油池火灾环境下包装容器的热响应特性模拟

史光梅，李明海，胡绍全，罗群生
（中国工程物理研究院总体工程研究所，绵阳 621900）

摘要：借助 CFD 模拟软件及其并行技术，以圆柱体钢结构件为研究对象，应用整场离散、整场求解的数值解法，初步探讨了火焰流场与结构热响应的耦合模拟方法，开展了静风及有风条件下 3 m 直径油池火灾环境下包装容器的热响应特性模拟，得到了水平放置的包装容器表面温度及热流响应的空间分布特性，研究结果可为含危险品结构的热-力耦合响应模拟提供载荷边界条件，为含危险品结构的热安全性评估提供技术支撑。

关键词：油池火烧环境；CFD 模拟；包装容器；辐射热通量
中图分类号：TB487；TJ765.4+3 **文献标识码：**A **文章编号：**1001-3563(2011)23-0130-03

Siulation of Thermal Response of Package under Fire Condition

SHI Guang-mei, *LI Ming-hai*, *HU Shao-quan*, *LUO Qun-sheng*
(China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China)

Abstract: Coupling simulation method between flame flux and thermal response of structure was discussed using computation fluid dynamics (CFD) simulation software and parallel technique, with cylinder steel structure as object, using numerical method of discrete and derivation in all domain. Thermal response of package in three-meter diameter pool fire under stagnant air and cross-wind was simulated. The regularity of temperature and heat flow response on horizontal setting container in stagnant air and cross-wind was obtained. The results can provide thermal-mechanics coupling simulation of the structure including dangerous goods with load boundary condition, thereby providing a theoretical reference for security assessment of the structure including dangerous goods.

Key words: pool fire environment; CFD simulation; package; radiant heat flux

耐热容器的油池火烧试验能比较真实地模拟耐热容器遭受意外火灾事故的环境，但其伴随着非常复杂的化学反应及传热过程，油池火焰的湍流特性及其对风的敏感性形成了非均匀的流场温度分布，并且受气候和环境的影响使实验重复性差，难以获得一致的结果；另外，受资金、安全、环保等因素的限制，开展大量实验研究是非常困难的，因此，应用数值模拟进行油池火灾特性参数计算及对处于火灾事故环境中的设备设施开展危害程度评估已成为更加可行的手段[1-4]。

当耐热包装容器置于火焰场中时，高温燃烧的气流与包装容器的外壁面间存在对流及辐射换热，该热边界条件是由热量交换过程动态地加以决定的而不能预先规定，其受到流体与壁面之间相互作用的制约，这时无论界面上的温度还是热流密度都应看成是计算结果的一部分，而不是已知条件，像这类问题就称为耦合传热问题[5]。大多数有实际意义的耦合问题都无法获得解析解，而要采用数值解法。数值解法可分为分区求解、边界耦合法和整场求解法两大类。由于分区求解、边界耦合的方法需要在不同区域之间进行反复迭代，需要较长的计算时间，因而整场求解法成为计算耦合问题的一种主导方法。整场离散、整场求解的方法是把不同区域中的热传递过程组合起来作为一个统一的换热过程来求解，不同的区域采用

收稿日期：2011-07-08
基金项目：国家自然科学基金委员会－中国工程物理研究院联合基金资助项目(10776100)
作者简介：史光梅(1974－)，女，新疆人，硕士，中国工程物理研究院总体工程研究所高级工程师，主要从事火烧试验及数值模拟、武器热安全性研究。

通用控制方程，区别仅在于广义扩散系数及广义源项的不同，耦合界面成为计算区域的内部。

1　离散模型和边界条件

为模拟耐热包装容器遭受意外火灾事故时的场景，基于简化考虑，假设包装容器为实心圆柱体，材料为钢，导热系数取 16.27 W/(m · K)，比热容为 502.48 J/(kg · K)，密度为 8 030 kg/m^3。包装容器的直径为 280 mm，高度为 400 mm，水平放置在直径为 3 m 的油池中央，包装容器底部距油池液面的距离为 300 mm；建模时，忽略试件架的存在，将包装容器定义为固体区，其它部分定义为流体区，整个计算模拟区域取 18 m×18 m×27 m，见图 1。

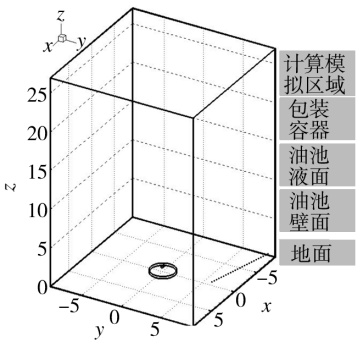


图 1　计算模型示意图

Fig. 1 Sketch map of computation model

建立网格总数约为 134 万的三维离散网格模型，为检查数值解对网格的依赖程度，在该模型的基础上将网格数加密到 274 万左右。经比较计算，发现采用 2 种离散网格模型得到的火焰面温度分布基本相同，说明采用网格总数为 134 万的粗网格模型可以满足计算精度的要求，节约计算成本。

采用整场离散、整场求解的方法，即在整个计算区域求解能量方程，只在流体区域求解流动方程。在油池火焰引起的周围空气流动中，浮力占重要地位，对该项的处理将直接影响到计算结果的物理真实性。模拟过程中，引入浮力修正的标准 k-ε 双方程模型模拟气相湍流输运，即在动量方程和湍流模型中引入浮力项来模拟浮力的影响，而在控制方程的所有其它项中忽略浮力的影响；气相湍流燃烧采用 PDF 非绝热扩展模型，辐射换热模型采用离散坐标法[6]；固体与流体区的导热系数、比热容等材料物性值采用各自的实际值。

在建模时，开敞空间上边界设置为压力出口边界条件。计算模拟区域四周在静风状态时采用压力出口边界条件，在有风状态时采用速度入口边界条件。燃料表面入口速度为 5.0×10^{-5} m/s。固壁面处为无滑移速度边界条件，地面和油池壁面为绝热边界，考虑模拟包装容器外壁面与火焰间的辐射换热。对壁面附近流场采用“标准壁面函数”法处理，保证数值计算的适应性。针对火焰流场的非线性和强源项问题，采用了步进解法和欠松弛迭代法来加速收敛。

2　数值模拟结果及分析

2.1　静风状态下包装容器外表面的温度及辐射热流分布

模拟包装容器外表面上的温度分布见图 2，从图

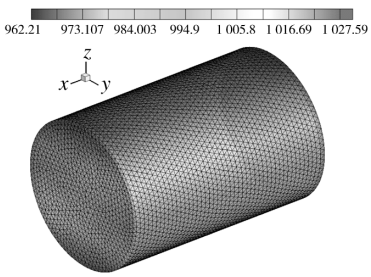


图 2　模拟包装容器外表面上的温度分布

Fig. 2 Temperature distribution of outer surface of simulated container

2 中可以看出，在火烧环境作用下，模拟包装容器的底部温度最高，达到 1 027.59 K；顶部温度最低，约为 962 K；左右两侧表面的温度基本呈对称分布，在 1 000 K 上下。

水平放置的模拟包装容器表面上的辐射热流分布情形见图 3，从图 3 中可以看出，模拟包装容器底部

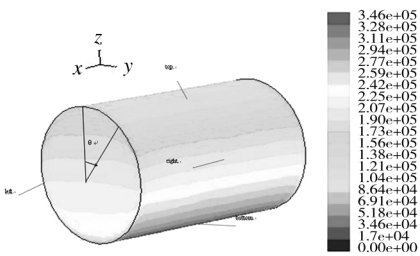


图 3　模拟包装容器表面的辐射热流分布

Fig. 3 Radiant heat flow distribution of simulated container surface

受到的辐射热流最大，可达到 344 kW/m²，相应的最高温度值也出现在模拟包装容器底部；容器顶部的热流密度最小，约为 100 kW/m²。由于模拟包装容器尺寸相对油池尺寸较小，在静风时，模拟包装容器被火焰完全吞没，因此，模拟包装容器两侧表面（图 3 中所指示的左、右 2 个表面）的温度及辐射热流分布基本对称，约在 200 kW/m² 上下。

2.2 横向风对包装表面辐射热流分布的影响

通常在静风情况下，火舌从油池表面垂直上升并在靠近油面上方出现颈缩现象，该现象主要是由火焰卷吸诱导进入的空气引起的；而存在自然风时，风加强了局部空气的进入，其可能随时变化并影响容器周围火焰厚度的一致性见图 4，也因此使火焰辐射系数

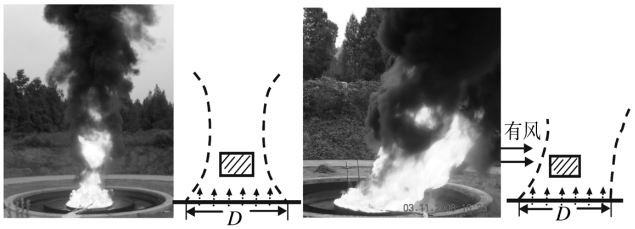


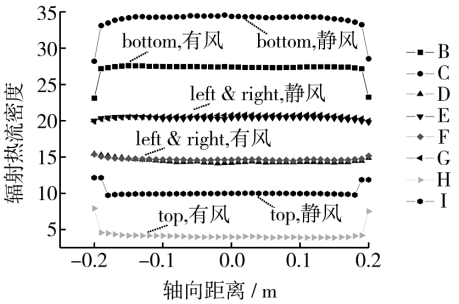
图 4 风对火焰厚度及辐射系数分布的影响

Fig. 4 Influence of wind on flame thickness and radiation coefficient distribution

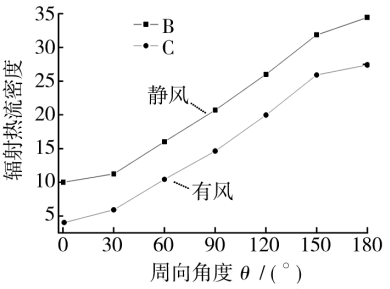
下降，从而导致包装容器表面辐射热流不均匀。

根据不同风速条件下油池火灾模拟计算结果[7]可知，在微风条件下，火焰的倾斜角度小于 15 ℃，当风速超过 4 m/s 后，火焰的倾斜角度可达 40 ℃以上，因此，如果在较大风速下开展包装容器火烧试验，会由于风的影响作用，火焰无法吞没或包覆整个包装容器，将影响试件周围火焰厚度的一致性，导致试件表面辐射热流不均匀，对包装容器耐火特性的正确评估产生影响。

将 FLUENT 软件中容器表面的辐射热流数据导出，得出辐射热流分布随模拟包装容器表面位置的变化关系，见图 5。可以看出辐射热流随圆柱轴向和周向位置的变化。静风条件下，在轴线方向上，除了容器顶面和底面端部位置外，辐射热流基本恒定；在圆周方向，容器底部的热流密度最大达到 112.5 kW/m²，容器顶部的热流密度最小约为 428 W/m²，模拟包装容器左右两侧表面的辐射热流密度约在 200 kW/m² 上下。当存在自然风时，包装容器表面的辐射热流会有所下降，例如取横向风速为 4 m/s 进行模



a 辐射热流密度随圆柱轴向位置的变化



b 辐射热流密度随圆柱周向位置的变化

图 5 静风及有风条件下的辐射热流分布

Fig. 5 Radiant heat flow distribution under stagnant air and wind conditions

拟计算，得到容器底部的最大热流密度为 112.5 kW/m²，容器顶部的热流密度最小约为 474.3 W/m²。

3 结论

1）在静风状态的火烧环境作用下，水平放置的模拟包装容器底部受到的辐射热流最大，相应地最高温度值也出现在模拟包装容器底部。如果模拟包装容器被火焰完全吞没，其两侧表面的温度及辐射热流分布基本对称。

2）静风条件下，在轴线方向上，除了容器顶面和底面端部位置外，辐射热流基本恒定；在圆周方向，容器底部的热流密度最大达到 344 kW/m²，容器顶部的热流密度最小约为 100 kW/m²，模拟包装容器左右两侧表面的辐射热流密度约在 200 kW/m² 上下。

3）当存在自然风时，由于风的影响，火焰可能无法吞没或包覆整个包装容器，将影响试件周围火焰厚度的一致性，导致试件表面辐射热流不均匀，对包装容器耐火特性的正确评估产生影响。模拟结果证实，当风速超过 2 m/s 后，包装容器周围的火焰热辐射通量分布降低，在下风向出现较大的热辐射通量分布。

（下转第 160 页）

包装将成为不可避免的趋势。商品包装都已采用条码识别技术，靠肉眼进行物资的识别和查找，效率低、易出错，极大地浪费了时间和人力。条码、射频技术、卫星定位等信息技术在军品包装领域的应用，将大大加强内包装物的透明性，提高快速反应能力，使对物资的管理变得更加简便易行。信息技术的应用将产品特性、包装要求、材料性能、环境条件、运输、装卸要求等各类信息分别予以分析、细化，建立相关的对应关系，并将其纳入计算机管理。数据共享可有效地缩短包装研制周期和快速获得各种有效信息，科学做出集装运输方案，甚至可以配合卫星定位跟踪技术，实现装备物资保障的全程可视化。以便于在未来战争以配送为基础的后勤保障中，指挥员能够及时掌握和驾驭战场信息，缩短反应时间，使后勤保障从被动地做出反应转变为有预见地使用资源。

军品包装在信息技术应用上已进行了很多有益的探索，如某仓库针储存物资管理现状，开发了基于自动识别技术的物资管理系统，在物资包装容器上采用射频标签和二维条码标签。按照“支持全过程，管理到单品”的原则，在集装器具（集装箱、集装托盘及集装架等集装单元和基数外包装容器）、大型单台装备器材和车辆上使用射频标签，实现批量或成套物资发送的数据自动采集；在中间包装（储运箱、滚塑箱、木箱、纸箱及软包装等）和发付单元上使用二维条码标签，实现平时管理和前送物资发放的数据采集[8]，能满足物资储存单位及野战情况下出入库及维护保养诸环节的包装信息采集需求，满足包装件自动采集、手工录入等多种采集手段并存使用的要求。

7 结语

军品包装将综合采用高性能包装材料、环保包装材料，集合包装技术、配套包装技术、信息自动采集技术等，逐步实现包装的智能化、高效化、节约化。从军事保障的需求出发，将国内外成熟的包装材料技术应用于军品包装，在传统包装方法不断发展的基础上，加强包装新材料新技术的研究与应用。

参考文献：

[1] 赵火应. 装甲装备器材保养封存与包装[M]. 北京：国防工业出版社，2008.

[2] 吴灿伟，封彤波，闫旭，等. 封套材料在军用装备封存包装中的应用及发展趋势[J]. 包装工程，2009，30(09)：53－57.

[3] 李文钊，田春雷，高敏，等. 基于战时保障的弹药单元化包装研究[J]. 包装工程，2007，28(3)：108－109.

[4] 梁成浩. 防锈溶剂型可剥性塑料的研究现状与展望[J]. 腐蚀科学与防护技术，2009(11)：546－548.

[5] 梁志杰. 装甲装备器材保养包装与防护手册[K]. 北京：国防工业出版社，2011.

[6] 陈晓峰. 军用物资配套包装探析[J]. 后勤科技装备，2008(2)：61－62.

[7] 刘振华，陈文阁，李中华. 加强军品包装节能环保工作的几点思考[J]. 包装工程，2010，31(3)：128－131.

[8] 董治光，杨久成. 自动识别技术在军品包装中的运用策略[J]. 商品储运与养护，2008，30(10)：96－97.

（上接第 132 页）

参考文献：

[1] MUÑOZ M，ARNALDOS J，CASAL J. et al. Analysis of the Geometric and Radiative Characteristics of Hydrocarbon Pool Fires[J]. Combustion and Flame，2004，139(3)：263－277.

[2] FERRERO F，MUÑOZ M，ARNALDOS J. Effects of Thin-layer Boilover on Flame Geometry and Dynamics in Large Hydrocarbon Pool Fires[J]. Fuel Processing Technology，2007，88(3)：227－235.

[3] 朱建华，褚家成. 池火特性参数计算及其热辐射危害评价[J]. 中国安全科学学报，2003，13(6)：25－28.

[4] 黄珏倩，李国强，杜咏，等. 大空间火灾中火焰辐射对钢构件升温的影响[J]. 自然灾害学报，2008，17(5)：87－94.

[5] 陶文铨. 数值传热学[M]. 西安：西安交通大学出版社，2001.

[6] 史光梅，刘朝. 工业炉内辐射换热模型研究进展[J]. 工业加热，2004，33(5)：9－12.

[7] 史光梅，李明海，胡绍全，等. 横向风对油池火烧试验的影响[J]. 装备环境工程，2010，7(6)：86－90.

[8] 宇德明，冯长根，曾庆轩，等. 热辐射的破坏准则和池火灾的破坏半径[J]. 中国安全科学学报，1996，6(2)：5－10.