

# 锅炉沸腾液体膨胀蒸汽爆炸 (BLEVE)的小尺寸模拟试验

陈思凝, 孙金华, 褚冠全, 陈先锋

(中国科学技术大学 火灾科学国家重点实验室, 安徽 合肥 230026)

**摘 要:** 在锅炉运行中, 由于各种原因使得在锅筒主体上形成细小裂缝, 一旦出现设备材料的老化和故障运行工况, 导致裂缝快速扩展, 就有可能出现沸腾液体膨胀蒸汽爆炸(BLEVE)的极端情况。BLEVE 是一种物理爆炸, 具有严重的破坏性, 为研究沸腾液体膨胀蒸汽爆炸的发生机理, 建立了小型实验装置进行模拟试验。通过测量爆炸瞬间容器内的温度及压力变化, 分析容器内气液两相介质的运动, 进而研究造成容器整体性破裂的原因。实验中发现, BLEVE 过程中存在由不同原因造成的两个压力峰; 其中过热液体的剧烈沸腾, 在液体表面形成高速膨胀的两相流层, 挤压容器内气相与液相, 导致出现第一个压力峰; 第二个压力峰主要是由于“液体锤”现象对容器的冲击造成, 其中壁面开口处受到的撞击最为猛烈。

**关 键 词:** 锅炉; 沸腾液体膨胀蒸汽爆炸; 爆炸压力; 两相流

中图分类号: TK122 文献标识码: A

## 1 前 言

在锅炉设计中, 依照传统的设计思想, 人们所关注的是在最经济的条件下使用什么材料、设计多厚, 使结构在实际运行中能够保证安全, 锅炉的安全与结构强度有绝对性的关联。很多人认为只要设备的强度设计足够即可安全的运行直至报废。但事实上, 在长期使用下, 由于设备老化和操作失误, 如钢材腐蚀、水垢形成、燃料空气比的异常和液位控制不当等都会造成严重的锅炉故障, 严重的甚至发生爆炸。因此, 人们必须考虑到设备运行中可能存在的最大风险, 对发生诸如沸腾液体膨胀蒸汽爆炸(BLEVE)等灾害而导致的一系列危害加以重视。

在工业与电站锅炉的锅筒内, 由于超压(如安全阀失效)、机械损伤(包括容器材料缺陷, 腐蚀以及边角、焊缝处的强度降低)、热应力和操作不当等因素的综合作用, 致使锅筒壁面出现部分区域的强度减

弱而产生裂缝, 此时瞬间暴露于大气压力下的过热水急剧沸腾, 造成容器内压力骤升, 挤压壁面, 如果裂缝在整个容器上快速扩展开来, 巨大能量瞬间释放, 这种爆炸形式即称为沸腾液体膨胀蒸汽爆炸(BLEVE)<sup>[1]</sup>。BLEVE 具有极大的破坏性, 爆炸会产生冲击波和容器碎片的抛射, 不仅会直接对人员和锅炉的整体结构、周围设施造成损伤, 还可能通过加速周围的管、板、阀, 使之高速抛射出去, 产生“二次破坏”。

对于 BLEVE 发生机理的解释, 国内外研究者提出了很多看法<sup>[2~5]</sup>, 但对于 BLEVE 过程中锅筒内水和两相流的运动及其对压力变化过程的影响还存在很多疑点。本文采用小型实验装置进行模拟试验, 通过测量爆炸过程中容器内的温度及压力变化, 分析容器内气液两相介质的运动, 进而研究造成容器整体性破裂的原因。

## 2 试验装置

在试验装置中, 设计了一个垂直圆柱形耐压容器, 高度为 800 mm, 直径 250 mm, 在其上表面开有圆形口, 开口面积可以改变, 在开口处覆以爆破片。容器顶部装设有一组压力传感器与热电偶, 在容器竖直圆筒面标高 400 mm 的壁面处装置有同样型号的一组传感器与热电偶。在容器顶部还设计安装了一个开口装置, 用以在试验过程中在需要的时刻打开爆破片; 在容器的底部装有加热器。实验时将水按需要的液位充入容器, 在开口处覆以爆破片, 加固后使容器密封。使用加热器在密闭容器内将水加热至 100 °C 以上, 使其具有一定过热度, 过热度大小可根据实验要求具体设定, 然后采用开口设备将爆破片突然打开, 用以模拟真实情况下高压容器由于各种原因产生破裂进而引发 BLEVE 的过程。由数据采

收稿日期: 2005-05-25; 修订日期: 2005-11-03

基金项目: 国家重大基础研究(973)火灾动力演化和防治基础基金资助项目(2001CB409600)

作者简介: 陈思凝(1976-)男, 安徽马鞍山人, 中国科学技术大学博士研究生。

集系统对过程中压力和温度信号进行采集和分析。试验装置结构简图如图 1 所示。

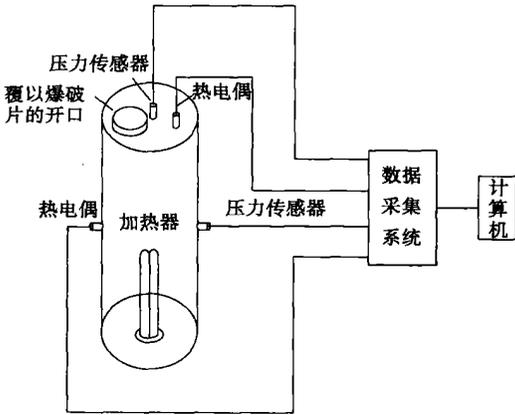


图 1 试验装置图

### 3 试验结果与分析

采用上述的试验装置, 将水注入容器, 高度为 480 mm, 此时水容积约为容器总体积的 60% (容器中间的一组压力传感器和热电偶没于水平面下方)。开口处直径为 65 mm, 将爆破片覆盖在开口上, 密封容器, 加热水至 130 °C 后 (此时相应的容器内压力约为  $2.7 \times 10^5$  Pa), 打开爆破片。高速数据采集器采样频率设为 2 000 Hz。图 2 中显示了容器开口后两相流的喷出过程。

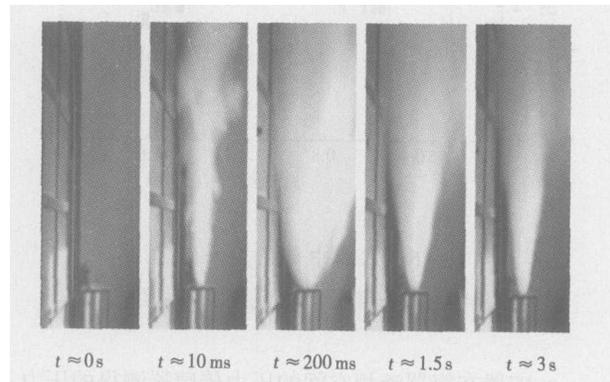


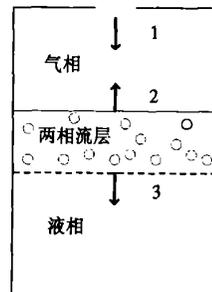
图 2 爆破片打开后水的喷出过程

爆破片突然打开后, 由于容器内压力和外界大气压力存在一个压力梯度, 容器气相空间靠近壁面开口处的介质发生外泄, 随着介质向外高速喷出, 容器内压力开始下降, 与此同时, 在开口处形成的稀疏波以当地音速向下传播。当稀疏波传播到容器内液相时, 液相内压力也开始经历一个下降过程, 此时的

液体由于突然的降压而呈现为过热状态, 液体开始剧烈沸腾, 液相内出现大量的气泡, 但需指出的是气泡的出现在整个液相区内的分布是不均匀的, 在液相表面最先发生并且最为剧烈<sup>[9]</sup>。同时在真实液体中总是有一些自由气体以小气泡或核的形式存在, 通常  $1 \text{ cm}^3$  中小气泡的个数可达为  $10^4 \sim 10^8$  个<sup>[7-8]</sup>, 在压力突降时, 这些气泡也会快速成长。

气泡成长变大主要有力学与传热两种原因, 气泡成长的过程可按两个阶段考虑: 开始生长阶段, 气泡半径  $r$  很小。一旦形成气泡核后, 则内压很大。气泡的生长主要受气相推动外层水的惯性力以及水的粘滞力和界面表面张力所控制, 热量传递的作用尚小, 可按等温过程考虑, 此阶段的生长期很短, 介质状态一定时, 气泡生长速度为定值, 成长中的气泡尺寸与时间成线性关系; 气泡生长的第二阶段, 气泡体积已较大, 内压已减少 (因  $r$  变大), 惯性作用也减少, 气泡的生长主要依靠过热液膜的供热, 因气泡内压力降低, 气膜温度随气泡长大而降低, 因此在此阶段气泡生长过程是在热量控制下的。在热量控制区内, 气泡的生长速度, 随时间的平方根减小, 气泡尺寸, 则随时间的平方根增大<sup>[9]</sup>。

由于急剧沸腾, 大量气泡出现并不断成长, 在液相表面形成一个不断急速膨胀的两相流层, 高速膨胀的两相层对气相与液相空间在各个方向上同时产生猛烈的推动, 气相、液相介质受到强烈的挤压, 致使整个容器内压力骤然升高。在容器内压力不断升高的条件下, 部分气泡在两相流层表面发生破裂, 释放出能量, 从而进一步造成压力的上升。在图 3 中描述了容器内两相流层的运动过程。



- 1-容器开口后, 稀疏波自开口位置以当地音速向下传播;
- 2-膨胀的两相流层向上挤压气相空间, 产生向上传播的压缩波, 同时两相流层向上高速运动;
- 3-稀疏波在液相中的传播以及两相流层对液相的压缩, 两相流层和液相之间界面的向下移动。

图 3 容器中两相流层的运动过程示意图

图 4 为装置在容器顶部的压力传感器测得容器

开口后该位置的 压力变化曲线, 图 5 为图 4 中第一个压力峰的局部放大图。在图 5 中 A 点时刻, 突然打开爆破片, 容器内压力降低, 在 A ~ B 时段内, 容器内物质泄放带来压力下降, 同时两相流层挤压气相空间造成压力上升, 这两个过程共同影响容器内压力变化; 在 B 点时刻, 容器内压力上升的速率大于下降速率, 在图线上表现为压力开始上扬, 从 A 到 B 时段时间为 6 ms。随着压力的上升, 在两相流层的表面, 气泡不断地破裂, 释放出热量与动能, 又进一步地推动压力的升高。但与此同时, 压力的持续升高导致了容器内气相空间介质加速向外喷出; 且随着温度的降低, 水的过热度不断降低, 内能不断减少, 在当容器内压力超过破裂前的初始压力后, 水不再过热、气泡出现、生长、破裂等一系列活动受到抑制, 两相流层的膨胀加速度降低, 推动能力减弱, 这些都会导致容器内压力出现下降。这两种过程并行发展, 经过 28 ms; 在 C 点时刻, 压力下降的趋势超过压力上升的趋势, 容器内压达到一个瞬态的平衡

新处于下降阶段。当压力下降到低于容器初始压力后, 水又呈现为过热状态, 水的沸腾使得两相流层重新得到加速, 向上挤压着气相空间; 从 D 点开始, 容器内压力又开始出现升高。

在压力变化的过程中, 两相流层以高速向上膨胀, 最终猛烈撞击到容器的上壁面, 其对壁面的冲击力可能达到容器内初始压力的数倍, 这一现象称之为“液体锤”, 它对整体强度已经减弱的破裂部位来说, 会造成严重的伤害, 甚至可能导致容器的瞬间整体破裂。如图 4 中所示, 容器内压力在经历了第一个由两相流层急剧膨胀导致的压力峰后, 又出现一个近似平台的压力升高段(由于喷出流的不均匀性, 压力有一些波动, 但基本呈现出一个平台阶段), 压力值达到初始压力的两倍以上, 这是由于具有上升动能的两相流层, 最终撞击到上壁面, 产生“液体锤”效应造成的。在这一阶段, 两相流从容器开口处持续高速喷出, 大量的气泡在上壁面受到挤压破裂, 从而高频地释放动能, 这也对容器的破坏起到重要作用。随着容器内温度和介质密度的降低以及能量的泄放, 容器内压力也开始逐渐下降, 喷出过程逐渐停止。

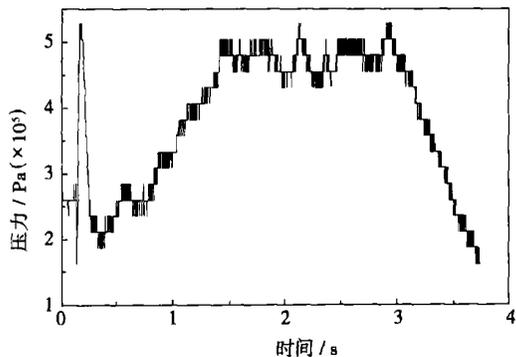


图 4 容器顶部压力传感器测得的全程变化曲线(60%高度)

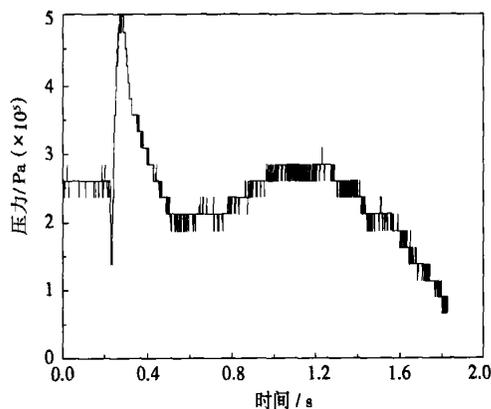


图 6 容器中 部压力传感器测得的全程变化曲线(60%高度)

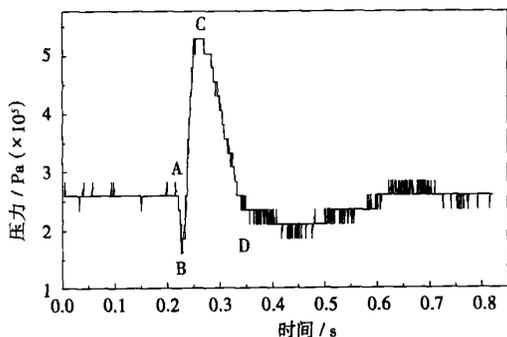


图 5 图 4 中第一个压力峰的局部放大图

后, 开始下降, 这一点处的压力值是初始压力的 2.2 倍。从 C 点到 D 点这一段时间内, 容器内压力又重

安置在容器液相空间的压力传感器测得的压力变化曲线如图 6 所示。随着容器开口后, 液体表面两相流层的出现, 液相空间也同样受到两相流层的挤压, 与气相空间有相似的压力变化。图 6 中第一个压力峰的峰值也达到了容器内初始压力的两倍。在两相流的运动过程中, 由于下方的液相空间是一个受限空间, 所以两相流在径向方向向下运动的速度远比向上要小, “液体锤”导致的冲击效应也要弱的多。从图 6 中可见, 第二个压力上升段较图 4 平

缓得多, 且持续的时间也要短得多。这说明在两相流喷出时, 上壁面开口位置受到的冲击较容器中更为强烈。

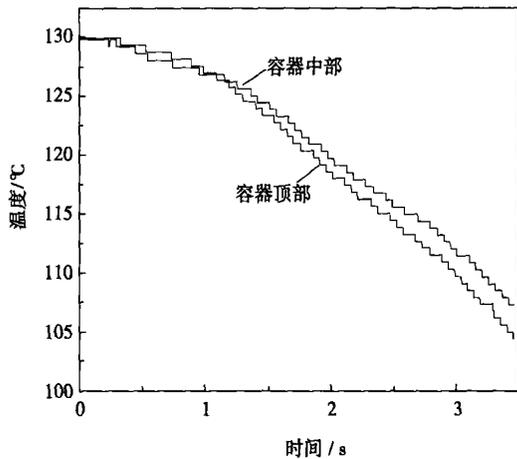


图 7 BLEVE 过程中容器顶部和中部的温度变化曲线

在压力剧烈变化的同时, 容器内温度的变化则较迟缓, 图 7 显示的是在容器顶部和中部设置的热电偶测得的温度变化曲线。可以看出, 当爆破片被打开后, 容器内温度呈单调下降趋势。虽然安装在容器顶部的热电偶在相同时刻所测温度值略低于中部的热电偶所测值, 但两者相差不大。

#### 4 结 论

经过试验研究, 发现在 BLEVE 过程中存在着两个由不同原因造成的压力峰, 其大小都比容器破裂前的初始压力要高出两倍以上。第一次的压力峰是由于过热液体剧烈沸腾, 在液体表面形成高速膨胀的两相流层, 同时挤压上方的气相空间和下方的液相空间而产生的; 第二次的压力峰则是主要因为高速喷出的两相流撞击在容器上壁面产生“液体锤”效应造成的, 在上壁面开口位置受到的冲击要比容器中更为强烈的多。当锅炉高压容器表面已经出现一定程度的破裂后, 在这样的超压作用下很可能出现裂口迅速扩大, 最终导致灾难性的整体破裂。第二次压力峰的作用时间较第一次压力峰要长数个量级, 在这一阶段, 容器发生 BLEVE 的可能性也要大得多。

#### 参考文献:

- [1] Center of Chemical Process Safety (CCPS). Guidelines for evaluating the characteristics of vapor cloud explosions, flash fires and BLEVES [R]. New York: AIChE, 1994.
- [2] JAN STAWCYK. Experimental evaluation of LPG tank explosion hazards[J]. *Journal of Hazardous Materials* 2003, **96**: 189-200.
- [3] BOESMANS B BERGHMANS J. Modelling boiling delay and transient level swell during emergency pressure relief of liquid gases[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 1996 **46**: 93-104.
- [4] BIRK A M. Scale effects with fire exposure of pressure-liquefied gas tanks[J]. *J Loss Process Ind.* 1995, **8**(5): 275-290.
- [5] BIRK A M, CUNNINGHAM M H. Liquid temperature stratification and its effect on BLEVE and their hazards[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 1996, **48**: 219-237.
- [6] YU C M, VENART J E S. The boiling liquid collapsed bubble explosion (BLCBE): A preliminary model[J]. *Journal of Hazardous Materials*. 1996, **46**: 197-213.
- [7] YOUNG F R. Cavitation[M]. London: McGraw-Hill, 1989.
- [8] STEALEN S V, COLE R. Boiling phenomena[M]. Washington: Hemisphere, 1979.
- [9] 鲁钟琪. 两相流与沸腾传热[M]. 北京: 清华大学出版社, 2002.

(何静芳 编辑)

#### 书 讯

### 流体力学基础

本书为少学时的流体力学教材, 是 1991 年版《流体力学基础》的第 2 版。全书共 7 章, 包括绪论、流体静力学、流体运动学、流体动力学微分形式的基本方程、恒定平面势流、边界层理论基础、流体动力学积分形式的基本方程, 每章后附有思考题与习题。全书在数学表达上, 采用分量、矢量两种形式, 由浅入深地平行叙述。附录中包含矢量及其运算和正交曲线坐标下的基本方程等, 可方便读者查阅。

读者对象: 水利、水电、水运、海洋、环境、船舶、土木、机械、石油、化工、气象等工程专业本科生和工程技术人员等。

2006 年 2 月出版

**words:** combustion optimization, positive equilibrium, self-optimization, optimal air/coal ratio

锅炉沸腾液体膨胀蒸汽爆炸 (BLEVE) 的小尺寸模拟试验 = **The Small-scale Simulation Test of the Boiling Liquid Expanding-vapor Explosion (BLEVE) of a Boiler** [刊, 汉] / CHEN Si-ning, SUN Jin-hua, CHU Guan-quan, et al (State Key Laboratory of Fire Science under the China National University of Science & Technology, Hefei, China, Post Code: 230026) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2006, 21(2). — 132 ~ 135

During the operation of a boiler there may emerge due to various causes fine and small cracks on the main body of the boiler. With the progress of equipment material aging and in case of abnormal operation the cracks will rapidly expand, leading in extreme circumstances to boiling liquid expanding-vapor explosion (BLEVE). The latter is a kind of physical explosion with a serious destructive force. To study the generation mechanism of BLEVE a small-scale experimental device has been set up to conduct simulation tests. Through the measurement of the changes in temperature and pressure in a vessel at the very moment of explosion the movement of gas-liquid two-phase medium in the vessel can be analyzed for a further study of the cause of the integral rupture of the vessel. It has been found through tests that in the BLEVE process there exist two pressure peaks due to different causes. In this connection, the intense boiling of a superheated liquid can lead to the formation on the liquid surface of a rapidly expanding two-phase flow layer. In the vessel the gas and liquid phase being squeezed there may emerge the first pressure peak. The second pressure peak is mainly sparked by a phenomenon of "liquid hammer", which impacts violently on the vessel. The open hole located at the vessel wall surface may be subjected to a most intense shock force. **Key words:** boiler, boiling liquid expanding-vapor explosion, explosion pressure, two-phase flow

余热锅炉构架护板结构的有限元分析 = **Finite Element Analysis of the Frame-casing Structure of a Waste Heat Recovery Boiler** [刊, 汉] / XIA Yong-jun, LU Nian-li, (College of Mechanical & Electrical Engineering under the Harbin Institute of Technology, Harbin, China, Post Code: 150001), ZHAO Xin-zhe, DING Zhao-shun (Harbin No. 703 Research Institute, Harbin, China, Post Code: 150036) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2006, 21(2). — 136 ~ 139

The frame-casing structure of a waste heat recovery boiler represents a typical and complicated shell-beam composite structure. In engineering practice a finite element method is mainly used to perform the mechanics analysis of the above-mentioned structure. The problems to be addressed and methods used to deal with them during finite element model-building are discussed, and some modeling techniques of highly practical value presented. The authors have performed a finite element analysis for the frame-casing structure of the waste heat recovery boiler (installed in tandem with model PG917E gas turbine) during its design stage. On the basis of displacement and stress distribution conditions the initial design has been progressively modified and then finalized. The methods employed by the authors may serve as a valuable reference for finite element modeling and mechanics analysis of analogous structures. **Key words:** waste heat recovery boiler, frame-casing structure, shell-beam composite structure finite element method

轴流压气机叶片优化设计 = **Optimized Design of Axial Compressor Blades** [刊, 汉] / YI Wei-lin, HUANG Hong-yan, HAN Wan-jin (College of Energy Science & Engineering under the Harbin Institute of Technology, Harbin, China,