

DOI:10.11918/202003024

平均化屈服准则及其在管道失效解析中的应用

章顺虎, 李寅雪, 姜兴睿, 邓磊, 田文皓

(苏州大学 沙钢钢铁学院, 江苏 苏州 215021)

摘要: 为得到准确可靠的管道爆破压力预测式, 建立一个新的屈服准则进行管道塑性失效分析. 为此, 通过对变角度边心距求积分中值, 建立一个随主应力分量线性变化的屈服准则, 称为平均化屈服准则. 该准则在 π 平面上的轨迹位于 Mises 圆内部, 几何形状为一个等边非等角的十二边形. 经与金属屈服的实验数据对比表明, 该准则的 Lode 参数改写式为相互连接的分段直线, 与实验数据吻合较好. 在此基础上, 利用该准则分析了管道受力时的应力、应变场, 通过考虑材料的应变硬化效应, 求出了管道爆破压力的解析解, 并讨论了影响管道爆破压力的主要参数. 通过与基于 Tresca 准则、Mises 准则和 TSS 准则得到的管道爆破压力以及实验数据的对比表明: 爆破压力预测值依赖于不同的屈服准则, 并且基于本文准则的结果对实验值具有更高的逼近程度. 此外, 研究还发现管道几何尺寸和应变硬化指数是决定管道爆破压力的关键因素, 管壁较厚或直径较小的管道可以承受更大的压力. 本文结果对于设计和评估油气管道具有重要的意义.

关键词: 管道; 屈服准则; 爆破压力; 硬化指数; 解析解

中图分类号: TG301

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2020)12-0126-06

Homogenization yield criterion and its application to pipeline failure analysis

ZHANG Shunhu, LI Yinxue, JIANG Xingrui, DENG Lei, TIAN Wenhao

(Shagang School of Iron and Steel, Soochow University, Suzhou 215021, Jiangsu, China)

Abstract: To obtain an accurate and reliable prediction formula of burst pressure for pipelines, a new yield criterion was proposed to analyze the plastic failure of pipelines. By calculating the integral mean value of the apothem with variable angle, a yield criterion in the form of principal stress components was established, which is called homogenization yield criterion. The locus of the criterion on the π -plane is located in the interior of the Mises circle, and the geometric shape is a dodecagon with equal sides and unequal angles. By comparing with the experimental data of metal yielding, it showed that the rewritten formula by the Lode parameters for this criterion was a connected piecewise line, which was in good agreement with the experimental data. Based on this criterion, the stress and strain fields of a pipeline were analyzed, and an analytical solution of burst pressure for the pipeline was obtained in consideration of the strain-hardening effect of the material. Then, the main parameters that influence the burst pressure were discussed. The experimental data was compared with the burst pressure obtained based on the Tresca, Mises, and TSS yield criteria. Results showed that the prediction results of burst pressure were dependent on different yield criteria, and the results based on the proposed criterion had higher approximation to the experimental data. In addition, it was found that the geometry size of the pipeline and the strain-hardening exponent were the main factors that determine the burst pressure, and the pipeline with thicker wall or smaller diameter could bear more pressure. The results of this paper are significant to the design and evaluation of oil and gas pipelines.

Keywords: pipeline; yield criterion; burst pressure; hardening exponent; analytical solution

屈服准则是判定材料在各种应力状态下是否发生塑性变形的依据, 也是求解材料成形外力必须依赖的条件. 合理的屈服准则对材料的选择、工艺参数的优化以及工程结构件的安全评定具有重要意义.

自 20 世纪以来, 研究者在屈服准则方面做了大量的研究, 并取得了许多重要的成果.

1776 年, Coulomb^[1] 提出一个屈服假定, 即当某平面上的剪应力超过该平面上材料的内聚力和摩擦力之和时, 材料就发生剪切屈服. 该准则也因此被称为 Coulomb 准则. 1864 年, Tresca^[2] 在冲裁和挤压实验的基础上, 提出了 Tresca 屈服准则. 该准则假定, 无论在何种应力状态下, 当物体内某一点的最大切应力达到某一定值时, 物体就发生屈服. 1913 年, von Mises^[3] 从数学的角度出发, 提出以偏差应力张

收稿日期: 2020-05-12

基金项目: 国家自然科学基金(52074187, U1960105, 51504165);

江苏省优秀青年基金(BK20180095);

苏州市重点产业技术创新项目(SYG201806);

国家级大学生创新创业训练计划(201910285036Z)

作者简介: 章顺虎(1986—), 男, 副教授, 硕士生导师

通信作者: 章顺虎, shzhang@suda.edu.cn

量的二次不变量作为判据,建立了 Mises 屈服准则. 该准则随后由 Hencky^[4]进行了物理解释,即当材料内部所积累的单位体积变形达到一个临界值时,材料发生塑性变形. 1950 年, Hill^[5]将适用于各向同性材料的 Mises 屈服准则推广到各向异性材料,提出了 Hill 屈服准则. 1952 年, Drucker 等^[6]在 Mises 屈服准则的基础上,考虑到静水压力对材料屈服的影响进而提出了 Drucker-Prager 屈服准则. 为了统一表征各屈服准则,文献[7]引入了三维应力空间的概念,描述了 Tresca 准则和 Mises 准则的几何特征. 1985 年,俞茂宏等^[8]提出了双剪应力(TSS)屈服准则,即假定当两个较大的主剪应力之和达到临界值时,材料发生塑性变形. 近年来,章顺虎^[9]在线性屈服准则的开发方面也取得了进展,提出了与 Mises 圆周长相等的线性屈服准则. 2015 年,杨凤等^[10]基于材料屈服时应力之间的关系,提出一种新的各向同性屈服准则. 该准则包含了应力幂次在 1~4 之间的各种形式. 2017 年,高江平等^[11]提出三剪应力统一强度理论,认为当作用于菱形十二面单元体上的 3 个主剪应力所组成的函数达到某一极值时,材料发生破坏.

以上屈服准则的开发为各类工程结构件的塑性失效分析提供了基础. 管道作为石油与天然气的输送媒介,在国民经济中发挥着至关重要的作用. 然而,近年来管道安全事故频发,已造成了严重的经济损失. 因此,进行管道失效分析具有重要意义. 管道塑性失效分析主要用于确定受力管道的极限承载能力,称为爆破压力. 国内外已有不少预测管道爆破压力的研究报道. 李灿明等^[12]采用 MY 准则求解 X80 管线钢爆破压力,得到逼近 Mises 结果的解析解. 文献[13-14]应用 Tresca 屈服准则和 Mises 屈服准则分别对管道的爆破压力进行了预测,研究发现 Tresca 准则的预测结果提供了管道爆破压力的下限,而 Mises 准则的预测结果会比实际数值偏高. 彭星煜等^[15]利用双剪应力(TSS)屈服准则得到的预测值是管道爆破压力的上限. 基于以上研究可见, Tresca 屈服准则通常给出下限解, TSS 屈服准则通常给出上限解; Mises 屈服准则给出相对偏高的结果.

根据上述信息,本文提出了一种新的线性屈服准则,旨在获得更加合理的预测结果,并分析不同屈服准则以及主要参数对管道爆破压力的影响.

1 三经典屈服准则

Tresca^[2]屈服准则的表达式为

$$f^{\text{Tresca}} = \sigma_1 - \sigma_3 = \sigma_s, \quad (1)$$

式中: σ_1 为第一主应力, σ_3 为第三主应力, σ_s 为屈服强度.

Tresca 屈服准则是一个线性准则,但由于只考虑了两个主应力分量,在描述金属材料的实际塑性变形方面存在不足,即通常会给出偏低的力学参数结果.

Mises^[3]屈服准则的表达式为

$$f^{\text{Mises}} = \frac{\sqrt{2}}{2} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2} = \sigma_s. \quad (2)$$

根据前人的研究和验证,大多数金属材料的塑性变形满足 Mises 屈服准则. 然而,由于其表达式的非线性,不便于复杂力学方程的联解计算.

TSS^[8]屈服准则的表达式为

$$\begin{cases} f_1^{\text{TSS}} = \sigma_1 - \frac{1}{2}(\sigma_2 + \sigma_3) = \sigma_s, \sigma_2 \leq \frac{1}{2}(\sigma_1 + \sigma_3); \\ f_2^{\text{TSS}} = \frac{1}{2}(\sigma_1 + \sigma_2) - \sigma_3 = \sigma_s, \sigma_2 \geq \frac{1}{2}(\sigma_1 + \sigma_3). \end{cases} \quad (3)$$

TSS 屈服准则也是一个线性的屈服准则,但与其他准则相比,它总是提供上限解.

上述公式在 π 平面上的屈服轨迹见图 1,其中 Mises 屈服准则的轨迹是一个圆, Tresca 屈服准则的轨迹是 Mises 圆的一个内接正六边形, TSS 屈服准则的轨迹是 Mises 圆的一个外切正六边形.

2 平均化屈服准则

2.1 数学表达式

为了线性逼近 Mises 圆,可以在 Tresca 屈服准则和 Mises 屈服准则之间构建一个十二边形. 在图 1 中, Mises 屈服准则的外切六边形(TSS)的边心距为 OB' , 内接六边形(Tresca)的边心距为 OF , 设线段 BF 上有一动点 E , 连接 $B'E$, 定义为本文即将开发的平均化屈服准则, OI 为其边心距.

在图中,设 OB' 与 OI 之间的夹角 $\angle B'OI$ 为 θ , 则当 $\theta = 0^\circ$ 时, $OI = OB'$; 当 $\theta = 30^\circ$ 时, $OI = OF$. 可见, OI 可在 OB' 与 OF 之间变化.

已知 Mises 圆的半径 $OB' = OD = \frac{\sqrt{6}}{3}\sigma_s$, 根据图中的三角函数关系,有变角度边心距 $f(\theta) = OI = OB' \cos \theta = \frac{\sqrt{6}}{3}\sigma_s \cos \theta$, 其中 $0^\circ \leq \theta \leq 30^\circ$. 由积分中值定理,可得平均化后的新边心距为

$$OI = \frac{1}{\frac{\pi}{6} - 0} \int_0^{\frac{\pi}{6}} \frac{\sqrt{6}}{3}\sigma_s \cos \theta d\theta = \frac{\sqrt{6}}{\pi}\sigma_s. \quad (4)$$

基于上式,可得

$$\begin{cases} \cos \theta = OI/OB' = \frac{3}{\pi}, \\ \cos \angle IOE = \cos(\frac{\pi}{6} - \theta) = 0.9754, \\ OE = OI/\cos \angle IOE = 0.7993\sigma_s. \end{cases} \quad (5)$$

Mises 屈服轨迹上的偏差矢量模长为

$$OD = OB' = \frac{\sqrt{6}}{3}\sigma_s \approx 0.8165\sigma_s. \quad (6)$$

平均化屈服准则的偏差矢量模长为

$$OE = 0.7993\sigma_s. \quad (7)$$

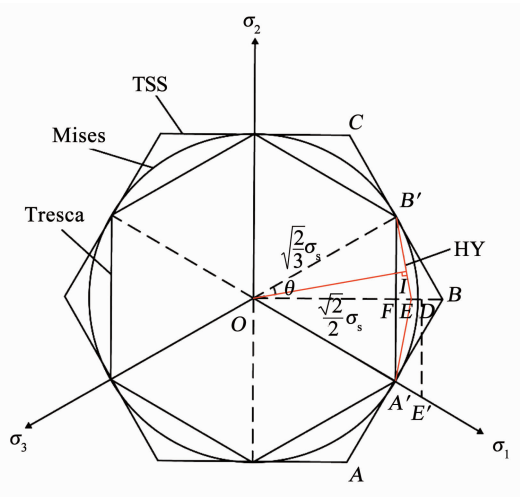


图1 π 平面上的屈服轨迹

Fig. 1 Different loci on π -plane

由此可见,平均化屈服准则的偏差矢量模长比 Mises 屈服准则的小,即 E 点在 F、D 之间. 在误差三角形 OBB' 内各种屈服准则的相互关系如图 2 所示.

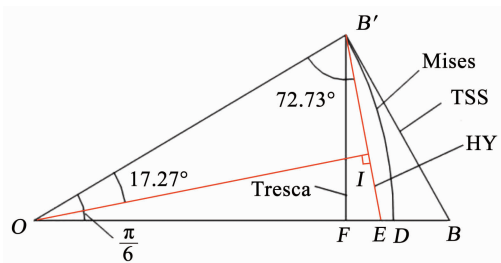


图2 平均化屈服准则在误差三角形内轨迹

Fig. 2 Locus of homogenization yield criterion in error triangle

下面建立直线 $A'E$ 、 $B'E$ 在 Haigh-Westgarrrd 空间中的应力方程. 图 3 为主应力分量在 π 平面上的投影,其中 E 点的应力状态为

$$\begin{cases} \sigma_1 = \frac{OE \times \sqrt{3}}{\sqrt{2} \cos 30^\circ} = 1.1304\sigma_s, \\ \sigma_3 = 0, \\ \sigma_2 = \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} = 0.5652\sigma_s. \end{cases} \quad (8)$$

假定直线 $A'E$ 满足如下方程:

$$\sigma_1 - a_1\sigma_2 - a_2\sigma_3 - c = 0, \quad (9)$$

则当材料发生屈服时有 $c = \sigma_s$ 、 $a_1 + a_2 = 1$,代入应力分量式(8)可得

$$a_1 = 0.231, a_2 = 0.769. \quad (10)$$

将式(10)代入式(9),可得 $A'E$ 的方程为

$$\sigma_1 - 0.231\sigma_2 - 0.769\sigma_3 = \sigma_s, \sigma_2 \leq \frac{1}{2}(\sigma_1 + \sigma_3). \quad (11)$$

同理,直线 $B'E$ 的方程可确定为

$$0.769\sigma_1 + 0.231\sigma_2 - \sigma_3 = \sigma_s, \sigma_2 \geq \frac{1}{2}(\sigma_1 + \sigma_3). \quad (12)$$

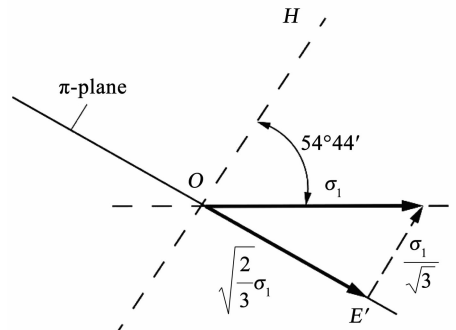


图3 σ_1 在 π 平面上的投影

Fig. 3 Trajectory of σ_1 on π -plane

式(11)和式(12)即为所提的屈服准则的数学表达式,它是主应力分量的线性组合. 因该准则的边心距 OI 由积分中值定理计算而得,故导出的准则称为平均化屈服准则,简称 HY 准则.

由图 2 可知, HY 准则的轨迹在 Mises 圆内,各顶角计算如下:

$$\begin{cases} \angle FB'E = 12.726^\circ, \\ \angle OB'E = 60^\circ + 12.726^\circ = 72.726^\circ, \\ \angle OEB' = 180^\circ - 30^\circ - 72.726^\circ = 77.274^\circ, \\ 2\angle OB'E = 145.452^\circ, 2\angle OEB' = 154.548^\circ. \end{cases} \quad (13)$$

由图 1 和式(13)表明, HY 准则的轨迹是在 Mises 圆内的等边非等角的十二边形,边长为 $0.4185\sigma_s$,6 个顶点在 Mises 圆上,内接点顶角为 145.452° ,另外 6 个顶点位于 Mises 圆的内侧,相距 $0.02\sigma_s$,顶角为 154.548° .

HY 准则的轨迹与 Tresca 屈服准则和 Mises 屈服准则轨迹之间的绝对和相对误差如下:

$$\begin{cases} \Delta_{AT1} = OE - OF = 0.0922\sigma_s, \\ \Delta_{AT2} = \frac{(OE - OF)}{OF} = 13\%, \\ \Delta_{AM1} = OE - OD = -0.0176\sigma_s, \\ \Delta_{AM2} = \frac{(OE - OD)}{OD} = -2.1\%. \end{cases} \quad (14)$$

式中: Δ_{AT1} 、 Δ_{AT2} 分别为 HY 准则和 Tresca 屈服准则之间的绝对误差和相对误差, Δ_{AM1} 、 Δ_{AM2} 分别为 HY 准则和 Mises 屈服准则之间的绝对误差和相对误差。

式(14)表明 HY 准则的轨迹位于 Tresca 屈服轨迹和 Mises 屈服轨迹之间, 并且更接近 Mises 屈服轨迹。

2.2 实验验证

在主应力状态为 $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3$ 时, 引入 Lode 参数来对比不同的屈服准则, Lode 参数表达式为^[16]

$$\mu_d = \frac{2\sigma_2 - \sigma_1 - \sigma_3}{\sigma_s} \quad (15)$$

将上式分别代入 Tresca 准则、Mises 准则、TSS 屈服准则和 HY 准则可得到它们含 Lode 参数的改写式如下:

Tresca:

$$\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{\sigma_s} = 1. \quad (16)$$

Mises:

$$\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{\sigma_s} = \frac{2}{\sqrt{3 + \mu_d^2}} \quad (17)$$

TSS:

$$\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{\sigma_s} = \begin{cases} \frac{4 + \mu_d}{3}, & -1 \leq \mu_d \leq 0; \\ \frac{4 - \mu_d}{3}, & 0 \leq \mu_d \leq 1. \end{cases} \quad (18)$$

HY:

$$\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{\sigma_s} = \begin{cases} \frac{2000 + 231\mu_d}{1769}, & -1 \leq \mu_d \leq 0; \\ \frac{2000 - 231\mu_d}{1769}, & 0 \leq \mu_d \leq 1. \end{cases} \quad (19)$$

基于以上改写式, 并结合已有的实验数据^[16-19], 可以得到图 4。

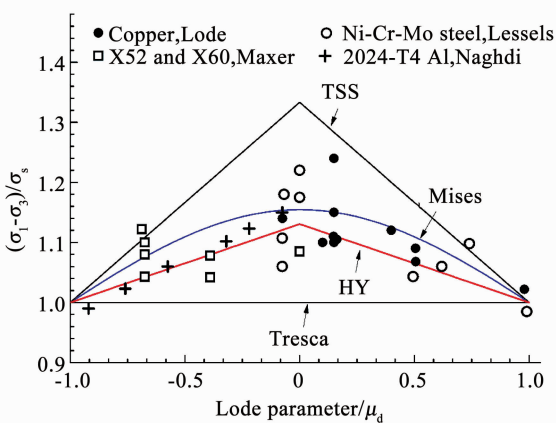


图 4 屈服准则实验结果对比

Fig. 4 Comparison of different yield criteria and experimental data

由图 4 可知, TSS 屈服准则位于最上侧, 提供了计算结果的上限, Tresca 屈服准则位于底部, 提供下限; HY 准则介于 TSS 准则与 Tresca 准则之间, 靠近 Mises 准则结果, 且与实验数据吻合较好, 提供了较合理的中间结果。

3 管道失效分析

为了证明新提出的 HY 准则的应用价值, 本节将 HY 准则应用于内压直管道的塑性失效分析。

3.1 爆破压力模型

对于受内压力的薄壁管, 其主应力分量表示为

$$\begin{cases} \sigma_1 = \sigma_\theta = \frac{pd}{2t}, \\ \sigma_2 = \sigma_z = \frac{pd}{4t}, \\ \sigma_3 = \sigma_r \approx 0. \end{cases} \quad (20)$$

式中: θ 、 z 、 r 分别为管道的周向、轴向和径向; d 和 t 是管道的内直径和初始壁厚; p 是管道的内部压力。

对于埋地管道, 轴向应变通常很小, 可看作 $\varepsilon_z = 0$ 。因此, 主应变分量为

$$\begin{cases} \varepsilon_1 = \varepsilon_\theta = \ln \frac{d}{d_0}, \\ \varepsilon_3 = \varepsilon_r = \ln \frac{t}{t_0}, \\ \varepsilon_2 = \varepsilon_z = 0. \end{cases} \quad (21)$$

式中 d_0 、 t_0 为管道的初始直径和初始壁厚。

当塑性变形发生时, 管线钢的应力-应变关系用以下幂函数表示^[14]:

$$\sigma = K\varepsilon^n; K = \left(\frac{e}{n}\right)^n \sigma'_u \quad (22)$$

式中: σ 、 ε 分别为单向拉伸实验时的真应力和真应变, n 为加工硬化系数, K 为在 $\varepsilon = 1$ 时的强度系数, σ'_u 为工程抗拉强度。

通过式(20)~(22)和失效条件 $\partial p / \partial \varepsilon = 0$, 则基于式(11)的爆破压力为

$$p_b^{\text{HY}} = 4 \left(\frac{1000}{1769} \right)^{n+1} \frac{t_0}{d_0} \sigma'_u \quad (23)$$

该式表明, 爆破压力是应变硬化指数、初始厚径比以及工程抗拉强度的函数。根据上述分析过程, 还可以导出基于 Tresca, Mises 和 TSS 屈服准则的爆破压力:

$$p_b^{\text{Tresca}} = 4 \left(\frac{1}{2} \right)^{n+1} \frac{t_0}{d_0} \sigma'_u, \quad (24)$$

$$p_b^{\text{Mises}} = 4 \left(\frac{1}{\sqrt{3}} \right)^{n+1} \frac{t_0}{d_0} \sigma'_u, \quad (25)$$

$$p_b^{\text{HY}} = 4 \left(\frac{2}{3} \right)^{n+1} \frac{t_0}{d_0} \sigma'_u. \quad (26)$$

上述爆破压力公式的一般形式表示为

$$p_b = 4\omega^{n+1} \frac{t_0}{d_0} \sigma'_u \quad (27)$$

式中 ω 是一个可变系数,取决于不同的屈服准则, $\omega = 1\ 000/1\ 769, 1/2, 1/\sqrt{3}$ 和 $2/3$ 分别对应于 HY, Tresca, Mises 和 TSS 准则.

3.2 实验验证和参数分析

为验证本文结果的正确性,将本文的归一化爆破压力 $p_n = p/(2t_0\sigma'_u/d_0) = 2\omega^{n+1}$ 与文献[20-22]中的实验结果进行比较,见图 5.

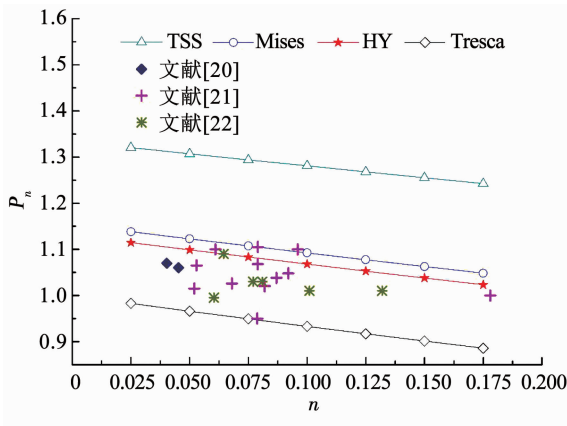


图 5 理论爆破压力与实验数据的比较

Fig. 5 Comparison of theoretical burst pressure and experimental data

由图 5 可知,基于 HY 准则得到的理论管道爆破压力介于 Tresca 与 TSS 准则预测的爆破压力之间,与 Mises 准则结果最为接近,且比 Mises 准则结果更接近实验结果.

不同硬化指数和厚径比对爆破压力的影响见图 6、7.

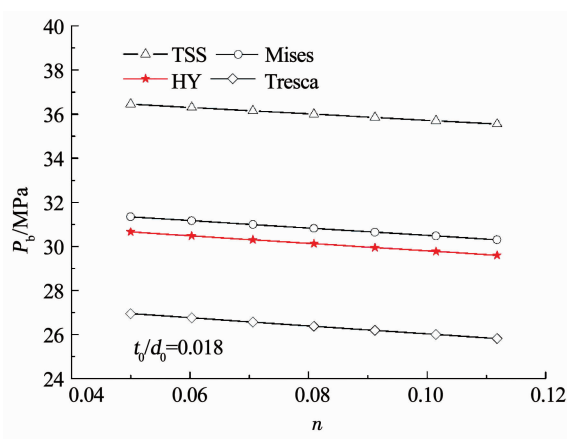


图 6 应变硬化指数对爆破压力的影响

Fig. 6 Effect of strain-hardening exponent on burst pressure

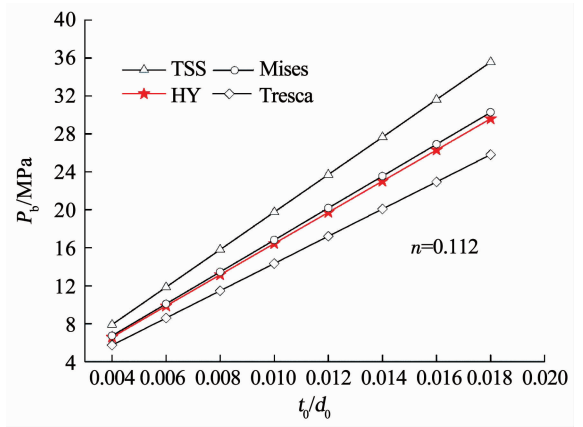


图 7 厚径比对爆破压力的影响

Fig. 7 Effect of t_0/d_0 on burst pressure

由图 6、7 可知,应变硬化效应和管道尺寸均对管道爆破压力产生影响,管道爆破压力随着应变硬化指数的增大而减小,随管道厚径比的增大而增大.

由于硬化指数取决于钢材生产工艺及化学成分,而厚径比又与使用条件及设计要求密切相关.因此设计管道时要综合考虑这两个关键参数,以避免管道失效.

4 结 论

1) 本文提出的平均化屈服准则是关于主应力分量的线性组合,它在 π 平面上的屈服轨迹为一个在 Mises 圆内的等边非等角十二边形,边长为 $0.418\ 5\sigma_s$,顶角分别为 154.548° 与 145.452° ,与 Mises 准则之间的最大误差不超过 2.1%. 通过对比实验数据发现,该屈服准则的预测结果与实验数据吻合较好,给出了较为合理的中间结果.

2) 将新提出的屈服准则应用于管道失效分析,结果表明,理论爆破压力取决于不同的屈服准则,并且本文结果与实验数据吻合较好.由此可见,本文采用 HY 准则进行管道失效分析的方法是可行的.

3) 对各种爆破压力的变化规律分析发现,随着应变硬化指数的增加,爆破压力减小;随着厚径比的增加,爆破压力增加,表明管壁较厚或直径较小的管道可以承受更大的压力.

参 考 文 献

[1] COULOMB C A. Essai sur une application des règles des maximis et minimis à quelques problèmes de statique relatifs à l'architecture [J]. Mémoires de l'Académie Royale des Sciences, 1776, 7: 343

[2] TRESCA H. Memoir on the flow of solid bodies under strong pressure [J]. Comptes-Rendus de l'Académie des Sciences, 1864, 59: 754

[3] VON MISES R. Mechanik der festen Körper im plastisch-deformablen Zustand [J]. Nachrichten von der Gesellschaft der Wissenschaften zu Göttingen, 1913, 4: 582

- [4] HENCKY H. Zur theorie plastischer deformationen und der hierdurch im material hervorgerufenen nachspannungen [J]. ZAMM-Zeitschrift für Angewandte Mathematik und Mechanik, 1924, 4(4): 323. DOI: 10.1002/zamm.19240040405
- [5] HILL R. The mathematical theory of plasticity [M]. London: Oxford University Press, 1950: 18
- [6] DRUCKER D C, PRAGER W. Soil mechanics and plastic analysis or limit design [J]. Quarterly of Applied Mathematics, 1952, 10(2): 157. DOI: 10.1090/qam/48291
- [7] 俞茂宏. 双剪理论及其应用 [M]. 北京: 科学出版社, 1998: 15
YU Maohong. Twin shear theory and its applications [M]. Beijing: Science Press, 1998: 15
- [8] 俞茂宏, 何丽南, 宋凌宇. 双剪应力强度理论及其推广 [J]. 中国科学: 数学, 1985, 12: 5
YU Maohong, HE Linan, SONG Lingyu. Twin shear stress strength theory and its extension [J]. Scientia Sinica: Mathematica, 1985, 12: 5
- [9] 章顺虎. 金属塑性成形力的线性化解法研究及应用 [D]. 沈阳: 东北大学, 2013
ZHANG Shunhu. Research on linearization analytical method of metal plastic forming forces and its applications [D]. Shenyang: Northeastern University, 2013
- [10] 杨凤, 万邵华, 刘军, 等. 一种新的各向同性金属材料屈服函数 [J]. 塑性工程学报, 2015, 22(6): 108
YANG Feng, WAN Shaohua, LIU Jun, et al. A new yield function on isotropic metals [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2015, 22(6): 108. DOI: 10.3969/j.issn.1007-2012.2015.06.019
- [11] 高江平, 杨华, 蒋宇飞, 等. 三剪应力统一强度理论研究 [J]. 力学学报, 2017, 49(6): 1322
GAO Jiangping, YANG Hua, JIANG Yufei, et al. Study of three-shear stress unified strength theory [J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2017, 49(6): 1322. DOI: 10.6052/0459-1879-17-081
- [12] 李灿明, 赵德文, 章顺虎, 等. MY 准则解析 X80 钢油气输送管道爆破压力 [J]. 东北大学学报 (自然科学版), 2011, 32(7): 964
LI Canming, ZHAO Dewen, ZHANG Shunhu, et al. Analysis of burst pressure for X80 steel pipeline with MY criterion [J]. Journal of Northeastern University (Natural Science), 2011, 32(7): 964
- [13] ZHU Xiankui, LEIS B N. Strength criteria and analytical prediction of failure pressures in line pipes [J]. International Journal of Offshore and Polar Engineering, 2004, 14(2): 125
- [14] ZHU Xiankui, LEIS B N. Average shear stress yield criterion and its application to plastic collapse analysis of pipelines [J]. International Journal of Pressure Vessels and Piping, 2006, 83(9): 663. DOI: 10.1016/j.ijpvp.2006.06.001
- [15] 彭星煜, 张鹏, 伍颖, 等. 基于双剪屈服条件的输油管道腐蚀剩余强度可靠性研究 [J]. 中国安全科学学报, 2008, 18(11): 149
PENG Xingyu, ZHANG Peng, WU Ying, et al. Study on the residual strength reliability of corroded oil pipeline based on double shear yield condition [J]. China Safety Science Journal, 2008, 18(11): 149. DOI: 10.3969/j.issn.1003-3033.2008.11.025
- [16] LODÉ W. Versuche über den Einfluß der mittleren Hauptspannung auf das Fließen der Metalle Eisen, Kupfer und Nickel [J]. Zeitschrift für Physik A Hadrons and Nuclei, 1926, 36(11): 913. DOI: 10.1007/BF01400222
- [17] LESSELLS J M, MACGREGOR C W. Combined stress experiments on a nickel-chrome-molybdenum steel [J]. Journal of the Franklin Institute, 1940, 230(2): 163. DOI: 10.1016/S0016-0032(40)90729-3
- [18] NAGHDI P M, ESSENBURG F J, KOFF W. An experimental study of initial and subsequent yield surfaces in plasticity [R]. Ann Arbor: The University of Michigan, 1957
- [19] MAXEY W A. Measurement of yield strength in the mill expander [C]//Proceedings of the Fifth Symposium on Line Pipe Research. Houston: [s. n.], 1974: 91
- [20] HILLENBRAND H G, LIESSEM A, KNAUF G, et al. Development of large-diameter pipe in grade X100 [C]//Proceedings of the Third International Conference of Pipeline Technology. Brugge: Belgium Press, 2000: 1263
- [21] PASLAY P R, CERNOCKY E P, WINK R. Burst pressure prediction on thin-walled, ductile tubulars subjected to axial load [C]//Proceedings of Applied Technology Workshop on Risk Based Design of Well Casing and Tubing. Woodlands: Society of Petroleum Engineers, 1998: 1. DOI: 10.2118/48327-MS
- [22] AMANO K, MATSUOKA M, ISHIHARA T, et al. Significance of yield ratio limitation to plastic deformation of pipeline in high pressure proof test [C]//Proceedings of the Seventh Symposium on Line Pipe Research. Texas: Houston Press, 1986: 81

(编辑 苗秀芝)