

# 吸收球罐内部流动分析

刘宏, 韩汉桥

中国科学院力学研究所, 高温气体动力学国家重点实验室(筹), 北京海淀区 100190

**摘要** 分析了吸收球罐内部流动生成的过程及主要特性, 为了便于数值模拟, 对吸收球罐的结构进行了适当简化。数值结果表明: 球阀受力主要来自球罐内部压力梯度引起球面压力分布变化。球罐两端连接管路的长度对球阀受力过程产生影响, 球阀受力变化梯度随管路长度增大而减小。球阀位置向上移动, 受力变化梯度增大, 且稳定流态下受力更大。

**关键词** 高温气冷反应堆, 吸收球罐, 数值计算

## 引言

高温气冷反应堆是由普通的石墨气冷堆发展而来的反应堆。工作原理是: 用石墨做为慢化剂, 用气体氦作为冷却剂(这就是“气冷”), 氦气的温度高达 800 度左右(这就是“高温”)具体过程是: 当反应堆内的核燃料进行核反应时, 放出中子, 速度太快的中子经过石墨碰撞便慢下来(因为在此堆里只有慢中子才能与铀燃料发生有效反应), 以维持核反应。核反应时要释放出大量的热量, 如果不把热量带走, 就会烧毁反应堆, 所以用气体(氦)流经堆芯, 把热量带到热交换器, 再由另一路冷却剂把氦气冷却, 降温后的氦气又回到堆芯继续冷却反应堆, 形成闭式循环回路。如果氦气回路发生破坏, 导致氦气流出, 将导致放射性物质泄漏。在回路中吸收球罐的作用是在管路发生断裂的情况下减小氦气泄漏。

吸收球罐基本结构为比原回路管道直径稍大一些的圆管, 中间用托架支撑着一个圆球, 圆球的直径大于上部连接管路的内径。正常工作状态下, 由于回路内氦气流速很小(约为 10 米/秒), 氦气对圆球的作用力不足以推动圆球移动, 圆球存在仅仅是增加阻力。当上部的连接管路发生断裂, 希望圆球能够向上移动阻塞下游的管道, 达到减小泄漏的目的。

## 1 计算方法

吸收球罐基本结构为内径 80 毫米的圆管, 内部安装一个直径 64 毫米的圆球, 下部连接内

径为 70 毫米的圆管, 上部连接内径为 50 毫米的圆管。正常工作状态下, 回路内氦气流速很低, 近似不可压缩流动。当管路发生断裂, 断裂处压力迅速降低。在断裂处将产生膨胀波并向上游传播, 引起管路内压力分布改变, 并导致管路内氦气速度改变, 这一过程中氦气压力和速度变化很大必须考虑气体的可压缩性。因此控制方程采用可压缩 N-S 方程。数值计算采用商用软件 CFD。数值格式采用二阶迎风格式。

膨胀波在管路内传播过程中由于边界层还没有生成, 是典型的无粘流动过程, 管路弯曲对简单波规律影响不大。在下面研究过程中都用直管代替实际中的弯管。

为了了解形成稳定流态下圆球受力情况, 便于分析计算结果是否合理, 采用层流计算。由于回路流速很低, 计算过程中假设初始速度为零。管路内初始压力为 7 兆帕。

## 2 计算结果分析

### 2.1 流动启动过程

当回路中某处管道发生断裂, 断裂处将产生一束喷张波向上游传播。经过球罐时, 膨胀波部分绕过圆球继续向上游传播, 部分在圆球表面反射, 膨胀波经过引起当地压力降低。图 1 至图 3 给出的是当膨胀波传播到球罐时管道压力图。从图中可以看出由于球罐内部存在较大压力差, 导致圆球表面压力分布不均匀时圆球受力的主要来源。由于此时球罐内气流速度较低, 由于流动引起圆球表面压力变化引起的圆球受力很小。

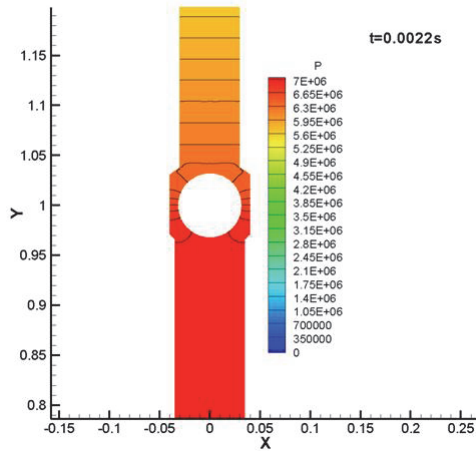


图1 t=0.0022 秒压力分布

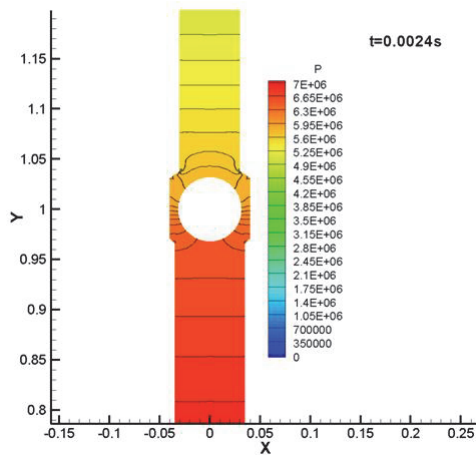


图2 t=0.0024 秒压力分布

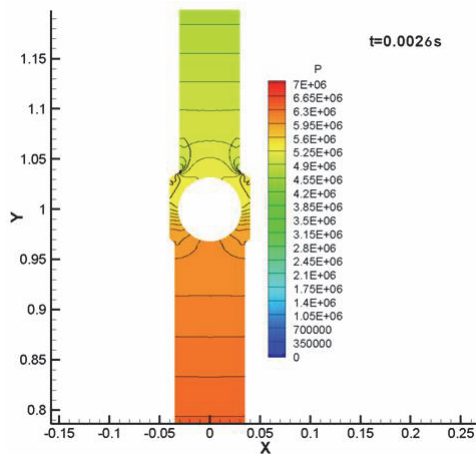


图3 t=0.0026 秒压力分布

由于断裂处膨胀波向上游传播形成扇形膨胀区，随着膨胀区增长，单位距离上压力变化将减小。因此可以想象，断裂处距球罐距离越远，球罐内压力梯度就越小，也就是说圆球所受的力也就越小。图4和图5分别给出的是断

裂处距球罐2米和20米时圆球受力随时间变化曲线。由于管道长度不同，所需要传播圆球表面的时间也不相同，研究的是圆球受力规律，需要膨胀波传播到圆球时刻开始计算。从图中可以看出，相同时刻，管长2米时圆球受力远大于管长为20米时圆球所受的力，受力变化梯度更大。

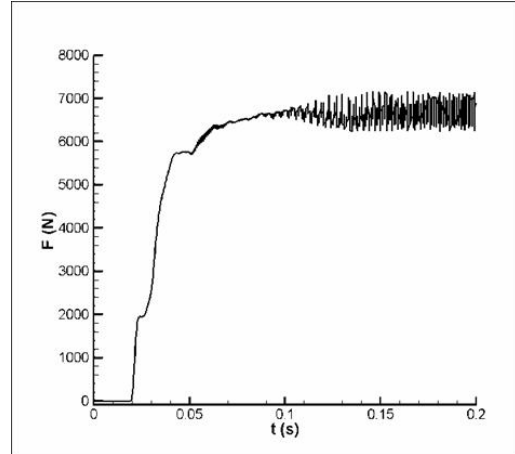


图4 管长2米时圆球受力随时间变化

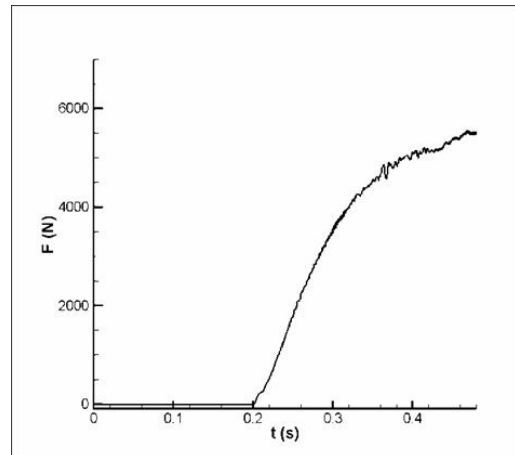


图5 管长20米时圆球受力随时间变化

从图中还可以看出，由于管道变长，膨胀波传播到圆球表面的时间也相应增长，也就是说圆球开始向上运动的时间延长。同时由于受力减小，圆球运动到阻塞管道的时间也将增长，氦气的泄漏量将相应增加。

## 2.2 流动稳定过程

前面讨论的是回路中管道突然断裂条件下，吸收球罐内部流动发展的过程。回路在实际运行过程中，这种情况很难发生，通常是回路中的管道先发生裂缝，进而发生管路的断裂。

在这种情况下，裂缝处产生一个接一个膨胀波，向上游传播。管道断裂之后，在高压气源作用下逐步形成稳定的流场。通过观察吸收球罐的结构可以发现，流道中最小截面积为通过圆球中心的水平截面。在此截面上气流速度达到声速，产生限流的作用，保证流道内达到一个稳定的流态。流道内的流动参数有最小截面积的大小决定。因此，达到稳定流态情况下，吸收球罐下游管路的长度对阀球受力大小影响不大。图 6 给出管道长度为 5 米时阀球受力随时间变化曲线。比较图 5 与图 6 可以发现，虽然最终流场为震荡流动状态，没有得到稳定流态，但是两者流态相同，并且阀球所受的力都在 7000 牛顿附近，这与上面的分析结果相同。图 7 给出的是管道长度为 2 米时，稳定流态下管道内压力分布云图。

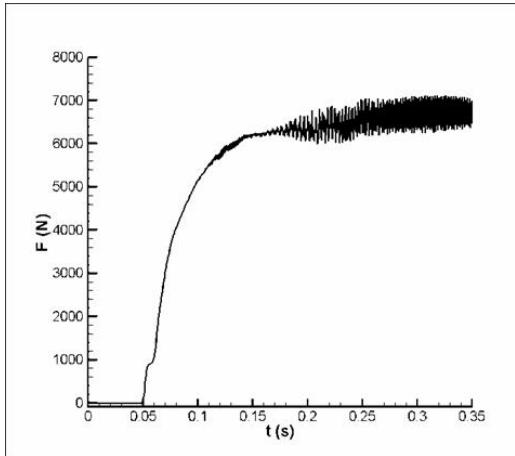


图 6 管长 5 米时圆球受力随时间变化

### 2.3 圆球位置变化对受力的影响

吸收球罐中圆球在所受力大于其所受的重力时，圆球将向上产生位移，这是在回路中安装吸收球罐的目的。如果圆球向上移动后，所受的力减小很多将影响吸收球罐的工作效率。下面讨论圆球向上产生位移后所受力变化规律。图 7 给出的是管道长度为 5 米时，阀球向上移动 10 毫米时受力随时间变化曲线。比较图 6 和图 7 可以发现，前 0.1 秒圆球受力随时间变化规律两者基本一致，说明圆球位置对膨胀波传播过程影响很小。在此之后圆球上移 10 毫米时受力大于圆球没有移动情况下的受力值。达到稳定流态时圆球受力也更大。

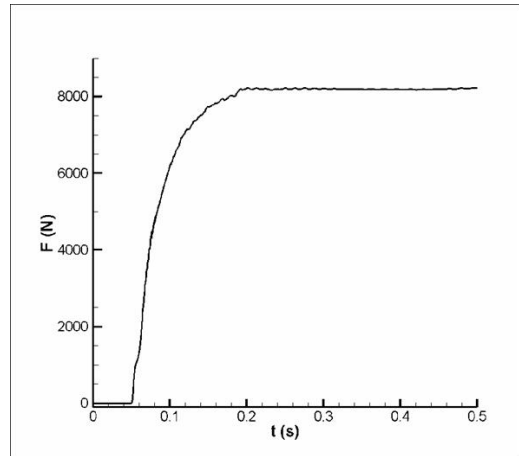


图 7 管长 5 米时圆球上移 10 毫米受力随时间变化

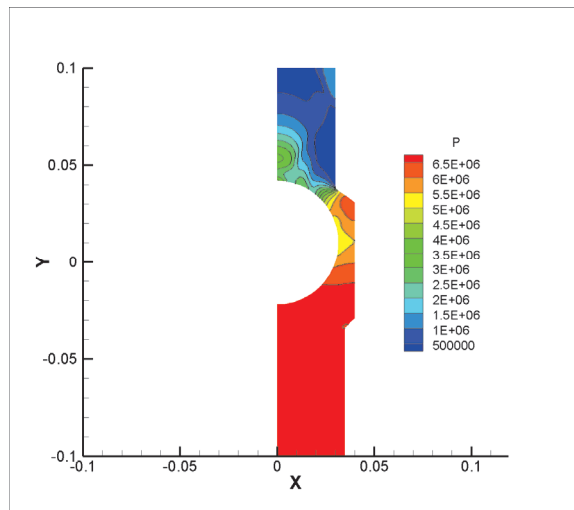


图 8 管长 5 米时圆球上移 10 毫米球罐内压力分布

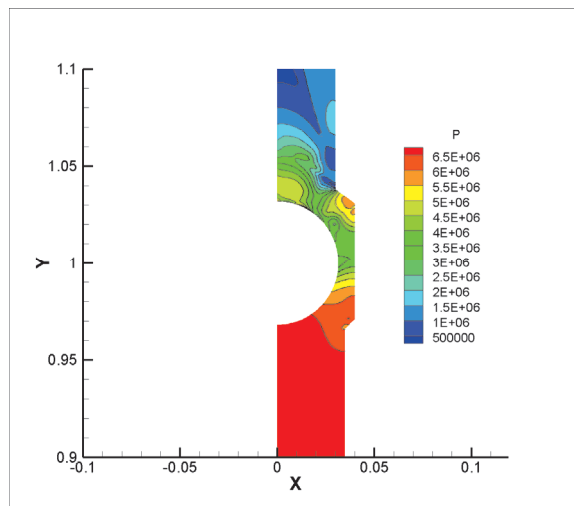


图 9 管长 5 米时圆球不动球罐内压力分布

图 8 和图 9 分别为圆球上移 10 毫米及圆球位置不变时球罐内压力分布。可以看出圆球上移之后，管路内最小截面积位置及大小发生改变

变。最小截面积从通过圆球中心的水平截面改变为圆球与吸收球罐上部管道之间最小截面积，导致球罐内圆球下部区域压力提高，而上部区域压力降低，圆球受力增大。

通过上面分析比较，可以想象，如果圆球继续向上移动，最小截面积将继续减小，圆球所受的力将进一步增大，可以保证吸收球罐实现其设计功能。

## 2.4 圆球移动速度对受力的影响

吸收球罐实际工作过程中，圆球受力向上移动，当圆球以某一速度向上移动时，将会对圆球上部气流产生压缩，而圆球下部的气流将产生膨胀，导致圆球受力减小。由于圆球能够运动的距离有限（20 毫米），圆球能够到达的速度有限，因而对圆球受力影响应该不大。图 10 给出的是球罐内圆球速度随时间变化曲线，可以发现圆球最终速度相对于声速（约为 1000 米/秒）很小（小于 10 米/秒），与前面的判断一致。图 11 与图 12 分别给出的是圆球静止与移动时圆球受力随时间变化曲线，通过比较可以发现，由于圆球的移动，前期圆球受力小于圆球静止时受力大小。这是因为圆球移动使得上部气流产生压缩效应，而下部产生膨胀效应引起的。后期圆球移动时受力大于圆球静止时的受力大小是因为圆球位置变化引起受力增加（上节结论）大于由于圆球移动引起压力减小的幅度，综合结果导致受力增大。

## 3 结论

1. 圆球受力主要球罐内压力分布差造成的；
2. 管道越长圆球受力越小；
3. 圆球位置上移受力增大；
4. 圆球向上移动速度导致受力减小，当影响不大。

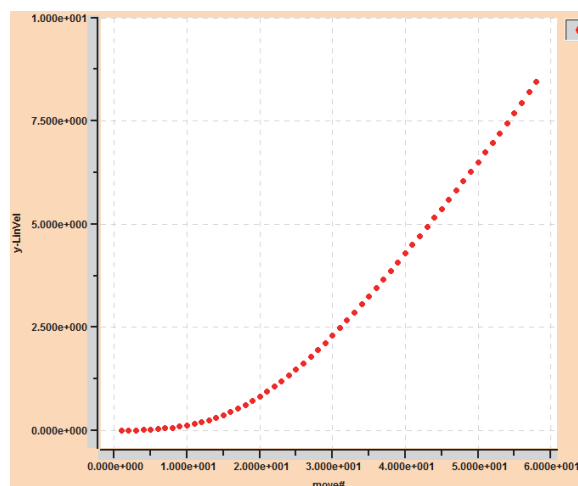


图 10 管长 2 米时圆球速度随时间变化曲线

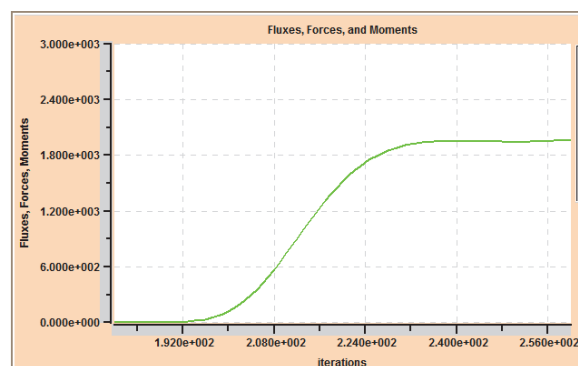


图 11 管长 2 米时圆球静止受力随时间变化曲线

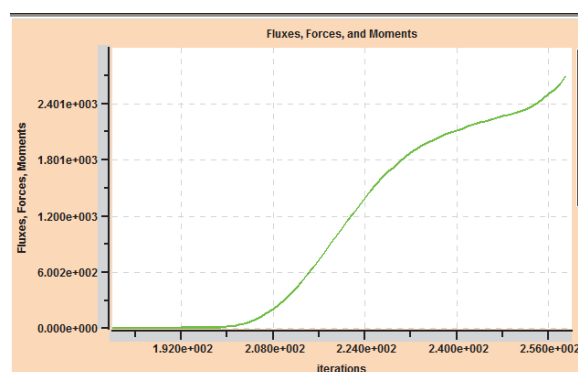


图 12 管长 2 米时圆球移动受力随时间变化曲线

## NUMERICAL STUDY ON FLOWFIELD IN ABSORPTION SPHERICAL TANK

LIU Hong, HAN Hanqiao

State Key Laboratory of High Temperature Gas Dynamics, Institute of Mechanics, C A S, No.15 Beisihuanxi Road, Beijing 100190, China

**Abstract** The flow field in absorption spherical tank was studied by a numerical method. The analyses on the computed result indicate that the thrust on sphere is correlated the station pressure distribution in the tank. The length increases of pipeline lead to the decreases of thrust on sphere. The upward movements of the ball result in the decreases of thrust on the ball.

**Key words** high temperature gas cooled reactor, absorption spherical tank , numerical calculation