

线圈终端盒内冷屏管路泄漏数值模拟

陈长琦^{1*} 闫珺¹ 陆坤² 程勇² 沈俊松²

(1. 合肥工业大学机械与汽车工程学院 合肥 230009; 2. 中国科学院等离子体物理研究所 合肥 230031)

Simulation of Cryogenic Helium Released from Thermal Shield Pipeline for Coil Terminal Box

Chen Changqi^{1*}, Yan Jun¹, Lu Kun², Cheng Yong², Shen Junsong²

(1. School of Machinery and Automobile Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China;

2. Institute of Plasma Physics, the Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China)

Abstract The leakage of the cryogenic helium gas from the thermal shield pipeline for the coil terminal box (CTB), connecting the superconducting magnet and peripheral systems in the International Thermonuclear Experimental Reactor (ITER), was modeled, approximated, and simulated with software package FLUENT, based on gas dynamics, fluid mechanics and gas jet dynamic theory. The formula of gas leakage rate at high pressure and low temperature was derived, and the transient leakage of helium in a period of 3 s was calculated. The major factors in the transient leakage, including the distributions of velocity, concentration, pressure, and temperature, were simulated. The relative error between the analytical calculated and numerically simulated leakages was found to be within 7.5%. We suggest that the simulated results be of much interest for diagnosis of helium leakage of the system.

Keywords Pipeline, Leakage, Mass flow, Numerical simulation

摘要 ITER 中线圈终端盒 (CTB) 是连接超导磁体系统与外围系统的重要通道, 内部设置了不同压力低温管路, 提供系统的低温环境。本文主要研究了冷屏氮气管路的泄漏过程, 依据气体动力学、流体力学及气体射流动力学理论, 推演出高压低温气体的泄漏质量流率公式。应用 FLUENT 建立了管路氮气泄漏模型, 提出了研究低温氮气泄漏的数值模拟方法, 计算不同压力氮气在 3 s 内的瞬态泄漏量, 得到氮气瞬态泄漏速度分布、压力曲线和温度曲线。数值模拟泄漏量与理论公式计算泄漏量的平均误差很小, 可为系统诊断氮泄漏提供依据。

关键词 管路 泄漏 质量流量 数值模拟

中图分类号: TL69; TB79 文献标识码: A doi: 10.3969/j.issn.1672-7126.2013.11.07

线圈终端盒作为国际热核聚变实验堆 (ITER) 超导馈线系统的重要组成部分, 其结构如图 1 所示, 内部包括电流引线、冷屏、低温管路和控制阀等组件。其中电流引线主要实现低温超导母线和室温电源的连接; 冷却管路及其控制阀完成对冷氮气的输送与控制, 从而实现对电流引线、冷屏等组件的冷却; 冷屏是设置在室温壳体和低温部件之间, 用来减少来自线圈终端盒高温区对低温部件的热辐射, 保证线圈终端盒内低温部件的正常工作^[1-2]。但冷屏

冷却管道在长时间工作周期内会存在泄漏隐患, 甚至会出现断裂极端情况, 造成冷屏功能丧失和线圈终端盒压力急剧升高, 进而引起超导电缆失超和容器破坏等恶劣后果。

文章针对冷屏冷却管道破裂氮气泄漏极端情况, 基于气体动力学及流体力学理论近似给出高压低温气体的泄漏公式, 并利用计算流体力学软件 FLUENT 数值模拟不同工况下氮气的泄漏过程, 对冷氮气的泄漏规律进行了探讨。

收稿日期: 2013-03-11

基金项目: 国家重点基础研究发展计划 (973 计划) 项目“我国承担国际热核聚变实验堆计划任务相关科学问题和关键技术的研究” (2008CB717906) 资助; ITER 计划专项支持 (我国承担 ITER 计划任务相关科学问题和关键技术的研究 2008GB102000)

* 联系人: Tel: 18634929180; E-mail: yanjun0310@gmail.com

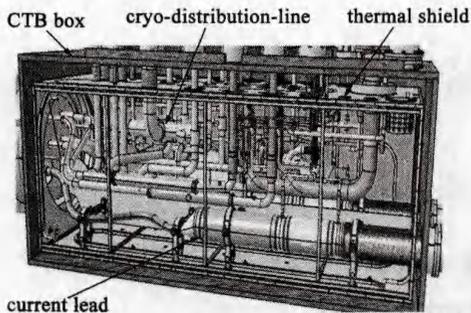


图1 线圈终端盒结构图

Fig.1 Schematics of the structure of the coil terminal box

1 数值模拟

1.1 冷屏结构

线圈终端盒的冷屏结构如图2所示,主要由冷却管路和冷屏壳体两部分组成,冷屏壳体固定在不锈钢管材焊接的骨架上,冷却管道采用外方内圆截面的管道结构(图3),蛇形串联排列于冷屏壳体上^[3],管路和冷屏壳体均选用1050铝合金材料。假设冷却管路某段发生泄漏,其管道破损情况如图3所示,在管道表面形成一条长度9 mm、宽度2 mm的贯穿裂纹。

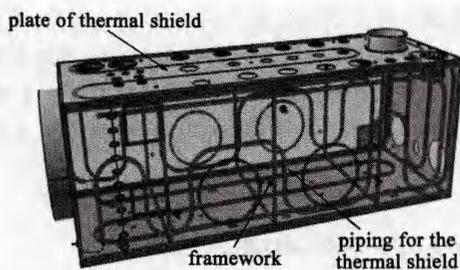


图2 冷屏结构图

Fig.2 Schematic diagram of the thermal shield

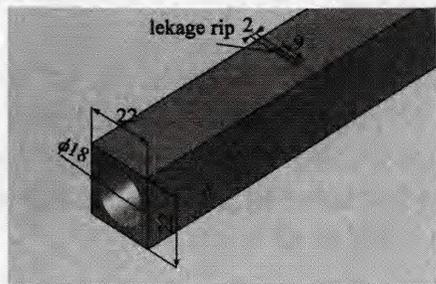


图3 冷屏管道结构及泄漏裂口

Fig.3 Cooling pipes and leak rip

1.2 数学模型

1.2.1 几何模型与网格划分

根据冷却管道破损情况对管道的泄漏模型进行简化,用2 mm × Φ6.5 mm的圆柱形喷口模拟三维管道裂缝,利用FLUENT的前处理软件建立如图4所示的几何模型:模拟区域为长3380 mm,宽1260 mm,高1260 mm的矩形空间,圆柱形喷口位于矩形空间左侧面的中心位置,圆柱外端面表示冷却管道的裂纹,即泄漏口。

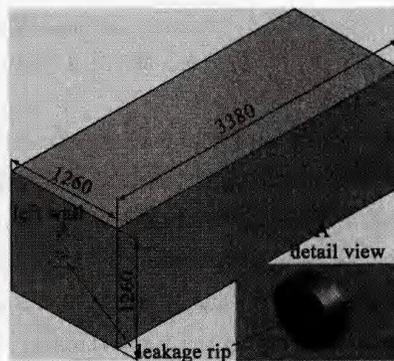


图4 几何模型

Fig.4 The mathematics model

采用非结构化四面体网格划分方法完成对几何模型的网格划分,考虑到泄漏口附近压力梯度变化极大,因此在泄漏口要保证足够的网格密度。通过多次调节网格控制因子使网格满足独立求解的条件,最终生成满足计算要求的非结构化网格,网格总数741542个。图5给出的是划分后的网格模型,并在泄漏口位置给出了局部网格加密放大视图。

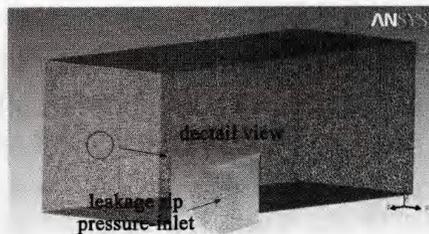


图5 网格模型

Fig.5 The mesh model

1.2.2 控制方程^[4]

冷却管道的气体泄漏过程仅涉及泄漏,没有发生物质燃烧或爆炸,采用FLUENT软件的物质传输与反应模块对氦气泄漏扩散进行模拟分析^[4]。由于

管道内外压差很大,在泄漏处形成典型的超高压欠膨胀射流过程,故模拟计算采用 Realizable $k-\epsilon$ 湍流模型,并对模型作如下假设:①计算域内气体属于理想牛顿流体,②泄漏过程中氦气流动为可压缩湍流。

1.2.3 边界条件的设定

模型泄漏口截面设定压力入口边界 (pressure-inlet): 压力 0.6 ~ 3.0 MPa, 温度 80 K, 氦气质量分数为 1; 壁面采用常温 (300 K) 边界条件, 计算域初始氦气质量分数为 0。

2 计算结果分析

2.1 理论计算^[5-7]

冷却管路发生泄漏,依据流体力学理论和实际泄漏过程,可以作出如下假设:①氦气按理想气体考虑;②氦气在管路中绝热流动;③泄漏口气体流动为等熵膨胀射流。联立气体流动能量方程、动量方程、连续性方程和气体状态方程得到常温常压气体泄漏流率方程

$$Q = Ap_1 \sqrt{\frac{2M}{RT_1} \cdot \frac{\gamma}{\gamma-1} \cdot \left[\left(\frac{p_0}{p_1} \right)^{\frac{2}{\gamma}} - \left(\frac{p_0}{p_1} \right)^{\frac{\gamma+1}{\gamma}} \right]} \quad (1)$$

式中: A 为泄漏裂口截面积; R 为气体常数; M 为气体分子质量; γ 为比热容比; p_1 为管路气体压力; p_0 为环境压力; T_1 为气体温度。

高压低温气体泄漏质量流率^[8]

$$Q_{\text{实际}} = \frac{p_2^2}{p_1^2} \cdot \frac{\eta_{300}}{\eta_T} Q \quad (2)$$

$$\frac{\eta_{300}}{\eta_T} = \left(\frac{300}{T} \right)^\alpha$$

式中: Q 为常温常压泄漏流量; α 为气体热物理常数; η 为气体粘滞系数; p_1 为大气压力; p 为管路气体实际压力; T 为气体实际温度。

2.2 数值计算

2.2.1 泄漏口流量

表 1 列出了气体温度相同压力不同条件下管路泄漏口质量流率的理论结果和数值结果,分析可知数值结果与理论结果平均误差仅 5.8%, 理论结果比数值结果结果稍小,分析其原因为理论公式假定气体泄漏是绝热等熵过程,而实际泄漏会有热传导和热对流过程。

图 6 所示为不同工况下泄漏口质量流率的增长趋势,由于管内外的压力差,在 0.2 s 内气体泄漏质量流率快速上升,1.5 s 后泄漏质量流率趋于稳定,并最终达到稳定泄漏阶段,且稳定泄漏流率的大小

随着管内压力的增大而增加,达到稳定泄漏流率的时间随着管压的上升而逐渐延长。图 7 所示的是外界环境中的氦气质量分数,泄漏发生 2 s 后,氦气基本已经充满了整个泄漏空间,故而泄漏流率随着氦气在空间的累积而逐渐稳定。

表 1 泄漏口质量流率

Tab.1 The impacts of pressure and temperature on mass flow rate with different

温度/K	80	80	80	80	80	80
压力/MPa	0.6	0.9	1.2	1.5	1.8	3.0
理论结果	0.0224	0.0336	0.0448	0.0561	0.067	0.1122
数值结果	0.0247	0.0370	0.0465	0.0594	0.0725	0.1168
误差	5.3%	9.1%	3.6%	5.5%	7.5%	3.9%

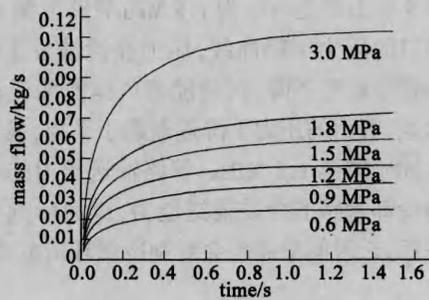


图 6 泄漏口质量流率

Fig.6 Mass flow rate from the leakage source

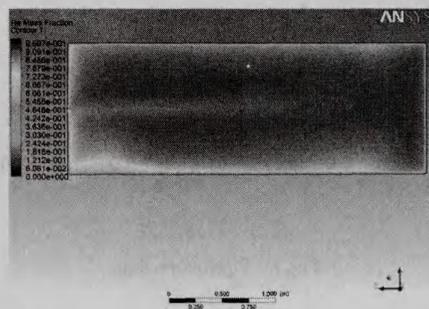


图 7 氦气质量分数

Fig.7 Helium mass fraction

2.2.2 泄漏口速度

高压管路气体在空间泄漏,实质是高速流动与快速扩散过程,主要包含超高压欠膨胀射流和强制对流扩散两部分。如图 8 所示,由于管路内外压力差满足音速射流临界条件,氦气从泄漏口高压泄漏出来,流体速度梯度大,来不及充分膨胀,因此在泄

漏口附近呈现欠膨胀射流形态,如图8所示泄漏口处的局部速度云图。氦气在强制对流扩散过程中,射流造成自身能量消耗,因此在远离泄漏口位置,气体流速较低。

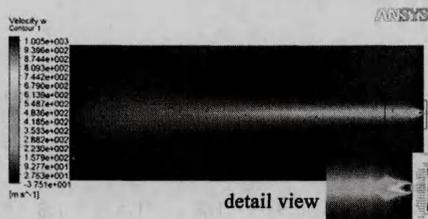


图8 速度云图

Fig.8 Spatial distribution of velocity

2.2.3 压力分析

图9给出的是内压为1.8 MPa管路泄漏3s过程中泄漏口的压力下降曲线,压力在泄漏发生1s过程中呈指数趋势下降,而后随着气体泄漏流动趋于稳定状态,管道的压力下降逐渐趋于平坦,最终压力由1.8 MPa降至1.5 MPa。管路输送压力的降低直接影响冷却管路的介质输送能力,进而影响冷屏的冷却性能,长时间泄漏也会对制冷循环造成破坏。

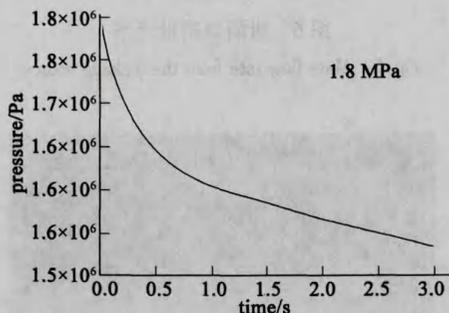


图9 管路压力

Fig.9 Pipeline pressure

高压氦气从输送管路泄漏出来急剧膨胀,短时间形成以超音速流动和气体扩散并存的气体泄漏形式。首先冷氦气以高压状态从泄漏口高速喷射进入外界环境,压力势能迅速转换为流体动能,在气体黏性和湍流横向脉动作用下,氦气在外界环境快速流动扩散和累积,致使环境压力呈图10所示增长趋势。

2.2.4 空间温度

泄漏空间温度的变化主要受泄漏口节流膨胀的

降温作用和气体流场对流换热过程影响^[9],其中强制对流换热是造成泄漏空间温度降低的主要方面,图11给出了内压1.8 MPa管路泄漏3s过程,空间内平均温度下降趋势,初期环境温度由于大量冷氦气突然泄漏而骤然降低,而后随着泄漏率逐渐稳定,降温幅度渐渐放缓。图12描述的是泄漏发生后空间的温度分布,泄漏口轴线位置的温度最低,在出现湍流和回流后温度场发生剧烈震荡和波动。

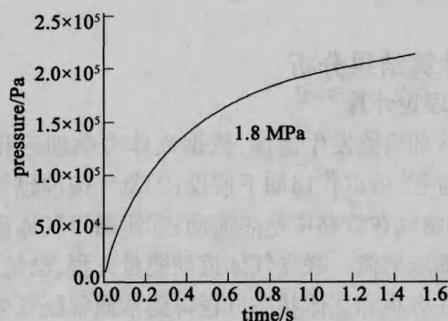


图10 体积平均压力

Fig.10 Volume average pressure

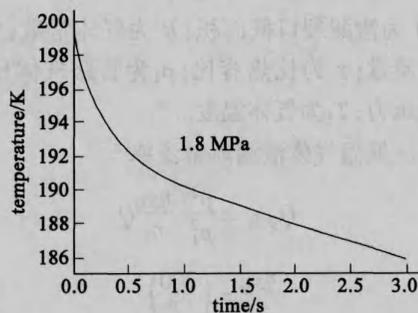


图11 空间平均温度

Fig.11 Space temperature

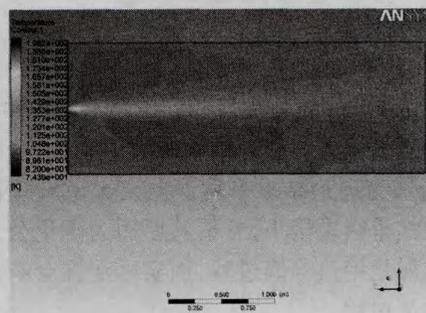


图12 空间温度云图

Fig.12 Space temperature contour

3 结论

屏和线圈终端盒的安全运行是 ITER 装置正常工作的重要保证,本文针对冷屏运行过程中可能发生的管路泄漏情况,建立数学模型对密闭空间瞬态氦气泄漏过程的泄漏量、速度、压力和温度变化规律进行研究,得到以下结论:

(1)推演出高压低温气体的泄漏质量流率公式,得到 1.8 MPa 冷屏管路的泄漏量理论结果与数值结果相对误差仅 7.5%,且气体泄漏量可作为超导馈线系统冷却管路泄漏诊断的重要参数指标之一;

(2)冷屏冷却管路破裂气体泄漏过程的高速射流引起了管道压力的急剧下降并且也会直接破坏线圈终端盒内真空环境,甚至造成线圈终端盒结构破坏,即导致低温超导线圈失超;

(3)数值模拟方法得到冷屏管路氦气泄漏扩散规律,也可以为超导馈线低温管路超临界氦泄漏分析提供参考。

参 考 文 献

- [1] 刘素梅,宋云涛,武松涛,等. ITER 馈线系统 CTB 盒冷屏热性能分析及实验研究[J]. 真空科学与技术学报, 2010, 30(1): 28 - 2
- [2] 刘素梅. ITER 装置线圈终端盒原型件冷屏传热设计分析与实验研究[D]. 合肥:中国科学院合肥分院, 2009: 26 - 28
- [3] 董 标,韩曼芬,王开松,等. ITER 极向场线圈过渡馈线冷屏的结构优化与传热耦合分析[J]. 真空科学与技术学报, 2011, 31(5): 612 - 616
- [4] 李鹏飞,徐敏义,王飞飞. 精通 CFD 工程仿真与案例实战(第一版)[M]. 北京:人民邮电出版社, 2011
- [5] Helena Montiel. Mathematical Modelling of Accidental Gas Releases. [J]. Journal of Hazardous Materials, 1998, 59: 211 - 233
- [6] Boujemaa Sami, Amielh Muriel, Chauve. Velocity and Concentration Distributions in Globally Unstable Axisymmetric Helium Jets[J]. Comptes Rendus Mechique, 2007, 335: 449 - 454
- [7] Winters W S, Evans G H, Rice S F. An Experimental and Theoretical Study of Heat and Mass Transfer During The Venting of Gas From Pressure Vessels[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2012, 55: 8 - 18
- [8] 谢 韩,王小明,廖子英. EAST 托卡马克装置冷屏的真空要求与受热分析[J]. 真空与低温, 2006, 12(3): 157 - 161
- [9] 杨 昭,彭继军,张甫仁,等. 纯制冷剂贮罐外泄动态过程分析[J]. 流体机械, 2006, 34(1): 63 - 69