

# 活塞式氢气压缩机气缸内温度变化规律研究

顾伶俐<sup>1</sup>, 姬茹一<sup>2</sup>, 尹立坤<sup>1</sup>, 蔺新星<sup>1</sup>, 叶建军<sup>3\*</sup>, 高言<sup>3</sup>, 杜宗钢<sup>3</sup>

<sup>1</sup>中国长江三峡集团有限公司科学技术研究院, 北京

<sup>2</sup>机械工业上海蓝亚石化设备检测所有限公司, 上海

<sup>3</sup>华中科技大学能源与动力工程学院, 湖北 武汉

收稿日期: 2021年10月20日; 录用日期: 2022年1月22日; 发布日期: 2022年2月7日

## 摘要

活塞式氢气压缩机是目前加氢站用压缩机发展重点, 研究其压缩过程中的温度变化规律对于活塞压缩机的设计和应用有重要意义。本文基于CFD方法, 结合动网格技术, 构建了活塞式氢气压缩机瞬态流动模型, 模拟了氢气压缩机的瞬态压缩过程, 研究了压缩过程中氢气的温度场分布以及气缸温度分布规律, 研究结果可为氢气压缩机的结构设计和材料选择提供依据。

## 关键词

氢气压缩机, 动网格, 温度分布, 流动分布, 气缸壁

# Temperature Performance in the Cylinder of the Piston Hydrogen Compressor

Linli Gu<sup>1</sup>, Ruyi Ji<sup>2</sup>, Likun Yin<sup>1</sup>, Xinxing Lin<sup>1</sup>, Jianjun Ye<sup>3\*</sup>, Yan Gao<sup>3</sup>, Zonggang Du<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Institute of Science and Technology, China Three Gorges Corporation, Beijing

<sup>2</sup>Machine Industry Shanghai Lanya Petrochemical Equipment Inspection Institute Co. Ltd., Shanghai

<sup>3</sup>School of Power and Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan Hubei

Received: Oct. 20<sup>th</sup>, 2021; accepted: Jan. 22<sup>nd</sup>, 2022; published: Feb. 7<sup>th</sup>, 2022

## Abstract

Piston hydrogen compressors are currently the focus of the development of compressors in hydrogen refueling stations. Understanding the temperature performance in the cylinder is important to the safety application and the design for the hydrogen compressors. Based on the CFD me-

\*通讯作者。

thod and dynamic grid technology, this paper proposed a transient flow model of a piston hydrogen compressor. The transient compression process of the hydrogen compressor is studied, and the temperature distributions of the hydrogen gas and the cylinder wall are studied. The results are benefit for the structure and the material design of the hydrogen compressor.

## Keywords

Hydrogen Compressors, Dynamic Grid, Temperature Distributions, Flow Field, Cylinder Wall

Copyright © 2022 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

当今世界环境问题日趋严重,同时能源也出现了短缺危机,氢能作为一种清洁、高效、可持续的能源,被视为21世纪最具发展潜力的清洁能源之一[1]。为了促进氢能的发展,氢能相关基础设施尤其是加氢站的建设目前进展迅速,截止2020年底国内建有加氢站128个,计划到2025年加氢站数量超过600座[2]。氢气压缩机作为加氢站的核心设备,其投资占到加氢站的整体投资30%以上[3]。因此开展高压氢气压缩机相关研究,对于提升我国氢能装备水平,加强加氢站核心装备自主化,降低加氢站的建设成本都具有重要意义[4]。

目前国内应用较多的氢气压缩机主要有隔膜式压缩机和活塞式压缩机两种[5],目前加氢站主要使用的多为隔膜式氢气压缩机,但是其排气量较小[6],越来越不适应加氢站供氢规模日趋增大的需求。活塞式氢气压缩机排气压力高,而且可以适用大排气量的供氢需求,是氢气压缩机未来发展方向。对活塞式压缩机而言,气缸是进行高压气体压缩的主要部件之一,气缸内气体的流动特性和温度特征影响压缩机性能表现。其中,压缩介质的温度是关键参数,若温度过高,不仅会造成缸壁温度过高、进气量不足等现象,还会使润滑失效,增加压缩机的功耗[7]。因此,研究活塞式氢气压缩机气缸内流动过程,掌握压缩过程中的温度分布规律,对氢气压缩机的优化设计和安全使用具有重要意义。本文以活塞式氢气压缩机为研究对象,基于CFD方法及动网格技术,构建活塞式氢气压缩机瞬态流动模型,并对氢气压缩机的瞬态压缩过程进行了模拟,研究了气缸内温度分布及变化规律。

## 2. 活塞式压缩机流场控制方程

任何流体的流动都要受到守恒定律的约束,其中质量守恒定律、动量守恒定律和能量守恒定律是计算流体力学中的三大基本守恒定律,通常用控制方程进行描述。

### 1) 质量守恒方程

质量守恒方程的实质就是连续性方程,是任何流动问题都要满足的条件,其数学描述为:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U) = 0 \quad (1)$$

### 2) 动量守恒方程

动量守恒方程实际就是牛顿第二定律对流体的应用,其数学描述为:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} + \rho g_i + F_i \quad (2)$$

其中  $p$  表示静压力,  $\tau_{ij}$  表示应力张量;  $g_i$  表示  $i$  方向上的重力体积力,  $F_i$  为  $i$  方向上的外部体积力。

### 3) 能量守恒方程

能量守恒方程是存在热量交换的问题必须满足的条件, 其实质就是热力学第一定律, 其数学描述为:

$$\frac{\partial(\rho T)}{\partial t} + \text{div}(\rho u T) = \text{div}\left(\frac{k}{c_p} \text{grad} T\right) + S_T \quad (3)$$

其中  $c_p$  为流体的比热容;  $T$  流体温度;  $S_T$  表示粘性耗散项。

## 3. 活塞式压缩机气缸三维 CFD 模型

### 3.1. 三维模型和网格划分

本文研究对象是活塞式氢压缩机, 并据此建立气缸的三维模型, 考虑到研究内容为压缩阶段气缸内温度场, 因此对瞬态压缩模型进行简化: 只考虑气缸盖、气缸壁等部件, 不考虑阀门等其他部件。而对于活塞只需要将一个面定义为活塞端面能够达到设置动网格的目的即可。本文根据实际情况需要建立的气缸三维模型如图 1 所示, 此气缸的三维模型主要分为两部分, 第一部分为圆柱体流体域, 表示气缸内的压缩介质; 第二部分为带端盖的圆环柱体, 表示气缸壁和端盖。基于结构化网格划分方法对两部分模型分别进行网格划分, 最后进行装配得到完整的气缸模型网格, 如图 2 所示。

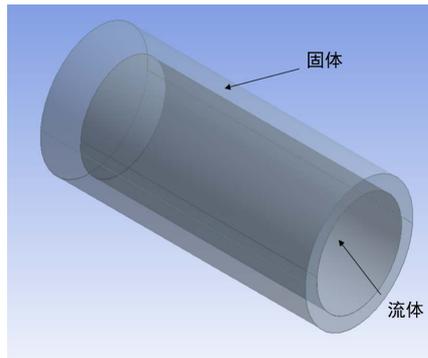


Figure 1. 3D model of the compressor cylinder

图 1. 气缸三维模型图

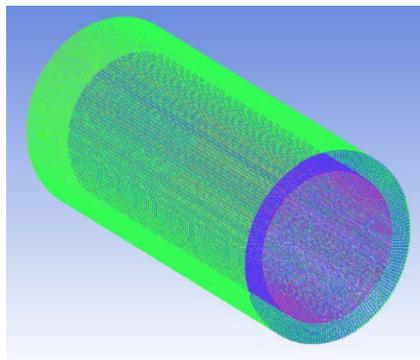


Figure 2. Mesh model of the cylinder

图 2. 气缸模型网格示意图

### 3.2. 湍流模型和边界条件设定

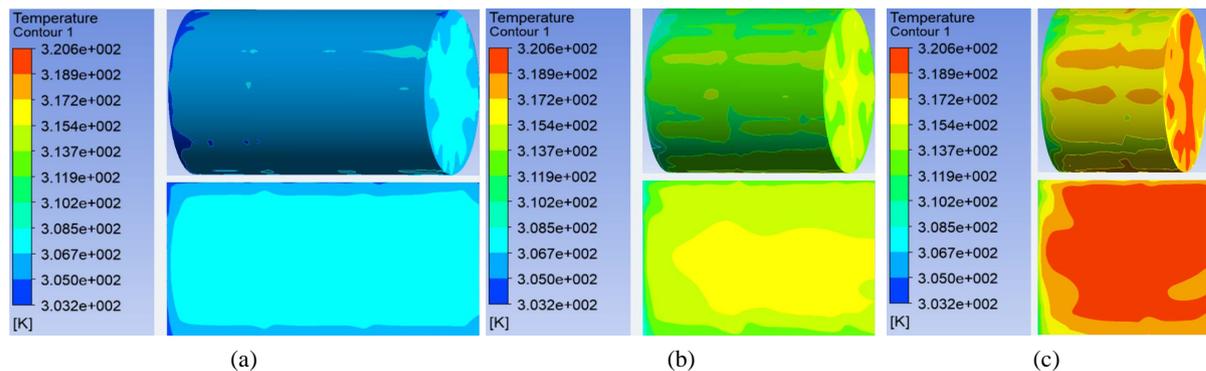
本文 CFD 湍流模型选用适用范围广且能兼顾精度和效率的  $k-\varepsilon$  模型，考虑到模拟过程中存在传热，且缸内流体流动的速度很慢，因此选择 RNG  $k-\varepsilon$  模型。一方面能够很好的计算传热，另一方面相比于标准  $k-\varepsilon$  模型，RNG  $k-\varepsilon$  模型对于低速流动的处理拥有更高的可信性和精度。模拟过程中涉及到气缸内流体和缸壁的传热，故将流体与固体接触的两对平面进行耦合传热设置。

### 3.3. 动网格模型

Fluent 中的动网格技术是为了适应计算区域发生变化而发明出来的一种网格技术。其原理是通过增大、减小网格的尺寸或者增多、减少网格的数量来适应计算区域的改变。本文经过综合考虑，选择铺层法实现网格更新。同时，通过编写 UDF 函数实现对运动的控制。由于往复式活塞式氢气压缩机多为液驱式，往复频率较慢，本模型中活塞的运动视为匀速直线运动。

## 4. 压缩过程中气缸瞬态温度场分布规律及分析

本文研究的压缩机工作条件为吸气压力 10 MPa，吸气温度为 20℃，活塞速度为 0.12 m/s。为清楚观察压缩过程气缸内温度场的变化，选取活塞位移分别为 80 mm、160 mm 和 228 mm (压缩阶段结束) 时的缸内温度场云图。其中三维云图和轴向截面温度云图如图 3 所示。



**Figure 3.** Temperature distribution of the hydrogen gas at different position. (a) 80 mm; (b) 160 mm; (c) The end of the compression

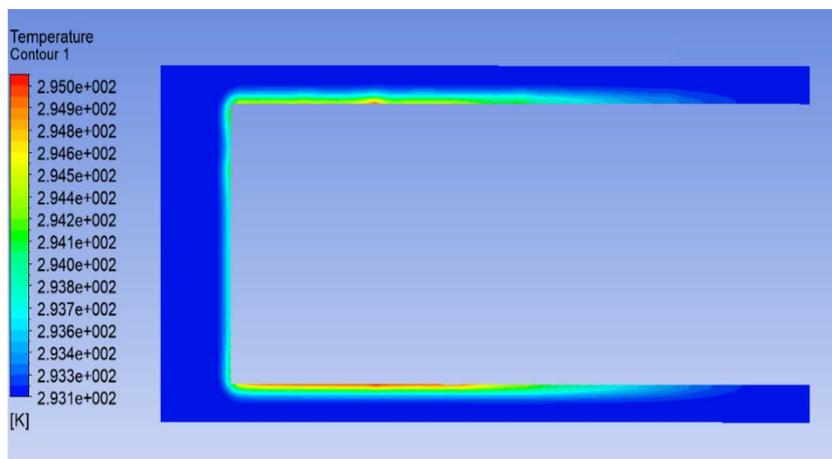
**图 3.** 不同压缩位置点处缸内氢气温度的云图。(a) 80 mm; (b) 160 mm; (c) 压缩阶段结束时

结合三维、二维温度云图分布可以看出，随着压缩过程的进行，气缸内氢气的温度逐渐上升，压缩阶段结束时气缸内大部分气体的温度达到 320 K 左右。由于氢气与气缸内壁和端盖存在传热，因此内部的氢气温度较高，外部的氢气温度较低。由于压缩阶段气缸是封闭，活塞运动的过程中氢气可能产生涡旋，因此靠近活塞端面的位置温度分布会出现局部不规律，例如图 3(c) 右下方向出现局部温度低于周围温度。

研究结果还显示与端盖接触的氢气的温度比与内壁接触的氢气温度要更低，分析原因如下：压缩过程中与内壁接触的氢气和内壁存在一定的摩擦，因此温度相对更高一些；除此之外，此模型中将活塞端面定义为绝热，因此温度场的分布应以活塞端面为起始向外发散温度逐渐降低，与端盖内壁接触的氢气和活塞端面的距离最远，因此温度更低一些。

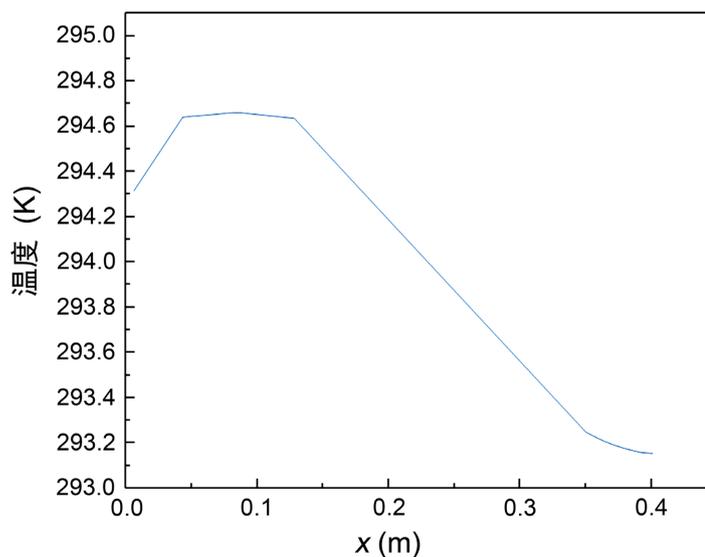
图 4 为气缸壁的温度分布云图，结果表明气缸内壁的温度较缸盖的温度更高，除了内壁与氢气温差较大这个原因之外，两部分的传热条件也不一样。但是压缩阶段结束时气缸总体的升温是比较小的，气缸壁面温度也明显低于气缸内氢气温度。分析原因如下：压缩阶段比较短暂，因此氢气与气缸壁的换热

量相对较小, 故导致气缸壁温升较小。同时, 气缸壁较厚, 体积大且储热量大, 因此有限体积的氢气传给气缸壁的热量仅能使气缸壁上升很小的温度。



**Figure 4.** Temperature distribution of the cylinder wall at the end of the compression  
**图 4.** 压缩阶段结束气缸壁温度分布云图

对气缸壁的温度分布情况进行定量分析, 取距离气缸内壁 2 mm 且平行于轴线方向的直线上点的温度数据, 绘制出温度沿程分布折线图, 所得到的温度沿程分布折线图如图 5 所示。结果显示, 随着  $x$  值的逐渐增大, 气缸壁温度先增大后逐渐减小。说明压缩过程中压缩机气缸壁近端盖处温度相对较高, 远离端盖处温度相对较低, 其最大温度区域位于端盖附近。



**Figure 5.** Temperature distribution along the x-axis of the cylinder  
**图 5.** 气缸壁温度沿程分布曲线图

本研究为压缩机的材料选择提供了一定的参考, 气缸壁的材料应在满足氢脆的前提下, 尽量选择热导率较高的材料。热导率较高时, 壁面内部的温度趋于均匀化的速度更快, 热量能够尽快传递到外壁面进而被冷却水带走, 使得压缩机工作达到稳态时, 壁面的温度不会很高, 对压缩机气缸材料的耐热性要求也会降低。

## 5. 总结

本文利用 CFD 技术对往复式氢气压缩机的压缩过程进行模拟,研究了压缩阶段不同时刻气缸内温度场的分布规律,得到以下结论:

- 1) 在压缩机进行压缩的过程中,气缸内氢气的温度逐渐上升,而且氢气与气缸壁的传热对氢气温度的影响明显。外部的氢气温度较低,与端盖接触区域的氢气的温度比与内壁接触的氢气温度更低。
- 2) 压缩阶段结束时气缸壁面温度明显低于气缸内氢气温度,气缸壁近端盖处温度相对较高,远离端盖处温度相对较低,其最大温度区域位于端盖附近。

## 参考文献

- [1] 吴善略,张丽娟. 世界主要国家氢能发展规划综述[J]. 科技中国, 2019(7): 91-97.
- [2] 程一步,王晓明,李杨楠,孟宪玲. 中国氢能产业 2020 年发展综述及未来展望[J]. 当代石油石化, 2021, 29(4): 10-17.
- [3] 殷伊琳. 我国加氢站发展现状及未来展望[J]. 天津化工,2021, 35(2): 3-5.
- [4] 郝加封,张志宇,朱旺,王峰,高沛. 加氢站用氢气压缩机研发现状与思考[J]. 中国新技术新产品, 2020(11): 22-24.
- [5] 李学斌,杨振东. 高压氢气充装设计中的注意事项[J]. 氯碱工业, 2015, 51(11): 38-39.
- [6] Li, J.Y., Jia, X.H., Wu, Z.M., *et al.* (2014) The Cavity Profile of a Diaphragm Compressor for a Hydrogen Refueling Station. *International Journal of Hydrogen Energy*, **39**, 3926-3935.  
<https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2013.12.152>
- [7] 李倩文. 基于 CFD 的往复式压缩机气缸流场分析[D]: [硕士学位论文]. 大连: 大连交通大学, 2017.