doi:10.3969/j.issn.1001-4837.2025.04.006

设计计算

火烧环境无隔热气瓶超压工程预测模型构建

韩　冰[1,2],戴行涛[1,2],刘　岩[1,2],闫兴清[3],李　岳[3],喻健良[3]
(1.国家市场监督管理总局重点实验室(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:针对火烧环境下气瓶受热快速升温引发的承压能力降低问题,以无隔热气瓶为研究对象,利用热力学、传热学、材料力学等理论,通过合理简化及假设,构建气瓶内部超压及破裂工程预测模型。基于Matlab软件编制模型计算程序,选取3组天然气气瓶火烧试验作为算例,调用REFPROP软件确定不同温度和压力下的甲烷物性参数,并将模型计算结果与试验值进行对比。结果表明,模型计算结果可靠性的关键是火焰温度和火焰向壁面对流传热系数的设置,现有文献推荐的火焰温度和对流传热系数使得计算值显著高于试验值。当火焰温度设置为1 000 K,对流传热系数设置为15 W/(m^2·K)时,3组算例计算得到的气瓶内气体压力与试验值较为吻合。研究结果可为量化火烧环境无隔热气瓶的传热及材料强度失效机制提供参考。

关键词:气瓶;无隔热;超压;火烧环境;工程模型
中图分类号:TH49;O643.21;TK124　　**文献标志码:**A

Construction of engineering prediction model on overpressure of uninsulated gas cylinder under fire environment

HAN Bing[1,2],DAI Xingtao[1,2],LIU Yan[1,2],YAN Xingqing[3],LI Yue[3],YU Jianliang[3]
(1.Key Laboratory of Gas Cylinders Safety Technology,State Administration for 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: Aiming at the problem of reduced pressure bearing capacity caused by rapid temperature rise of gas cylinders due to heat in fire burning environment,taking uninsulated gas cylinders as research object,an engineering prediction model for internal overpressure and rupture was constructed,by using theories of thermodynamics,heat transfer,and material mechanics and making some simplification and assumptions.A calculation program for model was developed based on Matlab software.Three natural gas cylinder experiments under external fire were selected as the calculation case.The physical property parameters of methane at different temperatures and pressures were determined by calling REFPROP software.The calculation results of the model were compared with experimental values.The results indicate that the key to reliability of the model calculation results lies in the setting of flame temperature and convective heat transfer coefficient towards the wall.The flame temperature and convective heat transfer coefficient recommended in existing literature result in significantly higher predicted values than experimental values.When the flame temperature is set to 1 000 K and the convective heat transfer coefficient is set to 15 W/(m^2·K),the calculated gas pressure of the three sets of calculation cases is in good agreement with the experimental values.The research results can provide a reference for quantifying the heat transfer and material strength failure mechanism of uninsulated gas cylinders in fire environments.

Key words:gas cylinder;uninsulated;overpressure;fire environment;engineering model

收稿日期:2024-12-17　**修回日期:**2025-02-26
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)

0 引言

压缩气体气瓶被广泛应用到各类行业及各种环境中[1-5]。作为一种定容设备，当气瓶内充装气体后，其内部压力变化仅受环境温度影响。考虑到气瓶充装压力远低于其爆破压力，因环境温度变化引起的气瓶升温超压风险较小。但当外部环境发生火灾时，火焰热量经气瓶壁面传递至内部气体，易引发快速升温超压[6]。此外，壁面材料强度随温度的升高显著降低[7]。可以预见，气瓶内部快速升高的压力作用在承压能力逐渐降低的内壁面，极易因材料强度失效而发生爆破事故[8]。

为了降低气瓶发生此类超压风险，相关标准及规范如TSG 23—2021《气瓶安全技术规程》[9]、GB/T 33215—2016《气瓶安全泄压装置》[10]、CGA S-1.1—2019 *Pressure relief device standards-Part 1-Cylinders for compressed gases*[11]等均要求，对盛装非剧毒介质的气瓶均应设置安全泄放装置。安全泄放装置的科学设置，首先需要确定气瓶在火灾环境下内部压力不升高所需的安全泄放量。相关标准对外部火灾环境下气瓶安全泄放量的计算给出了工程经验公式。

各标准给出的工程经验公式虽然得到了大量应用，但经验公式存在适用范围窄、计算结果保守等问题。较多研究机构如浙江大学[12-13]、中国特种设备检测研究院[14-15]、大连锅炉压力容器检验检测研究院有限公司[16-17]、瑞典RISE研究所[18]、德国BAM研究所[19-20]、英国华威大学(The University of Warwick)[21-22]等分别采用火烧试验、计算流体动力学数值模拟等方法再现气瓶在外部火灾环境下的风险环境，取得更为精准、直观的气瓶超压、泄放或破裂结果。

快速预测火烧环境下气瓶内部升温超压及破裂是理解气瓶风险、开展泄放设计的基础，通常采用火烧试验，以及有限元数值模拟开展此方面研究。火烧试验方法难度高，风险大；采用数值模拟方法能够较细致获得气瓶火烧过程传热、传质细节，但过程较为耗时，难以快速实现火烧环境下气瓶超压风险预测，且对工程技术人员难度较大。

综上所述，本文以火烧环境无隔热气瓶为研究对象，利用热力学、传热学、材料力学等理论，通过进行合理简化及假设，构建气瓶内部升温超压及破裂工程预测模型，可为理解火烧环境气瓶失效机制、快速开展气瓶风险评估、科学构建气瓶超压泄放设计提供支持。

1 风险场景及模型构建

1.1 风险场景

图1示出外部火烧环境无隔热气瓶风险场景，涉及火焰、气瓶壁面材料、气瓶内气体3种介质的相互作用。将气瓶简化为圆柱形结构，体积为V_w，内径为D_w，长度为L_w，厚度为δ_w。气瓶内部气体压力为P_g(绝压)，温度为T_g，质量为m_g。气瓶外部为火烧环境，火焰温度为T_f。火焰向壁面传递的热流密度为q_f''。为便于构建工程模型，对该场景做以下假设及简化：假定气瓶外壁面完全受火，由于壁面钢材厚度较小且热导率大，认为沿厚度方向不存在温度梯度，即整个壁面的温度T_w相同；忽略气瓶内部介质的温度梯度及质量传递，认为气瓶内气体温度T_g均匀。虽然上述假设及简化与实际有所不同，但能够重点突出火焰、材料及气体的传热学及热力学机制。

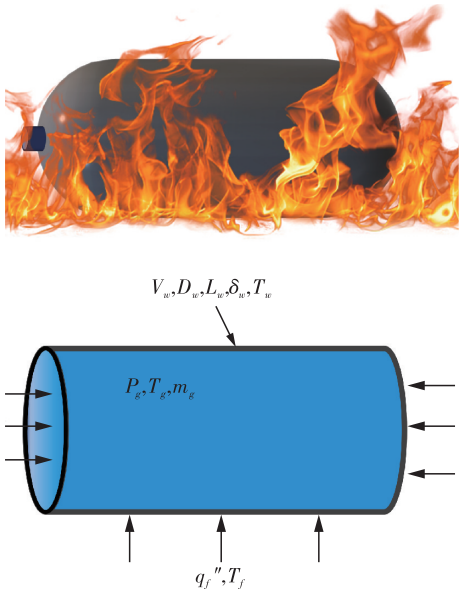


图1 外部火烧环境无隔热气瓶风险场景

Fig.1 Risk scenarios of uninsulated gas cylinders under external fire environment

1.2 传热模型构建

火焰释放的热流主要通过辐射及对流的方式传递给壁面，热流密度q_f''可由式(1)计算：

$$q_f''=\alpha_s\cdot\sigma\cdot(\varepsilon_f\cdot T_f^4-\varepsilon_s\cdot T_w^4)+h_f\cdot(T_f-T_w) \quad (1)$$

式中，q_f''为火焰向壁面传递的热流密度，W/m^2；α_s为壁面吸收率，通常取0.85；σ为Stefan-Boltzmann常数，$\sigma=5.67\times10^{-8}$ W/(m$^2\cdot$K^4)；ε_f为火焰发射率，通常取0.85；T_f为火焰温度，K；ε_s为壁

面发射率，通常取1.0；T_w为气瓶壁面温度，K；h_f为火焰向壁面的对流传热系数，W/(m²·K)。

气瓶壁面与瓶内介质通过自然对流的方式进行热传递，热流密度q_g''由式(2)计算：

$$q_g''=h_g\cdot(T_w-T_g) \tag{2}$$

式中，q_g''为气瓶壁面向内部气体传递的热流密度，W/m²；h_g为气瓶内部介质与内壁面的对流传热系数，W/(m²·K)；T_g为瓶内气体温度，K。

由于气瓶内部介质与内壁面的传热方式为对流传热，h_g由下式计算：

$$h_g=\frac{\overline{Nu_L}\cdot k_g}{L} \tag{3}$$

式中，$\overline{Nu_L}$为平均努塞尔数；k_g为气体的导热系数，W/(m·K)；L为特征长度，m，此处取气瓶筒体长度L_w。

将气体与内壁面的传热视为垂直圆柱的自然对流传热，则可采用邱吉尔和邱(Churchill and Chu)公式[23]计算$\overline{Nu_L}$：

$$\overline{Nu_L}=\frac{h_gL_w}{k_g}=\left\{0.825+\frac{0.387Ra^{1/6}}{[1+(0.492/Pr)^{9/16}]^{8/27}}\right\} \tag{4}$$

$$Ra=Gr\cdot Pr \tag{5}$$

$$Gr=\frac{g\cdot\beta_g\cdot(T_w-T_g)\cdot {L_w}^3}{{v_g}^2} \tag{6}$$

$$Pr=\frac{c_{pg}\cdot\mu_g}{k_g} \tag{7}$$

式中，Ra, Gr, Pr分别为瑞利数、格拉晓夫数、普朗特数；g为重力加速度，m/s²；β_g为气体体积热膨胀系数，K⁻¹；v_g为气体运动黏度，m²/s；c_{pg}为气体比定压热容，J/(kg·K)；μ_g为气体动力黏度，kg/(m·s)。

依据气瓶壁面的热流密度传递关系可知：

$$q_w''=q_f''-q_g'' \tag{8}$$

式中，q_w''为气瓶壁面的热流密度，W/m²。

将气瓶承受外部火烧过程的时间t离散化，在第i个时间步时，气瓶壁面温度为$T_w(i)$，当时间增加Δt，时间步变为i+1后，气瓶壁面温度升高至$T_w(i+1)$，对壁面建立能量守恒关系式，有：

$$A_w\cdot\delta_w\cdot\rho_w\cdot c_{pw}\cdot[T_w(i+1)-T_w(i)]=q_w''(T_w(i))\cdot A_w\cdot\Delta t \tag{9}$$

式中，A_w为气瓶表面积，m²；δ_w为气瓶厚度，m；ρ_w为壁面材料密度，kg/m³；c_{pw}为壁面材料比定压热容，J/(kg·K)。

联合式(1)(2)和(8)(9)并整理$T_w(i+1)$的计算式：

$$T_w(i+1)=\frac{[q_f''(T_w(i))-q_g''(T_w(i),T_g(i))]\cdot\Delta t}{\delta_w\cdot\rho_w(T_w(i))\cdot c_{pw}(T_w(i))}+T_w(i) \tag{10}$$

对气瓶内气体建立能量守恒关系式，则有：

$$V_w\cdot\rho_g(T_w(i))\cdot c_{pg}(T_w(i))\cdot(T_g(i+1)-T_g(i))=q_g''(T_w(i),T_g(i))\cdot A_w\cdot\Delta t \tag{11}$$

整理$T_g(i+1)$的计算式，得：

$$T_g(i+1)=\frac{q_g''(T_w(i),T_g(i))\cdot\Delta t}{D_i/2\cdot\rho_g(T_w(i))\cdot c_{pg}(T_w(i))}+T_g(i) \tag{12}$$

式中，D_i为气瓶内径，m。

1.3 气瓶内气体压力模型构建

对气瓶内气体的初始时刻及第i+1时刻，采用实际气体状态方程$P_g\cdot V_w=Z\cdot n\cdot R\cdot T_g$，可得到$i$+1时刻气体压力$P_g(i+1)$的计算式：

$$P_g(i+1)=\frac{Z(i+1)\cdot T_g(i+1)}{Z(0)\cdot T_g(0)}\cdot P_g(0) \tag{13}$$

式中，$Z(0), Z(i+1)$分别为初始时刻、第i+1时刻的压缩因子。

1.4 气瓶壁面材料破裂准则构建

采用第四强度理论构建气瓶壁面材料的破裂准则，即当气瓶材料的von Mises应力σ_e达到材料的允许抗拉强度σ_b时，气瓶破裂：

$$\sigma_e\geqslant\sigma_b \tag{14}$$

允许抗拉强度σ_b与材料的抗拉强度R_m有关：

$$\sigma_b=k_s\cdot R_m \tag{15}$$

式中，k_s为安全系数，视预测裕量确定，取值范围0.85~1[24]；R_m为材料抗压强度，MPa。R_m是温度T的函数，需要通过开展不同温度下的材料强度测试得到。

在第i+1时刻，σ_e可依据介质压力p_g计算：

$$\sigma_e(i+1)=\frac{\sqrt{(\sigma_1-\sigma_2)^2+(\sigma_2-\sigma_3)^2+(\sigma_3-\sigma_1)^2}}{\sqrt{2}}=\frac{P_g(i+1)\cdot(D_w+\delta_w)}{\sqrt{2}\,\delta_w} \tag{16}$$

式中，$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$分别为气瓶壁面在承受内压时的3个方向主应力，MPa。

联立式(14)~(16)可知当气体压力$P_g(i+1)$满足如下条件时，气瓶破裂：

$$P_g(i+1)=\frac{\sqrt{2}\,\delta_w\cdot k_s\cdot R_m(T_g(i+1))}{(D_w+\delta_w)} \tag{17}$$

1.5 计算流程

利用前述计算模型，基于Matlab程序编制火烧环境无隔热气瓶超压及破裂预测计算流程见图2。

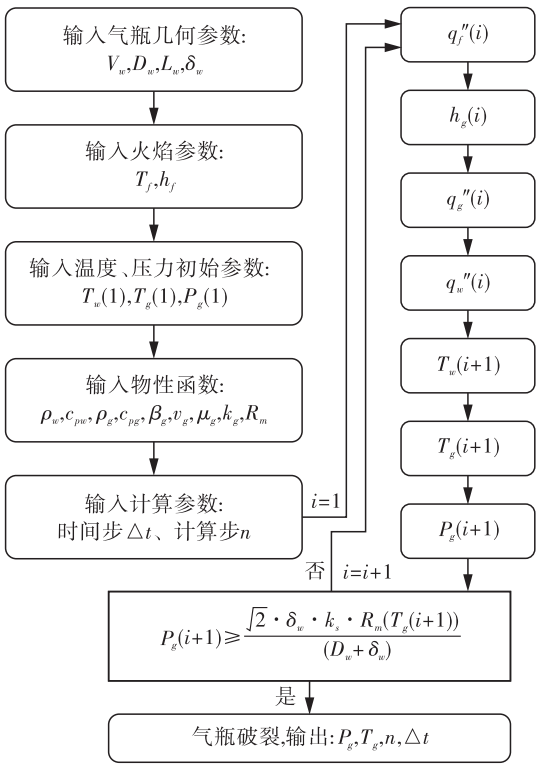


图2 外部火烧环境无隔热气瓶超压及破裂计算流程

Fig.2 Calculation process for overpressure and rupture of uninsulated gas cylinders in external fire environment

2 算例及模型可靠性分析

前述建立的模型，假设气瓶壁面温度均匀，沿厚度方向无温度梯度。对钢制气瓶，因钢材热导率较大，采用此假设不会引起过大的误差。但对于复合材料气瓶，此假设并不适用，需要添加复合材料的壁面热传导方程，并获得壁面复合材料的热物性和强度参数。故以压缩天然气钢瓶为算例，探讨模型的可靠性，未来将探讨复合材料气瓶的预测问题。

2.1 算例描述

作者单位开展了多组压缩天然气气瓶火烧试验，试验装置可参考文献[16-17]，在此不再赘述，仅给出与本文相关的信息。试验系统包括气瓶、燃料盘、温度和压力测量及采集系统。采用航空煤油作为外部火焰的模拟燃料，燃料盘覆盖全部气瓶长度以确保火焰形成包围火。气瓶内充装介质为甲烷。采用压力传感器监测气瓶内部介质压力，使用热电偶监测壁面不同位置的温度，选择3组火烧试验作为算例，试验气瓶参数见表1。这3组气瓶均配备温度驱动压力泄放装置(TPRD)，在试验持续一段时间后TRPD动作并泄放介质。但模型并未包括泄放过程，故仅对比泄放前气瓶内介质的压升过程。

表1 算例参数

Tab.1 Calculation case parameters

算例编号	气瓶型号	体积/m^3	外径/m	壁厚/m	长度/m	初始压力/MPa	初始温度/℃
1	CNG1-406D-210-20B	0.21	0.406	0.006 0	1.14	17.61	28
2	CNG1-356D-150-20B	0.15	0.365	0.007 5	1.81	17.27	31
3	CNG1-279D-90-20B	0.09	0.279	0.007 5	1.85	17.56	18

2.2 初始条件设置

计算所需的初始条件包括气瓶几何参数V_w，D_w，L_w，δ_w，初始温度及压力参数$T_w(1)$，$T_g(1)$，$P_g(1)$，均已在表1中给出(需换算单位)。此外，还需要火焰温度T_f及火焰向壁面的对流传热系数h_f。这两个数值的确定较为复杂，与燃料种类、火焰类型有关，也与试验的整体工况如风速风向、环境温湿度等有关。文献[25]推荐的不同类型火焰温度见表2。文献[26]采用的包围火的火焰温度T_f为1 078 K，对流传热系数h_f为30 W/(m^2·K)，与文献[25]的推荐数值有较小偏差。借鉴这两个文献的推荐值，并将这两个参量作为自变量开展变参数模拟计算，分析其对模拟结果的影响。

表2 火焰温度T_f及对流传热系数h_f取值

Tab.2 Values of flame temperature T_f and convection heat transfer coefficient h_f

火焰类型	包围火		局部火	
	T_f/℃	h_f/(W·m^{-2}·K^{-1})	T_f/℃	h_f/(W·m^{-2}·K^{-1})
通风控制池火	850~950	15~30	1 050~1 125	20~30
燃料控制池火	800~900	15~30	1 000~1 050	20~30
喷射火	950~1 050	50~125	1 000~1 150	100~150

2.3 物性参数

介质物性是温度的函数，故在模型中，需要精确确定甲烷在不同温度下的物性参数数值。美国国家标准与技术研究院（简称NIST）开发的REFPROP软件提供了大量物性数据，通过Matlab调用REFPROP的方式，在每一个时间步i内，准确计算甲烷在不同压力$P_g(i+1)$和温度$T_g(i+1)$下的密度ρ_g、比热容c_{pg}、动力黏度μ、热导率k_g、热膨胀系数β_g等参数。因测试气瓶均安装超压泄放装置，未涉及气瓶破裂现象，故不需要气瓶材料物性参数。

2.4 模型可靠性分析及讨论

设置时间步长为1 s，参考文献[25-26]给出的T_f和h_f数值开展计算，将计算得到的气瓶内介质压力数值与试验结果对比。图3为算例1的结果对比。可以发现，依据文献[25]推荐的T_f和h_f数值计算得到的介质压力显著高于试验值。相比文献[25]的推荐值，依据文献[26]推荐的T_f和h_f计算得到的介质压力有所降低，但仍然显著高于试验值。大量计算发现，在借鉴文献[25]给出的数值基础上，当火焰温度T_f设置为1 000 K，对流传热系数h_f设置为15 W/(m^2·K)时，预测得到的介质压力与试验值吻合较好。

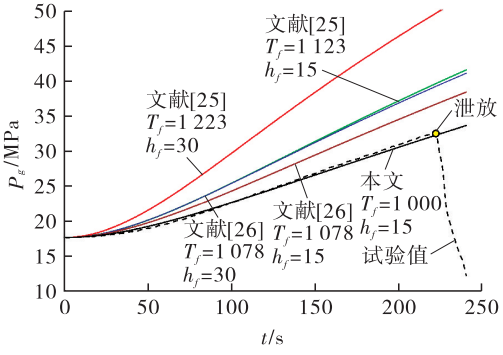


图3 不同初始参数下算例1气瓶压力计算值与试验值对比

Fig.3 Comparison between calculated and experimental values of gas cylinder pressure under different initial parameters in case 1

T_f设置为1 000 K，对流传热系数h_f设置为15 W/(m^2·K)时，表1所示的3个算例的气体压力及温度预测值与试验值对比如图4，5所示。由图4可以看出，算例1和算例2的气体压力计算值和试验值吻合较好，泄放时刻的气体压力偏差分别为-1.3%，7.4%。算例3的计算值稍高于试验值，泄放时刻的压力偏差为12.9%，作为工程应用方法，压力计算值保守，应用偏安全。由图5可以看出，试验得到的气瓶内气体温度存在波动，这是由于试验过程存在火焰、热量等不稳定性因素。模型计算得到的气体温度上升较为平稳。计算曲线虽然与试验曲线有偏差，但整体上能够反映气体的温升趋势。

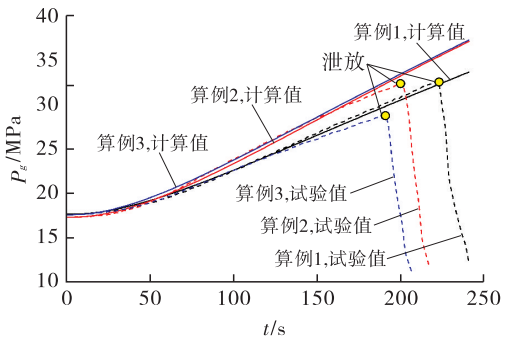


图4 3个算例气瓶内压力计算结果与试验结果对比

Fig.4 Comparison between calculated and experimental results of cylinder internal pressure in three cases

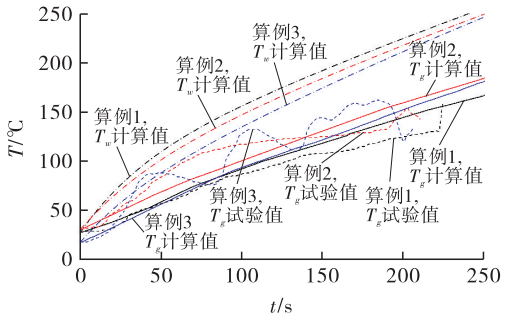


图5 3个算例气瓶内气体温度及壁面温度计算结果

Fig.5 Calculation results of cylinder internal gas temperature and wall temperature in three cases

从计算结果与试验结果对比可以看到，基于简化及假设条件建立的工程模型，能够反映火烧环境无隔热气瓶与火焰及气体的传热及强度失效机制，预测气瓶火烧时内部气体的压力及温度上升趋势。若已知气瓶材料抗拉强度与温度的函数关系，还可以估算气瓶在不安装TPRD时，发生破裂的时间。影响模型计算结果可靠性的关键是科学确定试验条件或者真实条件下的火焰温度和火焰向壁面的对流传热系数。现有文献及文中虽然给出推荐的数值，但要注意推荐数值是否适用于实际工况。以模型为基础，后续将依据高压气体射流及热力学理论构建气瓶内气体的泄放模型，预测安装TPRD的气瓶在火烧环境下的完整压力及温度变化，为TPRD的设计提供指导。同时，开展更多火烧工况（气瓶体积、气体种类、有无TPRD等）下的可靠性验证工作，为模型的工程应

用提供支持。

3 结语

建立火烧环境无隔热气瓶超压及破裂预测模型，对该过程的传热及强度失效机制进行量化，基于Matlab软件编制模型计算程序。通过算例预测结果和试验结果对比，发现影响模型计算结果可靠性的关键是火焰温度和火焰向壁面对流传热系数的设置。针对本文开展的火烧试验工况，文献给出的火焰温度和对流传热系数使得预测值显著高于试验值。当火焰温度设置为1 000 K，对流传热系数设置为15 W/(m^2·K)时，3个算例预测得到的介质压力与试验值较为吻合，建立的模型对理解火烧环境气瓶失效机制、快速开展气体气瓶风险评估、科学构建气瓶超压泄放设计具有一定的参考价值。

参考文献：

[1] 黄崧，陈杰，王泉生，等.我国气瓶安全状况分析与讨论[J].中国特种设备安全，2022，38(3)：6-12.
HUANG S，CHEN J，WANG Q S，et al.Analysis and discussion on cylinder safety in China [J]. China Special Equipment Safety，2022，38(3)：6-12.

[2] 赵广洲，鲍文杰，陈凡，等.高压气瓶4130X钢低周疲劳特性及疲劳设计曲线探讨[J].压力容器，2023，40(8)：37-43.
ZHAO G Z，BAO W J，CHEN F，et al.Discussion on low cycle fatigue characteristics and fatigue design curve of 4130X steel for high pressure gas cylinder [J].Pressure Vessel Technology，2023，40(8)：37-43.

[3] 杨刚，胡宇雄，陈新辉，等.立式低温绝热气瓶的振动特性研究[J].压力容器，2024，41(10)：34-42.
YANG G，HU Y X，CHEN X H，et al.Research on vibration characteristics of cryogenic insulated cylinder based on experiment and numerical simulation [J]. Pressure Vessel Technology，2024，41(10)：34-42.

[4] 王云峰，王哲，徐双庆，等.高压Ⅳ型储氢气瓶充氢工艺分析[J].流体机械，2024，52(10)：24-32.
WANG Y F，WANG Z，XU S Q，et al.Numerical analysis of hydrogen charging process for the high-pressure type Ⅳ hydrogen storage cylinder[J]. Fluid Machinery，2024，52(10)：24-32.

[5] 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.

[6] HORA J，KARL J，SUCHY O.Pressure cylinders under fire condition [J]. Perspectives in Science，2016，7：208-221.

[7] 楼国彪，王梦洁，李国强，等.Q355、Q460和Q690钢材火灾降温阶段力学性能对比[J].建筑材料学报，2025，28(4)：350-357.
LOU G B，WANG M J，LI G Q，et al.Comparison of mechanical properties of Q355，Q460 and Q690 steel at the cooling stage of fire [J]. Journal of Building Materials，2025，28(4)：350-357.

[8] TSCHIRSCHWITZ R，KRENTEL D，KLUGE M，et al.Hazards from failure of CNG automotive cylinders in fire [J]. Journal of Hazardous Materials，2019，367：1-7.

[9] 国家市场监督管理总局.气瓶安全技术规程：TSG 23—2021[S].北京：中国标准出版社，2021.
State Administration For Market Regulation.Regulation on safety technology for gas cylinder：TSG 23—2021 [S]. Beijing：Standards Press of China，2021.

[10] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局.气瓶安全泄压装置：GB/T 33215—2016[S].北京：中国标准出版社，2016.
General Administration of Quality Supervision，Inspection and Quarantine of the People's Republic of China.Pressure relief devices for gas cylinders：GB/T 33215—2016[S].Beijing：Standards Press of China，2016.

[11] Compressed Gas Association.Pressure relief device standards-Part 1-Cylinders for compressed gases (Sixteenth edition)：CGA S-1.1—2019 [S]. Chantilly：The Compressed Gas Association Inc，2019：12-13.

[12] 郑津洋，别海燕，陈虹港，等.纤维缠绕高压氢气瓶火烧温升试验及数值研究[J].太阳能学报，2009，30(7)：1000-1006.
ZHENG J Y，BIE H Y，CHEN H G，et al.Experimental and simulation study on bonfire test of high-pressure hydrogen storage vessels[J]. ACTA Energiae Solaris Sinica，2009，30(7)：1000-1006.

[13] 郑津洋，欧可升，花争立，等.车用高压储氢气瓶局部火烧试验方法研究[J].太阳能学报，2014，35(1)：58-63.
ZHENG J Y，OU K S，HUA Z L，et al.Investigation on localized fire test method for on-board high-pressure hydrogen storage tanks [J]. ACTA Energiae Solaris Sinica，2014，35(1)：58-63.

[14] 赵保峭，张博，胡熙玉，等.长管拖车气瓶火灾分析

及局部起火超压泄放试验研究[J].压力容器，2018，35(1)：57-62.
ZHAO B D，ZHANG B，HU X Y，et al.Fire accidents analysis of long tube trailer and experimental studies on overpressure release process in a local fire environment[J]. Pressure Vessel Technology，2018，35(1)：57-62.

[15] 王泽涛，刘岑凡，邓贵德，等.纤维缠绕大容积气瓶火烧试验及数值仿真[J].中国安全科学学报，2019，29(2)：88-93.
WANG Z T，LIU C F，DENG G D，et al.Fire test and numerical simulation of large capacity filament wound gas cylinder[J].China Safety Science Journal，2019，29(2)：88-93.

[16] 刘岩，胡军，郑津洋，等.车用高压氢燃料气瓶火烧试验及数值仿真[J].太阳能学报，2011，32(4)：589-593.
LIU Y，HU J，ZHENG J Y，et al. Bonfire test and numerical simulation of high-pressure hydrogen storage cylinders for vehicle [J]. ACTA Energiae Solaris Sinica，2011，32(4)：589-593.

[17] 李贝，王雪莹，金鑫，等.火灾场景下碳纤维复合高压储氢装置热损伤特征研究[J]，太阳能学报，2022，43(6)：398-404.
LI B，WANG X Y，JIN X，et al. Study on thermal damage properties of carbon fiber composite high-pressure hydrogen tank under fire scenarios[J]. ACTA Energiae Solaris Sinica，2022，43(6)：398-404.

[18] GEHANDLER J，LONNERMARK A. Uneven exposure of compressed natural gas (CNG) and hydrogen(H_2) cylinders：Fire and extinguishment tests [J].Fire Safety Journal，2024，146：104170.

[19] TSCHIRSCHWITZ R，KRENTEL D，KLUGE M，et al. Hazards from failure of CNG automotive cylinders in fire[J]. Journal of Hazardous Materials，2019，367：1-7.

[20] JANKUJ V，MYNARZ M，KRIETSCH A，et al. Experimental investigation of the consequences of acetylene pressure cylinder under fire conditions[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries，2022，80：104874.

[21] XU B P，CHENG C L，WEN J X.Numerical modelling of transient heat transfer of hydrogen composite cylinders subjected to fire impingement [J]. International Journal of Hydrogen Energy，2019，44：11247-11258.

[22] SALDI Z S，WEN J X. Modeling thermal response of polymer composite hydrogen cylinders subjected to external fires [J]. International Journal of Hydrogen Energy，2017，42：7513-7520.

[23] CHURCHILL S W，CHU H S. Correlating equations for laminar and turbulent free convection from a vertical plate [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer，1975，18：1323-1329.

[24] HEKKELSTRAND B，SKULSTAD P. Guidelines for the protection of pressurized systems exposed to fire [R]. Scandpower Risk Management AS：Kjeller，Norway，2004.

[25] SALATER P，OVERAA S J，KJENSJORD E. Size depressurization and relief devices for pressurized segments exposed to fire[J].CEP Magazine，2002，98，38-45.

[26] ANDREASEN A，BORRONI F，NIETO M Z，et al.On the adequacy of API 521 relief-valve sizing method for gas-filled pressure vessels exposed to fire[J]. Safety，2018，4(11)：1-17.

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，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，博士，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，刘岩，等.火烧环境无隔热气瓶超压工程预测模型构建[J].压力容器，2025，42(4)：41-47.
HAN Bing，DAI Xingtao，LIU Yan，et al.Construction of engineering prediction model on overpressure of uninsulated gas cylinder under fire environment[J].Pressure Vessel Technology，2025，42(4)：41-47.