

蒸汽锅炉安全阀排放能力不足的解决方案

许嘉义

(扬子石化巴斯夫有限责任公司, 江苏 南京 210000)

摘 要 环氧乙烷 / 乙二醇装置反应器存在尾烧工况, 当尾烧发生时, 会产生大量热量, 使得反应器撤热的汽包中的锅炉水发生膨胀, 压力随之升高, 一旦液位过高时, 极有可能引发两相流排放。然而, 现有安全阀无法提供足够的泄放能力, 这就可能造成汽包超过最高设计压力, 进而导致设备破坏和重大财产损失, 甚至可能对周边环境和人员安全造成严重威胁。本文探讨了蒸汽锅炉安全阀排放能力不足的解决方案, 以期为相关人员提供参考。

关键词 蒸汽锅炉; 安全阀; 汽包; 反应失控

中图分类号: TK222

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.09.017

0 引言

蒸汽锅炉作为工业生产中不可或缺的热能设备, 其安全运行对于保障生产效率和人员安全具有至关重要的作用^[1]。安全阀作为蒸汽锅炉的关键保护装置, 承担着在锅炉内部压力超过设定值时自动排放部分蒸汽或气体的重任, 以防止锅炉超压运行引发安全事故。然而, 在实际应用中, 蒸汽锅炉安全阀排放能力不足的问题时有发生, 不仅影响了锅炉的正常运行, 还可能对生产环境和人员安全构成严重威胁^[2]。

1 蒸汽锅炉的重要性及事故案例

蒸汽锅炉具有工作压力大, 介质温度高, 运行工况复杂等特点, 其事故种类呈现出多种多样的形式。蒸汽锅炉事故主要有超压事故、缺水事故、满水事故、汽水共腾事故、爆管事故、过热器管和省煤器管爆破事故、空气预热器管损坏事故、水锤事故受热面变形事故等几大类^[3-4]。

在锅炉运行中, 锅炉内的压力超过最高许可工作压力而危及安全运行的现象, 称为超压事故^[5]。这个最高许可压力可以是锅炉的设计压力, 也可以是锅炉经检验发现缺陷, 使强度降低而定的允许工作压力。总之, 锅炉超压的危险性比较大, 常常是锅炉爆炸事故的直接原因。

2018 年 6 月 7 日, 贵州桐梓县楚米镇境内发生一起锅炉爆炸事故。经勘查鉴定和询问调查, 事故锅炉安全阀阀座与锅筒法兰蒸汽通道被盲板隔断, 锅炉压力联锁保护装置未调试合格, 导致锅炉在超压时未起到泄压及停止运行锅炉燃烧机和报警等安全保护作用, 且锅炉操作人员在锅炉运行期间脱岗, 在锅炉发生超压时, 未能及时采取有效措施停止锅炉运行和泄压, 锅炉因超压运行导致锅炉受压部件开裂, 引发爆炸是

事故的直接原因。

1.1 反应失控场景下的两相流工况

反应失控场景下, 反应产生的蒸气或气体占据了液相的体积, 导致整体液位的升高, 当液位升高至气相出口时, 便发生两相流泄放^[6]。

可能产生两相流的工况如下: (1) 所有反应失控工况; (2) 表面热量输入 (火灾、日照、加热介质等) 工况; (3) 容器下部气体窜压工况; (4) 高温流体 (高于物料沸点) 窜压工况; (5) 换热器内漏工况; (6) 涉及超临界状态流体; (7) 其他可能同时出现气体与液体的场合。

容器内流动状态类型有以下三种: (1) 均质型: 气泡均匀致密, 一般总是发生两相流。(2) 气泡型: 气泡小而分散, 以较慢的速度上升, 易发生两相流。黏度 ≥ 100 cP 的物料体系倾向于气泡型。(3) 搅混型: 气泡相互结合形成大气泡, 上升速度较快。相同的气相速率, 搅混型的液位升高小于气泡型的液位升高程度, 故相比气泡型不易发生两相流泄放。黏度 < 100 cP 的物料体系倾向于搅混流。应判断气体或蒸气是在内部产生 (如反应), 还是在壁面产生 (如火灾工况、夹套加热等), 对于内部产生气体或蒸气的体系, 泄放过程更易产生两相流。

反应失控泄放体系的类型有如下三种: (1) 蒸气体系: 体系的压力主要由蒸气产生, 泄放时通过气化或闪蒸从液相中移走热量, 温度与压力上升或下降趋势一致。蒸气体系为调节体系。(2) 气体体系: 产生不凝性气体 (例如通过化学反应或溶液解吸), 并且在泄放条件下不会通过蒸发从液体中移走大量的能量, 压力下降可能不会导致温度下降。气体体系为非调节体系。(3) 混合体系: 在泄放条件下, 系统内压

力是由产生的不凝性气体和蒸气共同作用的结果。混合体系如果泄放时温度与压力上升或下降趋势一致,则为调节混合体系;混合体系如果泄放时随着压力下降不会导致温度下降,则为非调节混合体系。

反应失控工况泄放计算时,应首先确定反应泄放类型,确定反应泄放类型的试验方法。

两相流的临界充装比计算按下述规定:反应失控工况下,应确定泄放体系的类型,计算气体/蒸气通过液体表面的速率。

1.2 环氧乙烷/乙二醇装置汽包问题

某公司环氧乙烷/乙二醇装置汽包 B1170 已有的 2 台安全阀 Y11711、Y11712 在重新计算中发现,安全阀的泄放工况是:氧化反应器发生尾烧产生的过量热量输入造成汽包超压,计算发现汽包现有安全阀入口管道和出口管道的压降超过了规范允许值,并且在汽包顶部出口蒸汽调节阀 P11711 全关的情况下将导致安全阀无法提供足够的泄放量。

2 计算依据和方法

对安全阀 Y11711 和 Y11712 (中压蒸汽汽包 B1170) 的重新验证是在氧化反应器发生尾烧和蒸汽压力控制阀 PV11711 关闭故障的情况下进行的。

为满足 B1170 内部的超压限制值,还对氧化反应器发生尾烧后 PV11711 所需的阀门开度进行了检查。由于在尾烧开始时 B1170 的虚假填充液位以及热吸收的剧烈波动,很难估算液位膨胀的后果。因此,基于汽包专利商 Westinghouse 对热水力过程的计算结果,将装置提供的最高液位作为初始填充液位进行本次计算。液位最高保证值为现有 B1170 的高高联锁液位的 70%。同时,根据 Westinghouse 报告中的蒸汽产生流量,近似进行了三个阶段的逐步热输入以进行本报告的动态模拟。

2.1 排放量的可控性

研究发现现有的安全阀可能导致两相流排放,所需的泄放量会发生显著增加。为了确定泄放负荷,每个出口控制阀门都应在全开和全关的位置上考虑。这与控制阀的故障位置无关,因为故障可能是由仪表系统故障或误操作造成的。如果一个或多个入口阀门被导致出口阀门关闭的同一故障所打开,则可能需要安全阀来防止超压。所需的泄放率是最大进口流量和最大出口流量之差。所有的流量都应该在泄放条件下计算。此外,还应该考虑操作人员无意中关闭控制装置的影响。不应假定有利的仪表响应,在评估任何原因引起的泄放要求时,应假定任何未被考虑为引起泄放要求的自动控制阀门,以及将倾向于泄放的系统,保持在最小正常处理流量所需的位置。换句话说,任何有利的仪表反应都不应该被

考虑在内。最小正常阀门位置是指在发生破坏事件之前阀门的预期位置,也就是在最小设计流量时的阀门位置。因此,除非通过控制阀的流量条件发生变化,否则可以记入这些阀门的正常最小流量,修正为泄放条件,只要下游系统能够处理任何增加的流量。尽管由系统压力以外的变量驱动的控制阀可以尝试完全打开其阀门,但这种控制阀只能在正常最小流量时其操作位置所允许的范围内计入,而与阀门的初始状态无关,即在这种情况下,压力升高将会导致蒸汽出口阀进一步开启。然而,出口调节阀可以考虑保持最低正常的开度。在这种情况下,PV11711 的最小开启度为 C_v 值: 643.9, PV11711 提供额外泄放量以限制 B1170 的最大压力上升。值得注意的是,这是通过一个机械限位装置来实现调节阀的最小开度。

因此,根据动态模拟结果,Y11711 和 Y11712 的排放能力结合 PV11711 的最小开度 C_v 值是 643.9,对于目前的工况是足够的。B1170 的最大压力为 26.7 bara,低于 1.1 倍的最大允许工作压力 MAWP 23.6 barg,对应的泄放的蒸汽质量分数为 0.289。同时,进行了压力损失计算。为了满足 API 规范对安全阀出口压降的要求,现有安全阀的配置更改为:将 Y11711 重新安装到 B1170 的 K 管口,并将安全阀 Y11711 的出口尺寸扩大为 STD 8×12×16 寸;对于 Y11712,在入口管的第一个弯头后添加一个 STD 8×12 寸的大小头,出口管道增加 10×12×16 寸的大小头。

根据上述几何形状,Y11711 和 Y11712 的入口管道和出口管道的计算压力损失分别为 1.78%/9.94% 和 2.92%/8.44%。结果满足 API 规范要求。此外,以下是关键输入和结果数据的总结:

PSVs Y11711 和 Y11712 的泄压装置(设定压力为 23 barg;见附录 1)安装在蒸汽汽包 B1170 顶部,以提供超压保护。氧化反应器尾烧工况在专利商 Westinghouse 的外部报告(GBRA 141 125,)中进行了详细讨论。在该报告中,针对氧化反应器尾烧过程进行了热力学分析,涉及的系统包括:(1)E1141/1161;(2)R1130/1150;(3)B1140/1160;(4)E1142/1162;(5)B1170。通过绘制 B1170 内的压力和温度响应,未观察到过量的超压情况。然而,这一结论仅在压力控制阀 PV11711 能够完全开启且忽略液位膨胀的情况下成立。如果 PV11711 故障关闭,可能会导致 B1170 的超压。

现有的安全阀 Y11711 和 Y11712 可能会引发两相流排放,因此无法满足安全释放要求。因此,需要对排放进行重新设计,以专利商 GBRA 141 125 报告中记录的 B1170 的最大蒸汽产生量作为计算基准。(1)通过动态模拟确定安全阀的泄放能力;(2)计算安全阀

入口和出口管道内的压力损失, 并与 API STD 520 第二部分的规范值进行比较。

一般而言, 工况评估及随后所需泄放负荷的计算遵循 API STD 521。同时, 容器内的液位膨胀评估基于 DIERS 的蒸汽分离动力学分析。

基于上述内容, 通过内部程序 RSE1 进行泄放量的模拟。在该程序中, 结合多种用户定义的条件, 例如能量/物质的流入和流出。返回的变量包括压力、温度、填充液位百分比和流体相态, 以供进一步分析。

2.2 安全阀管道压力损失计算

安全阀的进气和排气管道的相对压力损失通过 PIPE_NG 2 进行计算。根据适用的规范, 最大释放压力下 (10% 超压) 和额定排放系数用于确定释放能力。为了确保安全阀的稳定开启, 入口管道的相对压力损失不得超过 3% (对于设定压力 < 3 barg, 允许 100 mbar 的进气压力损失), 而出口管道的相对压力损失不得超过 10% (或参考安全阀制造商的说明)。

由于在过程干扰开始时 B1170 的伪填充液位以及热吸收的剧烈波动, 估算液位膨胀的后果变得困难。因此, 基于报告 GBRA 141 125 的计算结果, 将装置提供的最高液位作为初始填充液位进行本次计算。

关于初始填充液位, 装置保证的高高液位 (HHL) 为 70%, 对应于 B1170 中 68.9% 的体积填充水平。在过程干扰开始时, 报告 GBRA 141 125 中水的体积分数大约从 0.5 增加到 0.62 (见附录 3, G), 相当于 6 m^3 。因此, 在 RSE 模拟中的初始填充液位为 83.2% 体积分数。与此同时, 蒸汽控制阀的最大蒸汽流量, 即反应器尾烧期间的实时蒸汽生成量, 在专利商 Westinghouse 的外部报告 GBRA 141 125 中进行了定义。在干扰期间, 报告 GBRA 141 125 中系统内的总热量和水量可应用于 B1170 的计算。因此, 为简化方法, 本报告中根据 GBRA 141 125 报告中的蒸汽生成流量近似了三个阶段的逐步热流入, 以进行动态模拟。

流入 B1170 的燃烧热流量定义如下: 潜热假定在 17.5 bara, 因为在非常短的时间内 (从 0 到 10 秒) 压力上升曲线的变化。为了限制 B1170 中的最大压力上升, RSE 模拟在三个蒸汽出口 (Y11711、Y11712 和压力控制阀 PV11711 的指定最小开度) 下进行。指定的分离参数为 1.5, 初始压力为 17.0 bara。

3 汽包专利商报告介绍

模拟事故工况及结果如下:

在 2012 年, 专利商 “westinhouse” 模拟了 “预燃烧” “尾烧” 和 “反应失控” 等事故工况。这些模

拟是基于环氧乙烷/乙二醇装置 38 万吨/年的设计数据进行的。该扩能项目于 2015 年 5 月实施。

模拟预测了系统在 “预燃烧” “尾烧” 和 “反应失控” 等事故工况下的温度和压力变化。这些温度和压力被用来检查设备的完整性。结果是积极的, 设备的完整性不会因这些故障而受到威胁。

然而, 这些计算中使用了一些重要的附加条件。当在环氧乙烷/乙二醇装置的运行过程中违反这些附加条件时, “西屋计算” 就不再有效。

这些 “西屋计算” 的基础是迅速检测到 “预点火” “失控” 和 “点火后” 等故障情况, 关闭氧气供应, 并使循环气中剩余的氧气与乙烯反应生成 CO_2 和 H_2O , 并利用这个放热反应的热量蒸发蒸汽汽包里的水。必须满足的重要附加条件有:

迅速检测到故障以防止额外的氧气进入再循环气、故障开始前限制再循环气体中的氧气浓度、蒸汽鼓中的水量足够吸收故障期间释放的热量、蒸汽汽包上的安全阀足够大以释放产生的蒸汽。

反应器蒸汽汽包的水位联锁值: 15 m^3 的水。

环氧乙烷产品冷却器蒸汽汽包的水位联锁值: 17.25 m^3 的水。

4 结束语

针对反应失控场景下, 汽包中发生两相流泄放, 现有安全阀无法提供足够的泄放能力, 可以通过为汽包蒸汽出口调节阀增加机械限位的方式解决, 超压时蒸汽调节阀可以用于蒸汽的泄放, 汽包不会超压。

参考文献:

- [1] 谢利杰, 陈世乐. 蒸汽锅炉房的工艺设计 [J]. 山东化工, 2023, 52(24):191-193, 197.
- [2] 王兴帅. 蒸汽锅炉定期检验常见问题及其防范措施研究 [J]. 新疆钢铁, 2024(02):179-181.
- [3] 李学智, 苟滨祥, 李建青, 等. 燃气蒸汽锅炉的安全管控措施及思路 [J]. 橡塑技术与装备, 2024, 50(10):55-59.
- [4] 潘昌. 蒸汽锅炉锅壳鼓包爆炸的原因分析及预防措施 [J]. 特种设备安全技术, 2025(01):7-9.
- [5] 刘召东, 崔维刚, 杨忠杰, 等. 在用电站锅炉主蒸汽阀门安全隐患问题的探讨 [J]. 中国特种设备安全, 2022, 38(08):51-54.
- [6] 纳海涛. 锅炉检验中安全问题及措施分析 [J]. 中国设备工程, 2024(09):149-151.