

# 基于CFD的含硫气田水闪蒸气放空火炬安全性分析

龙伊丽, 吴 娇, 何志强, 谭 红, 蒲泓汀

中石油西南油气田分公司, 重庆气矿工艺研究所, 重庆

收稿日期: 2026年1月19日; 录用日期: 2026年2月25日; 发布日期: 2026年3月18日

## 摘 要

本文采用 $k-\varepsilon$ 湍流模型、EBU-Arrhenius燃烧模型、P-1热辐射模型, 模拟研究了风速与闪蒸罐液面高度对火焰热辐射场, 尤其是近地面热辐射范围的影响。结果表明: 较大风速下, 火焰热辐射中心向下偏移, 下风向热辐射范围扩大, 辐射强度随距离先增后减; 随着罐内液位的增高, 火焰热辐射范围变大, 近地面热辐射强度超过临界值, 对人员与环境存在一定的安全风险。

## 关键词

含硫气田, 安全性, 风速, 热辐射

# Safety Analysis of Vent Torch for Flash Gas from Sulfur-Bearing Gas Field Water Based on CFD

Yanli Long, Jiao Wu, Zhiqiang He, Hong Tan, Hongting Pu

Technology Research Institute of Chongqing Gas Mine, PetroChina Southwest Oil & Gas Field Company, Chongqing

Received: January 19, 2026; accepted: February 25, 2026; published: March 18, 2026

## Abstract

In this paper, the  $k-\varepsilon$  turbulence model, EBU-Arrhenius combustion model and P-1 thermal radiation model were adopted to simulate and study the effects of wind speed and liquid level height of flash tank on the flame thermal radiation field, especially the near-ground thermal radiation range. The results show that under the condition of high wind speed, the center of flame thermal radiation shifts

downward, the downwind thermal radiation range expands, and the radiation intensity first increases and then decreases with the increase of distance. With the rise of liquid level in the tank, the flame thermal radiation range becomes larger, and the near-ground thermal radiation intensity exceeds the critical value, which poses certain safety risks to personnel and the environment.

## Keywords

Sulfur-Bearing Gas Field, Safety, Wind Speed, Thermal Radiation

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

含硫气田水闪蒸气放空过程中, 火炬放空速度会随着闪蒸罐压力的增大而变快[1], 令热辐射强度增强, 使得事故的风险亦随之增加, 因此含硫气田水闪蒸气放空火炬安全性分析十分重要[2][3]。目前行业内的计算方法常参考 API 521《泄压和减压系统导则》[4]与 API 573《通用炼油及石油化工设施火炬细则》[5], 但该方法对辐射范围的估算存在一定的局限性, 仅依据于辐射强度, 并未考虑其他影响因素(如火焰温度、形态等), 无法满足精准安全评估的需求。

CFD 模拟是一种准确、经济且高效的手段, 可以用来模拟含硫气田水闪蒸气的放空过程中, 但现阶段在该领域, 对于各影响因素的定量研究尚不够深入[6][7]。

有鉴于此, 本研究采用  $k-\varepsilon$  湍流模型、EBU-Arrhenius 燃烧模型分析了放空火炬的火焰热辐射特性, 以及其核心影响因素, 明确放空火炬安全运行过程中的关键参数, 为整个系统的安全设计与运行提供支撑。

## 2. 模型建立

### 2.1. 数值模型

本研究选用  $k-\varepsilon$  湍流模型、EBU-Arrhenius 燃烧模型、P-1 热辐射模型进行计算。

1)  $k-\varepsilon$  湍流模型

$k$  方程为湍动能方程, 如式(1)所示。

$$\frac{\partial \rho k}{\partial t} + \frac{\partial (\rho k u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_m + S_k \quad (1)$$

$\varepsilon$  方程为扩散方程, 如式(2)所示。

$$\frac{\partial (\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial (\rho \varepsilon u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} + S_\varepsilon \quad (2)$$

式中:  $G_k$  ——基于层流速度梯度产生的湍动能, kJ;

$G_b$  ——由浮力驱动的湍流能量, kJ;

$Y_m$  ——在可压缩湍流中, 由于过度的扩散作用产生的波动;

$C_{1\varepsilon}$ 、 $C_{2\varepsilon}$ 、 $C_{3\varepsilon}$  ——常量, 对应数据见表 1;

$\sigma_k$ 、 $\sigma_\varepsilon$  ——湍动能  $k$  和耗散率  $\varepsilon$  对应的 Prandtl 数;

$S_k$ 、 $S_\varepsilon$ ——用户自定义源项。

**Table 1.** Constants of the standard  $k$ - $\varepsilon$  model  
**表 1.** 标准  $k$ - $\varepsilon$  模型常数

$C_{1\varepsilon}$	$C_{2\varepsilon}$	$C_{3\varepsilon}$	$\sigma_k$	$\sigma_\varepsilon$
1.44	1.92	0.09	1.0	1.3

## 2) EBU-Arrhenius 燃烧模型

燃烧模型中最重要的一环包括确定湍流燃烧速率  $R_{fu}$ ，计算公式如式(3)所示。

$$R_{fu} = -\min(|R_{fu,A}|, |R_{fu,T}|) \quad (3)$$

其中，

$$R_{fu,A} = B\rho^2 Y_1 Y_2 \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right) \quad (4)$$

$$R_{fu,T} = C_{EBU} \rho \frac{\varepsilon}{k} \min(Y_1, Y_2, Y_3) \quad (5)$$

式中： $B$ ——指前因子；

$C_{EBU}$ ——经验常数，通常取 0.34~0.4；

$E_a$ ——活化能，J/mol；

$R_{fu,A}$ ——Arrhenius 型的燃烧速率，kg/(m<sup>3</sup>·s)；

$R_{fu,T}$ ——湍流燃烧速率，kg/(m<sup>3</sup>·s)；

$R$ ——普适气体常数，J/(mol·K)；

$Y_1$ 、 $Y_2$ 、 $Y_3$ ——质量分数，1、2、3 分别代表燃料、氧气、燃烧产物，%。

## 3) P-1 热辐射模型

光学厚度是选择辐射模型的重要标准。光学厚度指在计算辐射传输时，单位截面积上吸收和散射物质产生的总衰弱，是无量纲量。由于受大气中气溶胶、颗粒物的影响，大气的光学厚度一般超过 40。对于光学厚度大于 1 的情况，往往选用 P-1 辐射模型。

## 2.2. 物理模型

计算物理模型如图 1 所示。

## 2.3. 网格划分

用 PRO E 软件建立模型，采用 ICFM CFD 软件划分网格。网格数量 1,456,984。如图 2 所示。利用 ICFM 自带的网格质量检测，未出现负体积，最大网格体积小于 0.3，网格质量较好。

## 2.4. 边界条件

火炬的上表面为压力出口(pressure-outlet)，壁面和底面为壁面(wall)，柱体顶面为质量入口(mass-flow-inlet)。

无风情况下，四周弧面为压力出口(pressure-outlet)；有风情况下，半个弧面为压力出口(pressure-outlet)，半个弧面为速度入口(velocity-inlet)。

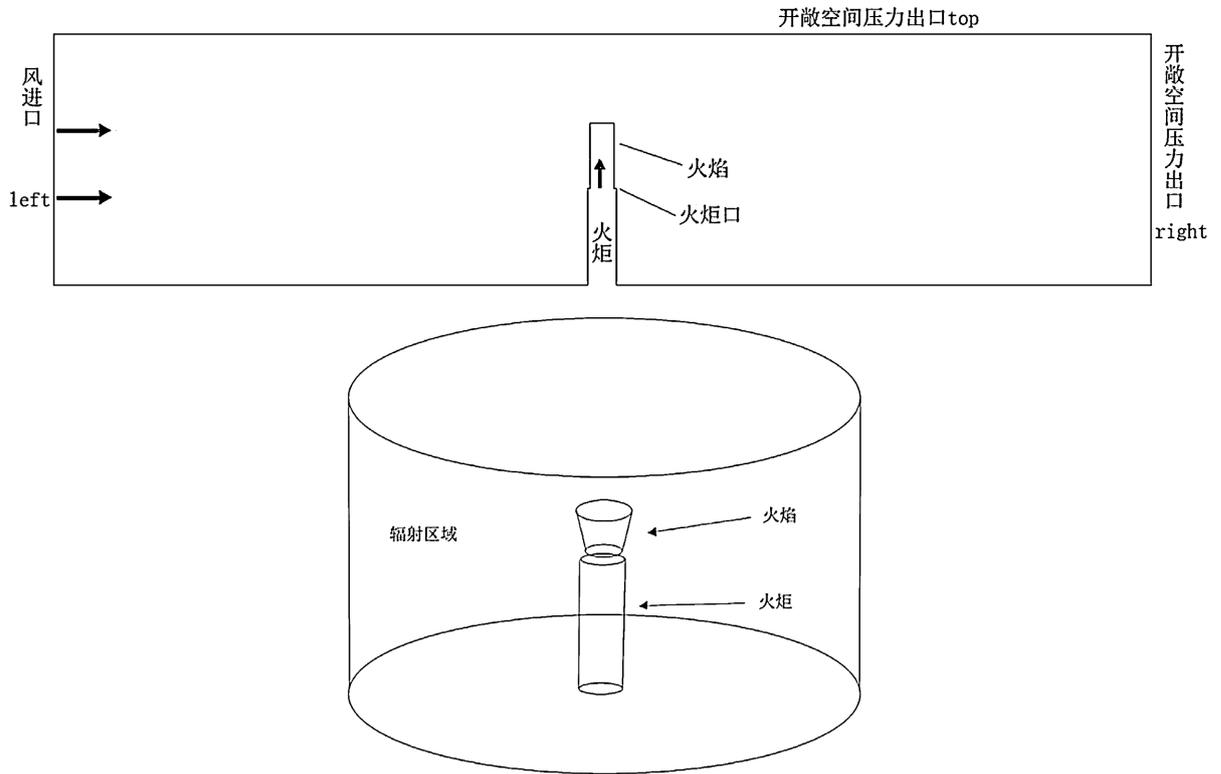


Figure 1. Schematic diagram of the radiation physical model

图 1. 辐射物理模型示意图

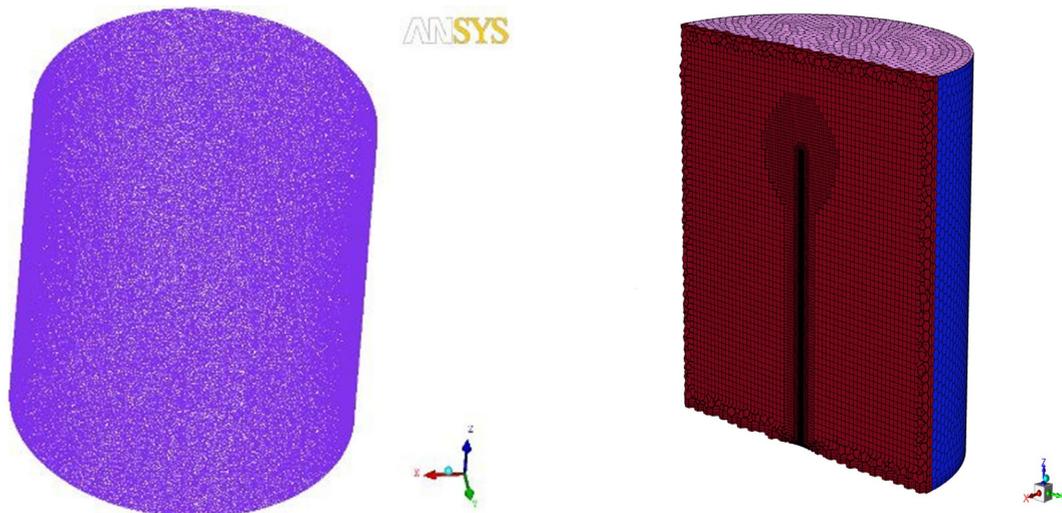


Figure 2. Grid division results

图 2. 网格划分结果

### 3. 热辐射数值分析

#### 3.1. 风速对火焰热辐射的影响

入口压力为 0.2378 MPa，火焰的纵向热辐射温度场随风速变化结果如图 3 所示，横向热辐射温度场随地面高度变化结果如图 4 所示。可知，随着风速的增加，热辐射的中心向下风向移动。

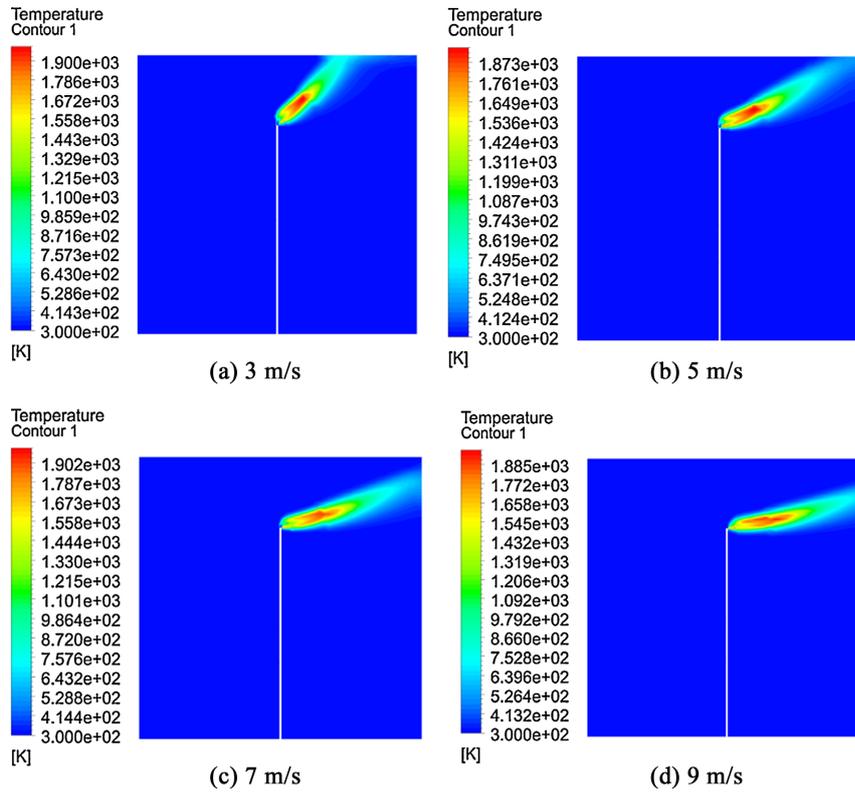
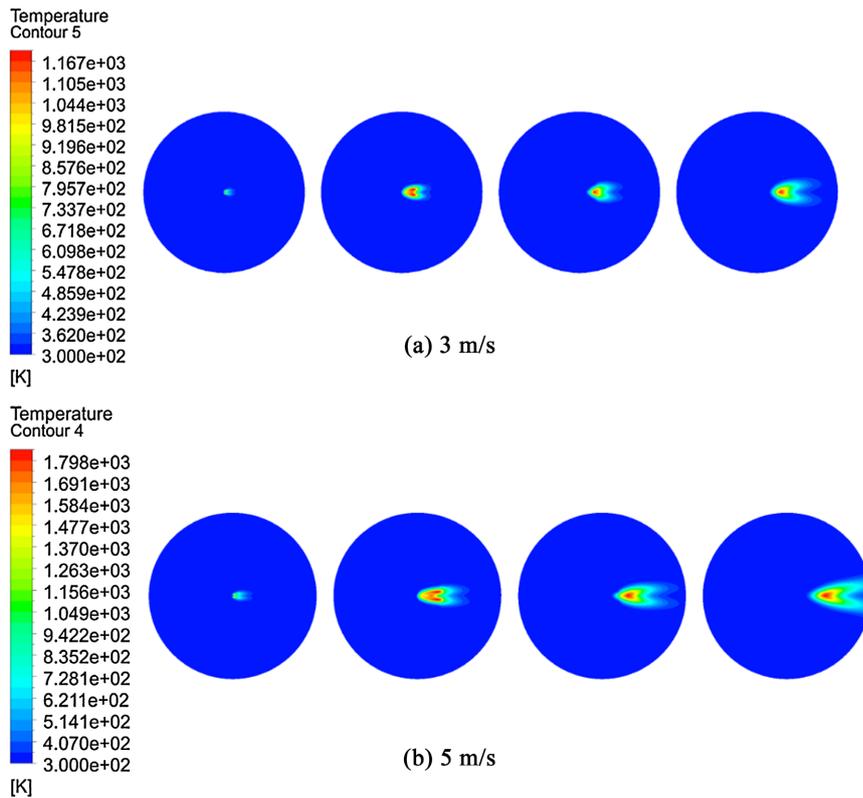


Figure 3. Longitudinal temperature field distribution

图 3. 纵向温度场分布



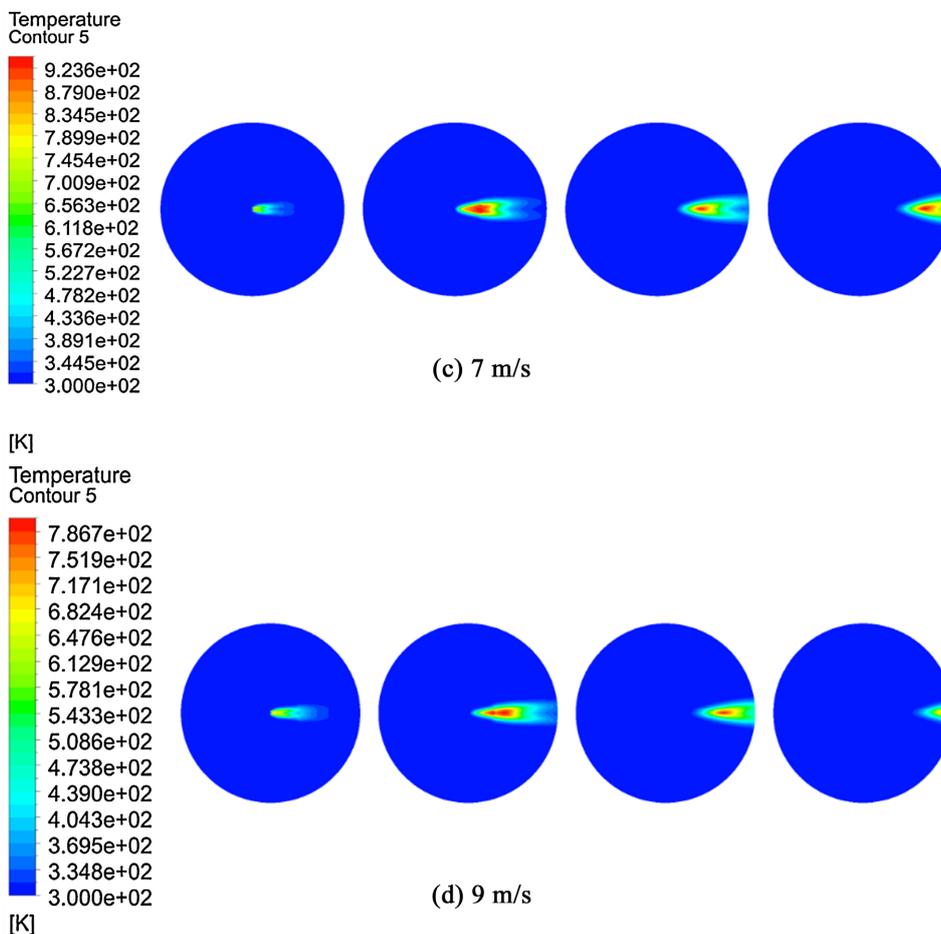


Figure 4. Transverse temperature field distribution  
图 4. 横向温度场分布

### 3.2. 液位对火焰热辐射的影响

不同风速、不同液位高度下，火焰的纵向热辐射温度场如图 5~8 所示。可知，闪蒸罐内的液位升高，使得罐内压力升高，扩大了热辐射扩散范围。

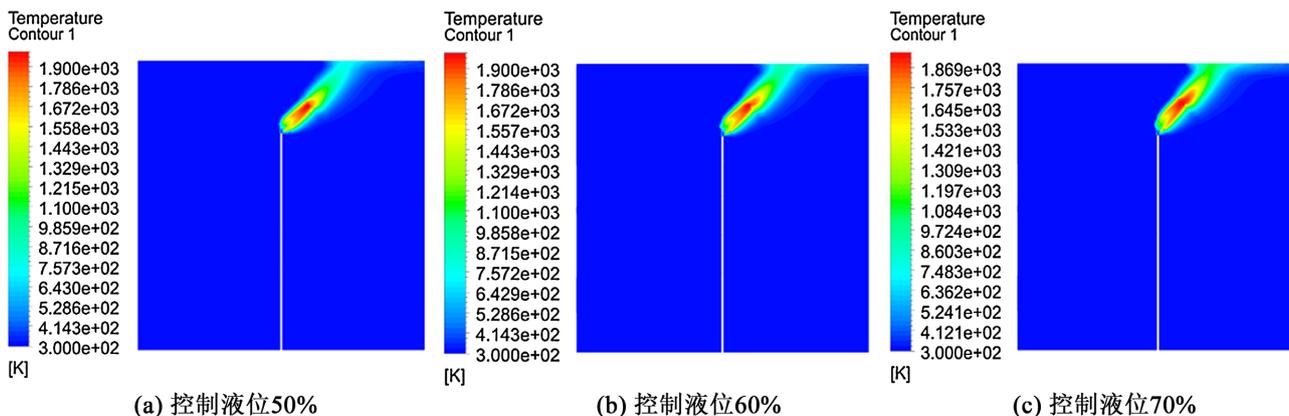


Figure 5. Longitudinal temperature field distribution (3 m/s)  
图 5. 纵向温度场分布(3 m/s)

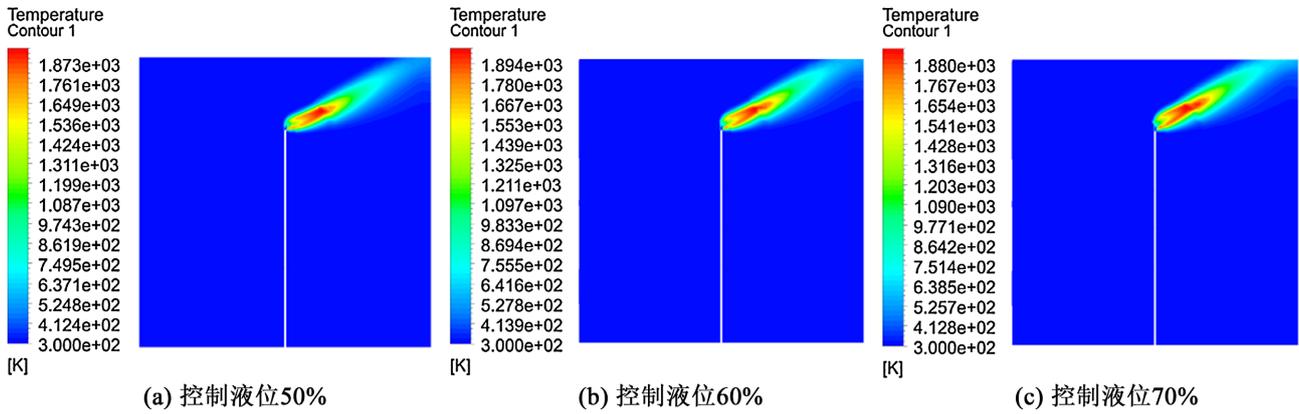


Figure 6. Longitudinal temperature field distribution (5 m/s)

图 6. 纵向温度场分布(5 m/s)

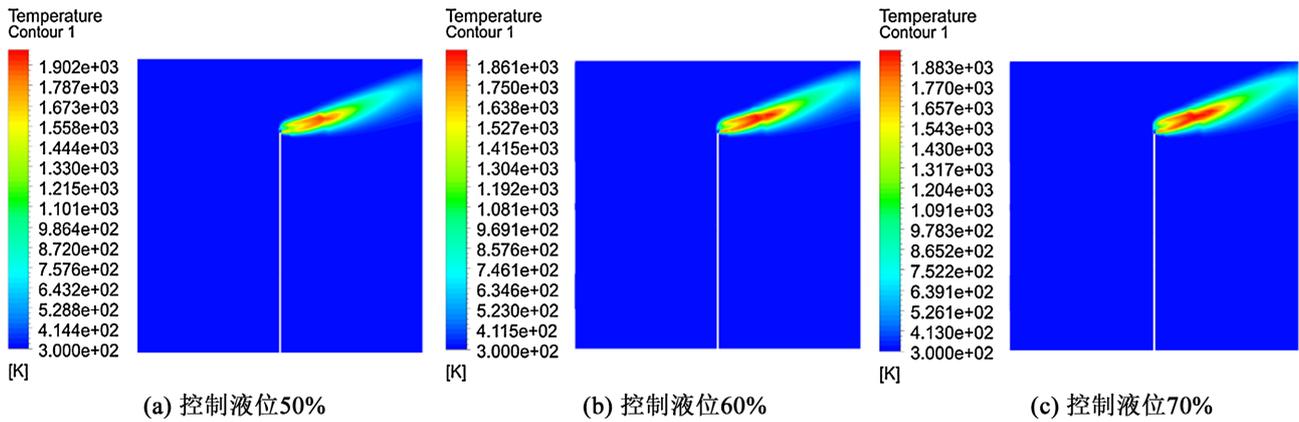


Figure 7. Longitudinal temperature field distribution (7 m/s)

图 7. 纵向温度场分布(7 m/s)

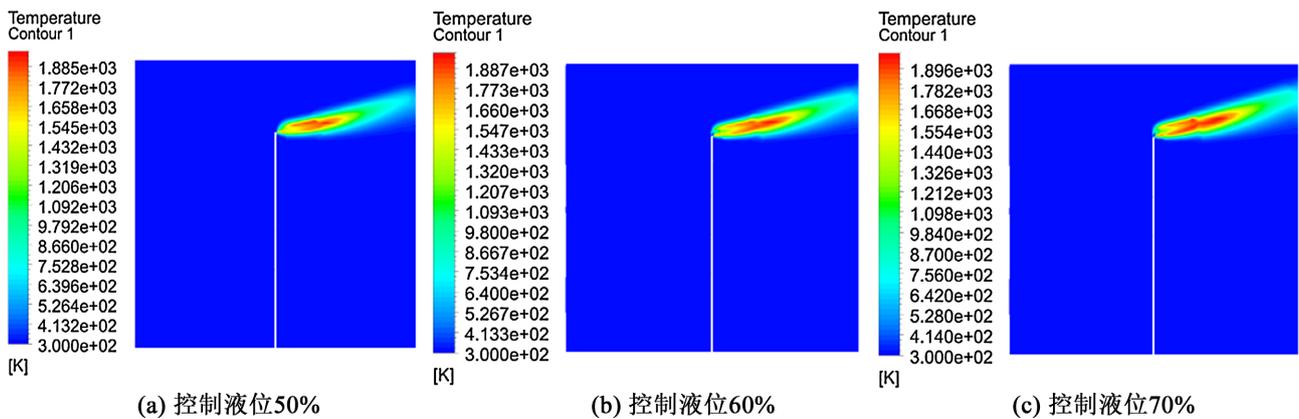


Figure 8. Longitudinal temperature field distribution (9 m/s)

图 8. 纵向温度场分布(9 m/s)

### 3.3. 风速对近地面辐射场的影响

火炬火焰对近地面的热辐射影响是站场安全所关注的重要指标之一。通过前两节的研究发现，强风速下火焰热辐射场中心会向近地面偏移，从而带来一定的风险隐患，需要对近地面的辐射场强度进行定

量的分析。

液位为 50%时，近地面热辐射辐射强度随风速的变化如图 9 所示。

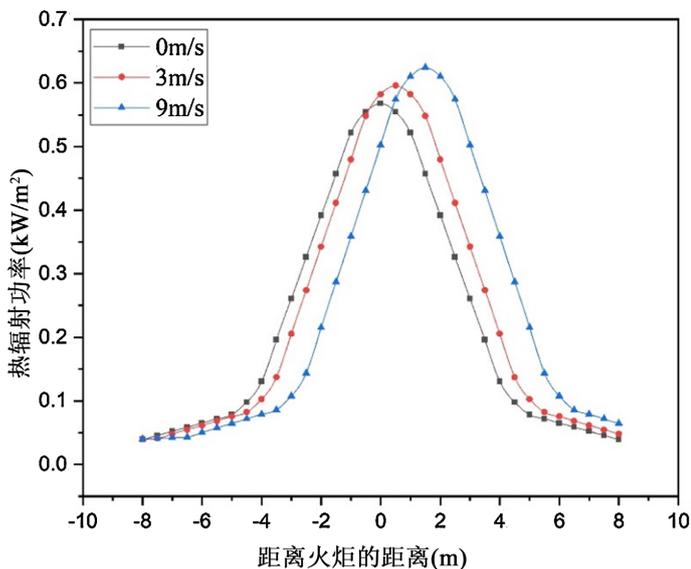


Figure 9. Effect of wind speed on thermal radiation intensity  
图 9. 风速对热辐射强度的影响

由图 9 可知，风速的增加会使得下风向的热辐射范围扩大，且风速越大，相同距离处的热辐射强度亦会相应增强。当距离足够远时，风速对于热辐射强度的影响逐渐减弱。针对液位为 50%的放空火炬，近地面的热辐射辐射强度均小于安全值(0.65 kW/m<sup>2</sup>)。

### 3.4. 液位对近地面辐射场的影响

不同风速下，近地面热辐射辐射强度随液位高度的变化如图 10、图 11 所示。

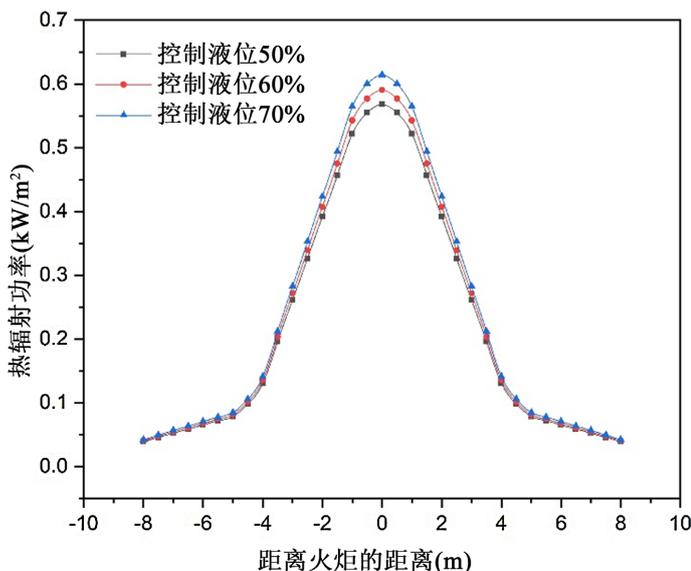


Figure 10. Torch thermal radiation field (wind speed 0 m/s)  
图 10. 火炬热辐射场(风速 0 m/s)

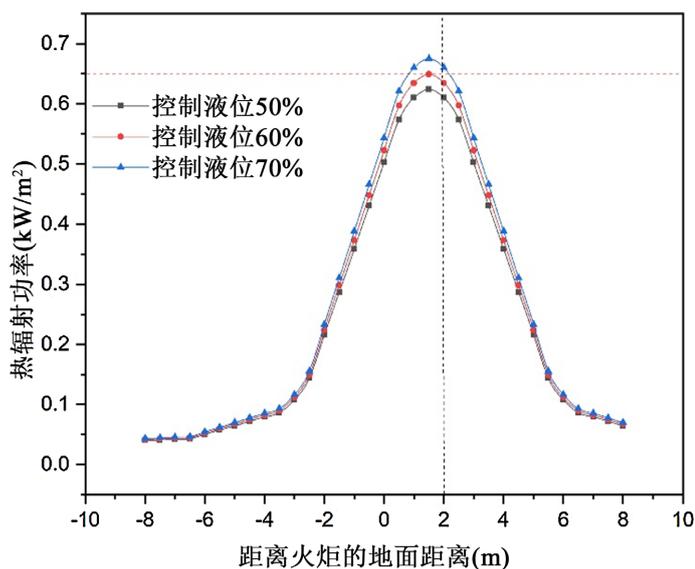


Figure 11. Torch thermal radiation field (wind speed 9 m/s)

图 11. 火炬热辐射场(风速 9 m/s)

由图 10、图 11 可知, 液位的增加会使得罐内压力升高, 令火焰的热辐射范围扩大。当风速大于 9 m/s, 近地面的最大辐射强度已大于临界值(0.65 kW/m<sup>2</sup>), 需要预留 2 m 的安全距离, 来保障人员与环境的安全。

#### 4. 结论

本研究构建了含硫气田放空火炬热辐射数值模型, 能够高效模拟火焰的热辐射过程, 揭示热辐射范围随风速、液位高度等影响因素的变化规律。当风速增强后, 火焰的热辐射中心向下风向偏移, 扩大下风向的热辐射范围, 并使得近地面的热辐射强度增强; 当闪蒸罐内液位升高后, 会导致罐内压力升高, 使得火焰的热辐射范围增大, 近地面存在一定的安全风险, 需预留安全距离。

#### 参考文献

- [1] 李发东, 刘迪, 张杰东. 高架火炬燃烧热辐射危害性分析[J]. 安全、健康和环境, 2021, 21(5): 45-48.
- [2] 陈萌萌. 某焦化项目的火炬设计及燃气预混过程数值模拟研究[D]: [硕士学位论文]. 太原: 中北大学, 2021.
- [3] 王盼锋. 天然气管道放空过程分析与研究[D]: [硕士学位论文]. 西安: 西安石油大学, 2020.
- [4] Committee on Refinery Equipment (2014) API STANDARD 521: Guide for Pressure-Relieving and Depressuring Systems. 5th Edition, American Petroleum Institute.
- [5] Committee on Refinery Equipment (2016) API STANDARD 573: Inspection Practice for Flares in General Refinery and Petrochemical Service. American Petroleum Institute.
- [6] 曾欢, 何石, 曹臻, 等. 高含硫气田放空火炬系统优化研究[J]. 化工设计通讯, 2019, 45(9): 121-122.
- [7] 徐振朋. 放空火炬辐射热范围影响因素探讨[J]. 山东工业技术, 2019(8): 75.