

锻制弯头内部流场分析

谈文虎¹ 赵朝文² 文代龙¹ 张维臣¹ 胡 锦¹ 孔 云³

1. 中国石油集团工程设计有限责任公司西南分公司, 四川 成都 610041;

2. 中国石油西南油气田公司重庆气矿, 重庆 400021;

3. 中国石油西南油气田公司川西北气矿, 四川 江油 621700

摘 要:介绍了一种适用于高压高酸性气田锻制弯头的设计方法, 对该锻制弯头两种不同流通形式的内部流场进行了比较。由于锻制弯头的内部流道与标准弯头不一致, 因此利用商业 CFD 软件对锻制弯头的两种不同流通形式进行了内部流场的数值分析, 得出了锻制弯头内部存在流动漩涡和压力波动的计算结果。通过对弯头外侧壁面剪切应力的比较, 分析了锻制弯头两种流通方式的壁面冲刷腐蚀。提出在强腐蚀介质环境中, 应优先选用流通方式 I 作为锻制弯头的流通方向。

关键词:锻制弯头; 数值计算; 压力损失; 冲刷腐蚀

DOI: 10.3969/j.issn.1006-5539.2013.02.024

0 前言

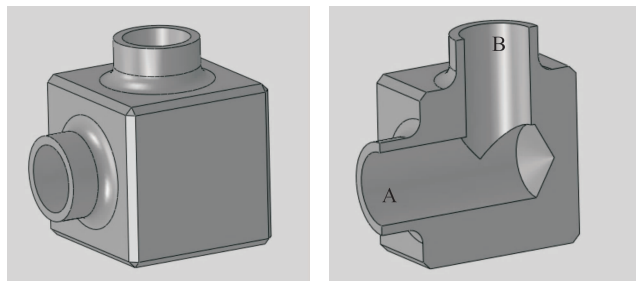
近年来, 随着国内天然气气田的不断开发, 高压高酸性气田不断增多。由于高压高酸性天然气介质对管材、管件壁厚及腐蚀余量的特殊要求, 标准管件^[1]已经不能满足其开发要求。同时, 采用进口管件^[2]将大大增加开发成本。因此, 部分设计单位提出选用适当材料的锻件制作非标管件的设计思路, 并将此种非标管件成功地应用于国内各酸性气田中, 为气田开发带来良好的经济效益。

锻制弯头作为最基本的锻制管件, 与标准弯头相比, 不管外形还是内部流道都有较大差异。锻制弯头的设计除需着重满足承压外, 还要求加工方便, 制造成本低。但锻制弯头加工出来的流道对介质流动产生的影响鲜有报道。

1 锻制弯头的设计

锻制弯头采用锻件, 经刨、车、铣三道主要工序制造而成, 故基体呈现立方体结构, 见图 1-a)。流道转弯处的封头端是整个锻制弯头承压相对薄弱的位置。因此锻制

弯头设计的要点在于保证流道封头端的承压能力。通过此种方法设计出的锻制弯头流道内侧端厚度较大, 具有足够的承压能力。



a) 外形图

b) 剖面图

图 1 锻制弯头外形图和剖面图

封头厚度按一体式圆形平盖计算, 公式^[3]为:

$$\delta_p = D_c \sqrt{\frac{K P_c}{[\sigma]^t \varphi}} \quad (1)$$

式中: δ_p 为封头计算厚度, mm; D_c 为封头计算直径, mm; P_c 为计算压力, MPa; K 为结构特征系数, 取 0.27; $[\sigma]^t$ 为设计温度下材料的许用应力, MPa; φ 为焊接接头系数, 取 1.0。

收稿日期: 2012-09-09

基金项目: 中国石油天然气集团公司重点工程资助项目 (S2007-43)

作者简介: 谈文虎 (1982-), 男, 四川内江人, 工程师, 硕士, 主要从事油气集输与机械设计工作。

封头计算直径 D_c 应为锻制弯头对应管材内径 D_i 与 2 倍腐蚀余量 C 之和,即应考虑腐蚀后封头的承压安全。

计算所得的封头厚度 δ_p ,加上腐蚀余量 C ,再经过取整,即可得到锻制弯头封头的名义厚度 $\delta(\text{mm})$ 。最后结合铣刀的锥孔高度和接管大小,得出锻制弯头立方体的边长 $L(\text{mm})$,最终设计出符合要求的锻制弯头。

以新疆某气田地面建设工程中的锻制弯头设计为例。锻制弯头的接管材质为 L245NCS,规格 $\Phi 60.3 \times 6.3$,设计压力 10 MPa,设计温度 $T_c 100^\circ\text{C}$,设计腐蚀余量为 3 mm。锻制弯头设计结果见表 1。

表1 10.0 MPa DN50锻制弯头设计结果

P_c	T_c	D_i	C	D_c	K	$[\sigma]^t$	φ	δ_p	δ	L
10.0	100	47.7	3	53.7	0.27	119	1.0	8.09	12.0	115

由于锻制弯头设计、制造的特殊性,使得内部流道与标准弯头有较大差异。下面通过 CFD 商业软件对锻制弯头内部流体流场分布情况,以及流体流动对锻制弯头产生的影响进行分析。

2 网格划分及边界条件

首先从锻制弯头模型中提取流体流道模型,见图 2-a)。再利用 CFD 的前处理软件对模型进行网格划分。

由于此模型两端圆柱体结构规则,交汇处的模型结构较为复杂,因此模型的网格划分可分为两部分处理。两端的圆柱体部分采用计算特性较好的六面体结构,而交汇部分,为了适应模型结构的变化,则采用四面体结构。为了适应流态变化,在流体转弯处采用较细的网格,而流态变化小的圆柱体区采用较粗的网格,见图 2-b)。此模型划分后的网格数量为 17 万个。

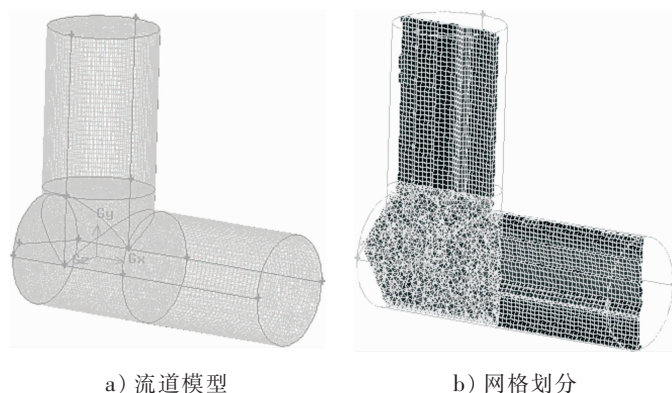


图2 锻制弯头流道网格划分

以 7.0 MPa、40 °C 的天然气以 7 m/s 的流速流经弯头为例对锻制弯头内部流场进行分析。根据锻制弯头流道结构,可分为两种流通方式:

流通方式 I: 天然气从图 1-b) 的端口 A 进入,从端

口 B 流出;

流通方式 II: 天然气从图 1-b) 的端口 B 进入,从端口 A 流出。

边界条件设置:入口端设置为速度入口,温度 40 °C,流速 7 m/s;出口端设置为自由出流;其余设置为绝热固壁。因此流动过程中,不考虑传热对流场的影响。根据工艺计算软件 HYSYS 可以算出天然气在 7.0 MPa、40 °C 工况下的所有物性参数,其中流场计算所需的主要物性参数见表 2。

表2 天然气在7.0 MPa、40 °C的物性参数

$\rho/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	$\mu/(\text{Pa}\cdot\text{s})$	$\lambda/(\text{W}\cdot(\text{m}\cdot\text{K})^{-1})$	$C_p/(\text{J}\cdot(\text{kg}\cdot^\circ\text{C})^{-1})$
48.45	1.331×10^{-5}	0.042 32	2 724.4

3 数值模型

由于本算例为单介质流动,流动过程仅为物理过程,因此数值模型中不考虑组分守恒方程和化学守恒方程。质量守恒方程和动量守恒方程^[4]分别如下:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) = S_m \quad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} + \rho g_i + F_i \quad (3)$$

$$\text{其中, } \tau_{ij} = [\mu(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i})] - \frac{2}{3}\mu \frac{\partial u_i}{\partial x_i} \delta_{ij} \quad (4)$$

锻制弯头内流动为定常流动,流态不随时间变化,因此 $\frac{\partial \rho}{\partial t} = 0, \frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) = 0$ 。

整个流动过程中不存在源项, $S_m = 0$ 。

流动过程中不存在外部体积力, $F_i = 0$ 。

流体密度较小,流经锻制弯头时间较短,因此不考虑重力作用, $\rho g_i = 0$ 。

能量方程:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho E) + \frac{\partial}{\partial x_j}(u_j(\rho E + p)) = \frac{\partial}{\partial x_i}(k_{eff} \frac{\partial T}{\partial x_i} - hJ + u_j(\tau_{ij})_{eff}) + S_h \quad (5)$$

$$\text{其中, } E = h - \frac{p}{\rho} + \frac{u_i^2}{2} \quad (6)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho E) = 0 (\text{定常流动})$$

$$S_h = 0 (\text{无源项})$$

湍流方程选用标准 $k-\varepsilon$ 方程:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j}[(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k}) \frac{\partial k}{\partial x_j}] + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M + S_k \quad (7)$$

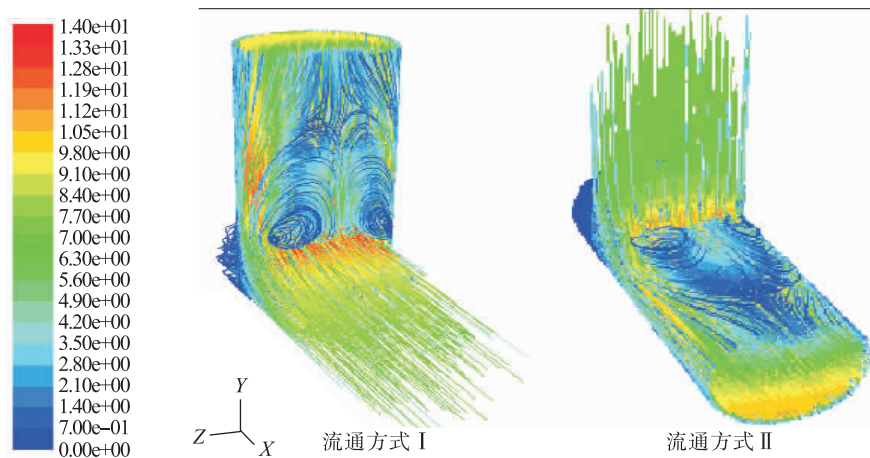


图3 流动迹线图

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} + S_\varepsilon \quad (8)$$

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (9)$$

$$C_{1\varepsilon} = 1.44, C_{2\varepsilon} = 1.92, C_\mu = 0.09, \sigma_k = 1.0, \sigma_\varepsilon = 1.3$$

本模型的解法器采用基于密度的耦合解法器,方程采用 Roe-FDS 矢通量分裂法求解。

4 计算结果

4.1 流动迹线

图3为流动迹线图,流通方式 I 和流通方式 II 在下游都会出现内侧的低压旋涡,越靠近转弯处,旋涡强度

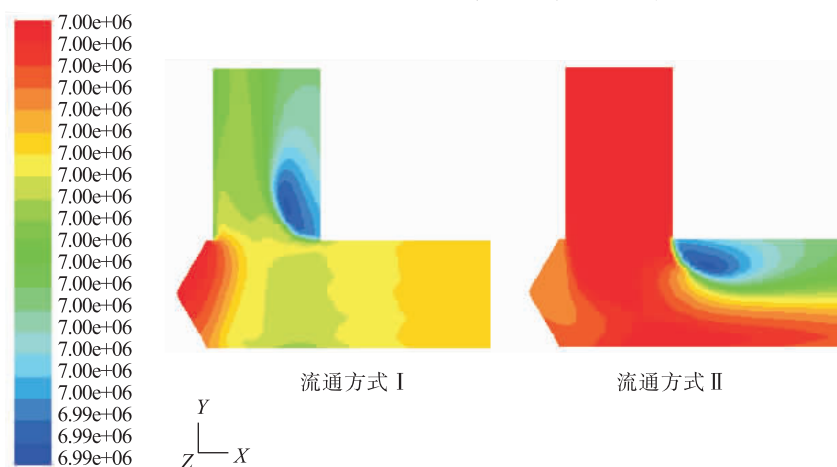
越大。可见,锻制弯头内流动旋涡的存在,将造成部分压力损失。通过计算进出口总压的面积平均值,得出两种流通方式的总压损失见表3。

表3 两种流通方式下的总压损失

	入口总压 /Pa	出口总压 /Pa	总压损失 /Pa
流通方式 I	7 000 082	6 998 055	2 027
流通方式 II	7 001 683	7 000 201	1 482

4.2 压力波动

图4为 $z=0$ 中剖面上流场的总压分布。图4中,流场在流动转弯后的内侧形成明显的低压区。弯头转弯处流场发生突变,压力出现波动,产生一定的冲击;同时弯头下游处存在较明显的涡流现象,见图3。在有腐蚀性介质存在的条件下,压力波动与流动旋涡都将锻制弯头的腐蚀产生一定的影响^[5]。

图4 $z=0$ 中剖面上总压分布图

4.3 速度分布及壁面剪切

图5为 $z=0$ 中剖面上流场的速度分布。图5中,流场在流动转弯后的外侧形成明显的冲刷区。流通方式 I 的高速流动核心区离壁面1还有一定的距离,而流通方式 II 的高速流动核心区则完全附着于壁面2上。壁面1和

2的壁面剪切应力分别见图6、7。可以看出,壁面1的剪切应力在流道拐转的根部最大,约14 Pa,随着位置的远离,应力逐渐减小;壁面2的剪切应力先增大再减小,最大值约16 Pa。值得注意的是,壁面2的剪切应力在中部存在跳跃增大位置,这是由于高速气流集中冲刷壁面造

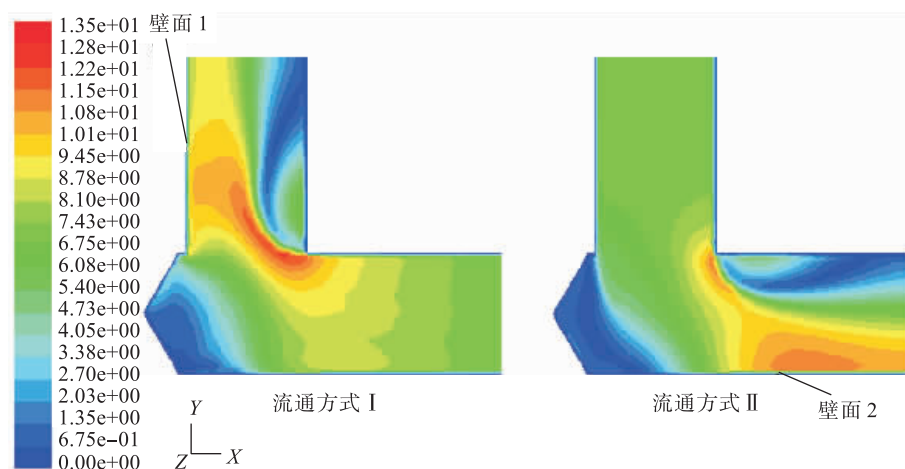
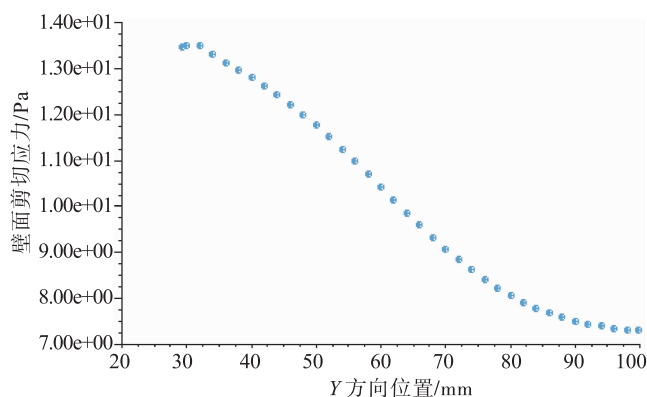
图5 $z=0$ 中剖面上速度分布图

图6 流通方式 I 中壁面 1 剪切应力曲线

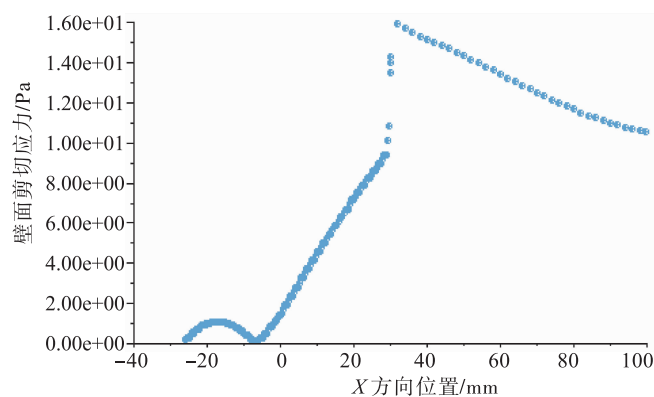


图7 流通方式 II 中壁面 2 剪切应力曲线

成的,而此类冲刷也是造成材料加速腐蚀的重要因素之一。^[6]

5 结论

从以上模拟结果可得:

a) 锻制弯头内有流动旋涡产生,导致压力能损失。流通方式 I 的压力能损失大于流通方式 II。

b) 锻制弯头内流场在转弯后的内侧形成压力波动与流动旋涡。在有腐蚀性介质存在的条件下,压力波动与流动旋涡都将对锻制弯头的腐蚀产生一定的影响。

c) 锻制弯头内流场在转弯后的外侧形成冲刷区。流通方式 II 的冲刷对材料腐蚀的影响大于流通方式 I。

综上,锻制弯头焊接时对流通方式的选择应根据工况条件决定。对于强腐蚀工况,推荐采用流通方式 I,通过锥形端静止介质的缓冲,减小下游壁面的冲刷腐蚀,从而增加锻制弯头的安全性和使用寿命。

参考文献:

[1] GB/T 12459-2005, 钢制对焊无缝管材[S].

GB/T 12459-2005, Steel Butt Welding Seamless Pipes [S].

[2] 张有渝,成一宇. 站场用管件的设计与制造[J]. 天然气与石油, 2005, 23(4): 44-46.

Zhang Youyu, Cheng Yiyu. Design and Manufacture of Fittings Used in Stations [J]. Natural Gas and Oil, 2005, 23(4): 44-46.

[3] GB 150-1998, 钢制压力容器[S].

GB 150-1998, Steel Pressure Vessels [S].

[4] 韩占忠,王敬,兰小平. FLUENT 流体工程仿真计算实例与应用[M]. 北京:北京理工大学出版社, 2004. 14-15.

Han Zhanzhong, Wang Jing, Lan Xiaoping. FLUENT Fluid Engineering Simulation Calculation Example and its Application [M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2004. 14-15.

[5] 范志刚,李翠楠,王燕,等. 流速对天然气输气管道腐蚀的影响规律研究[J]. 钻采工艺, 2010, 33(2): 33-35.

Fan Zhigang, Li Cuinan, Wang Yan, et al. Study on Effects of Flow Velocity on Natural Gas Pipeline Corrosion [J]. Drilling & Production Technology, 2010, 33(2): 33-35.

[6] 郑玉贵,姚治铭. 流体力学因素对冲刷腐蚀的影响机制[J]. 腐蚀科学与防护技术, 2000, 12(1): 36-40.

Zheng Yugui, Yao Zhiming. Fluid Mechanics Factors on the Corrosion Mechanism of the Effect of Erosion [J]. Corrosion Science and Protection Technology, 2000, 12(1): 36-40.