

DOI: 10.16210/j.cnki.1007-7561.2021.02.029

崔鹏程, 陈鑫, 张涛. 基于 Pyrosim 的粮食储备库火灾仿真模拟分析[J]. 粮油食品科技, 2021, 29(2): 211-217.

CUI P C, CHEN X, ZHANG T. Simulation analysis of the grain storage fire based on the PyroSim[J]. Science and Technology of Cereals, Oils and Foods, 2021, 29(2): 211-217.

# 基于 PyroSim 的粮食储备库 火灾仿真模拟分析

崔鹏程, 陈鑫, 张涛✉

(国家粮食和物资储备局科学研究院, 北京 100037)

**摘 要:** 为研究粮食储备库发生火灾后对作业人员的影响, 应用 PyroSim 软件对粮食储备库进行火灾模拟。选取应用较为广泛的平房仓为研究对象建立物理模型, 针对磷化氢熏蒸口引起的火灾场景, 分析火灾烟气发展和温度分布情况, 并提出预防措施。结果表明: 烟气形成阶段和向上发展阶段为灭火和作业人员疏散的最佳时期, 此时烟气尚未弥漫至整个仓房; 烟气在顶部扩散时作业人员应马上撤离; 烟气充满仓房时作业人员严禁进入仓内; 10~100 s 之间是火灾发生和发展阶段, 1.5 m 以下范围仓房温度未达到人员极限忍受范围; 100 s 到 10 min 由于燃烧物充分燃烧, 温度不断升高, 作业人员面临烧伤风险。

**关键词:** PyroSim; 粮食储备库; 火灾模拟; 烟气; 平房仓

**中图分类号:** TS210; X928.7      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1007-7561(2021)02-0211-07

**网络首发时间:** 2021-01-29 13:03:49

**网络首发地址:** <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.3863.TS.20210129.1051.004.html>

## Simulation Analysis of the Grain Storage Fire Based on the PyroSim

CUI Peng-cheng, CHEN Xin, ZHANG Tao✉

(Academy of National Food and Strategic Reserves Administration, Beijing 100037, China)

**Abstract:** In order to study the effect of the fire on the workers, the PyroSim was used to simulate the fire of in grain reserve storages in this paper. The widely used warehouse was selected as the research object, and the physical model was established. Aiming at the fire scenario caused by phosphine fumigation port, the development of fire smoke and temperature distribution were analyzed, and preventive measures were proposed. The results showed that the formation stage and upward development stage of smoke are the best time for fire fighting and evacuation of operators, and the smoke has not diffused to the entire warehouse. And the operators should evacuate immediately when the smoke diffuses at the top. The operators are forbidden to enter the warehouse when the smoke fills the warehouse. The temperature of the warehouse below 1.5 meters does not reach the limit of the personnel endurance range between 10 seconds and 100

收稿日期: 2020-07-10

基金项目: “十三五”国家重点研发计划 (2017YFC0805903-3)

Supported by: National Key Research and Development Project of the 13th five year plan, China (No. 2017YFC0805903-3)

作者简介: 崔鹏程, 男, 1993 年出生, 硕士, 研究实习员, 研究方向为粮食储运安全生产技术。E-mail: cpc@ags.ac.cn.

通讯作者: 张涛, 男, 1982 年出生, 博士后, 副研究员, 研究方向为储粮害虫综合防控和粮食行业安全生产安全防护技术。E-mail: zt@ags.ac.cn.

seconds. And due to the full combustion of the combustor, the temperature keeps rising, and the operators are facing the risk of burns in 100 seconds to 10 minutes.

**Key words:** PyroSim; grain reserve storages; fire simulation; smoke; warehouse

粮库是粮食储存和保管的主要场所,也是进行生产作业的主要地点。统计表明,相比其他类型的事故,火灾发生的次数较多,造成的损失最为严重。并且,随着社会的进步,经济的发展和技术的革新,为满足各种作业的需求,粮库设计更加复杂,单库存量也不断攀升。一旦发生火灾事故,不但会损坏仓房和粮食,而且产生的有毒烟气和高温对正在作业的人员和未过火粮食造成巨大危害。因此对粮库火灾的研究将具有重要意义。

国内学者对粮库火灾事故主要进行了原因分析和监测预警。其中,王赫等采用事故树的方法分析得出我国粮库火灾的主要原因是大量使用可燃物和易燃物<sup>[1-2]</sup>;王小将则认为粮食自身发热、粮库本身存在火灾隐患、消防安全管理不到位、员工消防意识淡薄、供电线路和防雷设施存在隐患是引起粮库火灾的五大因素<sup>[3]</sup>;唐芳雄等设计开发了粮食储备库火灾预警软硬件系统用于火灾预防<sup>[4]</sup>。由于科技的发展,计算机仿真为火灾模拟提供便利。由美国 NIST 研发的火灾动态模拟软件 FDS,以及后期为简化建模过程而开发出来的 Thunderhead Engineering PyroSim(以下简称 PyroSim)在不同行业中应用广泛。诸如,建筑行业通过对高层建筑、影院、地铁车站等进行火灾模拟,获取不同时间段、不同火灾地点的烟气、温度、能见度情况,确定人员疏散的安全时间和路线,以及建筑结构<sup>[5-6]</sup>;交通运输行业则对高铁、隧道交通、高空飞机、大型客车等交通运输工具和构筑物进行火灾模拟,探究了不同着火点对于人体的危害程度,确定乘客的最小转移时间<sup>[7-10]</sup>;矿山行业则通过模拟地下巷道中不同火源情况的火灾场景,分析火灾烟气的总体流动和分布状况,确定火灾报警器响应时间和应采取防火措施<sup>[11-12]</sup>;而对于大型仓库,部分学者通过模拟对棉花仓库早期火灾蔓延趋势<sup>[13]</sup>和大跨度、大空间的物流仓库火灾扑灭技术<sup>[14]</sup>进行研究。

由以上内容看出,前人对于粮食储备库火灾研究较少,也并没有将相对成熟的火灾模拟技术

应用到粮库中来。因此,本文将应用火灾模拟软件 PyroSim,选取粮食储备库中应用较多的平房仓为研究对象,针对磷化氢熏蒸口发生的火灾情况,分析火灾烟气和温度对于仓内作业人员的影响,并提出预防措施,以期为粮库防火、灭火和人员疏散提供理论基础。

## 1 粮库火灾的相关理论基础

### 1.1 不同阶段火灾特点

#### 1.1.1 火灾初始阶段

点火源能量高于可燃物最小点火能,可燃物被点燃。在火灾初始阶段,可燃物性质、燃烧的类型、周围环境状况、通风等对火灾增长速度有一定影响,燃烧速度较慢。燃烧物质的充足与否和通风供氧条件决定火灾的后续发展状况。若可燃物较多且氧气充足,火灾将继续发展;若可燃物或氧气缺少,燃烧和火灾将终止。此阶段,火势较小不易发觉,但也是防灭火和人员疏散的关键时期。

#### 1.1.2 火灾发展阶段

火灾发展阶段,仓内所有的可燃物充分燃烧,室内温度急剧升高,烟气浓度加大,仓房结构逐渐破坏,持续时间与燃烧物的量和氧气量有直接关系。实验发现,火灾发展阶段燃烧的可燃物为整个火灾过程中烧掉可燃物数量的 80%<sup>[15]</sup>。此阶段灭火则需要发动专业的消防力量进行紧急处置,防止财产继续损失和人员的伤亡。

#### 1.1.3 火灾熄灭阶段

火灾熄灭阶段,可燃物逐渐燃烧殆尽,火势逐渐减小,温度开始下降,烟气浓度下降。但相关实验发现,温度的衰减与上一阶段火灾发展阶段的持续时间有很大关系。持续时间越长,衰减速度越慢。因此,此阶段仓内温度仍然很高,热辐射强烈,灭火时应做好降温和个人防护措施。

### 1.2 火灾烟气

火灾烟气指物质在燃烧或热解过程中所产生的悬浮在空气中的固体和液体颗粒。火灾烟气的

主要成分包括：①未燃烧的气态可燃物；②气相燃烧产物；③没有完全燃烧的液、固相分解物和冷凝微小颗粒。火灾烟气的危害主要体现在其具有遮光性<sup>[16]</sup>、刺激性<sup>[17]</sup>、高温性和毒性。能见度降低导致疏散速度减慢，刺激性气体的存在导致人的呼吸系统和眼睛受到损害，高温造成人皮肤的烫伤，产生的有毒气体可能造成窒息和中毒的危险<sup>[18]</sup>。

### 1.3 火灾模拟软件介绍

火灾模拟的不同软件对应不同的模型，主要有经验模型、区域模型、场模型、区-场-网复合模型<sup>[19]</sup>。通过模型和模拟分析，直观了解火灾发生发展过程，完成对火灾中的温度场分布、烟气分布的定性和定量分析。

#### 1.3.1 专家系统 (Expert System)

专家系统主要依靠的是专家通过火灾实际和实验参数的采集和经验总结，以及火灾科学的相关经验公式。由于火灾事故和实验的局限性，该模型仅限于针对特定的相似火灾定性和定量的模拟。目前应用比较多的是 FIREFORM、英国 ASKRSF 和澳大利亚 FIRECAIC 等<sup>[20-21]</sup>。

#### 1.3.2 区域模型 (Zone Model)

区域模拟是以某一确定空间火灾为研究对象的半物理模拟，是经验公式与三大守恒定律以及化学反应公式的结合。模拟方式的差异主要取决于结合程度的不同<sup>[21]</sup>。模拟时通常将模拟对象分为温度较高和温度较低两部分控制体进行。目前区域模型的程序主要有 CFAST、FIRST、Vents 等。

#### 1.3.3 场模型 (Field Model)

场模拟是以三大守恒定律为理论研究基础，利用计算机求解火灾过程中状态参数的空间分布及其随时间变化的方法。目前研究火灾过程中应用较多的是场模拟软件主要有 CFD 通用软件 CFX、FLUENT 和火灾模拟专用软件 FDS<sup>[22-24]</sup>。

#### 1.3.4 区-场-网复合模型 (Field-Zone-Network Model)

区-场-网复合模型是对以上模型的综合应用。当一种模型不能够满足模拟需求时，就需要多种模型结合使用，这样就能弥补不同模型的不足，形成一种更为合理的火灾模拟方法。

结合火灾模拟场所的特点，选取恰当的火灾

模型和软件可以在保证模拟质量的基础上节约成本和模拟时间，提高效率。针对本文所研究的粮库的类型，选用场模型进行模拟，所选用的场模拟软件是在 FDS 模型的基础上进行改进的 Pyrosim 火灾模拟软件。

## 2 PyroSim 基础理论和平房仓火灾数值模拟

### 2.1 PyroSim 软件介绍

PyroSim 火灾模拟软件是一款专用于消防动态仿真模拟的软件，它是在火灾模拟软件 FDS 的基础上发展起来。PyroSim 火灾模拟软件最大的特点是提供了三维图形化前处理和可视化编辑的功能，能够边编辑边查看所建模型，避免了代码的编写。该软件以计算流体动力学为理论依据，采用了 Navier-Stokes 方程和流体的能量、动量和质量控制偏微分方程进行流体计算。

表 1 PyroSim 火灾模拟软件理论方程

Table 1 PyroSim fire simulation software theoretical equation

序号	基本控制方程	方程式
1	能量守恒方程	$\frac{\partial}{\partial t}(\rho h) + \nabla \cdot \rho h u = \frac{Dp}{Dt} + q'' - \nabla \cdot q'' + \phi$
2	动量守恒方程	$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u) + \nabla \cdot \rho h u + \nabla \cdot p = \rho g_n + f + \nabla \cdot \tau_{ij}$
3	质量守恒方程	$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \rho u = 0$
4	组分守恒方程	$\frac{\partial}{\partial t}(\rho Y_i) + \nabla \rho Y_i u = \nabla (\rho D_i Y_i \nabla \mu) + W_i$
5	气体状态方程	$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \rho u P_0 = \rho TR \sum_i \frac{Y_i}{M_i}$

式中： $\rho$ ：气体密度， $\text{kg/m}^3$ ； $u$ ：速度矢量， $\text{m/s}$ ， $u=(u,v,w)$ ； $\tau_{ij}$ ：牛顿流体粘性应力张量， $\text{Pa}$ ； $f$ ：外部矢量， $\text{kg/m}^2 \cdot \text{s}^2$ ； $p$ ：压力， $\text{Pa}$ ； $h$ ：比焓， $\text{J/kg}$ ； $q''$ ：热通量矢量， $\text{W/m}^2$ ； $q'''$ ：单位体积的热释放速率， $\text{W/m}^3$ ； $\phi$ ：耗散函数， $\text{W/m}^3$ ； $Y_i$ ：组分  $i$  的质量分数； $D_i$ ：组分  $i$  的扩散系数， $\text{m}^2/\text{s}$ ； $T$ ：气体温度， $\text{K}$ ； $R$ ：气体常数， $R=8.314 \text{ J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$ 。

PyroSim 火灾数值模拟软件包含模型建立、运行求解和分析处理三个基本过程。通过模型设置、表面设置、化学反应设置、设备设置，得到一个完整的火灾数值模拟模型，最后通过运行模拟模块，输出数据、图标和动画等。

### 2.2 平房仓火灾的 PyroSim 数值模拟

平房仓作为粮库中主要仓型，具有仓房的密闭、保温、隔热、防潮性能好，单仓容量大、使用寿命长、结构安全可靠、造价低、施工简便等优点，被广泛应用。因此本文选取平房仓进行火

灾模拟研究。

磷化氢是目前国内粮食行业广泛使用的粮食杀虫熏蒸剂。然而,磷化氢气体是一种无色、剧毒、易燃的气体,其熏蒸粮食过程引发的火灾安全事故时有发生。因此本研究主要模拟粮食熏蒸过程中磷化氢熏蒸口所引起的火灾。

### 2.2.1 平房仓物理模型设定

本研究以高大平房仓为研究对象,是某库区某型号平房仓进行相对简化而得,计算区域主要是仓内空间。边界材料均设置为混凝土且绝热状态。其中,仓房长 60 m,宽 30 m,高 10 m。在仓壁设置通风窗和进出粮门,并处于关闭状态,如图 1 所示。

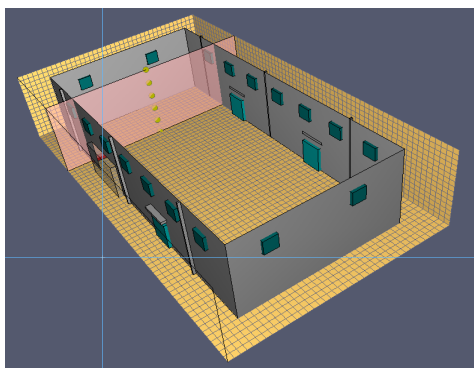


图 1 平房仓物理模型

Fig.1 Physical model of warehouse

### 2.2.2 网络模型的设定

由于平房仓的主体建筑形式为长方体,所以,对建筑进行简化建立模型尺寸为  $70 \times 40 \times 15 \text{ m}^3$  的立方体,取网格参数见下表 2,最小网格尺寸为  $1 \times 1 \times 1$ ,网格总数为 42 000。

表 2 网格参数设置

Table 2 Grid parameter setting

轴	Min (起点)	Max (终点)	网格数
X	-5	65	70
Y	-5	35	40
Z	0	15	15

选取此网络模型,既可以准确的描述出平房仓的基本状况,又能在节约运算时间的基础上得到较为精确的模拟结果。

### 2.2.3 火源点设置

火源点设置在磷化氢熏蒸口,距离仓出 3 m 处,火源面积为  $0.5 \times 0.5 \text{ m}^2$ ,位置紧贴仓壁,如图 2 所示。

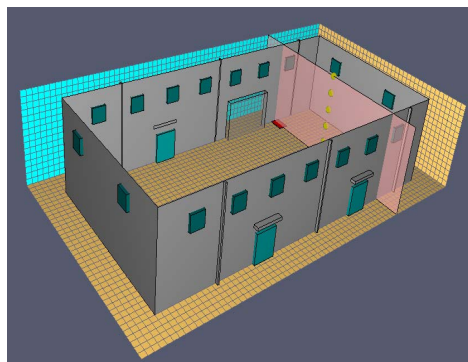


图 2 火源点设置

Fig.2 Fire source setting

### 2.2.4 火灾模拟初始条件的设定

在进行 PyroSim 火灾数值模拟时,初始条件有一部分是系统默认设定的,但是根据本研究的具体情况,对于初始条件设定如下:

- (1) 环境初始温度:  $20 \text{ }^{\circ}\text{C}$
- (2) 环境初始相对湿度: 65%
- (3) 环境大气压力:  $101\,325 \text{ Pa}$
- (4) 风速:  $0 \text{ m/s}$
- (5) 火灾模拟时间: 600 s
- (6) 火灾增长类型: 快速火
- (7) 地板和墙壁材质: 绝热材料,不传热

## 2.3 火灾模拟结果

### 2.3.1 烟气

通过 PyroSim 建立平房仓的物理模型,然后设定火源点,设定不同的火灾模拟初始条件,之后点击运行 FDS 进行火灾动态模拟。这个过程的运算时间会根据物体的大小,网格多少等的不同而不同。本研究运算时间大概在 4.5 h,运算结果经 Smokeview 软件处理后通过视频化的形势展现出火灾发展的全动态过程,模拟结束后还可以查看温度随时间的变化值等。如图 3~6 所示为火灾烟气蔓延过程。

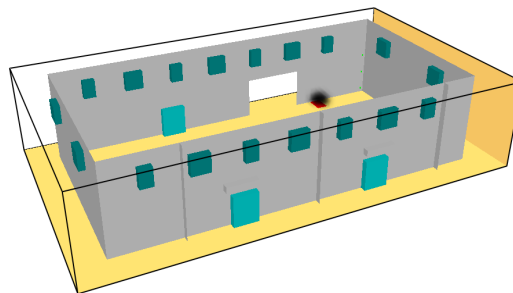


图 3 烟气形成阶段

Fig.3 Smoke formation stage

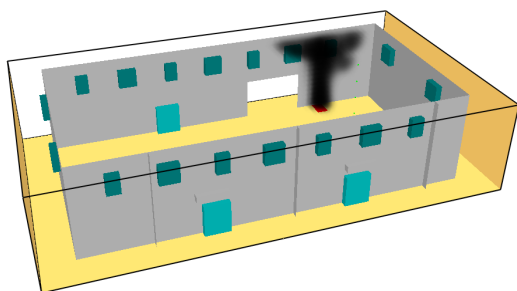


图 4 烟气向上发展阶段  
Fig.4 Smoke upward development stage

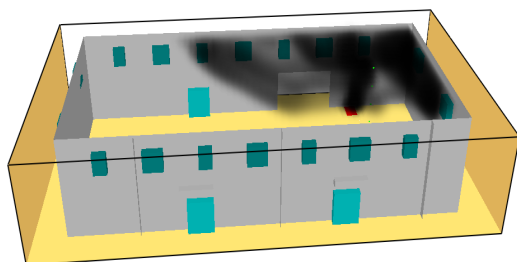


图 5 烟气顶部发展阶段  
Fig.5 Top development stage of smoke

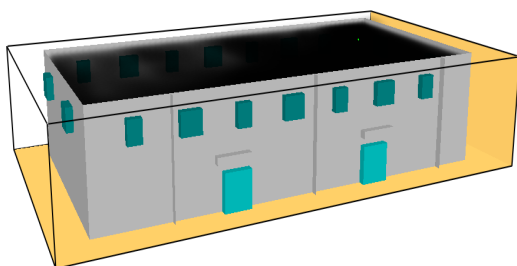


图 6 烟气扩散阶段  
Fig.6 Smoke diffusion stage

从模拟结果可以看出,火灾发生后,火灾烟气处于形成阶段,火灾烟气较小,该阶段是灭火和人员逃生的最佳时期;当火灾由一定的发展,火灾烟气向上发展,烟气准备开始扩散,火势较小,仓内工作人员应及时灭火和疏散;随着时间的推移,火灾烟气逐渐在顶部扩散,开始扩散到整个仓内,仓内工作人员应赶紧撤离,避免停留;当火灾无法控制时,火灾烟气充满整个仓内,此时处于仓内的工作人员将受到严重的生命威胁。

### 2.3.2 温度

据相关医学和生理实验统计,火灾过程的高温烟气会对人体造成一定程度的伤害,若长时间处于高温环境中甚至会导致死亡。判断烟气温度是否对人构成危险,通常是以人眼处的烟气温度作为特征温度进行判断。人眼的特征高度是

1.2~1.8 m,取人眼特征高度为 1.5 m。对于健康的着装成年男子,温度与人体极限忍受时间的关系式为:

$$t = 4.1 \times \frac{10^8}{\left[ \frac{T - B_2}{B_1} \right]^{3.61}} \quad (6)$$

式中:  $t$  为极限忍受时间 min;  $T$  为空气温度  $^{\circ}\text{C}$ ;  $B_1$  和  $B_2$  分别为常数,一般取  $B_1=1.0$ ,  $B_2=0$ 。考虑湿度影响,安全系数取 0.6,得到:

$$t = 2.46 \times \frac{10^8}{T^{3.61}} \quad (7)$$

根据公式可得出人员忍受时间和温度之间的关系,当温度为 50、100、200  $^{\circ}\text{C}$  时,人体的耐受温度分别为 180、14、1.2 min。由于仓内的疏散时间要求较短,因此选取对人体有害的临界温度为 100  $^{\circ}\text{C}$ 。

为探测仓内发生火灾时烟气温度的变化情况,在着火点切面设置温度探测器,如图所示 7。

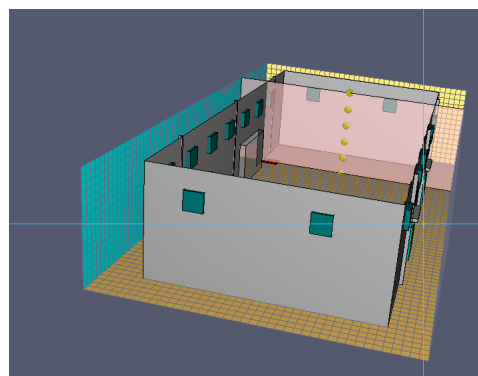


图 7 设置温度探测器  
Fig.7 Setting the temperature detector

经过模拟可得温度分布情况,如图 8~10 所示。

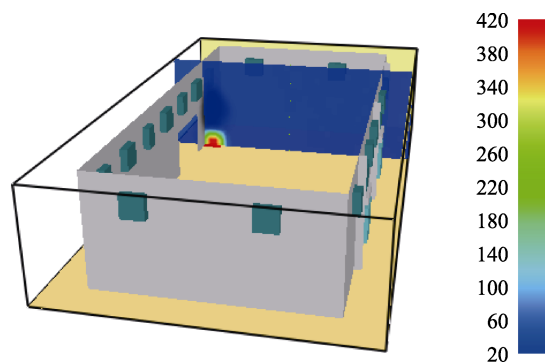


图 8 10 s 时温度分布  
Fig.8 Temperature distribution at 10 s



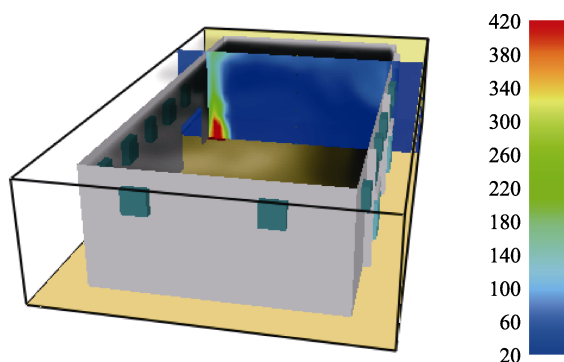


图 9 100 s 时温度分布

Fig.9 Temperature distribution at 100 s

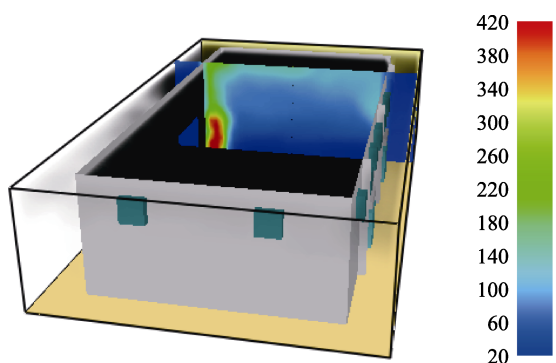


图 10 600 s 时温度分布

Fig.10 Temperature distribution at 600 s

由图可知,当时间到达 10 s 左右时,火灾处于初始阶段,烟气尚未成型,高于 100 °C 的区域主要集中在火源附近,其他空间温度维持在常温 20 °C 左右;当时间到达 100 s 左右时,火灾开始发展,烟气开始蔓延,但仓房内的温度大部分还处于常温状态,此时对人体损害最大的是有毒有害的烟气;随着火灾的不断发展,当时间到达 10 min 左右时,高温烟气不断扩散,1.5 m 以上区域超过 100 °C,1.5 m 以下区域也都处于 60~100 °C 之间,已经处于脸部短时间暴露的极限温度,因此,在场人员必须马上撤离,避免被高温灼伤。

### 3 防火和人员疏散建议

#### 3.1 防火

##### 3.1.1 火灾的主动防护

粮库火灾的主动防护指的是预防和控制仓内火灾发生和发展的措施。消防管理部门应加强对储粮单位和企业的监管力度,建立与粮食部门的信息互通机制,明确岗位消防职责,做到消防检查常态化,对于消防隐患应做到“检查一处,整改一处”。粮食储备库企业和单位应建立健全消防安

全管理,落实消防责任。并结合粮库具体情况,引进相关防护技术包括:粮库火灾探测报警设施;磷化氢熏蒸过程中的火灾预防措施;主动灭火系统等。

##### 3.1.2 火灾的被动防护

粮库火灾的被动防护指的是减弱火灾发展趋势,减少财产损失的办法和措施。其中,最重要的是储粮单位和企业应编制火灾应急预案,加强对火灾发生后的综合协调指挥处置能力,提高应急救援反应能力,及时、有序、高效、妥善的处置突发火灾,最大限度的减少人员伤亡和粮食损失。除此之外,粮库内还应尽量减少易燃可燃物的数,进一步提高粮库材料和设施部件的防火性能。

#### 3.2 人员疏散

当发生火灾后,人员的疏散是减少人员伤亡的有效措施。针对粮库作业人员,粮库管理人员应加强其安全管理和培训,提高作业人员安全意识。按照有关规定,在作业人员工作区域张贴安全疏散注意事项图、疏散路线图以及其他疏散常识图等。并定期开展消防演练,让作业人员深入了解消防应急常识,树立消防意识,掌握火灾事故发生现场应急扑救流程,学习安全快速疏散和逃生的方法。

### 4 结论

本文运用 PyroSim 软件对粮食储备库中的平房仓磷化氢熏蒸口火灾场景进行模拟,分析了烟气和温度对于作业人员的影响,得出的结论如下。

烟气形成阶段和向上发展阶段为灭火和作业人员疏散的最佳时期;当烟气在顶部扩散时作业人员应马上撤离;当烟气弥漫至整个仓房时已经十分危险,作业人员严禁进入仓内。

高温容易导致作业人员烧伤和烫伤。在仓内 1.5 m 以下范围温度未达到人员极限忍受范围时,作业人员应赶紧撤出,避免烧伤。并且应捂住口鼻,防止高温烟气造成呼吸系统损害。

储粮单位和企业应采取多种措施主动预防和控制火灾,并尽可能减少人员伤亡和财产损失。提高人员疏散培训质量和消防演练频次。

#### 参考文献:

- [1] 王赫,郝立群,林琳,等.基于故障树的粮库火灾事故分析[J].

- 中国粮油学报, 2019, 34(S2): 21-24.
- WANG H, HAO L Q, LIN L, et al. Analysis of grain depot fire accident based on fault tree[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2019, 34(S2): 21-24.
- [2] 王赫, 刘盛华, 郝立群, 等. 粮食储备库火灾事故的故障树分析[J]. 粮食加工, 2020, 45(3): 85-87.
- WANG H, LIU S H, HAO L Q, et al. Fault tree analysis of grain storage depot fire accident[J]. Grain Processing, 2020, 45(3): 85-87.
- [3] 王小将. 粮库诱发火灾原因分析及对策[J]. 现代工业经济和信信息化, 2014, 4(9): 54-56.
- WANG X J. Analysis and countermeasures of fire induced by grain depot[J]. Modern Industrial Economy and Informationization, 2014, 4(9): 54-56.
- [4] 唐方雄, 丁克勤, 王志杰. 基于多参数协同监测的粮食储备库火灾预警系统设计开发[J]. 中国粮油学报, 2019, 34(S2): 12-15.
- TANG F X, DING K J, WANG Z J. Design and development of fire warning system for grain storage based on multi-parameter collaborative monitoring[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2019, 34(S2): 12-15.
- [5] HADJISOPHOCLEOUS G, JIA Q. Comparison of FDS prediction of smoke movement in a 10-storey building with experimental data[J]. Fire Technology, 2009, 45(2): 163-177.
- [6] GLASA J, VALASEK L, WEISENPACHER P, et al. Cinema fire modelling by FDS[J]. Journal of Physics Conference, 2013, 410(1): 2013.
- [7] OZTEKIN E S. Heat and mass transfer due to a small-fire in an aircraft cargo compartment[J]. International Journal of Heat & Mass Transfer, 2014, 73(6): 562-573.
- [8] MENG N, HU L H, WU L, et al. Numerical study on the optimization of smoke ventilation mode at the conjunction area between tunnel track and platform in emergency of a train fire at subway station[J]. Tunnelling and Underground Space Technology incorporating Trenchless Technology Research, 2014, 40.
- [9] 田鑫, 苏燕辰, 席亚军, 等. 地铁列车火灾安全疏散研究[J]. 科学技术与工程, 2016, 16(31): 281-284+289.
- TIAN X, SU Y C, XI Y J, et al. Study on the fire safety evacuation of subway trains[J]. Science Technology and Engineering, 2016, 16(31): 281-284+289.
- [10] 梁君海, 李霞, 林建辉, 等. 基于 PyroSim 的高速动车火灾分析[J]. 重庆理工大学学报(自然科学), 2014, 28(10): 35-37.
- LIANG J H, LI X, LIN J H, et al. Analyses of EMU fire based on PyroSim[J]. Journal of Chongqing University of Technology (Natural Science), 2014, 28(10): 35-37.
- [11] 陈兴, 吕淑然. 基于 PyroSim 的复杂矿井火灾烟气智能控制研究[J]. 数字技术与应用, 2012(10): 9-10.
- CHEN X, LV S R. Research on intelligent control of fire smoke in complex mine based on PyroSim[J]. Digital Technology & Application, 2012(10): 9-10.
- [12] 张娇, 王筱冬. 基于 PyroSim 的矿井电气火灾仿真模拟[J]. 煤矿机械, 2018, 39(3): 130-132.
- ZHANG J, WANG S D. Simulation of mine electrical fire based on PyroSim[J]. Coal Mine Machinery, 2018, 39(3): 130-132.
- [13] 赵倩琳, 关磊, 武海丽, 等. 棉花仓库火灾早期蔓延扩散研究[J]. 消防科学与技术, 2019, 38(10): 1397-1401.
- ZHAO Q L, GUAN L, WU H L, et al. Study on the early spread of cotton warehouse fire[J]. Fire Science and Technology, 2019, 38(10): 1397-1401.
- [14] 李驰原. 基于 PyroSim 模拟的大跨度、大空间仓库火灾扑救技战术研究[J]. 武汉理工大学学报(信息与管理工程版), 2018, 40(1): 1-4+15.
- LI C Y. Research on fire fighting techniques and tactics of large span and large space warehouse based on PyroSim simulation[J]. Journal of Wuhan University of Technology(Information & Management Engineering), 2018, 40(1): 1-4+15.
- [15] 霍然, 胡源. 建筑火灾安全工程导论[M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 1999: 119-112.
- HUO R, HU Y. Introduction to building fire safety engineering[M]. Hefei: University of Science and Technology of China Press, 1999: 119-112.
- [16] 黄冷雨, 江舜勇. 浅析火灾烟气的危害与防范对策[J]. 中国公共安全(学术版), 2011, (2): 78-80.
- HUANG L Y, JIANG S Y. Analysis on the harm of fire smoke and preventive measures[J]. China Public Security(Academy Edition), 2011, (2): 78-80.
- [17] 武来喜. 典型建筑结构中基于烟气成分和温度分布的烟气危害性分析方法研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2009.
- WU L X. Research on smoke hazard analysis method based on smoke composition and temperature distribution in typical building structure[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2009.
- [18] 张志魁. 基于 Pyrosim 和 Pathfinder 的建筑火灾数值模拟和安全疏散研究[D]. 天津: 天津理工大学, 2015.
- ZHANG Z K. Research on building fire numerical simulation and safe evacuation based on Pyrosim and Pathfinder[D]. Tianjin: Tianjin University of Technology, 2015.
- [19] BEYLER C, P J. DI N. Introduction to fire models. chapter4~11, SFPE Hand-book of fire protection engineering. 2nd Edition[M]. Society of Fire protection Engineering and National Fire protection Association, Quincy, USA, 1995.
- [20] 唐方琴. 基于 GIS 的火灾场景下人员疏散模拟[D]. 北京: 清华大学, 2009.
- TANG F Q. Simulation of evacuation under fire scene based on GIS[D]. Beijing: Tsinghua University, 2009.
- [21] 汪箭, 陈贤福, 杨锐, 等. 计算机模拟与可视化技术在火灾科学研究中的应用[J]. 火灾科学, 2001, 10(3): 144-149.
- WANG J, CHEN X F, YANG R, et al. Application of computational simulation and visible technology in fire science research[J]. Fire Safety Science, 2001, 10(3): 144-149.
- [22] 丛北华, 廖光煌, 韦亚星. 计算机模拟在火灾科学与工程研究中的应用[J]. 防灾减灾工程学报, 2003, 23(2): 63-69.
- CONG B H, LIAO G H, WEI Y X. Application of computer simulation in fire science and engineering research[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2003, 23(2): 63-69.
- [23] KEVIN B. MCGRATTAN, HOWARD R, et al. Fire dynamic simulator (version4) user, guide[R]. U. S. Government Printing Office, 2006: 1-31.
- [24] KEVIN B. MCGRATTAN, HOWARD R, et al. Fire dynamics simulator(version3)-technical reference guide[R]. Technical ReportN1-STIR6783, National Institute of Standards and Technology Gaithersburg, MD20899, 1997(6).
- [25] BAUM H R, MC GRATTAN K B. Simulation of large industrial outdoor fires [A]. In fire safety science-proceedings of the sixth international symposium[C] International Association for Fire safety science, 1999, 244-256. ㉔
- 备注: 本文的彩色图表可从本刊官网 ( <http://lspkj.ijournal.cn/ch/index.aspx> ), 中国知网、万方、维普、超星等数据库下载获取。