

# 整体式 Y 型采气井口装置冲蚀规律及量化计算

艾志久<sup>1</sup>, 孟璋劼<sup>1</sup>, 柴希伟<sup>1</sup>, 柴希军<sup>1,2</sup>, 陈鹏<sup>1</sup>

1. 西南石油大学机电工程学院, 成都 610500
2. 中国石油大港油田石油工程研究院, 天津 300280

**摘要** 国内某油田在应用氮气欠平衡钻井技术以及钻油管技术过程中, 采用钻油管完井一体化井口装置。由于钻完井过程中气体流量大, 高速携岩气流容易造成完井井口装置的冲蚀磨损, 导致井口装置的承压能力下降, 造成井控风险增大, 极易诱发工程安全事故。本文结合冲蚀磨损仿真与缺陷量化计算, 定性、定量地探索整体式 Y 型采油树井口携岩气体流动特性及缺陷深度随时间的变化关系, 计算得出不同采油树的安全生产时间, 为整体式 Y 型采油树在高压高产气井的安全使用提供了理论依据。研究表明: 同等工况条件下, 冲蚀深度随采气量的增大而增大, 随井口压力的增加而减小。

**关键词** 钻油管完井一体化; 气固两相流; 整体式 Y 型采油树; 冲蚀磨损; 量化计算

**中图分类号** TE931

**文献标志码** A

**doi** 10.3981/j.issn.1000-7857.2015.11.009

## Erosion characteristics and quantitative calculation of Y-type gas production wellhead

AI Zhijiu<sup>1</sup>, MENG Zhangjie<sup>1</sup>, CHAI Xiwei<sup>1</sup>, CHAI Xijun<sup>1,2</sup>, CHEN Peng<sup>1</sup>

1. School of Mechatronic Engineering, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China
2. Engineering Institute of Dagang Oilfield, PetroChina, Tianjin 300280, China

**Abstract** In an application of nitrogen unbalanced drilling technology and coiled tubing technology to one domestic oil field, integrated wellhead of drilling and well completion was adopted. Because of the large gas flow in the process of drilling and well completion, the high-speed flow carrying rock particles led to erosion of the wellhead and the decline of bearing capacity of wellhead, resulting in increasing risk of well control. This paper combines the erosion simulation and quantitative calculation to qualitatively and quantitatively investigate the gas flow characteristics of Y-type gas production wellhead and the relationship between the defect depth and time. Safety times in production for different Y-type gas wellheads are calculated to provide a theoretical basis for high pressure application of integrated wellhead. It is shown that under the same condition, erosion depth increases with gas production and decreases with the increasing wellhead pressure.

**Keywords** integrated wellhead of drilling and completion; gas-solid two-phase flow; Y-type gas integrated wellhead; erosion attack; quantitative calculation

氮气欠平衡钻井技术已经从低压、低渗储层拓展到高压、高产储层, 具有及时评价、保护储层和提高单井产能的特点。国内某油田在应用氮气欠平衡钻井技术以及钻油管技术过程中, 采用了钻油管完井一体化井口装置。由于钻完井

过程中气体流量大, 高速携岩气流容易造成完井井口装置的冲蚀磨损, 导致井口装置的承压能力下降, 严重影响井口装置的使用寿命, 造成井控风险大, 极易诱发工程安全事故<sup>[1-4]</sup>。因此, 为保障钻完井过程中的井控安全, 有效预防高

收稿日期: 2014-09-05; 修回日期: 2015-04-07

作者简介: 艾志久, 教授, 研究方向为石油天然气装备及油气井安全工程, 电子信箱: aizhijiu123@vip.sina.com

引用格式: 艾志久, 孟璋劼, 柴希伟, 等. 整体式 Y 型采气井口装置冲蚀规律及量化计算[J]. 科技导报, 2015,33(11): 54-58.

压、高产气井完井井口装置的失效问题,本文探讨完井井口装置的冲蚀规律研究及量化计算。

### 1 井口采气通道结构

图1为整体式Y型井口采油树的整体结构,整体式Y型采油树的主通径和旁通径的尺寸都是78 mm,选用整体式Y型采油树减少了井口设备各组件之间的连接点,相对减少了泄漏概率。图2为整体式Y型完井井口的物理模型,其中1~5为采油树冲蚀较为严重的位置。

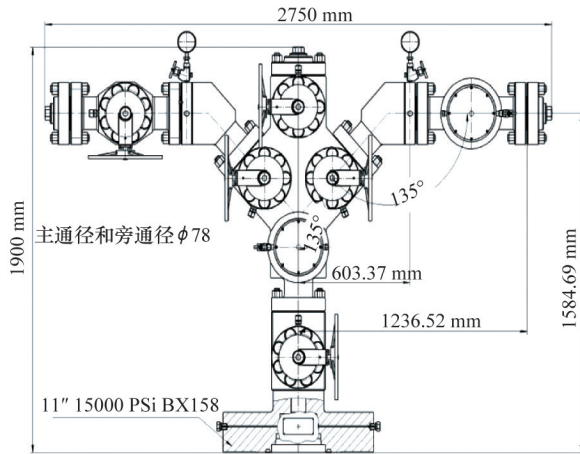


图1 整体式Y型井口结构尺寸

Fig. 1 Integral Y-type wellhead structure size

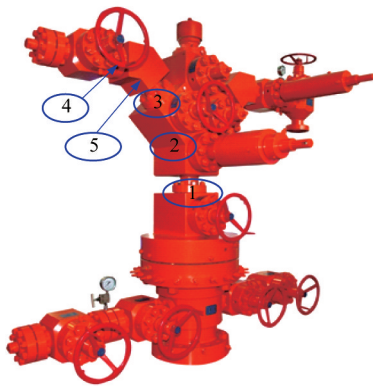


图2 整体式Y型井口物理模型

Fig. 2 Model of Y-type wellhead

## 2 气固两相流冲蚀磨损计算模型

### 2.1 冲蚀磨损数学模型

在多相流仿真中,CFD软件包含有颗粒对壁面冲蚀磨损计算,本文选用的计算模型主要考虑了颗粒的碰撞角度、碰撞速度、质量流量、形状等参数,具体模型<sup>[2]</sup>表达式为

$$R_{\text{erosion}} = \sum_{p=1}^{N_{\text{particles}}} \frac{\dot{m}_p C(d_p) f(\alpha) v^{b(v)}}{A_{\text{face}}} \quad (1)$$

式中,  $R_{\text{erosion}}$  为冲蚀速率;  $C(d_p)$  为岩屑粒径函数;  $f(\alpha)$  为冲击角函数;  $v$  为岩屑相对于壁面的速度;  $b(v)$  为岩屑相对速度的函数;  $\dot{m}_p$  为颗粒质量;  $A_{\text{face}}$  为冲蚀面积;  $N_{\text{particles}}$  为颗粒数

量。考虑壁面材质的变化可将公式变化为

$$R'_{\text{erosion}} = \frac{C_{\text{unit}}}{\rho_{\text{wall}}} R_{\text{erosion}} \quad (2)$$

式中,  $C_{\text{unit}}$  为单位换算常数;  $\rho_{\text{wall}}$  为壁面材质的密度;  $R'_{\text{erosion}}$  为单位密度的冲蚀速率。

一般来说,气体投产时,井口装置的材料大多数为中碳钢,整体式Y型完井井口装置的材料均为35CrMo,是典型的中碳钢。因此,式(1)与式(2)中的边界函数可以根据文献<sup>[5]</sup>给定,其表达式为

$$b(v) = 1.73 \quad (3)$$

$$C(d_p) = 1.559B^{-0.59} F_s \times 10^{-7} \quad (4)$$

$$f(\alpha) = \begin{cases} a_1 \alpha^2 + b_1 \alpha & \alpha \leq 0.262 \\ x_1 \cos^2 \alpha \sin \alpha + y_1 \sin^2 \alpha + z_1 & \alpha > 0.262 \end{cases} \quad (5)$$

其中,  $B$  为采油树材料的布氏硬度;  $F_s$  为粒子的形状系数,球形粒子的形状系数为1;  $a_1, b_1, x_1, y_1, z_1$  为常数,取值分别为-33.4, 17.9, 1.239, -0.1192, 2.167。

### 2.2 计算域模型及边界条件

整体式Y型采油树是在正常射孔完井工况下采用的井口装置。数值模拟计算模型主要考虑在采气工况下对整体式Y型采油树内壁、法兰连接密封处的冲蚀作用。在实际工程应用中,整体式Y型采油树的一侧连接采气管线。投产时采用单边Y型采气通道采气。整体式Y型采油树的计算域如图3所示。

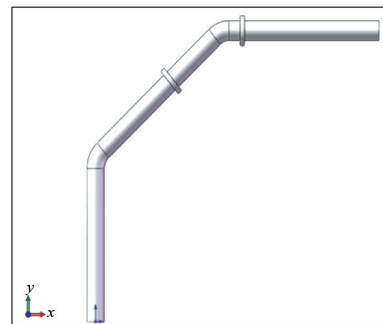


图3 整体式Y型采油树计算域

Fig. 3 Computational domain of Y-type wellhead

对整体式Y型流体域采用非结构网格划分方式<sup>[6,7]</sup>,对法兰连接密封处实行网格加密处理,并对壁面设置了细化的边界层网格<sup>[8,9]</sup>。整体式Y型采油树流域网格模型如图4所示。

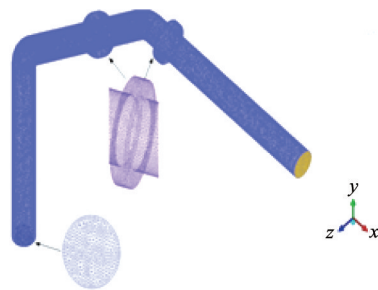


图4 整体式Y型采油树流域网格模型

Fig. 4 Model of Y-type in grid

通过计算完成的网格模型,共有网格节点497538个,网格单元2323840个。其中四面体网格单元1912835个,锥形网格单元103124个,楔形网格单元304998个。

在采气过程中,天然气温度293.15 K,采气井口压力为10、20、30、40、50 MPa,考虑气体的压缩性。整体式Y型采油树的采气通道流体计算域上主要有进口边界、出口边界及壁面边界3种边界类型。砂粒直径3 mm,含砂量1%,密度2650 kg/m<sup>3</sup>,质量流量0.083 kg/s,详细计算参数如表1所示。

表1 计算边界条件参数

Table1 Parameters of boundary conditions

工作介质	体积流量/(万m <sup>3</sup> ·d <sup>-1</sup> )	质量流量入口/(kg·s <sup>-1</sup> )	采气井口压力/MPa	出口2,3
天然气	100	8.2986	10~50	无滑移壁面
	200	16.597	10~50	无滑移壁面
	300	24.89	10~50	无滑移壁面
	400	33.19	10~50	无滑移壁面
	500	41.5	10~50	无滑移壁面

### 3 冲蚀磨损仿真计算结果分析

#### 3.1 Y型采气通道流场分析

当采气井口压力为10 MPa,含砂量为1%时,不同采气量情况下,整体式Y型采油树天然气流动的最大速度分布云图如图5所示。

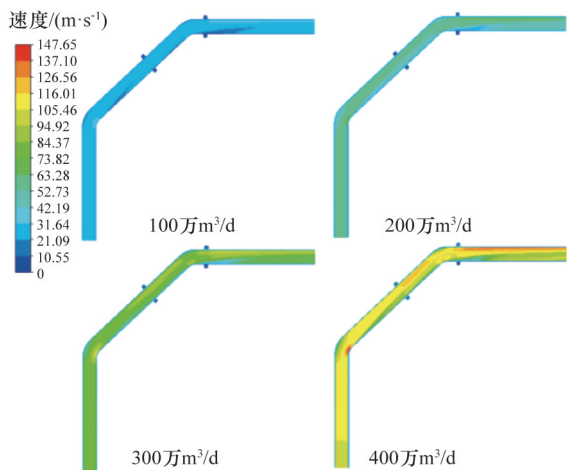


图5 不同采气量下整体式Y型采油树速度场(10 MPa)  
Fig. 5 Velocity fields of Y-type wellhead in different gas productions

由图5可见,随着产气量的增大(即入口气体流量的增大),天然气进入Y型采气通道后,在相应的采气量下,整个Y型通道的速度分布都处于相应采气量的中间位置,且在

拐角处的冲蚀速度达到最大。同时,在弯角处形成一个高压和负压区,将出现比较严重的冲蚀。

分别将其他在不同采气量和井口压力工况下,获得的最大气流速度绘制如图6所示。可以看出,当采气井口压力一定,随着采气量由100万m<sup>3</sup>/d增加到500万m<sup>3</sup>/d,整体式Y型采油树采气通道内的气体最大流速成线性增加;当采气量一定时,随着采气井口压力的增大,气体的气流速度出现减小的趋势。当井口压力为10 MPa、采气量为500万m<sup>3</sup>/d时,天然气的速度达到最大为183 m/s。而当井口压力为50 MPa、采气量为100万m<sup>3</sup>/d时,天然气的速度最小为7.53 m/s。

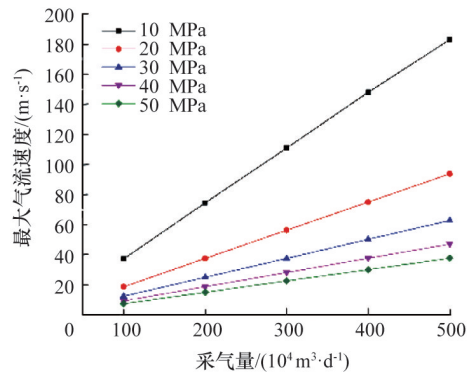


图6 不同采气井口压力和采气量下的最大气流速度曲线  
Fig. 6 Maximum flow velocity curves in different gas production wellhead pressures and gas productions

#### 3.2 砂粒对整体式Y型井口的冲蚀规律研究

冲蚀速率作为衡量气体携砂对整体Y型完井井口Y型采气通道内壁冲蚀程度的一个重要参数,其定义为砂粒在单位时间内造成Y型内壁单位面积上的损失量。

由图7可以看出,整个Y型采气通道中受冲蚀磨损最大的部位分别是Y型采气通道的两个弯曲段和法兰连接设备的盘根密封处,最大冲蚀速率为0.185 kg/(m<sup>2</sup>·s)。

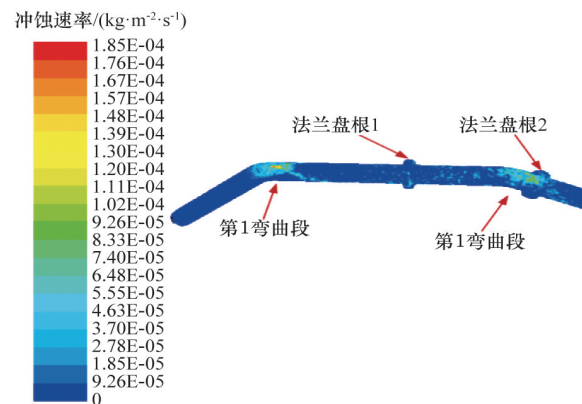


图7 砂粒对Y型采气通道的冲蚀速率分布  
Fig. 7 Erosion rate distribution of sand mining gas channel of Y type

从上述受冲蚀的4个关键位置,可以得出在弯曲段气体携带砂粒运动的流向发生改变,造成了弯曲段的冲蚀磨损,2个法兰盘根处的冲蚀主要是因为气体流经过流截面的突变时,在突变区域发生涡流现象,导致砂粒运动轨迹的紊乱,进而造成了法兰盘根处密封处的冲蚀磨损。同时整体式Y型采油树本体的其他位置也发生不同程度的冲蚀,且冲蚀面并不连续。

图8为不同采气井口压力工况下,最大冲蚀速率与采气量的变化曲线图。可以看出,当采气井口压力在30~50 MPa时,随着产气量由100万 m<sup>3</sup>/d增加到500万 m<sup>3</sup>/d,采油树内最大冲蚀速率逐渐增大,增长幅度较小。当采气井口压力为10 MPa和20 MPa时,随着产气量增加,采油树内最大冲蚀速率非线性增长。

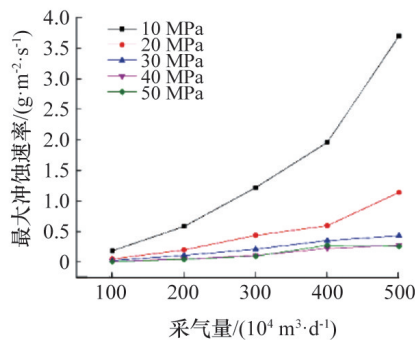


图8 不同井口压力工况下最大冲蚀速率与采气量的变化曲线

Fig. 8 Variation curves of the maximum erosion rate and gas production under the different wellhead pressures

由图9知,含砂量为1%时,最大冲蚀速率随着采气量的增加,变化并不明显。当含砂量为10%时,最大冲蚀速率随着采气量的增加而增大,且增长幅度较大。说明含砂量的增加对于最大冲蚀速率具有非常明显的影响。

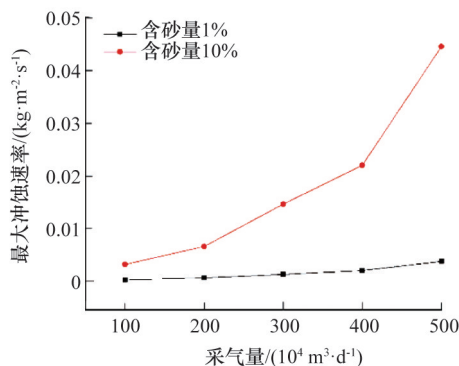


图9 不同含砂量下的最大冲蚀速率

Fig. 9 Maximum erosion rates under different sand contents

#### 4 冲蚀磨损缺陷的量化计算

对冲蚀模型计算出的冲蚀速率进行冲蚀缺陷坑深度的量化时,需要考虑气固两相冲蚀时间的影响。由此可将式

(2)进一步转化为

$$D = R_{\text{erosion}} \cdot T \quad (6)$$

式中, $D$ 为单位面积上冲蚀坑的深度; $T$ 为冲蚀时间。

选择工况为采气量100万 m<sup>3</sup>/d,井口压力10 MPa、含砂量1%时,整体式Y型采油树的冲蚀速率为0.185 g/(m<sup>2</sup>·s)。利用Fluent的后处理,选取有较大冲蚀速率的范围区间的冲蚀部位进行位置的显示,显示结果如图10所示。

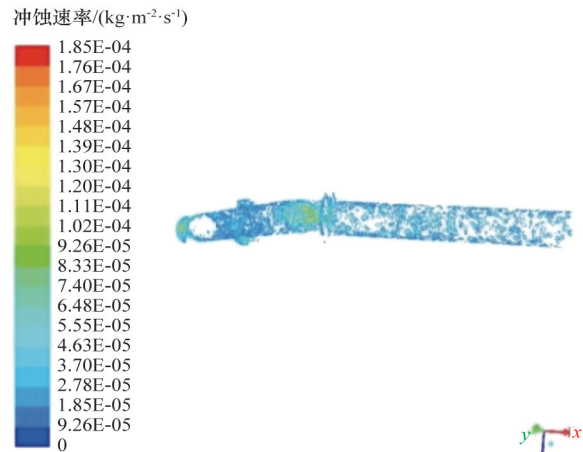


图10 冲蚀速率较大的冲蚀区域位置显示

Fig. 10 Position of the large rate of erosion area

将图10所示存在较大冲蚀速率的区域在软件里进行该区域的面积查询,即可得到如图11所示的面积查询结果。

Area	(m <sup>2</sup> )
clip-dpm-erosion-rate-4	1.8458956×10 <sup>-6</sup>

图11 冲蚀速率较大的冲蚀区域面积查询结果

Fig. 11 Query results of the erosion rate

同理,可以得出不同工况下整体式Y型采气通道冲蚀速率较大的冲蚀区域面积。

通过对整体式Y型采油树在采气工况下冲蚀速率的计算,应用以上缺陷量化分析方法,即可得出采气通道最大冲蚀速率部位完全被刺穿所用时间 $T$ 。由于冲蚀最为严重的区域为Y型采油树本体第2个拐弯处和液控安全阀法的密封盘根处,现场应用的Y型井口此处旁通内壁距密封槽的厚度为10 mm,因此在计算刺穿时间时,应参考该壁厚进行计算。利用式(6)与式(2)可以计算得出刺穿盘根密封槽所用时间为

$$T = d_{\text{max}} / \left( \frac{R_{\text{erosion}}}{\rho_{\text{wall}}} \right) \quad (7)$$

不同工况下刺穿盘根密封圈所用的极限时间如表2所示。可以看出,在采气量一定的情况下,刺穿盘根密封槽所用极限时间随采气井口压力的增大而加长;当井口压力一定时,刺穿极限时间随采气量的增大而缩短。将获得的数据整理得出不同采气量下,冲蚀深度随时间的变化关系。

表2 不同工况下刺穿盘根密封圈所用的极限时间

Table 2 Limit times of the packing seal ring pierced under different conditions

井口压力/MPa	极限时间/h				
	100万 m <sup>3</sup> /d	200万 m <sup>3</sup> /d	300万 m <sup>3</sup> /d	400万 m <sup>3</sup> /d	500万 m <sup>3</sup> /d
10	118.02	37.39	17.90	11.14	5.90
20	421.49	109.17	49.85	36.51	19.15
30	808.64	196.70	102.50	61.68	50.31
40	1559.52	421.49	200.31	97.04	79.11
50	2568.63	471.56	219.21	79.11	83.33

图12为采气量500万m<sup>3</sup>/d时,冲蚀深度与时间的关系图。可以看出,在采气量一定的情况下,冲蚀深度随采气井口压力的增大而减小,受冲蚀作用与时间成线性增加的过程愈平缓。同时,通过图12并结合采油树采气的实际工况,可以直观地看出在各工作时间内所产生的冲蚀磨损深度值。然后比较冲蚀磨损深度与实际壁厚,看是否处于安全范围,即可实现对工作过程中的冲蚀磨损情况进行安全性的提前预判。

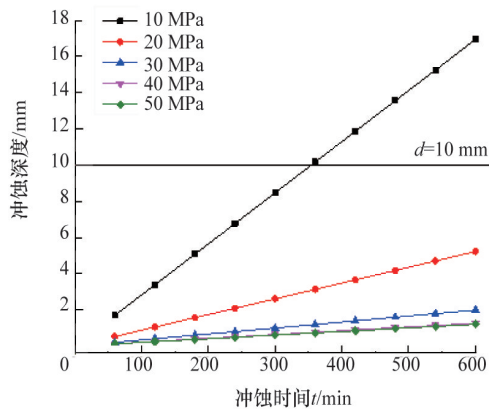


图12 冲蚀深度随时间的变化关系

Fig. 12 Relationship between the depth of erosion and time

## 5 结论

1) 经过研究Y型采油树的气体流动特性与砂粒的冲蚀速率,分析得出采油树受冲蚀破坏的主要原因是高速气流携带岩屑颗粒流经采气井口装置时,由于气体流动方向的改变和采气通道过流截面的改变发生的涡流现象引起了井口装置的冲蚀磨损。

2) 确定了整个井口装置受冲蚀磨损严重的区域。

3) 对冲蚀磨损进行了量化计算,总结得出冲蚀深度与冲蚀时间的关系曲线,计算得出不同采油树的安全生产时间。为整体式Y型采油树在高压高产气井的安全使用提供了科

学的理论依据。

4) 利用对冲蚀磨损深度的量化计算,即可实现对工作过程中的冲蚀磨损情况进行安全性的提前预判。

## 参考文献 (References)

- [1] 袁玲. 采气方式选择及生产参数优化[D]. 北京: 中国石油大学, 2009.  
Yuan Ling. Gas production methods and production parameter optimization[D]. Beijing: University Petroleum of China, 2009.
- [2] 陈浩, 梁爱武, 李锐钦. 井口装置的失效分析[J]. 天然气工业, 2004, 24(7): 65-68.  
Chen Hao, Liang Aiwu, Li Ruiqin. Failure analysis of natural gas wellhead equipment[J]. Natural Gas Industry, 2004, 24(7): 65-68.
- [3] 张辉, 张川东, 付春艳, 等. 钻井四通开裂原因分析[J]. 中国测试, 2010, 36(4): 38-40.  
Zhang Hui, Zhang Chuandong, Fu Chunyan, et al. Analysis of drilling four way cracking[J]. China Measurement & Test, 2010, 36(4): 38-40.
- [4] 马骏, 林盛旺. 采气井口装置安全隐患的整改技术[J]. 钻采工艺, 2003, 26(增1): 89-92.  
Ma Jun, Lin Shengwang. Repairing process on christmas tree leakage in Chongqing Gasfield[J]. Drilling and Production Technology, 2003, 26 (Suppl 1): 89-92.
- [5] Edwards J, McLaury B, Shirazi S. Modeling solid particle erosion in elbows and pluggedtees[J]. Journal of Energy Resources Technology, 2001, 123(4): 277-284.
- [6] Morsi S A, Alexande A J. An investigation of particle trajectories in two-phase flow system[J]. Fluid Mesh, 1972, 55(2): 193-208.
- [7] 李丽丹, 李声. 基于CFX和Workbench的数值仿真技术[J]. 中国测试, 2010, 36(5): 79-81.  
Li Lidan, Li Sheng. The numerical simulation technology of CFX and Workbench[J]. China Measurement & Test, 2010, 36(5): 79-81.
- [8] 许蕾, 罗会信. 基于ANSYS ICEM CFD和CFX数值仿真技术[J]. 机械工程师, 2008(12): 65-66.  
Xu Lei, Luo Huixin. The technology of numerical simulation based on ANSYS ICEM CFD and CFX software[J]. Mechanical Engineer, 2008(12): 65-66.
- [9] 纪兵兵, 陈金瓶. ANSYS ICEM CFD网格划分技术实例详解[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2012.  
Ji Bingbing, Chen Jinping. ANSYS ICEM CFD mesh generation examples [M]. Beijing: China Water Conservancy and Hydropower Press, 2012.

(责任编辑 刘志远)