

DOI: 10.16076/j.cnki.cjhd.2016.06.011

机坪管网输送低温介质时流固耦合分析*

刘硕¹, 刘小川², 邵伟光³, 刘天民³, 张健¹, 许晶禹¹

(1. 中国科学院力学研究所, 北京 100190, Email: xujingyu@imech.ac.cn;

2. 中国航空油料有限责任公司, 北京 100088;

3. 总后勤部油料研究所, 北京 110000)

摘要: 机坪输油管道埋在停机坪下方, 是飞机航空燃油的主要供给渠道, 对安全要求较高。高寒地区, 部分机坪管道会出现泄漏状况, 对机场安全运营造成了威胁, 需要引起较高的重视。该文借助 ANSYS 有限元软件, 分别建立了带有法兰连接的 Z 形补偿管道和直管管道模型。通过流固耦合分析, 对两组管道的力学性能进行了对比分析, 探讨了介质流动、温度变化等对管道受力的影响。研究表明: 直管管道在温度变化的条件下, 法兰连接处易出现较大的拉伸和弯曲应力, 是低温管道泄漏的危险点。增加 Z 形补偿对长管道流动影响不大, 但可降低管道因内部流体和内外温差产生的轴向收缩量, 有利于保护管道上法兰的密封性能。法兰的密封性能与螺栓预紧力有着很大关系。最后, 通过与现场测试结果进行对比分析, 验证了数值模拟的准确性。

关键词: 输油管道; 低温介质; 流固耦合; 泄漏

中图分类号: TE832

文献标识码: A

Fluid-structural coupling analysis for apron pipeline system transmitting cryogenic fluids

LIU Shuo¹, LIU Xiao-chuan², SHAO Wei-guang³,
LIU Tian-min³, ZHANG Jian¹, XU Jing-yu¹

(1. Institute of Mechanics, Chinese Academy of Science, Beijing 100190, P.R. China;

2. China Aviation Oil Holding Company, Beijing 100088, P.R. China;

3. Oil Research Institute of the General Logistics Department, Beijing 110000, P.R. China)

Abstract: Pipes used in airports are located under aprons. It has significant safety requirements as main fueling method for airplanes. Part of the pipeline systems may leak sometimes in areas with chilly atmosphere, and brings tremendous safety threats. In this paper, pipe with and without Z compensation were built by ANSYS. Mechanical properties for two kinds of pipe above

* **收稿日期:** 2015-07-25(2016-11-02 **修改稿**)

作者简介: 刘硕(1988 -), 男, 河北廊坊人, 博士研究生

通信作者: 许晶禹, Email: xujingyu@imech.ac.cn

Received: July 25, 2015 (**Revised** November 02, 2016)

Biography: LIU Shuo (1988-), Male, Ph. D. Candidate, Engineer.

Corresponding author: XU Jing-yu, Email: xujingyu@imech.ac.cn

were compared to discuss impact of fluid flow, temperature variation on pipes through fluid-structural coupled analysis. Results show that, flange connection part is the dangerous point for cryogenic pipeline leakage, where large stretching and bending stress come out under temperature variation. Z compensation has limited influence on long pipe fluid, while can diminish axial shrinkage under impact of inner fluid and temperature difference, which is beneficial for flange sealing. Bolt pretention load has impact on flange sealing. At last, field tests are carried out and compared with numerical analysis result, which further validate method of numerical simulation.

Key words: petroleum pipeline; cryogenic mediate; fluid-structural couple; leakage

引言

输油管道泄漏是石油化工领域中的常见问题,管道泄漏形式一般包括连接部位泄漏、冲刷泄漏和填料部位泄漏等^[1]。对于高寒地区机坪输油管道,在探讨其泄漏机理时,需要考虑管路结构的特点:管道埋设在停机坪下方,管路上布置有垂直穿过填埋土层和机坪混凝土道面为飞机提供航空煤油的加油栓井,是一个多点锚固结构;大流量供油时,埋地管网中的航煤会短时间内被低温介质置换,导致管道与流体之间的耦合作用加剧,使管网产生更大应力;此外,高寒地区机坪输油管网的输送介质温度常常在 -10°C 以下,管道热胀冷缩在轴线方向上的变形会逐渐累积到法兰等结构不连续处,作为力学节点^[2],法兰是管道泄漏较为危险的部分。因此,高寒地区机坪管道泄漏的机理非常复杂,与温度变化、流体介质及管道结构等多种因素有关。本文将考虑温度场影响,对高寒地区低温管道进行流固耦合分析,并结合现场测试,探讨高寒地区低温管道泄漏的机理。

1 计算模型及耦合方法

1.1 数值模拟模型

Z形补偿是埋地管道中的一种常见温度补偿结构。本文建立了两个包含法兰的长管道模型—含Z形补偿的管道模型和长直管道模型,如图1所示。管道的整体规格如下:长度48 m,管径377 mm,壁厚9 mm,法兰和螺栓规格根据相关规范选取;Z形补偿段长度4 m。

边界条件:管道两侧施加固支约束,定义外界环境温度为 0°C ,管内流体温度为 -20°C 。管内流体入口速度为1.83 m/s,出口压力为 $3\times 10^5\text{ N/m}^2$ 。法兰单个螺栓预紧力为146.7 kN。

介质及材料属性:标况下,管内煤油的密度是 780 kg/m^3 ,导热率是 $0.149\text{ W/m}\cdot\text{K}$,粘度 $0.0024\text{ mPa}\cdot\text{s}$;管道材料为20号钢,杨氏模量 $2.06\times 10^{11}\text{ Pa}$,屈服强度245 MPa;垫片为铜质材料;螺

栓为高强度螺栓,屈服强度为640 MPa。

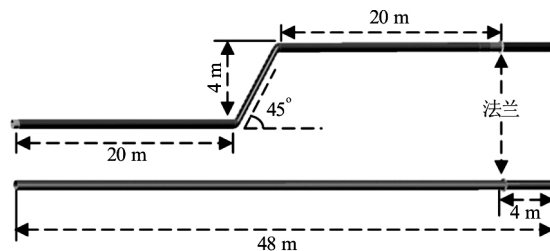


图1 管道模型
Fig.1 Model for pipes

1.2 控制方程及湍流模型选择

本文涉及的数值模拟工作在 ANSYS workbench 平台完成,可将仿真过程结合在一起^[3]。根据操作工况,流体计算的控制方程选用雷诺平均输运方程^[4]:

连续性方程

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) = 0 \quad (1)$$

动量方程

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial u_l}{\partial x_l} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial x_j}(-\rho \overline{u'_i u'_j}) \quad (2)$$

式中: u_i 、 u_j 为速度平均值, u'_i 、 u'_j 为速度脉动值。

工程计算中广泛采用基于雷诺平均的 $k-\varepsilon$ 双方程模型^[5,6]。对管内湍流流动,流动中包含湍流核心区 and 壁面区:核心区 Re 数较高;壁面区 Re 数很低,尺度相对核心区小。 $k-\varepsilon$ 模型只适用于 Re 数较高的情况,因此在壁面区选用低 Re 数 $k-\varepsilon$ 模型。为体现分子黏性力的影响,需划分足够密的网格^[7],在模型中表现为液体外壁增加膨胀层。标准双方程 $k-\varepsilon$ 模型^[8]如式(3)和式(4)所示:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M + S_k \quad (3)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} + S_\varepsilon \quad (4)$$

式中: G_k 为由层流速度梯度产生的湍流动能, G_b 为由浮力产生的湍流动能, Y_M 为可压缩流中过渡的扩散产生的波动, C_1 、 C_2 和 C_3 为常量, σ_k 和 σ_ε 为 k 方程和 ε 方程的湍流 Prandtl 数。

1.3 边界条件

内流场计算涉及到的边界条件包括速度入口边界条件、压力出口边界条件和壁面边界条件。在流体与固体的交界面处, 对于黏性流体, 流体将粘附于固体表面(无滑移), 即 $v|_F = v|_S$ 。

当在壁面处应用固定温度条件, 从流体单元到壁面单元的热传导, 由式(5)计算

$$q'' = h_f (T_w - T_f) + q''_{\text{rad}} \quad (5)$$

式中: h_f 为流体边界当地热传导系数, T_w 为壁面表面温度, T_f 为当地流体温度, q'' 为壁面处传来的对流热流量, q''_{rad} 为辐射热流量。

1.4 流固耦合原理

基于流场计算结果, 将流体载荷施加于结构上, 在流固交界面上满足运动学连续性条件、动力连续性条件和能量守恒条件, 实现流固耦合^[9]。流固耦合方法一般分两种: 单向流固耦合和双向流固耦合。当流体作用到固体上引起固体变形很小, 且变形后的固体对流场的影响很小时, 采用单向流固耦合方法。当流体载荷对结构影响较大, 并且固体变形后对流场影响也较大时, 需考虑双向流固耦

合。本文涉及到的机坪输油管道, 由于其埋深于土壤中, 内流影响属于次要因素, 因此采用单向流固耦合^[10]。

2 计算结果及讨论

2.1 内流场分析

通过 fluent 模块, 采用标准 $k-\varepsilon$ 双方程湍流模型, 对管道内流场进行分析。得到 Z 形补偿管道和

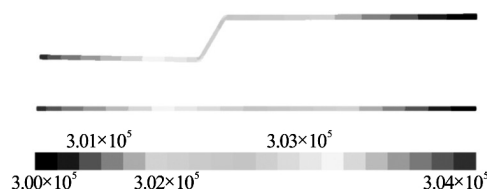
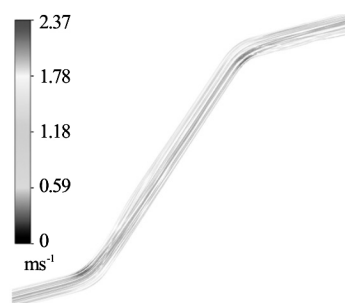
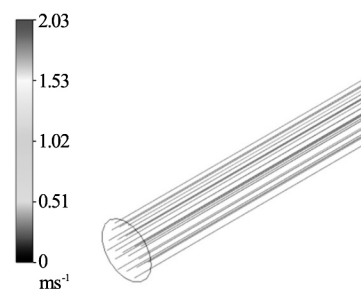


图2 管内流体压力场分布
Fig.2 Distribution of fluid pressure in the pipe



(a) Z型补偿管道



(b) 直管

图3 管内流线分布

Fig.3 Streamline distribution in the pipe

表1 两个管道流场力计算对比
Table 1. Fluid force comparison for two pipes

	Z形补偿管道			直管道		
	压力/N	黏性力/N	总合/N	压力/N	黏性力/N	总合/N
x	19.31	-17.32	1.98	0.07	-0.14	-0.07
y	0.21	0.01	0.21	-1.02	-0.23	-1.25
z	-61.10	-258.51	-319.63	-70.90	-271.99	-342.88

长直管道的流场压力分布,如图2所示。两个管道沿程压降均为 400 N/m^2 左右,远小于出口的绝对压力。Z形补偿管道的两个弯头内侧的流体压强均小于外侧的流体压强。尽管Z形补偿局部的压力场分布和对应位置的直管略有不同,但两个管道整体压力场分布相同。

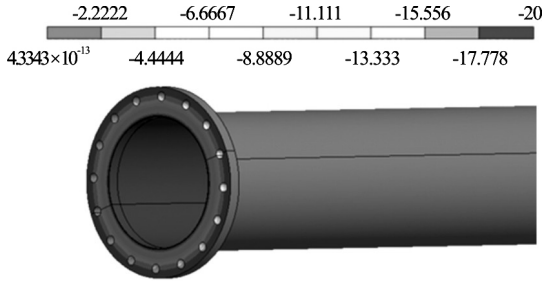


图4 管道温度场分布
Fig.4 Thermal distribution for pipe

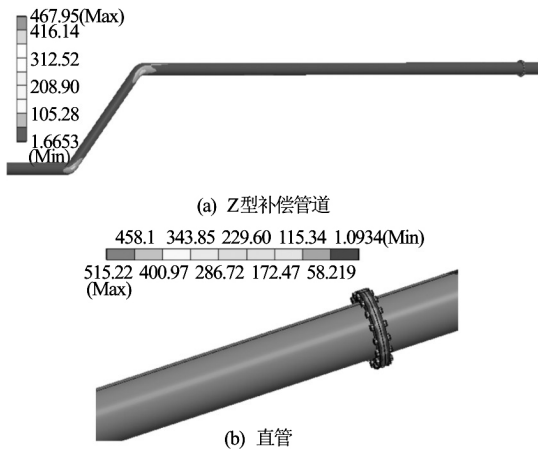


图5 耦合后管道应力分布
Fig.5 Stress distribution for pipe after coupling



图6 Z形补偿管道变形图
Fig.6 Deformation figure for pipe with Z compensation

图3是两个管道的流线图。对于Z形补偿管道,弯头内侧流体速度最大 (2.37 m/s),弯头外侧流体速度较小 (1.2 m/s),大部分流体流速接近入口平均流速;对于直管道,管道流速分布较Z形补偿管道均匀,最大流速 2.03 m/s 。对比两个管道的流场力,表1中可以看出:两个管道的合力均沿轴线方向,且两组管道的压力和黏性力各自接近,合力在 330 N 左右,其它方向上两组管道的合力较小,Z

形补偿管道在 x 方向出现了较大的值。因为Z形补偿位于 $x-z$ 平面,流体通过Z形补偿在 x 方向上产生位移,形成 x 方向 17.32 N 的阻力,Z形补偿引发的压力场对流体产生了 19.31 N 沿 x 轴正向的力,矢量叠加,得到合力为 1.98 N 。从以上分析中可以看出,Z形补偿对管道整体流场影响不大。

2.2 流固耦合分析

流固耦合分析中,将内流场分析的结果导入热分析模块中进行温度场分析,提取温度载荷,连同流体载荷导入结构分析模块中进行耦合计算。图4是管道的温度场分布,两个管道法兰附近的温度分布形式相同。对比两个管道的应力分布,如图5所示,发现两个管道的最大应力都出现在螺栓上,Z形补偿管道的最大应力是 467 MPa ,直管道的最大应力为 515 MPa ,直管道偏于危险。螺栓主要受轴向拉伸作用,对比两个管道的螺栓应力分布状况,直管道的螺栓承受的拉伸作用更大。

针对两个管道的轴向约束力,Z形补偿管道的轴向约束力是 48.2 kN ,直管道的轴向约束力是 803.0 kN ,差异显著。结合管道在流场和温度场共同作用下的变形图(图6)进行分析,发现Z形补偿可以通过自身柔性对管道轴向伸缩进行补偿,降低管道在两端约束状况下因轴向变形产生的约束力,利于法兰密封性能的保持,因此直管道中缺乏温度补偿构件是导致低温管道泄漏的一个重要原因。

2.3 法兰局部受力分析

低温管道泄漏一般出现在法兰位置,结合前文分析,本节在外界环境和管内流体温差 10°C 条件

下对法兰局部受力情况进行了数值模拟。图7为法兰有限元模型及法兰应力分布。对拉弯组合工况下的法兰,最大应力出现在螺栓上 (439 MPa)。法兰和螺母接触的位置应力较高,但数值远低于螺栓。图8为三种拉弯组合工况 (50 Mpa 拉应力+ 20 Mpa 弯曲应力; 35 Mpa 拉应力+ 35 Mpa 弯曲应力; 20 Mpa 拉应力+ 50 Mpa 弯曲应力)下法兰的最大应

力和垫片位移随螺栓预紧力的变化情况。通过分析可以发现, 相同外载荷的法兰, 螺栓预紧力越小, 垫片位移越大, 法兰连续性越差, 容易在法兰和垫片接触的位置产生缝隙, 导致泄漏。为保证法兰密封性能, 需要有足够的螺栓预紧力。

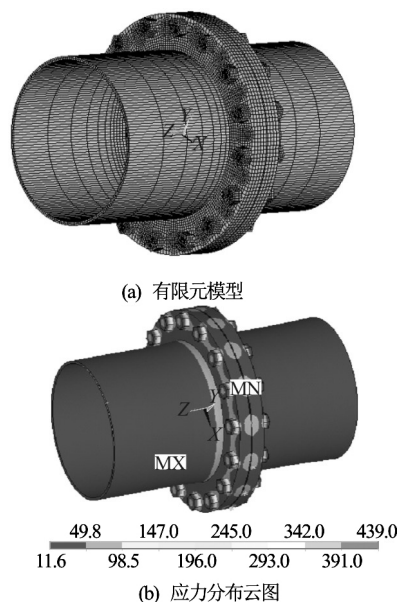


图7 法兰有限元模型及法兰折算应力分布云图

Fig.7 FEM model for flange and stress distribution for flange

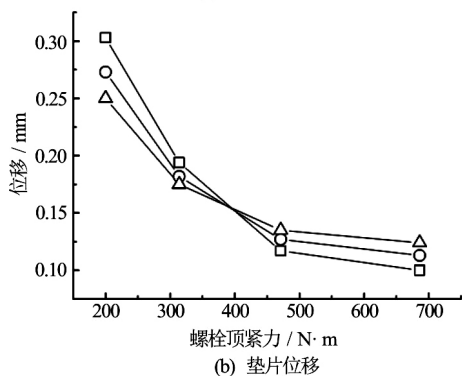
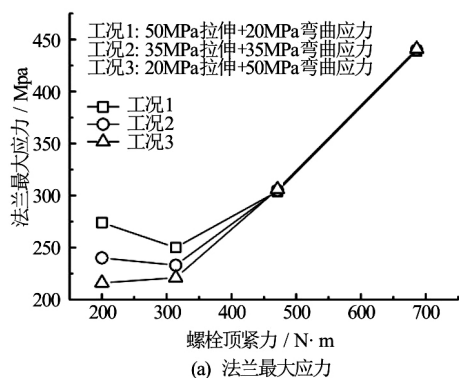


图8 螺栓紧固力矩对法兰最大应力和垫片位移的影响

Fig.8 Effects for bolt pretention torque on maximum stress of flange and displacement of gaskets

2.4 现场实验对比

为了验证数值模拟的准确性, 对乌鲁木齐机场冬季输送航煤时的机坪地下管道进行了现场测试。图9为现场测试的流量变化和法兰两侧相对变形, 变形最高点对应的管道内平均流速为 1.34 m/s。由图中可以看出, 当管道内流体开始通过法兰时, 法兰两侧相对变形突然增加, 增量在 2–18 μm 之间。在相同操作工况下对长直管道模型进行流固耦合分析, 计算得到法兰在通过流体后, 相对变形增加了 24 μm , 和现场测试的结果较为相符。通过现场测试和数值模拟, 发现流固耦合作用下法兰受拉伸作用, 这种拉伸作用来源于内部流体对管路的冲刷作用, 以及温度变化导致的管道收缩, 容易导致法兰处泄漏。

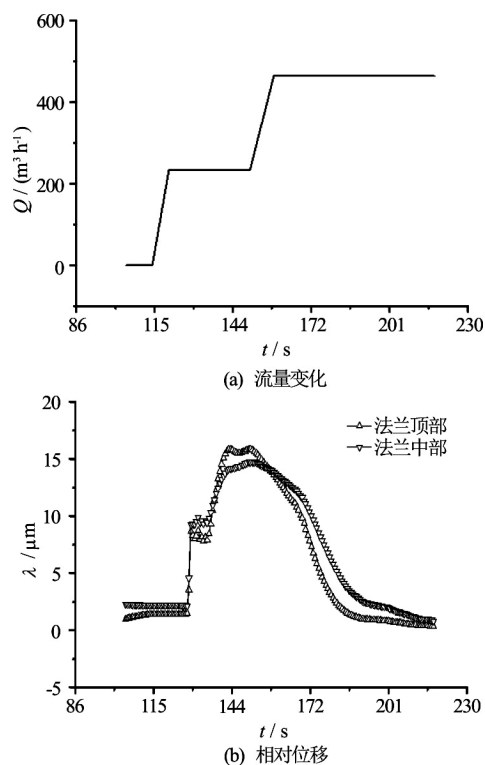


图9 现场实验测试

Fig.9 Experimental measurements

3 结论

本文针对机坪管网输送低温介质时管道法兰处泄漏问题进行了研究, 对含有法兰的Z形补偿管道和直管道进行了考虑温度场的流固耦合分析, 对比了两种管道的内流场分布、结构应力分布和轴向约束力大小。通过研究得出, 增加 45° Z形补偿对

长管道流动影响不大,但可降低管道因内部流体和外部环境温差产生的轴向收缩量,有利于保护法兰的密封性能,因此缺乏自然补偿是导致低温管道在法兰连接处泄漏的主要原因之一。同时,通过法兰局部数值模拟,发现螺栓预紧力不足也可能导致低温管道泄漏。最后,将数值模拟结果和现场测试结果进行了对比,验证了数值模拟的准确性。

参 考 文 献:

- [1] 魏秋林,李祥,藏玉霞.天然气管道泄漏问题分析及处理技术[J].化学管理,2013,16(8):134.
WEI Qiu-lin, LI Xiang, ZANG Yu-xia. Analysis and treatment technology of natural gas pipeline leakage[J]. Chemical Management, 2013, 16(8): 134.
- [2] NAYYAR M. Piping handbook[M]. McGraw-Hill Professional. USA, 2000.
- [3] 蒲广益. ANSYS Workbench 12 基础教程与实例详解[M]. 北京, 中国: 中国水利水电出版社, 2010.
PU Guang-yi. ANSYS Workbench 12 basic guide and example explanation[M]. Beijing, China: China Water Resources and Hydropower Publishing House, 2010.
- [4] 赵文超,万德成.海上浮式风力机叶片气动性能的数值模拟[J].水动力学研究与进展, A 辑, 2014, 29(6): 663-669.
ZHAO Wen-chao, WAN De-cheng. Numerical simulation of aerodynamic characteristics of floating offshore wind turbine blades[J]. Chinese Journal of Hydrodynamics, 2014, 29(6): 663-669.
- [5] 朱广圣,张月林.低雷诺数非线性 $k-\varepsilon$ 湍流模型及其应用[J].水动力学研究与进展, A 辑, 1997, 12(4): 401-406.
ZHU Guang-sheng, ZHANG Yue-lin. A new low-Reynolds-number nonlinear $k-\varepsilon$ model and its application[J]. Chinese Journal of Hydrodynamics, 1997, 12(4): 401-406.
- [6] 方平治,顾明,谈建国.计算风工程中基于 $k-\varepsilon$ 系列湍流模型的数值风场[J].水动力学研究与进展, A 辑, 2010, 25(4): 475-483.
FANG Ping-zhi, GU Ming, TAN Jian-guo. Numerical wind fields based on the $k-\varepsilon$ turbulent models in computational wind engineering[J]. Chinese Journal of Hydrodynamics, 2010, 25(4): 475-483.
- [7] 陈锐强.核电站管道流固耦合应力分析[D].大连,中国:大连理工大学,2012.
CHEN Rui-qiang. Stress analysis of pipeline in nuclear power plant with fluid-structure interaction method[D]. Dalian, China: Dalian University of Technology, 2012.
- [8] 江帆,黄鹏. Fluent 高级应用与实例分析[M]. 北京, 中国: 清华大学出版社, 2008.
JIANG Fan, HUANG Peng. Fluent advanced application and case analysis[M]. Beijing, China: Tsinghua University Press, 2008.
- [9] 李春,叶舟,高伟,等.现代大型风力机设计原理[M]. 上海, 中国: 上海科学技术出版社, 2013.
LI Chun, YE Zhou, GAO Wei, et al. Modern large-scale wind turbine design principle[M]. Shanghai, China: Shanghai Scientific and Technical Publishers, 2013.
- [10] 解元玉.基于 ANSYS Workbench 的流固耦合计算研究及工程应用[D].太原,中国:太原理工大学,2011.
XIE Yuan-yu. Fsi calculation of research based on ANSYS Workbench and engineering applications[D]. Taiyuan, China: Taiyuan University of Technology, 2011.