基于减压波预测模型的 超临界 CO,管道韧性止裂方法研究

股布泽1 张对红2 胡其会1 闫 峰2 黄维和3 李玉星1 鞠世雄4

[1. 中国石油大学(华东)储运与建筑工程学院,山东省油气储运安全重点实验室;
 2. 国家石油天然气管网集团有限公司科学技术研究总院分公司; 3. 中国石油天然气股份有限公司;
 4. 国家石油天然气管网集团有限公司油气调控中心]

摘要 管道运输是碳捕集、封存与利用(Carbon Capture Utilization and Storage, CCUS)的重要环节, CO2管道可能因为腐蚀穿孔或第三方破坏导致泄漏。由于 CO2的特殊物性,在泄漏发生后产生相变使泄漏 口附近形成较高的压力平台,这会导致 CO2管道的裂纹持续扩展问题。所以本文基于等熵假设结合均相流 模型和 GERG2008 状态方程建立了减压波模型,结合采用 BTC 和 DNV 止裂模型,开展了不同管径、管材 等级的 CO2管道止裂韧性计算评估。结果表明:同一压力下,裂纹扩展速度随着管材等级升高逐渐变大, 管道韧性止裂所需的夏比能提高。在同一管径下,管材等级越高,DNV 模型与 BTC 模型设计的管道最小壁 厚的差值越小。韧性止裂所需最小夏比能的差值随着管材等级的升高而升高,即随着管材等级的升高,两 种模型在管道韧性止裂所需的最小夏比能预测结果偏差越来越大。仅靠壁厚设计准则在大管径下止裂效果 表现较好,小管径难以止裂。基于此,本文结合两种止裂韧性评估模型的优缺点和适用性,建立了一种 CO2管道韧性止裂参数计算和优化方法,此方法可以直接为 CO2管道设计的壁厚计算、管材选择和安全维 护提供建议。同时也为管材的研发和压力、温度及杂质含量等工艺参数的优化提供参考。

关键词 超临界 CO2管道;减压波预测;韧性止裂;止裂方法

在全球变暖的严峻形势下,世界主要各国均 制定了碳减排计划。在众多碳减排技术中,碳捕 集、封存与利用(Carbon Capture Utilization and Storage, CCUS)是目前能够最大程度减少碳排放 并合理利用捕集碳的重要技术手段。管道运输是 工业规模、长距离输送 CO₂的最安全和最经济的 方式。CO₂管道输送可以采用气态、液态、密相 和超临界态等不同相态,其中超临界态/密相 CO₂具有密度高类似液体,黏度低类似气体的物 理性质,因此超临界/密相是 CO₂管道运输的首 选状态。

超临界/密相 CO₂管道为维持单一相态,管 道持续高压运行,使得管材对缺陷敏感,一旦发 生腐蚀壁面减薄、穿孔或第三方破坏过程引起泄 漏乃至断裂。与天然气不同,CO₂的焦汤效应较 强,发生泄漏之后在泄漏口周围会产生低温,最 低温度可达-78℃,远低于常见碳钢管道的韧脆 转变温度,造成管道脆断。除此之外,CO₂的减 压特性与天然气也大不相同,超临界 CO₂减压至 临界点后会持续相变,导致其减压曲线产生平 台,为裂纹扩展持续提供能量导致管道无法依靠 自身韧性止裂。目前我国 CCUS 行业发展迅速, 国内多条工业规模 CO₂管道正在设计建设,亟需 明确 CO₂减压特性和裂纹扩展机理,建立 CO₂减 压波预测模型和管道韧性止裂模型,为 CO₂管道 设计提供理论支撑。

国外的 CCS 起步较早,针对 CO,管道泄漏 及止裂已开展一定的研究。挪威、英国、意大利 等国家都开展过工业规模的全尺寸 CO,爆破实 验,主要有: COOLTRANS 项目、CO₂QUEST 项 目、CO₂PipeHaz项目、挪威船级社(DNV)项目, 掌握了大量的大规模 CO,全尺寸爆破实验数据, 建立了《DNVGL-RP-F104》和《BS EN 14161》等 行业标准。理论方面, Maxey 在 Battelle 实验室 取得的管道延性断裂试验数据基础上, 拟合出了 断裂扩展速度计算公式,与减压波速度计算公式 构成 Battelle 双曲线法,但 BTC 双曲线模型预测 高压 CO。管道韧性止裂时存在一定不确定性且不 保守。为此, DNV 基于 BTC 双曲线模型和对多 次大规模全尺寸 CO,管道爆破试验进行观察和研 究,建立了一套经验止裂评估方法,并在 DNV GL-RP-F104 2021 版本中进行了公布。但由于 现有全尺寸爆破试验数据有限,DNV 方法的适 用范围有限,具有一定的局限性。

相较于国外,国内的CO,研究起步较晚,尤 其全尺寸爆破试验较为缺乏。大连理工大学喻健 良团队依托欧盟第七框架国际合作项目支持,在 2015 年建立了 Φ273mm×20mm、管长 258m 的大 型工业规模实验管道,开展了不同相态 CO,泄漏 减压特性、垂直放空特性实验。实现了针对管内 同一位置、不同径向高度的温度测量,发现了泄 漏过程中 CO,减曲线存在复杂阶跃变化和管内同 一截面上 CO。流体保持"上热下冷"温度规律。 中国石油大学(华东)李玉星团队建立了两套 CO,管道实验装置,其规格分别为: DN250 壁 厚、12mm 管长 12m 和 Ф21 × 3mm、管长 14.85m, 开展了不同相态 CO, 泄漏减压波、泄 漏扩散规律、节流特性等方面的实验研究,建立 了泄漏减压模型和减压波预测模型, 计算结果与 实验吻合较好。

总的来看,国内外虽然开展了一定量的大规 模试验,理论方面关于 CO₂物性相特性和减压特 性等也有了一定研究基础,但由于含杂质后的 CO₂的物性和相特性更加复杂,关于 CO₂管道减 压波特性和发生泄漏后的裂纹止裂的研究仍然不 足,且目前并没有一个体系完整的 CO₂管道韧性 止裂计算评价方法。有鉴于此,本文建立了一种 基于减压波预测的管材韧性止裂计算和优化方 法,可以为 CO₂管道壁厚设计、管材选择等提供 技术支持。

1 CO₂减压波预测模型

1.1 状态方程及热物性计算

CO₂流体状态及相关热物理性质计算是减压 波传播速度预测的基础。根据文献调研,目前的 减压波预测模型采用的状态方程有 BWRS、PR、 SRK、SW 和 GERG - 2008 等状态方程。其中 Botros 等人针对不同状态方程对于 CO₂管道减压 波特性计算的适用性开展了实验研究,结果表明 在不同相态下 GERG—2008 状态方程较其他状态 方程对于减压波特性的预测与实验值更为接近, 精度更为准确。Elshahomi 等人的研究表明 GERG—2008 状态方程能够准确计算 CO₂混合物 流体的相关热物理性质,并且满足工程应用的 需求。

GERG—2008 状态方程是基于多流体近似显

式的约化亥姆霍兹自由能,通过将大量实验得到的不同组分之间的回归系数拟合到立方型方程中,通过混合物的衍生关联式来计算含杂质 CO₂ 流体的物理性质:

 $\alpha(\delta, \tau, \overline{x}) = \alpha^{\circ}(\rho, T, \overline{x}) + \alpha^{r}(\delta, \tau, \overline{x}) (1)$

其中: α 为真实气体的约化吉布斯自由能; α° 为理想气体的约化吉布斯自由能; α° 为残余 的约化吉布斯自由能; \bar{x} 为摩尔组分,%; T 为温 度, K; ρ 为密度, kg/m³。

理想的混合气体部分的约化吉布斯自由 能为:

$$\alpha^{o}(\rho, T, \bar{x}) = \sum_{i=1}^{N} x_{i} \alpha^{r}_{oi}(\delta, \tau)$$

$$\left[\alpha^{o}_{oi}(\rho, T) \pm \ln x_{i}\right]$$
(2)

真实的混合气体残余部分的约化吉布斯自由 能力。

能为:

$$\boldsymbol{\alpha}^{\mathrm{r}}(\boldsymbol{\delta}, \ \boldsymbol{\tau}, \ \boldsymbol{\bar{x}}) = \sum_{i=1}^{N} x_{i} \boldsymbol{\alpha}_{\mathrm{oi}}^{\mathrm{r}}(\boldsymbol{\delta}, \ \boldsymbol{\tau}) + \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^{N} x_{i} x_{j} F_{ij} \boldsymbol{\alpha}_{ij}^{\mathrm{r}}(\boldsymbol{\delta}, \ \boldsymbol{\tau})$$
(3)

其中: $\delta = \frac{\rho}{\rho_r(\bar{x})}$ 为无量纲的混合密度; $\tau = (\bar{x})$

为无量纲的混合温度。

1.2 声速计算模型

流体的当地声速取决于流体的物理性质和其 所处的状态。当管道发生泄漏时,由于 CO₂具备 可压缩流体特性,此时管道内持续保持较高压 力,管道内流体为超临界相、密相或液相等单一 相态流动,当地声速的计算公式(4)。

$$a = \left(\frac{\partial P}{\partial \rho}\right)_{s}^{0.5} \tag{4}$$

式中, a 为流体的当地声速, m/s; P 为流体压力, MPa; ρ 为流体密度, kg/m³。

因为 CO₂具有极强的焦-汤效应,所以随着 管道泄漏管道内的温度压力逐渐降低,直到 CO₂ 的温度压力接近临界点或相包线附近,此时 CO₂ 可能从超临界相、密相或液相等单相区进入到气 液共存的两相区。Flatten 等提出了气液两相区流 体当地声速计算模型可用来进行两相区的 CO₂流 体声速计算公式(5)、式(6)。

$$a^{-2} = a_p^{-2} + \frac{\rho}{T} \frac{C_{p,g} C_{p,l} (\zeta_g + \zeta_l)^2}{C_{p,g} + C_{p,l}}$$
(5)

$$a_p^{-2} = \rho \left(\frac{\varphi_g}{\rho_g a_g^2} + \frac{\varphi_l}{\rho_l a_l^2} \right)$$
(6)

其中, *a* 为气液两相区流体的当地声速, m/ s; a_g 为气液两相区中气相流体的当地声速, m/ s; a_l 为气液两相区中液相流体的声速, m/s; a_p 为压力平衡状态流体的当地声速, m/s; ρ 为流 体平均密度, kg/m³; ρ_g 为气相密度, kg/m³; ρ_l 为液相密度, kg/m; *T* 为流体温度, K; $C_{p,g}$ 为 气相定压比热容, kJ/(kg·K); $C_{p,l}$ 为液相定压 比热容, kJ/(kg·K); φ_g 为气相体积分数; φ_l 为液相体积分数。

其中, ζ_{g} 、 ζ_{l} 分别由式(7)和式(8)确定。

$$\zeta_{g} = \left(\frac{\partial T}{\partial P}\right)_{sg} \tag{7}$$

$$\zeta_g = \left(\frac{\partial T}{\partial P}\right)_{sl} \tag{8}$$

1.3 减压波传播速度计算

减压波传播速度主要由管道内流体的当地声 速和泄漏口流体流速决定,减压波传播速度通常 由式(9)确定:

$$w = a - u \tag{9}$$

其中, w 为减压波传播速度, m/s; a 为流体的当地声速, m/s; u 为泄漏口流体流速, m/s;

当管道断裂后,管道内的 CO₂流体从泄漏口 流向大气。在管道发生断裂的瞬间,泄漏口的流 体出流速度为 0。随着泄漏过程的进行, CO₂流 体的出流速度由式(10)确定。

$$u = \left[\int_{p_i}^p \frac{a}{p} d\rho\right]_s \tag{10}$$

为进行数值计算,需将式(10)转换为微分 方程并进行离散,得到管道泄漏处流体流速的表 达式,见式(11)。

$$u_i = u_{i-1} + \frac{p_{i-1} - p_i}{a_i \rho_i}$$
(11)

1.4 模型计算方法

综合式(5)、式(9)和(11),当管道泄漏口 处 CO₂流体处于不同相态时,当地声速的计算方 式也不同,因此需要先对相态进行判断,采用合 适的求解方法。本文采用 MATLAB 软件对含杂 质 CO₂管道减压波传播特性预测模型进行编程计 算求解。模型计算求解思路:首先根据管道断裂 时的初始温度 T_0 、初始压力 P_0 ,计算熵值 s_0 (T_0 、 P_0)、初始声速 a_0 ;其次,选择合适的温 度梯度 ΔT ,每下降 ΔT ,对此温度 T_1 下的压力 P_1 进行试算,保证此状态下的熵值 $s_1(T_1, P_1)$ 与 初始熵值 $s_0(T_0, P_0)$ 相等,则输出压力 P_1 及泄漏口流速 u_1 。每进行一次温度、压力输出,进行一次 CO₂流体相态判断,根据相态选择合适的 公式对当地声速 a_1 进行计算。根据式(9)计算出 减压波传播速度 w_1 ,当计算的减压波传播速度 小于等于零时,程序终止。模型计算框图如图 1 所示。



2 韧性止裂模型

2.1 BTC 双曲线止裂模型

Battelle 双曲线止裂模型是由 Maxey 在 Battelle 实验室取得的管道延性断裂试验数据基础上拟合出的断裂扩展速度计算公式,并与减压 波速度计算公式构成,其原理如图2所示。当减 压波速大于裂纹扩展速度时,裂纹尖端压力下降 迅速,驱动裂纹扩展的能量迅速降低,管道可以 韧性止裂。反之,管道裂纹会持续扩展。

根据 BTC 双曲线模型,当管道内压力降至

止裂压力时,裂纹停止扩展,止裂压力由式 (12)确定:

$$P_a = -\frac{2\sigma_a t}{D_w} \tag{12}$$

式中, P_a 为止裂压力, MPa; σ_a 为止裂应 力, MPa; t 为管道壁厚, mm; D_w 为管道外 径, mm。

式(12)中止裂应力 σ_a 的计算方法认为止裂 是静态行为,将开裂过程进行反推,通过开裂方 程和裂纹有效长度的一半计算得出,止裂应力由 式(13)确定。

$$-\sigma_a = \frac{2\overline{\sigma}}{M_T \pi} \arccos\left(\exp\frac{-12.5\pi CVNE}{24_{\sigma}^{-2}a_{eq}}\right) \quad (13)$$

式中, $\overline{\sigma}$ 为流动应力, MPa; M_T 为 Folias 因子, 通常取 3.3; *CVN* 为夏比冲击功, J; *E* 为 材料弹性模量, GPa; a_{eq} 为裂纹有效长度的一半, mm。

根据多次全尺寸实验结果,裂纹有效长度的 一半可是使用 3√*RT*来表示。根据管道裂纹止裂 压力和稳态管道韧性断裂扩展可得出裂纹扩展速 度计算公式,见式(14):

$$V_f = C \frac{\overline{\sigma}}{\sqrt{CV}} \left(\frac{P_d}{P_a} - 1\right)^{\frac{1}{6}}$$
(14)

式中, *C* 为经验长度, 通常回填管道取 0.275, 无回填管道取 0.379; *CV* 为单位面积夏 比冲击功, J/mm²; *P*_d为裂纹尖端压力, MPa。

由 BTC 双曲线止裂模型, 将管道泄漏后不 同压力下的减压波传播速度和裂纹扩展速度进行 对比,在管道泄压到止裂压力之前,减压波波速 一直大于裂纹扩展速度,管道的韧性才能满足止 裂要求。当减压波传播特性曲线与裂纹扩展曲线 相切时,管道止裂韧性或壁厚为管道依靠自身韧 性止裂的最小夏比能或最小壁厚。目前 BTC 双 曲线模型在天然气管道以及低压 CO₂管道韧性止 裂预测方面表现较好,可以为止裂设计提供参 考,但是在高压 CO₂管道韧性止裂预测方面偏差 较大。

2.2 DNV 评估模型

针对未修正的 BTC 双曲线模型预测高压 CO₂管道韧性止裂时存在一定不确定性且不保 守,挪威船级社(DNV)基于 BTC 双曲线模型和 多次全尺寸 CO₂管道爆破试验结果,建立了一套 经验止裂模型的评估方法如图 3 所示。



由图 3 可知, DNV 评估模型通过评价点(X, Y)的位置对管道韧性止裂能力进行预测, X 和 Y 由式(18)和(19)确定:

$$X = \frac{1000CV \times E}{\sigma^{-2} \times \sqrt{R \times t}}$$
(18)

$$Y = \frac{P \times D}{2t \times \overline{\sigma}} \tag{19}$$

式中, R 为管道外半径, mm; P 为裂纹尖 端压力,可以确定为 CO_2 管道组分与运行条件相 对应的饱和压力, MPa; $\overline{\sigma}$ 为流动应力, MPa; CV 为单位面积夏比冲击功, J/mm^2 ; E 为材料 弹性模量, GPa; t 为管道壁厚, mm。

根据评价点(X,Y)所在位置的区域来对管 道韧性止裂进行评估。由图 3 可知,DNV 评估 模型主要分为三个区域分别为:"预计扩展"、 "基于具体评价结果进行评估"和"基于小尺寸试 验评估"区域。其中处于基于具体评价结果评估 区的需要针对不同管道进行具体评价来证明止 裂;处于基于小尺寸试验评估区的 CO₂管道被认 为是可以依靠自身韧性完成止裂;相反处于预计 扩展区,如果没有外部止裂措施管道往往会持续 扩展,无法依靠自身止裂。因此,在采用 DNV 评估模型止裂评价方法进行 CO₂管道设计时,应 该使评价点(X,Y)处于"基于小尺寸试验评估" 区域。

3 止裂韧性计算及模型评价

裂纹扩展过程与 CO₂管道设计管材和尺寸参数息息相关。为了确定 CO₂管道依靠自身止裂的 韧性参数,首先需要按照强度设计准则对管道壁 厚进行计算:

$$t = \frac{PD_w}{2\sigma_s \varphi F \zeta} \tag{20}$$

式中: t 为钢管的壁厚, mm; P 为设计压力, MPa; D_{w} 为管道外径, mm; σ_{s} 为管材的最小屈服强度, MPa; F 为强度系数; φ 为焊缝系数; ζ 为温度折减系数。当温度小于 120℃时, 取值为 1。

相较于工业油气管道常采用 X70、X80 甚至 X90 等高等级钢材,工业规模 CO₂管道常用的管 材大多为 X52、X60 和 X65 等级的钢材,原因在 于其最低屈服强度较小在低温情况下止裂性能更 好。因此以 X52、X60 和 X65 钢材为例,管道设 计压力为 14 MPa,计算不同管道直径的 CO₂管 道依靠自身止裂的止裂韧性,CO₂流体组分及初 始状态见表 1,按照强度设计准则计算一级地区 的 CO₂管道最小壁厚见表 2。

表1 CO2流体组分及初始条件参数

名称	参数
组分	96%CO ₂ +2%N ₂ +2%H ₂
初始温度/℃	50
初始压力/MPa	14

编号	管材	管道外径/mm	强度设计最小壁厚/mm
1	X52		11. 5
2	X60	426	9. 98
3	X65		9.2
4	X52		13.72
5	X60	508	11.9
6	X65		10. 98

表 2 不同管道的最小壁厚

			
编号	管材	管道外径/mm	强度设计最小壁厚/mm
7	X52		16. 47
8	X60	610	14. 29
9	X65		13. 18

· . · .

图 4 所示为表 1 中 CO₂流体组分的减压波传 播特性曲线,由图可知,由于氢气的存在,含杂 质 CO₂流体的减压波平台较高,平台压力为 8.53MPa,初始减压波波速为 298.28m/s。



3.1 BTC 双曲线模型止裂韧性计算

根据 CO,流体的减压波传播特性曲线,在不 改变管道韧性的情况下,将不同等级钢材管道依 据强度设计计算的最小壁厚采用 BTC 双曲线模 型判断其能否依靠自身的韧性完成止裂。由图 4 所示, 以减压波平台压力 8.53MPa, 作为 BTC 双曲线模型饱和压力来对 CO。管道止裂韧性进行 预测。图 5~图 7 为 BTC 双曲线模型预测的三种 管道直径和不同等级管材的止裂韧性。由图5可 以看到, 管道外径 426mm 条件下, X60 和 X65 等级管道的裂纹扩展曲线均与减压波传播曲线有 交点,不能依靠自身止裂,而 X52 管道可以依 靠自身韧性止裂;由图6可知,管道外径 508mm条件下,管材为 X65 等级的管道不能依 靠自身止裂, X52 和 X60 等级可以依靠自身止 裂:由图7可知,管道外径610mm条件下,三 种管道的裂纹扩展速度曲线与减压波传播特性曲 线没有交点,均可以依靠自身韧性止裂。

通过对图 5~图 7 进行综合分析发现,在同 一管道直径和依据强度设计最小壁厚的情况下, 不同等级管材的裂纹扩展曲线相互接近;同一压 力下,裂纹扩展速度随着管材等级升高逐渐变 大,裂纹扩展曲线向减压波传播特性曲线靠近, 且管道依靠自身止裂所需的止裂夏比能逐渐提 高。这是因为钢材的屈服强度与韧性是呈对立关 系,管材的等级越高,管材的最低屈服强度越 高,管道的韧性就越差,管道裂纹扩展的风险就 越大。通过对三个管径进行对比,可以发现在采 用强度设计的最小壁厚和止裂夏比能时,管道直 径越大,裂纹扩展曲线离减压波传播曲线越远, 管道止裂性能表现越好。

综上分析可知,当管道直径一致且采用强度 设计最小壁厚的情况下,管材等级越高,管道依 靠自身韧性止裂越困难,管材所需的止裂夏比能 越高。按 CO₂管道强度设计准则计算的止裂性能 在大管径情况下表现较好,在小管径条件下,如 果不进行优化很难止裂。







针对表 2 中编号为 2、3 和 5 的不能依靠自 身韧性进行止裂的管道进行优化。在确定最小壁 厚的前提下,通过增大管材止裂所需止裂韧性, 来使其裂纹扩展曲线与减压波传播曲线不相交, 如图 8 所示。不同管道的强度设计最小壁厚和采 用 BTC 模型优化后的止裂夏比能见表 3。





表 3	采用强度设计准则和 BTC 模型优化后的
	最小壁厚和止裂夏比能

编号	管材	管道直径/ mm	强度设计 最小壁厚/mm	BTC 模型优化后 止裂夏比能/J
1	X52		11.5	27.94
2	X60	426	9. 98	36. 2
3	X65		9.2	41. 2
4	X52		13. 72	33.44
5	X60	508	11.9	35.63
6	X65		10. 98	37.33
7	X52		16. 47	41. 5
8	X60	610	14. 29	42. 79
9	X65		13. 18	44. 74

3.2 DNV 评估模型止裂韧性计算

根据 CO₂流体的减压波传播特性曲线,将不 同管道在依据强度设计标准计算的最小壁厚和 BTC 双曲线模型计算的止裂夏比能,采用 DNV 评估模型判断其能否依靠自身的韧性完成止裂, 不同条件对应的编号如图 9-(a)所示。如图可 知,9种不同管道对应的 DNV 评估模型预测结 果评价点均处于"预计扩展"区域,且其 Y 值大 于 0.27。通过式(18)、式(19)可以知道,Y 值 与止裂夏比能无关,在不改变管道直径 D、管材 和输送压力 P 的情况下,只有通过增大管道壁 厚 t 来降低 Y 值;X 值与管材的止裂夏比能和壁厚可 以降低 X 值,使其评价点达到"基于小尺寸试验 评估"的依靠自身韧性止裂的区域。

通过对 9 种不同管道的壁厚和止裂夏比能进 行优化,使其达到满足 DNV 评估模型的止裂评 价条件的临界值。为了使 Y 值降低至"基于小尺 寸试验评估"区的上限为 0.27,即提高管道壁厚 t 为 DNV 评估模型中对应的最小壁厚。通过固定 最小壁厚值,增大止裂夏比能,使得 X 值平移 至"基于小尺寸试验评估"区域边界,此时为 DNV评估模型中对应的最小止裂夏比能,优化 后的管道最小壁厚及止裂韧性见表 4。由表可 知, DNV评估模型优化后的壁厚与止裂夏比能 较 BTC 双曲线模型均有提高,止裂夏比能有较 大提高。

通过对 BTC 与 DNV 模型所需止裂参数进行 对比,呈现出如下规律:在同一管径下,DNV 与 BTC 模型止裂所需管道最小壁厚的差值随着 管材等级的升高而降低,即管材等级越高,两种 模型预测的止裂所需最小壁厚越接近;在同一管 径下,DNV 与 BTC 模型止裂所需最小夏比能的 差值随着管材等级的升高而升高,即随着管材等 级越高,两种模型在针对管道止裂最小夏比能预 测方面的偏差越来越大。BTC 模型的止裂最小 夏比能预测值大多集中在100 J 以下、DNV 大多 集中在150 J 以上甚至更高。

DNV 评估模型优化后的评价点都在 *X* = 40、 *Y* = 0.27 处,如图 9-(b)所示,所有评价点均处 于"基于小尺寸试验评估"区域,满足 DNV 评估 模型评价标准,管道可以依靠自身韧性止裂。



表 4 DNV 模型优化后的最小壁厚和止裂夏比能

20

X

(a)优化前

30

编号	强度设计最小 壁厚/mm	BTC 模型 止裂夏比能/J	DNV 设计 壁厚/mm	DNV 模型 止裂夏比能/J
1	11.5	27.94	15.69	162. 1
2	9. 98	36.2	13.9	194. 25
3	9.2	41.2	12.97	215.7
4	13.72	33.44	18.57	193. 3
5	11.9	35.63	16. 58	231.65

编号	强度设计最小 壁厚/mm	BTC 模型 止裂夏比能/J	DNV 设计 壁厚/mm	DNV 模型 止裂夏比能/J
6	10. 98	37.33	15.46	257.22
7	16. 47	41.5	22.46	232. 12
8	14. 29	42. 79	19. 91	278.16
9	13. 18	44. 74	18. 57	308. 87

续表

0.5

0.4

0.3

0.2

0.1

0.0

0

根据具体评估

结果进行评估

10

3.3 模型对比

将满足 DNV 评估模型止裂预测条件的管道 最小壁厚和止裂夏比能代入 BTC 双曲线模型中, 对比两个模型在预测管道韧性止裂方面的不同, 如图 10 所示。由图可知,采用 DNV 评估模型参 数的裂纹扩展曲线比 BTC 模型的扩展曲线更远 离减压波传播曲线,止裂压力更高,裂纹扩展速 度更低,设计更为安全。由于 DNV 评估模型是 基于 BTC 双曲线模型和多次大规模全尺寸 CO₂ 管道爆破试验经验建立的,所以采用 DNV 评估 模型设计的管道止裂性能比采用 BTC 双曲线模 型的设计更保守,管道设计的止裂性能表现更 好。所以在满足 DNV 评估模型适用范围内,建 议用 DNV 评估模型对管道韧性止裂进行设计。



图 10 426 mm 管径 BTC 和 DNV 模型止裂预测表现对比

基于以上分析,形成了一种 CO₂管道管材止 裂韧性计算评价及优化方法。首先根据组分和初 始温度、压力通过含杂质 CO₂管道减压波传播特 性预测模型进行减压波传播特性预测,提取减压 波曲线的平台压力作为优化条件;根据管道设计 参数进行以强度设计标准的最小壁厚计算;将减 压波平台压力作为饱和压力和最小壁厚计算;将减 压波平台压力作为饱和压力和最小壁厚代入 BTC 双曲线模型进行止裂评估,计算满足管道依靠自 身韧性止裂条件的最小壁厚和最小止裂夏比能; 将 BTC 双曲线止裂模型计算的最小壁厚和最小 止裂更比能参数代入 DNV 评估模型中重新进行 止裂评价,得出满足 DNV 韧性止裂条件的最小 壁厚和最小止裂夏比能。

4 结论

本文基于含杂质 CO,流体减压波预测模型,

并结合 BTC 双曲线模型和 DNV 评估模型,建立 了一种含杂质 CO₂管道止裂韧性计算优化方法, 得到的主要结论如下:

(1)在采用强度设计最小壁厚的情况下,同一管道直径不同等级管材的裂纹扩展曲线相互接近;同一压力下,裂纹扩展速度随着管材等级升高逐渐变大,裂纹扩展曲线逐渐向减压波传播特性曲线靠近,且管道韧性止裂所需的夏比能提高。

(2) 在采用强度设计准则和止裂夏比能的情况下,管道直径越大,裂纹扩展曲线离减压波传播特性曲线越远,管道止裂性能表现越好;采用 CO₂管道强度准则进行设计的管道止裂性在大管 径情况下表现较好,但在小管径条件下如果不进 行优化很难止裂。

(3) 在同一管径下, DNV 模型与 BTC 模型 设计的管道最小壁厚的差值随着管材等级升高而 降低, 即管材等级越高, 两种模型预测的止裂所 需最小壁厚越接近; 而 DNV 模型与 BTC 模型止 裂所需最小夏比能的差值随着管材等级的升高而 升高, 即随着管材等级的升高, 两种模型在针对 管道止裂最小夏比能预测方面的偏差越来越大;

(4) BTC 模型的止裂最小夏比能预测值大多 集中在 100 J 以下、而 DNV 模型大多集中在 150 J 以上甚至更高。DNV 评估模型设计的管道止裂 性能比采用 BTC 双曲线模型的设计更为安全保 守,管道设计的止裂性能表现更好。进行 CO2管 道止裂韧性计算时,可先采用强度设计计算壁 厚,利用 BTC 模型评价并优化得到韧性止裂所 需最小夏比能,然后利用 DNV 模型进一步评价 并优化管材的止裂韧性,最终得到满足 DNV 韧 性止裂条件的最小壁厚和最小止裂夏比能。

参考文献

- [1] 邹才能, 薛华庆, 熊波, 等."碳中和"的内涵、创 新与愿景[J]. 天然气工业, 2021, 41(08): 46-57.
- [2] 胡其会,李玉星,张建,俞欣然,王辉,王武昌,等."双碳"战略下中国 CCUS 技术现状及发展建议
 [J].油气储运,2022,41(04):361-371.
- [3] Wang D, Zhang Y D, Adu E, et al. Influence of dense phase CO₂ pipeline transportation parameters [J]. International Journal of Heat and Technology, 2016, 34(3): 479-484.
- [4] 黄维和, 宫敬, 王军. 碳中和愿景下油气储运学科的任务[J]. 油气储运, 2022, 41(06): 607-613.

油气智能化建设篇

- [5] 黄维和,李玉星,陈朋超.碳中和愿景下中国二氧 化碳管道发展战略[J].天然气工业,2023,43(7): 1-9.
- [6] 李玉星,滕霖,王武昌,等.不同相态管输 CO₂ 的 节流放空实验[J].天然气工业,2016,36(10): 126-136.
- [7] 李顺丽,李玉星,赵青,等. 纯 CO₂ 的节流特性 [J]. 天然气工业, 2015, 35(08): 93-98.
- [8] 赵亮, 邹鹏, 王飞宇, 等.回火对 42CrNiMo6 钢韧 脆转变温度的影响[J]. 热处理技术与装备, 2021, 42(02): 17-20.
- [9] 李玉星, 王财林, 胡其会, 等. 含杂质超临界 CO₂ 管道减压波波速的预测模型[J]. 油气储运, 2021, 40(09): 1027-1032.
- [10] 陈磊, 闫兴清, 胡延伟, 等, 等. 二氧化碳管道意 外泄漏减压过程的断裂控制研究进展[J]. 化工进 展, 2022, 41(03): 1241-1255.
- [11] Barnett J, Cooper R. An operator's erspective on fracture control in dense phase CO₂ pipelines [C]. Calgary: Proceedings of 2016 11th International Pipeline Conference, 2016.
- [12] Porter R T J, et al. Techno-economic assessment of CO₂ quality effect on its storage and transport: CO2QUEST: An overview of aims, objectives and main findings [J]. International Journal of Greenhouse Gas Control, 2016, 54: 662-681.
- [13] Woolley R M, Fairweather M, Wareing C J, et al. CO2PipeHaz: quantitative hazard assessment for next generation CO₂ pipelines [J]. Energy Procedia, 2014, 63: 2510-2529.
- [14] Cosham A, Jones D G, Armstrong K, et al. Ruptures in Gas Pipelines, Liquid Pipelines and Dense Phase Carbon Dioxide Pipelines [C] 2012 9th International Pipeline Conference. 2012.
- [15] Ahmad M, Lowesmith B, Koeijer G D, et al. COSHER joint industry project: large scale pipeline rupture tests to studyCO₂ release and dispersion [J]. Int. J. Greenh. Gas con, 2015, 37: 340–353.
- [16] Maxey W A. Long shear fractures in CO₂ lines controlled by regulating saturation, arrest pressures [J]. Oil & Gas Journal, 1986, 84(31): 558–583.

- [17] 喻健良,朱海龙,郭晓璐,等.超临界 CO₂管道减 压过程中的热力学特性[J].化工学报,2017,68 (09):3350-3357+3645.
- [18]喻健良,刘长远,闫兴清,等.高压超临界 CO2管 道泄漏扩散灾害模拟[J].安全与环境学报,2022, 22(03):1495-1502.
- [19] Cao Q, Yan X Q, Liu S R, et al. Temperature and phase evolution and density distribution in cross section and sound evolution during the release of dense CO₂ from a large-scale pipeline[J]. International Journal of Greenhouse Gas Control, 2020(96): 103011.
- [20] 赵青.含杂质 CO₂不同相态管输节流及减压特性研究[D].青岛:中国石油大学(华东), 2015.
- [21] 顾帅威,滕霖,李玉星,等,含杂质气态 CO₂管道 减压波传播特性[J],石油化工,2018,47(07): 689-695.
- [22] Gu S W, Li Y X, Teng L, et al. A new model for predicting the decompression behavior of CO₂ mixtures in various phases [] J] . Process Safety and Environmental Protection, 2018, 120: 237-247.
- [23] Botros K K, Geerligs J, Rothwell B, et al. Measurements of Decompression Wave Speed in Binary Mixtures of Carbon Dioxide and Impurities [J]. Journal of Pressure Vessel Technology, 2016, 139(2).
- [24] Elshahomi A, Lu C, Michal G, et al. Decompression wave speed in CO2 mixtures: CFD modelling with the GERG-2008 equation of state [J]. Applied Energy, 2015, 140: 20-32.
- [25] Kunz O, Wagner W. The GERG—2008 Wide-Range Equation of State for Natural Gases and Other Mixtures: An Expansion of GERG—2004[J]. Journal of Chemical & Engineering Data, 2012, 57 (11): 3032-3091.
- [26] Flatten T, Lund H. Relaxation two-phase flow models and the subcharacteristic condition [J]. Mathematical Models & Methods in Applied Sciences, 2011, 21 (12): 2379-2407.
- [27] Maxey W A. Long shear fractures in CO2 lines controlled by regulating saturation, arrest pressures [J]. Oil & Gas Journal, 1986, 84(31): 558–583.