

工业蒸汽管道减压阀爆炸失效分析

何志超（中石油吉林化工工程有限公司，吉林 吉林 132002）

摘要：随着科学技术的发展和工业水平的提高，失效分析技术在国内越来越受到重视。失效分析是分析引起机械产品失效的原因，并提出对策，以防止同类失效事件再次发生。分析引起产品失效的原因是失效分析的核心，失效产品的残骸就是失效分析的客观依据，通过失效分析工作，可以从残骸上找到被“记录”下的失效信息，实际面对的失效往往是多层次的，零件失效与设计、选材、制造、检验、安装等过程均有关，通过较明显的失效现象，找到更深入的失效原因，为探究减压阀爆裂事故原因，结合压力管道的设计、安装工况，对事故减压阀进行失效分析，得出事故原因为管道设计不当、安装不规范，阀门材质的选取不符合标准要求等因素所导致。

关键词：工业；管道；减压阀；失效

1 引言

随着现代科学技术的不断发展，电子与液压技术结合的电液控制技术成为了现代控制工程中不可或缺的技术手段和控制策略。电液比例阀是电液控技术的核心元部件，可以通过输入不同的电信号得到与输入信号成比例的的压力、流量输出。工业蒸汽管道在运行过程中，蒸汽管道支管上的减压阀突然爆裂，造成人员伤亡事故，为探究事故成因，笔者对管道系统进行失效分析。

2 工作原理

气动减压阀受压部分的结构有活塞式和膜片式两种，膜片式没有机械摩擦，具有高精度和高敏感性，但不能应用于高压气动系统中；活塞式具有抗干扰能力强，可应用于高压系统中。

如图1所示为某型两通高压活塞式气动减压阀结构图，该阀进口最高压力为41.4MPa，出口压力为0~1.5MPa。两通减压阀当出口压力达到设定压力后减压阀关闭。高压活塞式气动减压阀是通过主阀2与阀座3构成的锥环型节流效应，将进口压力 p_1 降至设定所需的出口压力 p_2 ，并且能在进口压力和流量变化时，利用主阀弹簧1、调压弹簧6、主阀2和阀座3共同作用保持出口压力 p_2 基本不变。通过是改变减压阀的节流面积，使气流流过阀节流部位的流动速度及气流自身动能改变，从而引起不同的压力损失，以达到减压目的。主阀弹簧1的作用是迫使主阀2与阀座3接触。当负载侧（出口处）压力低于目标压力时，主阀1与阀座3打开，并实现节流控制；当负载侧压力增加将导致活塞8上提，以减少主阀2与阀座3过流面积，进而降低负载侧压力；当负载侧压力超过目标值后，

主阀1与阀座3关闭。

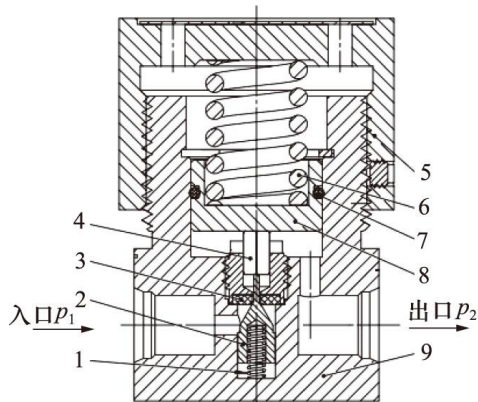


图1 高压活塞式气动减压阀

3 阀门宏观及理化分析

减压阀型号：Y43H-16（先导活塞式减压阀），材质：HT150，公称压力：1.6MPa，适用温度： $\leq 200^{\circ}\text{C}$ ，公称通径：100mm，出口压力：0.1~1.0MPa，生产日期：2018年10月。

GB/T12246-2006《先导式减压阀》规定：阀体、阀盖材料应符合GB/T12226-2005《通用阀门灰铸铁件技术条件》的规定，GB/T12226-2005规定适用阀门中的灰铸铁材料最低等级为HT200，该减压阀材质为HT150，可见，阀门材质的选取不符合要求。

在断口附近截取一段试样，用碳硫仪和火花放电式直读光谱仪对试样进行化学成分分析，测产品标准GB/T9439-2010《灰铸铁件》规定：化学成分不作为铸件验收的依据，但化学成分的选取必须保证铸件材料满足该标准所规定的力学性能和金相组织要求。

Si/C比显著地影响灰铸铁件的组织 and 力学性能，在相同的条件下，不同的Si/C比能使铸铁的力学性能

和力学组织产生较大的差异,适当地提高 Si/C 比,可提高铸铁的强度,改善铸铁的切削加工性能,因此应选择和控制适宜的 Si/C 比,使铸铁保持合适的硬度和较高的抗拉强度。根据《金属材料金相图谱》的要求,一般灰铸铁的 Si/C 比在 0.40~0.55,计算可得该材料的 Si/C 为 0.33,低于要求下限值。

4 工业设备管道安装故障

4.1 管道加工制作问题

由于工业设备管道错综复杂,需要分节段加工制作,再通过焊接、法兰等连接成一个整体。但一些施工单位在工业设备管道加工制作中,过于追求速度和成本,未按照设计图纸的要求和规范进行下料和加工。致使加工好的管道和实际情况差异比较大,不但会增加工业设备管道安装的难度,而且会浪费成倍,且为工业设备管道正常运行埋下安全隐患。

4.2 焊接问题

在工业设备管道安装中,焊接工人是主要的作业人员,在焊接过程中,由于操作不当,引起焊瘤、未焊透、未熔合等质量缺陷,再加上焊接部位的定位不够精确,容易引起漏焊、虚焊等质量问题,会对管线的强度、严密性造成一定的影响,并产生一定的安全隐患。

4.3 绝热问题

工业设备管道大多安装在室外,容易受到温度变化的影响,在外界气温突变或介质相变的情况下,容易对管道的性能造成较大影响,从而缩短使用使用,若情况严重,甚至会出现胀裂问题,增大发生泄露的概率,影响安全生产。

5 工业蒸汽管道减压阀故障完善

5.1 完善焊接过程

焊接质量是衡量工业设备管道安装质量的主要指标,因此,在工业设备管道安装中,必须注重对焊接问题的解决和处理,以保证焊接质量,避免出现泄露问题。在工业设备管道安装中焊接方式通常会选择焊条电弧焊,若有特殊的要求时,需用氩弧焊打底,电弧焊盖面,焊接工艺和参数需要通过试焊来确定。若无特殊要求,需要采取以下措施进行焊接,以保证工业设备管道安装焊接质量。

坡口加工。按照工业设备管道壁厚的不同,采用氧气乙炔切割或者砂轮机来制作坡口,常见的坡口形式有两种,一种是 I 型坡口,另一种是 V 型坡口,坡口形式不同,焊接方式不同,坡口也不相同。比如: I

型坡口,采用单面焊时,壁厚大于 1.5~2.0mm 时,间隙要控制在 0~0.5mm 之间,壁厚在 2~3mm 之间时,间隙要控制在 0~1.0mm 之间。若采用双面焊,壁厚大于等于 3~3.5mm 时,间隙要控制在 0~1.0mm 之间,壁厚 3.6~6.0mm 时,间隙要控制在 0~2.5mm 之间。V 型口,若工业设备管道的壁厚大于等于 3~9mm 时,坡口开口角度控制在 65~75° 之间,间隙控制在 0~2mm 之间,纯边控制在 0~2mm 之间。若工业设备管道的比好超过 3~9mm,坡口开口角度要控制在 55~65° 之间,间隙控制在 1~3mm 之间,纯边控制在 0~3mm 之间。坡口加工完成后,要及时清除周围的油污、杂物、氧化铁皮登上,清理范围不应小于 10mm。

工业设备管道组对时,若管径小于 DN150 可采用人工组对,超过 DN150 时采用螺栓连接的专用组对器和焊接组对卡具进行组对。在管道组对时要保证 I 级和 II 级焊缝错位不超过 10% 壁厚,且不应超过 1mm。III 级和 IV 级焊缝错位不超过 20% 壁厚,且不应超过 2mm。不同壁厚的工业设备管道在组对时,需保证内壁相对平整。先点焊再满焊接,以控制工业设备管道变形,保证安装精度。在进行点焊操作时,要保证所使用的焊接材料、工艺、要求和正式施焊的相同,点焊长度控制在 10~15mm 之间,点焊高度控制在 2~4mm 之间。正式焊接时,要按照试焊确定的标准、工艺、参数进行焊接,以保证焊接质量。

5.2 减压阀设计

在电液比例减压阀的设计过程中,基于压力振幅选择了 PWM 电信号频率,基于泄漏量选择了阀的配合间隙,基于流体可视化分析对阀进行了结构优化,研究及测试结果表明:①此阀选取电信号频率为 100Hz,配合间隙为 5~6 μ m 时,有良好压力特性及电流——压力特性;②合理的在阀芯凸肩处增加斜角和倒圆,在阀体阀口处增加环形槽能够有效抑制了气穴的产生,降低了阀口处液压油流速,减少了噪声和振动,有利于改善阀的性能;③优化后的电液比例阀经测试检验,各项要求均能满足设计需求,验证了设计的正确性和可靠性;④本款比例阀阀芯最细处仅为 4mm,热处理过程中出现了阀芯淬透以致阀芯脆性太高的现象,且由于阀芯为 μ 级精度,淬火后的微小变形量对阀工作状态会有很大影响。后期,将对对高压、超细阀芯的材料及生产工艺进行着重研究。

5.3 壳体工艺

壳体属于薄壁件,从工艺路线分析,先从左侧或

右侧加工,均会出现薄壁部分,导致加工另一端强度不足。若采用市面上的内涨夹头,由于长度不足也只能支撑有限部分。

为了保证壳体加工时有可行支撑,实际加工时头道从左端面开始加工,加工出 $\phi 23.8\text{mm}$ 孔;二道加工时自车芯轴以左端面 $\phi 23.8\text{mm}$ 内孔定位,为了防止夹持 $\phi 26.5\text{mm}$ 发生形变,需要严格控制芯轴与壳体配合尺寸。加工时用软爪夹持外圆进行右端面外圆及内孔加工,充分保证加工效率及精度,事实证明此种方法经济实用。

壳体材料为磁性材料,冷加工会造成纯铁内部多种晶体缺陷。学术领域历来有对该材料的热处理工艺研究,工艺上一般需要退火处理,高温退火的目的是为了充分消除内应力,改善组织,去除杂质。

为了保证阀芯在阀套主阀孔内自由运动,一般主阀孔需要做珩磨处理。由于该孔尺寸较小,珩磨刀具难以制作,工艺上订制专用合金铰刀进行铰制,交叉孔处毛刺采用 $\phi 4\text{mm}$ 的带磨料尼龙刷进行处理。

由于该零件材料为磁性材料,硬度低,加工性能好, $\phi 2.8\text{mm}$ 主阀孔铰制,去刺后内孔尺寸及光洁度满足设计要求。

5.4 调压特性研究

气动减压阀的调压特性研究是在减压阀入口压力恒定时,线性调整调压弹簧力,对阀出口压力、流量变化规划的研究,亦是检验阀可调可控性的最基本的研究。将减压阀入口压力 p_1 设定为 42MPa ,调压弹簧力 F_2 由 0 调至 600N ,阀的对应压力。

当调压弹簧力大于 5N 时,阀出口压力随调压弹簧力呈线性增加,最小线性可控制出口压力在 0.01MPa 以内;当调压弹簧力小于 5N 时,由于此时主阀阀芯 2 与阀座 3 接触关闭,阀出口压力为零。

5.5 工业设备管道安装的注意事项

工业设备管道加工制作中,要保证密封面的加工、弯管的加工、坡口加工以及管口组对、焊接质量等都符合《工业管道高压管线预制工艺标准》中的相关规定。法兰连接必须与工业设备管道同轴同心,并确保螺栓的插入是自由的,法兰螺栓孔应该在中间安装,法兰之间必须平行,并且不能超过法兰的外径 1.5% ,并且不能超过 2mm 。不能采用紧固的方式来消除倾斜。法兰的接头必须采用相同的材料,并且螺栓的安装方向必须相同。螺栓拧紧后,必须紧密地粘在法兰上,不能有楔形缝隙。现场装配组的接头或装配接头,其

对接头的平直程度应该在离接头中心 200mm 处,管的公称直径小于 100mm 时容许误差为 1mm ,而管公称直径超过 100mm 时容许误差为 2mm 。但长度容许误差不能超过 5mm 。

5.6 脉冲涡流检测技术

第一,传感器激励。将特定频率和度的电流信号以脉冲形式施加到传感器上。第二,涡流感应。当电流通过传感器时,在管道表面产生一个变化的瞬时电磁场,同时这个电磁场会在管道材料中引起涡流产生。第三,涡流信号检测。通过检测和分析涡流信号的变化,可以确定管道内部存在的缺陷、腐蚀等问题。常见的涡流信号特征包括幅值、相位、频率等。第四,数据处理与分析。将采集到的数据输入计算机系统进行处理和分析,通过比对参考标准或者图像重建算法生成可视化图像或报告,提供对管道内部情况的评估和分析结果。

6 结束语

综上所述,由于管道设计不当、安装不规范,导致安装后阀门承受额外的附加应力,阀门材质的选取不符合标准要求,使得减压阀材料强度和韧性不足,最终阀门在介质压力的作用下而产生脆性断裂。通过对构成本阀的关键零件加工及装配工艺研究,多项工艺已通过小批量生产验证。本研究介绍的多项加工工艺、装配方法经济可靠,为后序比例插装阀开发具有指导意义。

参考文献:

- [1] 程明辉,张晓萌,刘杰.工业蒸汽管道减压阀爆炸失效分析[J].工业锅炉,2023(05):49-51.
- [2] 吴瑞楠,马彦伟.提升插装比例减压阀性能的工艺研究[J].液压气动与密封,2023,43(10):126-128.
- [3] 刘智健.高压气动减压阀在液压系统中的特性研究[J].液压与气动,2023,47(10):23-30.
- [4] 王晓凯,马强.电液比例减压阀的设计与优化[J].煤炭工程,2023,55(08):176-181.
- [5] 张正春,石红.核级高压气体减压阀设计与试验[J].阀门,2023(03):268-276.
- [6] 汪成文.减压阀后管道振动失效分析和应对方法[J].化肥设计,2019,57(6):4.
- [7] 李文利,潘伟亮,钟丰平,等.蒸汽管道用先导式减压阀阀体爆裂分析[J].管道技术与设备,2020(06):122.
- [8] 许小华.蒸汽管道断裂爆炸事故技术分析[J].中国锅炉压力容器安全,2021,18(2):2.