘制出位移 - 压力曲线图, 其中卸爆压力与泄爆位置之间关系如下(垂直安装, 见图 7)。

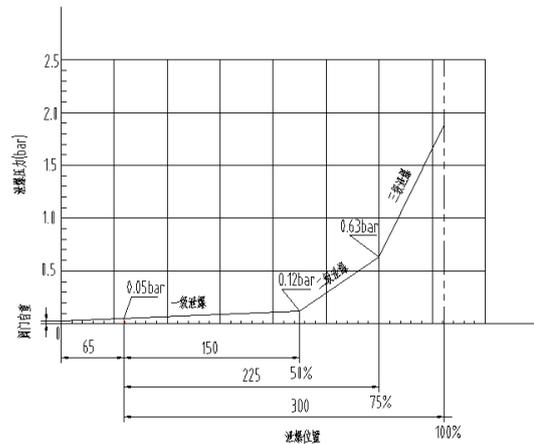


图 7 卸爆压力与泄爆位置图

## 5 结语

高温多级自闭泄爆阀是煤热解用电除尘设备的必不可少的设备, 此设备的成功研制是实现煤热解技术广泛应用的关键, 保证了系统的安全稳定运行, 而且成功申请了国家专利, 专利号为 ZL2020214939497。

## 参考文献

- [1] 吴洁,狄佐星,罗明生,等.煤热解技术现状及研究进展[J].煤化工,2019,47(6):6.
- [2] 杨源泉.阀门设计手册[M].北京:机械工业出版社,1992.
- [3] J-L·莱昂斯,袁玉求,张洪文,等.阀门技术手册[M].北京:机械工业出版社,1991.
- [4] JB/T12124—2015 电除尘器用煤气安全泄爆阀[S].
- [5] 吴宗泽,冼建生.机械零件设计手册[M].北京:机械工业出版社,2013.