

积液管道的影响分析

唐菁菁 张世忱

中国寰球工程公司,北京 100012

摘 要:为进一步了解管道积液对弯头和支架的冲击影响,通过建立物理模型,对管道中积液运动过程进行详细分析,应用动量定理及流体力学相关原理,推导弯头受力与工艺介质物理参数、流速之间的数学关系,得出冲击载荷与流速之间的函数曲线,结合工程简例计算说明积液影响,给出降低积液危害的建议,为管道防液击设计提供基础理论参考。

关键词:积液;管道;冲击载荷;柱塞流

DOI:10.3969/j.issn.1006-5539.2013.05.006

0 前言

在工厂生产运行中,由于温度波动、误操作、停车、检修等原因,可能在管道中产生大量积液,当系统输入工艺介质时,介质推动积液运动对管道弯头及支撑结构产生冲击载荷,对管道系统造成一定危害。国内外大量文献对水锤载荷的分析研究较为成熟,却极少提到积液管道的影响^[1-2]。为确保系统的安全和稳定,本文就此对管道积液的运动过程和影响进行了探索性地分析和推导,通过几个相对理想的积液管道模型,推导出冲击载荷的理论解析值。

1 少量积液的管道受力分析

1.1 均匀介质的管道

不考虑管道内液体和气体的黏性作用,以弯头处微段介质 dm 为研究对象进行受力分析(见图 1),设弯头给 dm 的推力 f 在 x, y 轴方向的分量为 f_x, f_y , dm 给弯头的推力 F 在 x, y 轴方向的分量为 F_x, F_y ,流入弯头的介质压力为 p_0 ,流出弯头的介质压力为 p' ,介质密度为 ρ ,流速 v_0 ,管道截面积为 A ,得出:

$$dm = \rho \cdot dV = \rho \cdot A \cdot dl = \rho \cdot A \cdot v_0 \cdot dt \quad (1)$$

动量定理可以表述为

$$\sum F \cdot dt = dm \cdot v_t - dm \cdot v_0 \quad (2)$$

x, y 方向分别应用动量定理^[3],并应用牛顿第三定律

可知:

$$F_x = -f_x = -(p' + \rho v_0^2) A + (p_0 + \rho v_0^2) A \cos \theta \quad (3)$$

$$F_y = -f_y = (\rho_0 + \rho v_0^2) A \sin \theta \quad (4)$$

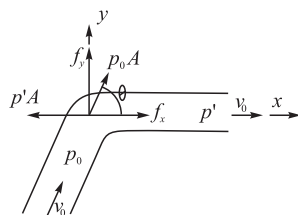


图 1 微段介质 dm 的受力分析

1.2 存有少量积液的管道

如果管内只有少量积液(见图 2),积液前后气体连通,压力保持一致,即 $p_0 = p'$ 。积液在气体推动下做加速运动,假设积液冲击弯头的速度为 $v_{液}$,积液密度为 $\rho_{液}$,气体密度为 $\rho_{气}$ 。少量积液冲击弯头瞬时,假设在某方向上,液体跟弯头接触面积为 $A_{液}$,气体与弯头接触面积 $A_{气}$,则 $A_{液} + A_{气} = A$ 。由式(3)可知介质对弯头的推力为

$$\begin{aligned} F_x &= -(p_0 + \rho v_0^2) A (1 - \cos \theta) \\ &= -p_0 A (1 - \cos \theta) - \rho v_0^2 A (1 - \cos \theta) \end{aligned} \quad (5)$$

其中 $p_0 A (1 - \cos \theta)$ 项是静压力, $\rho v_0^2 A (1 - \cos \theta)$ 项是介质对管道的冲力,夹杂少量积液的介质对管道的推力为:

收稿日期:2013-08-20

作者简介:唐菁菁(1982-),女,湖北随州人,工程师,硕士,主要从事压力管道应力分析工作。

$$F_x = -p_0 A (1 - \cos\theta) - \rho_{\text{液}} v_{\text{液}}^2 A_{\text{液}} (1 - \cos\theta) - \rho_{\text{气}} v_0^2 A_{\text{气}} (1 - \cos\theta) \quad (6)$$

同理由式(4)可得:

$$F_y = (p_0 A + \rho_{\text{液}} v_{\text{液}}^2 A_{\text{液}} + \rho_{\text{气}} v_0^2 A_{\text{气}}) \sin\theta \quad (7)$$

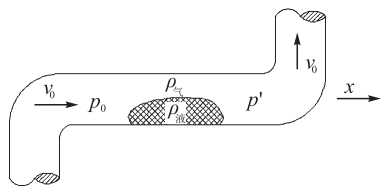


图2 存有少量积液的管道

2 存有大量积液的管道

2.1 过程分析

如果管道存有大量积液,如柱塞流(见图3),那么积液前后气体不连通,压力也可能不同,则 $p_0 \neq p'$ 。

假设通入气体初始,积液速度为0,积液在压差的作用下做加速运动。将积液之后速度为 v_0 的气体按照质量分成 n 等份 $dm = dm_1 = dm_2 = dm_3 = \dots = dm_{n-1} = dm_n$, n 趋于无限大。假设通入气体均匀,各微段密度均为 $\rho_{\text{气}}$,则 dm 所占用管线长度为: $dx = dx_1 = dx_2 = dx_3 = \dots = dx_{n-1} = dx_n$, 且 $dm = dm_1 = \dots = dm_n$, 则有 $\rho_{\text{气}} A dx = \rho_{\text{气}} A dx_1 = \dots = \rho_{\text{气}} A dx_n$ 。

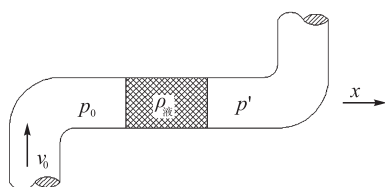


图3 存有大量积液的管道

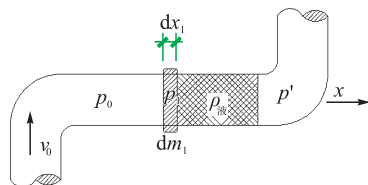


图4 dt_1 时段分析微段 dm_1 气体

a) dt_1 时段(见图4), dm_1 气体被压缩,瞬时升压为 p_1 , 气体速度由 v_0 变为 $v_1=0$, dm_1 气体刚刚接触积液时,速度为 v_0 , 积液速度为0,该瞬时积液相当于关闭的阀门,由水锤波的推导公式可知,可压缩流体的波速^[4-5]表达式为

$$a = \frac{1}{\sqrt{\rho_{\text{气}} \left(\frac{D}{Ee} + \frac{1}{K} \right)}} = \sqrt{\frac{K}{\rho_{\text{气}}}} \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{KD}{Ee}}} \quad (8)$$

式中: K 为介质体积模量, Pa; E 为管壁弹性模量, Pa; D 为

管径, mm; e 为管壁厚, mm。

此时流体波在 dx_1 中传播, 且 $dx_1 = a dt_1$, 由式(8)可知, a 与介质速度无关, 因此, $dt = dt_1 = dt_2 = \dots = dt_{n-1} = dt_n$ 即 $dx = a dt$ 。

以 dm_1 为研究对象, $dm_1 = \rho_{\text{气}} A dx_1$, 对 dm_1 受力分析, 设积液给 dm_1 的推力为 F_{01} 。

由动量定理

$$(-F_{01} + p_0 A) dt_1 = dm_1 \cdot v_1 - dm_1 \cdot v_0 \quad (9)$$

将 $dm = \rho_{\text{气}} A dx$, $dx = a dt$ 代入可得,

$$F_{01} = p_0 A + \rho_{\text{气}} A a (v_0 - v_1) = p_1 A \quad (10)$$

$$p_1 = p_0 + \rho_{\text{气}} a (v_0 - v_1) \quad (11)$$

b) dt_2 时段(见图5), 积液速度由 v_1 增加至 v_2 , dm_1 气体紧挨着液柱, 速度也为 v_2 , 即 dm_1 速度开始增加, 于是降压至 p_1 ; 而 dm_2 速度由 v_0 减小至 v_2 , 与积液速度一致, dm_2 气体被压缩, 压力升高至 p_2 。先以微小段 dm_1 为研究对象, F_{01} 为液柱对 dm_1 的作用力, F_{21} 为 dm_2 对 dm_1 的作用力, 由动量定理:

$$(-F_{01} + F_{21}) dt_2 = dm_1 \cdot v_2 - dm_1 \cdot v_1 \quad (12)$$

$$-F_{01} + F_{21} = \rho_{\text{气}} A a (v_2 - v_1) \quad (13)$$

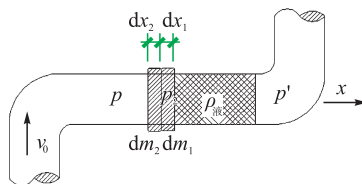


图5 dt_2 时段分别分析微段 dm_1 、 dm_2 气体

再以微小段 dm_2 为研究对象, F_{12} 为 dm_1 对 dm_2 的作用力, 与 F_{21} 大小相等、方向相反。注意 $F_{21} = F_{12}$, 不取方向。动量定理可以表述为

$$(-F_{12} + p_0 A) dt_2 = dm_2 \cdot v_2 - dm_2 \cdot v_0 \quad (14)$$

$$-F_{21} + p_0 A = \rho_{\text{气}} A a (v_2 - v_0) \quad (15)$$

将式(13)、(15)相加得:

$$F_{01} = [p_0 + \rho_{\text{气}} a (v_0 + v_1 - 2v_2)] A \quad (16)$$

$$p_2 = p_0 + \rho_{\text{气}} a (v_0 + v_1 - 2v_2) \quad (17)$$

同理分析 dt_3 时段可得:

$$p_3 = p_0 + \rho_{\text{气}} a (v_0 + 2v_2 - 3v_3) \quad (18)$$

式(11)、(17)和(18)依次类推并取极限, 得到液柱后被压缩或拉伸的气体压力为:

$$p = p_0 + \rho_{\text{气}} a (v_0 - v) \quad (19)$$

式中: p 为液柱之后被压缩或拉伸气体的压力, Pa; v 为液柱的速度, m/s; p_n 为 dt_n 时刻液柱之后被压缩或拉伸气体 dm_n 的压力, Pa ($n=1, 2, 3, \dots$); v_n 为 dt_n 时刻液柱的速度, m/

s; F_{mn} 为 dm_m 气体微段对 dm_n 气体微段的推力, N 。

式(19)即为液柱之后的压力值,它随着液柱的速度变化而发生变化。可以看出,当 $v=v_0$ 时, $p=p_0$,说明此时气柱全部恢复原来的压力,液柱继续加速。当液柱前后压差平衡时,液柱受到的合力为0,加速度为0,速度达到最大值。若此时液柱的速度大于气体介质的速度 v_0 ,则积液后面的气柱将被拉长,管壁直径变小,气体压力 p 将开始减小,压差又不平衡了,液柱的加速度变为反向,速度开始减小。

同理分析液柱减速过程,表达式与加速过程一致,运动过程如此往复。

2.2 理论分析

由式(7)、(19)可知,介质对弯头的水平推力:

$$F_x = [p_0 + \rho_{\text{气}} a(v_0 - v) + \rho_{\text{液}} v^2] A (1 - \cos \theta) \quad (20)$$

分析 $\theta=90^\circ$ 的情况,则:

$$F_x = [p_0 + \rho_{\text{气}} a(v_0 - v) + \rho_{\text{液}} v^2] A \quad (21)$$

由式(21)看出, F_x 的表达式是一个开口向上的 $v-F_x$

二次函数曲线(见图 6)对称轴为 $v = \frac{\rho_{\text{气}} a}{2\rho_{\text{液}}}$, 定义域为 $0 \leq$

$$v \leq v_0 + \frac{p_0 - p'}{\rho_{\text{气}} a}。$$

当 $v=0$ 时,

$$F_x = (p_0 + \rho_{\text{气}} a v_0) A \quad (22)$$

当 $v = \frac{\rho_{\text{气}} a}{2\rho_{\text{液}}}$ 时, F_x 取最小值,即:

$$F_{x_{\min}} = \left(p_0 + \rho_{\text{气}} a v_0 - \frac{\rho_{\text{气}}^2 a^2}{4\rho_{\text{液}}} \right) A \quad (23)$$

由式(23)可以看出如果液柱在 $v = \frac{\rho_{\text{气}} a}{2\rho_{\text{液}}}$ 时撞击弯头,

弯头受力最小。

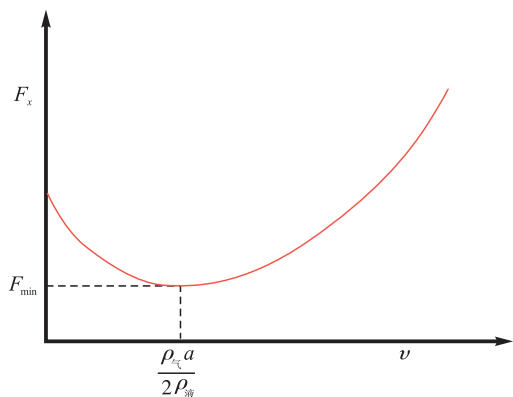


图 6 无摩擦阻力时的 $v-F_x$ 二次函数曲线

当 $v=v_0$ 时,

$$F_x = (p_0 + \rho_{\text{液}} v^2) A \quad (24)$$

当 $p=p_0 + \rho_{\text{气}} a(v_0 - v) = p'$ 时,液柱前后压差为0,在不考虑摩擦阻力的情况下,液柱加速度为0,这是液柱达到最大速度的时刻。

$$v_{\max} = v_0 + \frac{p_0 - p'}{\rho_{\text{气}} a} \quad (25)$$

如果此时积液碰撞弯头,则有

$$F_{x_{\max}} = p' A + \rho_{\text{液}} A \left(v_0 + \frac{p_0 - p'}{\rho_{\text{气}} a} \right)^2 \quad (26)$$

对于大量的积液来讲,液体黏性对液柱的速度影响非常大,因此,需考虑积液的摩擦阻力。以液柱为研究对象进行简要分析,通常积液冲击弯头的速度较大,液体流动为湍流,故由于液体黏性产生的管壁对长度为 l 的液柱摩擦阻力^[6]为:

$$f = \frac{\lambda \cdot l \cdot v^2}{2D} = 0.05 \left(\frac{\varepsilon}{D} + \frac{68}{Re} \right)^{0.23} \cdot \frac{l}{D} \cdot v^2 \quad (27)$$

式(27)中的雷诺数 Re 值通常很大,摩擦力表达式因此可简化为:

$$f = 0.05 \left(\frac{\varepsilon}{D} \right)^{0.23} \cdot \frac{l}{D} \cdot v^2 \quad (28)$$

以积液为研究对象进行受力分析可得:

$$pA - (p' A + f) = m_{\text{液}} a_{\text{液}} \quad (29)$$

将式(19)代入式(29):

$$(p_0 - p') A + \rho_{\text{气}} a A (v_0 - v) - f = m_{\text{液}} a_{\text{液}} \quad (30)$$

将式(28)代入式(30):

$$(p_0 - p') A + \rho_{\text{气}} a A (v_0 - v) - 0.05 \cdot \frac{l}{D} \cdot \left(\frac{\varepsilon}{D} \right)^{0.23} v^2 = m_{\text{液}} a_{\text{液}} \quad (31)$$

积液以加速度 $a_{\text{液}}$ 做初速度为0的加速运动,并且随着积液速度的增加,加速度逐渐减小,当 $a_{\text{液}}=0$ 时,积液速度达到最大值:

$$v_{\max} = \frac{-\rho_{\text{气}} a A + \sqrt{(\rho_{\text{气}} a A)^2 + \frac{l}{5D} \cdot \left(\frac{\varepsilon}{D} \right)^{0.23} [\rho_{\text{气}} a v_0 + (p_0 - p')] A}}{\frac{l}{10D} \cdot \left(\frac{\varepsilon}{D} \right)^{0.23}} \quad (32)$$

式(32)为积液所能达到的最大速度,如果积液此时撞击弯头,由式(21)可知,积液对弯头的冲击力为:

$$F_{x_{\max}} = [p_0 + \rho_{\text{气}} a(v_0 - v_{\max}) + \rho_{\text{液}} v_{\max}^2] A \quad (33)$$

由式(28)可知,此时的摩擦阻力大小可按照下式计算:

$$f_{\max}=0.05\left(\frac{\varepsilon}{D}\right)^{0.23}\cdot\frac{l}{D}\cdot v_{\max}^2 \quad (34)$$

式中: ε 为绝对粗糙度,mm; λ 液体摩擦系数,无量纲。

此外,当 $v=v_0$ 时, $p=p_0+\rho_{\text{气}}a(v_0-v)=p_0$,在考虑摩擦阻力的情况下,判别此时液柱的运动状态:

如果 $p_0A>f+p'A$,则此时液柱加速运动, $v_0<v_{\max}$;

如果 $p_0A=f+p'A$,则 $v_0=v_{\max}$,液柱在气柱的推动下匀速运动;

如果 $p_0A<f+p'A$,说明 $v_0>v_{\max}$,液柱达不到速度 v_0 的时候就已处于平衡状态了,液柱达到速度 $v_{\max}$ 后匀速运动。

综上所述,在计算弯头受力时,根据管道走向确定液柱撞击弯头的速度,或得出一个速度范围,则按照式(21)计算可得到更真实的受力情况;如不能确定液柱撞击弯头时的速度,那么保守的假定管道足够长,能够让液柱在管道中有足够的时间和距离加速到最大速度 $v_{\max}$ 。

3 简例

a)某项目1根44 in.(1 in.=25.4 mm)碳钢水平管道,停车积液管内液面高度为38 mm,积液密度为640 kg/m³,压力为0.13 MPa,计算开车时以80 m/s的速度通入气体介质时积液对弯头、固定支架的冲击力,其中气体密度为4.32 kg/m³。

由积液高度38 mm可计算积液占管道截面面积为10 251 mm²,气体介质占截面面积为940 081 mm²。积液撞击弯头时的速度取决于管道的长度、气体介质的流速、以及上游压力等各个因素,特别是积液被气体推动之后产生的流态,具体情况非常复杂,很难计算出真实值。因此,在没有足够的工艺条件或测速方法时,如果管道介质流速很快,可以初步按照最苛刻的情况来考虑,假定积液被高速气体带动起来,达到气体流速,那么依据式(6)可知弯头受到介质推力为

$$\begin{aligned} F_x &= -p_0A - \rho_{\text{液}}v_{\text{液}}^2A_{\text{液}} - \rho_{\text{气}}v_0^2A_{\text{气}} \\ &= -123\,543\text{ N} - 41\,987\text{ N} - 25\,991\text{ N} \\ &= -191\,521\text{ N} \end{aligned}$$

其中气态介质的冲击力大小为25 991 N,积液对弯头冲击力为41 987 N,内压给弯头的推力为123 543 N。水平管道上的压力和气体介质在前后两个弯头上给管道的推力可近似认为大小相等,方向相反。因此水平管弯头上的介质推力为191 521 N,而水平管限位支架上承受的冲击载荷应该是积液对弯头的冲击力造成的不平衡力41 987 N,可认为这是少量积液冲击载荷的极限值。

由此可知,少量积液在高速气体冲击的情况下,可能会给管道弯头带来较大的冲击载荷,在可预见的情况

下,应采取一定措施消除积液,或通过计算来保证管道和支架的强度设计。

b)某项目1根4 in.的碳钢管道,壁厚8.56 mm,通入的气态介质密度8.85 kg/m³,压力0.51 MPa,体积模量0.66 MPa,摩尔质量34 kg/kmol,气体介质流速0.21 m/s,管中存有一段长3 m的积液,积液下游段保持压力0.35 MPa,积液密度为980 kg/m³,管道材料弹性模量206 000 MPa,管道粗糙度为0.3 mm。

根据式(8)可知,压力波速为:

$$a = \frac{1}{\sqrt{\rho_{\text{气}}\left(\frac{D}{Ee} + \frac{1}{K}\right)}} = \sqrt{\frac{K}{\rho_{\text{气}}}} \cdot \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{KD}{Ee}}} = 273\text{ m/s}$$

根据式(23)可知,气体介质推动积液运动,当液体速度达到 $v = \frac{\rho_{\text{气}}a}{2\rho_{\text{液}}} = 1.23\text{ m/s}$ 时撞击弯头冲击力最小

$$F_{x_{\min}} = \left(p_0 + \rho_{\text{气}}av_0 - \frac{\rho_{\text{气}}^2a^2}{4\rho_{\text{液}}} \right) A = 4\,126\text{ N};$$

在不考虑摩擦阻力的情况下,如果水平管道足够长,则根据式(25)得到液柱的最大速度为

$$v_{\max} = v_0 + \frac{p_0 - p'}{\rho_{\text{气}}a} = 67\text{ m/s}$$

由式(26)可知,积液对弯头的最大推力为

$$F_{x_{\max}} = p'A + \rho_{\text{液}}A\left(v_0 + \frac{p_0 - p'}{\rho_{\text{气}}a}\right)^2 = 37\,882\text{ N}$$

如果考虑管道给积液的沿程摩擦阻力,依据式(32)液柱的最大速度则为:

$$\begin{aligned} v_{\max} &= \frac{-\rho_{\text{气}}aA + \sqrt{(\rho_{\text{气}}aA)^2 + \frac{l}{5D} \cdot \left(\frac{\varepsilon}{D}\right)^{0.23} [\rho_{\text{气}}av_0 + (p_0 - p')]A}}{\frac{l}{10D} \cdot \left(\frac{\varepsilon}{D}\right)^{0.23}} \\ &= 38\text{ m/s} \end{aligned}$$

由式(33)得到弯头受到的介质推力为

$$F_{x_{\max}} = [p_0 + \rho_{\text{气}}a(v_0 - v_{\max}) + \rho_{\text{液}}v_{\max}^2]A = 14\,847\text{ N}$$

由式(34),积液速度达到最大时,摩擦阻力大小为

$$f_{\max} = 0.05\left(\frac{\varepsilon}{D}\right)^{0.23} \cdot \frac{l}{D} \cdot v_{\max}^2 = 557\text{ N}$$

可以看出,管壁给大量积液的摩擦阻力对计算结果影响异常显著,式(25)、(26)没有考虑摩擦阻力的影响,过高地估计了管道积液的最大速度和介质施加给弯头的最大推力。通过计算可以看出,尽管是1根4 in.的管道,介质流速只有0.21 m/s,当管道足够长的时候,积液的速度仍可能达到38 m/s;如果我们假定通入气体介质的流速为30 m/s,那么计算出来的积液最高速度为48 m/s。由此说明,对于大量积液的管道而言,通入气体的速度对于积液的影响并没有想象的那么大,因为气体有很强

压缩性,积液与管壁之间有很大的摩擦阻力,以至于积液速度对通入气体的速度敏感度大大降低。因此可知,积液前后的压差对流速有更大影响,在工程应用中可以通过系统整体升压来减小积液前后的压差,有效降低积液速度。

此外,对于相同参数下的6 in.管道,计算得到的弯头受力将接近60 000 N。虽然计算模型相对理想化,但这样的结果在设计中应引起重视,特别是对于长输管道,必要时应采取减小积液的影响,或加强管道固定支架及基础结构的设计。

4 结论

a)在管道刚刚通入介质时,介质在流动过程中施予管道支架的载荷与上游段弯头的受力相同。管道水平段充满均匀介质之后,两端弯头均始终受到介质冲击力,大小相等,方向相反,此时管道支架不再受到介质冲击力的作用。因此对于弯头来讲,介质的冲击力是持续载荷,对于支架结构而言,介质的冲击力是偶然载荷。

b)通过简例计算可知,积液速度对管道推力有非常重要的影响。对于大口径管道而言,通常只有少量积液,影响积液速度的主要因素是气体流速;大量积液一般只会存在于小口径管道中,除了气体流速的影响外,更多影响积液速度的是压差。大多数情况下积液的流速变化很难精确计算,需要大量的试验和进一步理论研究,在此仅作了部分探索性的理论分析和研究工作。

c)在管中存有大量积液的情况下,液柱在气体介质的挤压和推动下,先做初速度为0、加速度减小的加速运动,当加速度减小到0时,积液前后压差与摩擦阻力平衡,假设管道足够长,积液速度达最大值,此后积液将在摩擦阻力与压差的平衡作用下匀速运动。积液越多,液体的摩擦阻力越大,积液所能达到的最高速度就越小。在管道设计过程中,应尽量避免积液的产生,从工艺上避免危害发生。

d)此外,积液的运动形式也是柱塞流的一个单元模拟,可以依据气柱给液柱的推力影响分析对柱塞流进一步研究,多个液柱、气柱的排列影响,相当于多个流体压力波相互叠加。

参考文献:

- [1] 黄 坤,吴世娟,卢泓方,等.沿坡敷设输气管道应力分析[J]. 天然气与石油, 2012,30(4):1-4.
Huang Kun, Wu Shijuan, Lu Hongfang, et al. Analysis on Stress of Gas Pipeline Laid along Slope [J]. Natural Gas and Oil, 2012,30(4):1-4.
- [2] 沙晓东,陈晓辉,黄 坤,等.输气管道应力影响因素分析[J]. 天然气与石油, 2013,31(1):1-4.
Sha Xiaodong, Chen Xiaohui, Huang Kun, et al. Analysis on Factors Affecting Stress in Gas Pipeline [J]. Natural Gas and Oil, 2013,31(1):1-4.
- [3] 唐永进.压力管道应力分析[M].北京:中国石化出版社, 2010.
Tang Yongjin. Stress Analysis of Pressure Pipeline[M]. Beijing: China Petrochemical Press Co., Ltd., 2010.
- [4] 赵 昕,张晓元,赵明登,等.水力学[M].北京:中国电力出版社,2011.
Zhao Xin, Zhang Xiaoyuan, Zhao Mingdeng, et al. Hydraulics [M]. Beijing: China Electric Power Press, 2011.
- [5] 陈卓如,金朝铭,王洪杰,等.工程流体力学[M].北京:高等教育出版社,2004.
Chen Zhuoru, Jin Chaoming, Wang Hongjie, et al. Engineering Fluid Mechanics[M]. Beijing: Higher Education Press, 2004.
- [6] 谭天恩,窦 梅,周明华,等.化工原理[M].北京:化学工业出版社,2009.
Tan Tianen, Dou Mei, Zhou Minghua, et al. The Principle of Chemical Engineering [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2009.