doi:10.3969/j.issn.1001-4837.2025.02.003

设计计算

# 外部火灾环境液体容器泄放设计中湿润面积计算探讨

韩　冰[1,2],戴行涛[1,2],闫兴清[3],李　岳[3],喻健良[3]

(1.国家市场监管重点实验室(气瓶安全技术),辽宁大连 116013;2.大连锅炉压力容器检验检测研究院有限公司,辽宁大连 116013;3.大连理工大学 化工学院,辽宁大连 116024)

**摘　要:**确定容器的湿润面积是依据API 521—2020标准开展外部火灾环境液体(含液化气体,下同)容器超压泄放设计的首要步骤。调研发现,工程技术人员在计算该值时容易出错,导致得到错误的泄放设计结果。现有文献也缺少对不同类型液体容器湿润面积计算方法的系统论述。通过调研分析与归纳总结相结合的方法,构建了外部火灾环境下不同类型液体容器的风险工况及几何模型,分析了球罐、卧式容器(半球形封头、平板封头、椭圆形封头)、支座式立式容器(半球形封头、平板封头、椭圆形封头)、裙座式立式容器、塔设备内有效液位高度的计算方法,基于有效液位高度建立了不同类型液体容器湿润面积的计算公式,并给出了计算算例。本研究可为外部火灾环境液体容器超压泄放设计提供参考。

**关键词:**液体容器;外部火灾;超压泄放;湿润面积

**中图分类号:**TH49;TE82;TH122　　**文献标志码:**A

# Discussion on wetted surface area calculation of liquid vessel venting design under external fire environment

HAN Bing[1,2],DAI Xingtao[1,2],YAN Xingqing[3],LI Yue[3],YU Jianliang[3]

(1.Key Laboratory of Gas Cylinders Safety Technology for State Market Regulation,Dalian 116013,China;
2.Dalian Boiler and Pressure Vessel Inspection & Testing Institute Co.,Ltd.,Dalian 116013,China;
3.School of Chemical Engineering,Dalian University of Technology,Dalian 116024,China)

**Abstract:**The determination of wetted surface area of vessel is the first step to design the overpressure venting of liquid (liquified gas is included) vessels under external fire environment according to the API 521—2020 standard. It has been found by investigations and research that the calculations of the wetted surface area are prone to errors,and the systematical description of the calculations has not been given in existing literatures.In this paper,by using the combination methods of investigation analysis and induction and summary,the different risk conditions and geometric models for liquid vessels under external fire environments have been built. Formulas for calculating the effective liquid height of liquid vessels in spherical tanks,horizontal containers (hemispherical heads,flat heads,elliptical heads),support type vertical containers (hemispherical heads,flat heads,elliptical heads),skirt type vertical containers,tower equipment were analyzed. The calculations of the wetted surface area of different liquid vessels under external fire environments are given bases on the effective liquid height.The research can provide reference for the overpressure venting design for liquid vessels with external fire environments.

**Key words:**liquid vessel;external fire;overpressure venting;wetted surface area

## 0　引言

近年来,我国压力容器技术发展迅速[1]。但压力容器在运行时仍可能存在因误操作、零部件故障、物料累计、能量变化、反应失控、外部火灾等因素导致内部出现超压风险[2]。为了避免因容器

**收稿日期:**2024-08-05　**修回日期:**2024-10-22

**基金项目:**国家市场监管重点实验室(气瓶安全技术)开放课题项目(2023K02)“储氢容器/气瓶安全泄放特性研究”

内部超压过高而发生安全事故，国内外标准及规范均规定需要设置压力泄放装置，如爆破片、安全阀等[3-4]。压力泄放装置设计的关键是确定容器在超压风险场景时的安全泄放量并计算所需的最小泄放面积[5-6]。

外部火灾风险是液体压力容器普遍面临的一种超压风险。随着我国能源的高速发展，液化天然气、液化石油气、液氢、液氨等容器大量涌现，液体容器面临的外部火灾风险越来越多。科学开展此类容器在外部火灾环境的超压泄放设计，是确保容器安全使用的重要技术途径[7-11]。美国石油学会颁布的API 520.1—2020 *Sizing, selection and installation of pressure-relieving devices, Part 1-Sizing and selection*，API 520.2—2020 *Sizing, selection and installation of pressure-relieving devices, Part 2-Installation*，API 521—2020 *Pressure-relieving and depressuring system* 等标准对外部火灾环境液体容器的超压泄放设计方法进行了规定，国内GB 150—2011《压力容器》、SH/T 3210—2020《石油化工装置安全泄压设施工艺设计规范》等部分标准规范也引用了该方法。其基本思路是当外部火焰热量通过液体容器壁面传递至内部液体介质时，介质气化发生超压，容器所需的安全泄放量等于火焰热量引起的介质气化量。依据此思路，开展液体容器超压泄放设计时首先需计算火焰向介质传递的热量，然后计算安全泄放量，最后计算所需最小泄放口径。在计算火焰传递热量时，需要明确容器的湿润面积 $A_{ws}$，则火焰传递热量计算式如下：

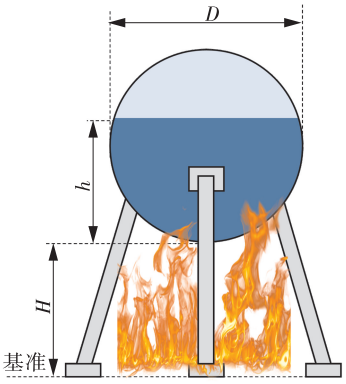
$$Q = CFA_{ws}^{0.82} \tag{1}$$

式中，$Q$ 为火焰通过湿润面积向容器内介质传递的总热量，W；$C$ 为系数，与容器是否配备快速消防设施和良好的排燃料系统有关；$F$ 为环境因子；$A_{ws}$ 为暴露于火灾中的容器内介质的总润湿面积，$m^2$。

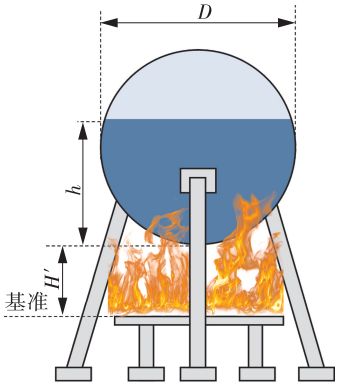
调研发现，部分技术人员不太理解容器湿润面积的计算方法，导致得到了错误的泄放设计结果。现有文献虽然对此做过探讨[12-14]，但信息较零散，无法有效指导泄放设计。基于此，探讨外部火灾环境液体容器泄放设计中湿润面积计算方法，为科学开展超压泄放设计提供参考。

## 1 外部火灾环境液体容器风险场景及几何模型

本文仅考虑工业最为常见的受热后能够气化的液体或液化气体容器（统称液体容器）的部分充装场景，即充装率低于1的工况。当液体容器处于外部火灾环境时，容器内液体介质不断吸收壁面传递的火焰热量，液体逐渐气化产生蒸汽发生超压。API 521—2020规定容器内液体的湿润面积是液体吸热产生蒸汽的有效面积，以球罐为例，如图1（a）所示，湿润面积是容器接触液体的内壁面面积。但API 521—2020以碳氢化合物引起的开敞空间池火作为容器外部发生火灾的场景，经过大量试验，认为火焰能够传递至容器内部介质的最大高度为7.6 m。因此，湿润面积的计算必须考虑最大火焰高度7.6 m这一限制条件。通常，外部火灾燃料位置与容器支座处于相同水平面，可以直接对比最大火焰高度7.6 m与支座高度 $H$ 及液位高度 $h$ 的关系。但当外部火灾燃料位置与支座处于不同水平面时，则需要以外部燃料位置为基准，对比最大火焰高度7.6 m与新基准面支座高度 $H'$ 及液位高度 $h$ 的关系，如图1（b）所示。




（a）燃料位置与容器支座处于相同水平面




（b）燃料位置与容器支座处于不同水平面

**图1 球罐外部火灾风险场景**

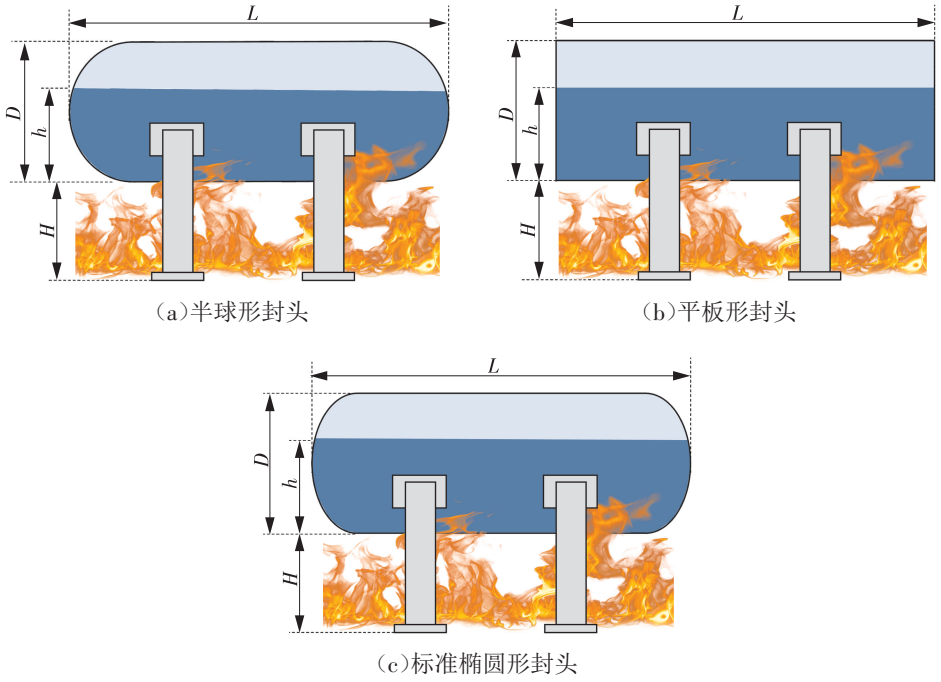
Fig.1 Risk environment of spherical tank under external fire

以燃料位置与容器支座处于相同水平面为例，调研发现，石油化工行业常遇到的外部火灾液

体容器风险场景及几何模型有如下几种。

场景1：球罐。罐体直径为$D$，内部物料高度为$h$，支座高度为$H$，如图1（a）所示。

场景2：不同类型封头的卧式容器。筒体直径为$D$，容器总长度为$L$，内部物料高度为$h$，支座高度为$H$。封头类型包括半球形封头、平板形封头、椭圆形封头，如图2所示。



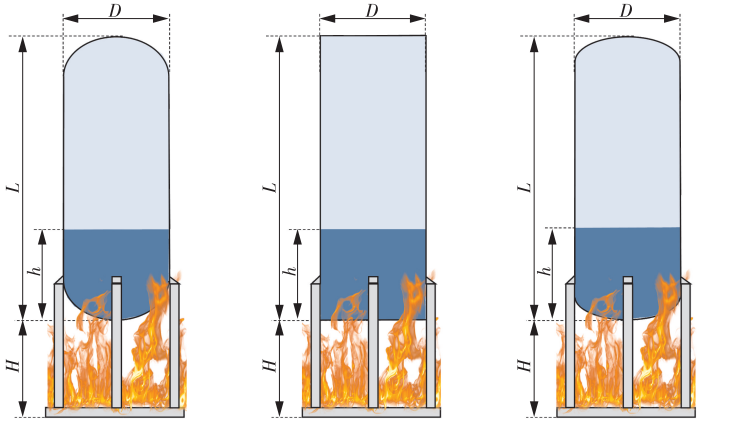

（a）半球形封头　（b）平板形封头

（c）标准椭圆形封头

**图2　卧式容器外部火灾风险场景**

Fig.2　Risk environment of horizontal vessel under external fire

场景3：不同类型封头的支座型立式容器。筒体直径为$D$，容器总高度为$L$，物料高度为$h$，支座高度为$H$。封头类型包括半球形封头、平板形封头、椭圆形封头，如图3所示。




（a）半球形封头　（b）平板形封头　（c）标准椭圆形封头

**图3　支座型立式容器外部火灾风险场景**

Fig.3　Risk environment of support type vertical vessel under external fire

场景4：裙座型立式容器。筒体直径为$D$。由于密闭式裙座将容器底部封头包围在内，火焰发生在裙座外围时，底部封头输入的热量可以忽略不计，因此，此时容器总高度$L$及液位高度$h$均不考虑底部封头，如图4所示。

场景5：塔设备。塔体直径$D$，裙座高度为$H$。与裙座型立式容器类似，塔设备的总高度$L$及底部液位高度$h$均不考虑底部封头。此外，当火焰能够达到塔板高度时，还要考虑塔板上液层的吸热作用，故塔板上液层高度为$x$，如图5所示。

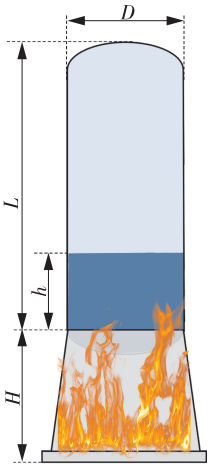



图4 裙座型立式容器外部火灾风险场景

Fig.4 Risk environment of skirt type vertical vessel under external fire

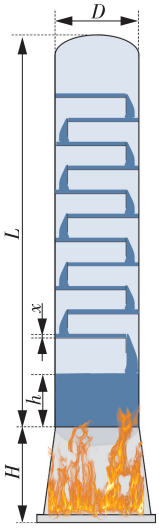



图5 塔设备外部火灾风险场景

Fig.5 Risk environment of tower under external fire

## 2 液体容器有效液位高度计算

有效液位高度$h_{eff}$是指考虑了容器壁面能够吸收热量的最大火焰高度7.6 m时，确定的用于计算润湿面积的高度。对于球罐，还应考虑当液位高度低于$D/2$时，取有效液位高度为$D/2$进行计算。计算有效液位高度$h_{eff}$的逻辑框图如图6所示。图中，$H_t$为液位至外部火灾燃料基准面的总高度，m；$H_{eff}$为考虑最大火焰高度7.6 m时液位至外部火灾燃料基准面的总有效高度，m；$h_e$为考虑最大火焰高度7.6 m时容器内液位基本高度，m；$h_{eff}$为用于计算湿润面积的容器内液位有效高度，m。

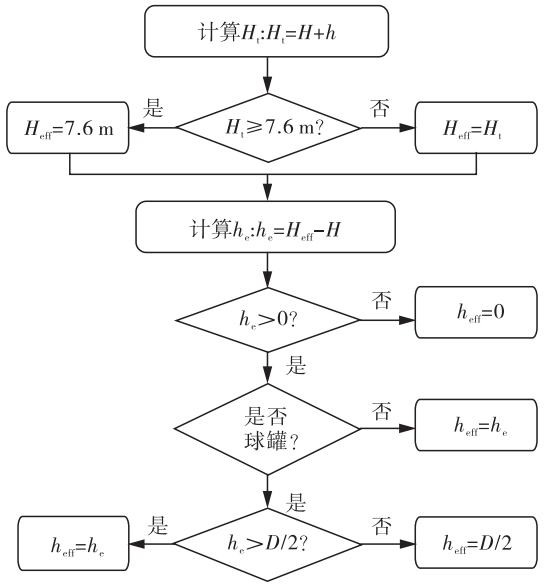



图6 有效液位高度$h_{eff}$计算逻辑框图

Fig.6 Logical diagram of effective liquid height calculation

## 3 基于有效液位高度的液体容器湿润面积计算

在获得$h_{eff}$后，可依据数学方法计算容器的湿润面积。

对于场景1中的球罐，如图1(a)所示，湿润面积$A_{ws}$为高度$h_{eff}$、内径$D$的球缺面积，其计算公式如下：

$$A_{ws}=\pi D h_{eff} \tag{2}$$

对于场景2中的半球封头卧式容器，如图2(a)所示，湿润面积$A_{ws}$为高度$h_{eff}$、内径$D$、长度$(L-D)$的圆柱缺面积与2个高度$h_{eff}$、内径$D$的半球缺面积之和，其计算公式如下：

$$A_{ws}=\pi D(L-D)\frac{\beta}{180}+\pi D h_{eff} \tag{3}$$

式中，$\beta$为液位有效角度，(°)。

$\beta$的计算公式如下：

$$\beta=\cos^{-1}\left(1-2\frac{h_{eff}}{D}\right) \tag{4}$$

对场景2中的平板封头卧式容器，如图2(b)所示，湿润面积$A_{ws}$为高度$h_{eff}$、内径$D$、长度$L$的圆柱缺面积与2个高度$h_{eff}$、内径$D$的圆缺面积之和，计算方法见下式：

$$A_{ws}=\pi D L\frac{\beta}{180}+\pi D^2\frac{\beta}{360}-D\left(\frac{D}{2}-h_{eff}\right)\sin\beta \tag{5}$$

对于场景2中的标准椭圆封头卧式容器，如图2(c)所示，湿润面积$A_{ws}$为高度$h_{eff}$、内径$D$、长

度$L$的圆柱缺面积与2个高度$h_{eff}$、内径$D$的椭球缺面积之和。椭球缺面积的精确计算较为复杂，在此采用文献给出的近似方法[15]。湿润面积计算公式如下：

$$A_{ws}=\pi D(L-D)\frac{\beta}{180}+2.168Dh_{eff} \quad (6)$$

对于场景3中的支座型半球封头立式容器，如图3(a)所示，湿润面积$A_{ws}$为高度($h_{eff}$–$D$/2)、内径$D$的圆柱面积与1个内径$D$的半球面积之和，其计算公式如下：

$$A_{ws}=\pi Dh_{eff} \quad (7)$$

对于场景3中的支座型平板封头立式容器，如图3(b)所示，湿润面积$A_{ws}$为高度$h_{eff}$、内径$D$的圆柱面积与1个内径$D$的圆板面积之和，其计算公式如下：

$$A_{ws}=\pi Dh_{eff}+\frac{\pi}{4}D^2 \quad (8)$$

对于场景3中的支座型标准椭圆封头立式容器，如图3(c)所示，湿润面积$A_{ws}$为高度($h_{eff}$–$D$/4)、内径$D$的圆柱面积与1个短轴$D$/4、长轴$D$/2的标准椭圆封头面积之和，其计算公式如下：

$$A_{ws}=\pi Dh_{eff}+0.542D^2 \quad (9)$$

对于场景4中的裙座型立式容器(见图4)，因被裙座包围的底部封头不计入湿润面积，故湿润面积$A_{ws}$为高度$h_{eff}$、内径$D$的圆柱面积，其计算公式如下：

$$A_{ws}=\pi Dh_{eff} \quad (10)$$

对于场景5中的塔设备(见图5)，由于要考虑塔板的液层高度，故需要分情况计算湿润面积。当有效液位高度$h_{eff}\leqslant h$时，湿润面积$A_{ws}$为高度$h_{eff}$、内径$D$的圆柱面积，其计算方法与式(10)一致。当有效液位高度$h_{eff}>h$时，需要判断$h_{eff}$能够包含的塔板数$n$。此时，湿润面积$A_{ws}$为高度$h_{eff}$、内径$D$的圆柱面积与$n$个高度$x$、内径$D$的圆柱面积之和，其计算公式如下：

$$A_{ws}=\pi Dh_{eff}+\pi Dnx \quad (11)$$

需要注意的是，当$h_{eff}>h$，但达不到底部第一块塔板高度时，$n$=0，此时式(11)即转变为了式(10)。系统地建立图1~5所示的液体容器超压风险场景，以及对应的湿润面积的计算式(2)~(11)，可以将上述场景及公式编译为计算软件，为快速、准确地确定湿润面积及后续超压泄放设计提供了支持。

## 4 计算案例

球罐罐体直径$D$=4.2 m，罐体底端距离地面高度$H$=5 m，内部液位高度$h$=4 m。在工程上常遇到的湿润面积计算方法有如下两种：(1)采用容器内液位高度$h$的介质与罐体接触的内表面积作为湿润面积；(2)采用容器内液位高度为半径$D$/2的介质与罐体接触的内表面积作为湿润面积。将上述两种计算方法得到的湿润面积计算结果进行对比，见表1。

**表1 不同湿润面积计算方法的结果对比**

Tab.1 Result comparisons of wetted surface area calculated by different methods

| 计算方法 | 方法(1) | 方法(2) | 准确方法[见式(2)] |
|---|---|---|---|
| 计算采用的液位高度/m | $h$=4.0 | $D$/2=2.1 | $h_{eff}$=2.6 |
| 湿润面积计算结果/m$^2$ | 52.75 | 31.65 | 34.29 |

从表中可以看出，这两种错误的计算方法得到的湿润面积可能大于、也可能小于正确结果，继而导致得到错误的超压泄放面积。其中，方法(1)得到的结果偏于保守，误差约为53.8%；方法(2)得到的结果偏于危险，误差约为–7.7%。因此，准确计算湿润面积是科学开展超压泄放设计的前提。

## 5 结语

构建了外部火灾环境下盛装液体的球罐、卧式容器(半球封头、平板封头、椭圆封头)、支座式立式容器(半球封头、平板封头、椭圆封头)、裙座式立式容器和塔设备的风险场景及几何模型，基于有效液位高度给出了液体容器湿润面积的计算方法，为外部火灾环境液体容器超压泄放设计及湿润面积计算程序的编制提供了参考。

## 参考文献：

[1] 陈学东，范志超，陈永东，等.我国压力容器设计制造与维护的绿色化与智能化[J].压力容器，2017，34(11)：12–27.
CHEN X D，FAN Z C，CHEN Y D，et al.Green and intelligent design，manufacturing and maintenance of pressure vessels in China [J]. Pressure Vessel Technology，2017，34(11)：12–27.

[2] 董泽,陈利平,陈网桦,等.密闭容器内失控反应超压的数学建模及其在压力泄放中的应用[J],化工学报,2017,68(11):4453-4460.
DONG Z,CHEN L P,CHEN W H,et al.Mathematical model of runaway reaction pressure in closed container and its application in vent calculation[J]. CIESC Journal,2017,68(11):4453-4460.

[3] 唐旭丽,刘青烽,李晓峰.ASME《锅炉与压力容器规范——超压保护规则》分析研究[J].标准科学,2022(10):75-79.
TANG X L, LIU Q F, LI X F. Research on the new code ASME BPVC "Rules for overpressure protection" [J].Standard Science,2022(10):75-79.

[4] 吴全龙,惠虎,史斐菲,等.CGA S-1.3—2020超压泄放装置应用解析[J].压力容器,2022,39(8):66-74.
WU Q L, HUI H, SHI F F, et al. Analysis on application of pressure relief devices in CGA S-1.3—2020[J]. Pressure Vessel Technology, 2022, 39(8): 66-74.

[5] 史斐菲,吴全龙,李景良.真空绝热深冷压力容器安全泄放量计算探讨[J],压力容器,2021,38(1):61-67.
SHI F F, WU Q L, LI J L. Research on calculation of safety relief capacity for vacuum insulated cryogenic pressure vessels [J]. Pressure Vessel Technology, 2021,38(1):61-67.

[6] 吴全龙,胡熙玉.真空绝热低温容器安全泄放装置应用探讨[J].压力容器,2020,37(10):70-78.
WU Q L, HU X Y. Discussion on application of safety relief devices for cryogenic vessel[J]. Pressure Vessel Technology,2020,37(10):70-78.

[7] 吴全龙,史斐菲,徐维普,等.火灾工况充装压缩气体容器超压泄放装置尺寸计算解析[J].压力容器,2023,40(11):62-66.
WU Q L, SHI F F, XU W P, et al. Research on size calculation of pressure relief devices for gas-filled pressure vessels under exterior fire condition [J]. Pressure Vessel Technology,2023,40(11):62-66.

[8] 吴全龙.火灾工况下盛装液化气体压力容器的安全泄放量计算方法探讨[J],压力容器,2018,35(10):59-64.
WU Q L. Research on calculation of safety relief capacity of liquified gas pressure vessels under external fire condition [J]. Pressure Vessel Technology,2018,35(10):59-64.

[9] 郭远顺,于新海,赵桂生,等.安全阀气体泄漏在线监测方法研究[J].流体机械,2023,51(3):77-83.
GUO Y S, YU X H, ZHAO G S, et al. Research on on-line monitoring method of gas leakage of safety valve[J].Fluid Machinery,2023,51(3):77-83.

[10] 罗岩松,何清,于新海,等.先导式主蒸汽安全阀动作性能瞬态模拟及分析[J].流体机械,2023,51(12):49-55.
LUO Y S, HE Q, YU X H, et al. Transient simulation and analysis of pilot main steam safety valve performance [J]. Fluid Machinery, 2023, 51(12): 49-55.

[11] 宋学官,周威豪,鄢来强,等.流-固-热多物理场耦合作用下安全阀密封性分析[J].流体机械,2023,51(10):24-32.
SONG X G, ZHOU W H, YAN L Q, et al. Sealing performance analysis of spring type safety valve disc under coupled action of multiple fluid-solid-thermal fields[J].Fluid Machinery,2023,51(10):24-32.

[12] 王绪建.外部火灾事故工况下安全泄放量计算[J].化工设计,2023,33(6):47-49.
WANG X J. Calculation of relief capacity for fire scenario [J]. Chemical Engineering Design, 2023, 33(6):47-49.

[13] 黄承明.外部火灾工况下压力容器润湿面积的计算[J].化工与医药工程,2016,37(4):25-28.
HUANG C M. Calculation of wet area on pressure vessel in external fire relief scenario[J].Chemical and Pharmaceutical Engineering,2016,37(4):25-28.

[14] 傅睿.椭圆封头卧式容器火灾工况安全阀计算优化[J].石油化工设计,2024,41(1):45-49.
FU R. Optimization of safety valve calculation for horizontal vessels with elliptical heads under fire conditions [J]. Petrochemical Design, 2024, 41(1): 45-49.

[15] FIROOZI B. Calculate the wetted surface area of pressure vessels [J]. Chemical Engineering, 2018, 125(10):58-60.

**作者简介**:韩冰(1979),女,正高级工程师,主任,主要从事特种设备检测检验工作,通信地址:116023辽宁省大连市西岗区新河街20号,E-mail:hb_dbpvi@126.com。

**通信作者**:喻健良(1963),男,教授,主要从事压力容器超压泄放研究,通信地址:116024辽宁省大连市甘井子区凌工路2号大连理工大学西校区H513,E-mail:yujianliang@dlut.edu.cn。

**本文引用格式**:
韩冰,戴行涛,闫兴清,等.外部火灾环境液体容器泄放设计中湿润面积计算探讨[J].压力容器,2025,42(2):23-28.
HAN Bing, DAI Xingtao, YAN Xingqing, et al. Discussion on wetted surface area calculation of liquid vessel venting design under external fire environment[J].Pressure Vessel Technology,2025,42(2):23-28.