

文章编号: 1000-4750(2015)01-0234-07

基于统一强度理论的厚壁套管柱三轴抗拉强度

李 艳, 赵均海, 李 楠, 王 娟, 吴 赛

(长安大学建筑工程学院, 陕西, 西安 710061)

摘 要: 为了研究油气井厚壁套管柱的力学性能, 基于统一强度理论, 合理考虑中间主应力和材料拉压比的影响, 推导了厚壁套管柱三轴抗拉强度的计算公式, 分析了内外压比、材料的拉压比、中间主应力和径厚比等因素对不同工况下套管柱三轴抗拉强度的影响特性。研究表明: 强度准则的选用对套管柱的三轴抗拉强度具有显著影响; 材料拉压强度不等特性(SD 效应)对套管柱的三轴抗拉强度也具有显著影响, 当内外压比小于或等于 1 时, 套管柱的三轴抗拉强度随材料拉压比的增大近似线性提高, 当内外压比大于 1 时, 材料 SD 效应的影响与外荷载有关; 考虑中间主应力效应可以充分发挥材料的自承载能力和强度潜能, 提高套管柱的三轴抗拉强度, 具有一定的经济效益; 内外压比和径厚比对套管柱的三轴抗拉强度也具有一定的影响。该文计算公式适用于具有 SD 效应和中间主应力效应的材料, 并将多种屈服准则下套管柱三轴抗拉强度的表达式统一起来, 具有广泛的适用性, 可为油气井厚壁套管柱的设计提供借鉴。

关键词: 统一强度理论; 厚壁套管柱; 三轴抗拉强度; SD 效应; 中间主应力

中图分类号: TE22; O346 文献标志码: A doi: 10.6052/j.issn.1000-4750.2013.07.0646

TRI-AXIAL TENSION STRENGTH OF THICK-WALLED CASING STRINGS BASED ON UNIFIED STRENGTH THEORY

LI Yan, ZHAO Jun-hai, LI Nan, WANG Juan, WU Sai

(School of Civil Engineering, Chang'an University, Xi'an, Shaanxi 710061, China)

Abstract: In order to study mechanical properties of thick walled casing strings in oil and gas wells, a computational formula for the tri-axial tension strength of thick walled casing strings is deduced according to unified strength theory, considering the impacts of the intermediate principal stress effect and tension/compression ratio of materials. In addition, the influences of various factors on the tri-axial tension strength of casing strings under different load conditions are analyzed, including the internal pressure/external pressure ratio, tension/compression ratio, intermediate principal stress, and diameter/thickness ratio. The results show that the strength criterion has a significant influence on the tri-axial tension strength of casing strings. The strength disparity (SD) effect of materials also has a conspicuous impact on tri-axial tension strength. The tri-axial tension strength increases almost linearly with the growth of tension/compression ratios if the internal pressure/external pressure ratio is less than or equal to 1, while the influence of the SD effect of materials is related to loads when the internal pressure/external pressure ratio is more than 1. By considering the intermediate principal stress effect, full use can be made of the self-bearing capacity and strength potential of materials, so as to improve the tri-axial

收稿日期: 2013-07-19; 修改日期: 2014-03-24

基金项目: 国家自然科学基金项目(41202191); 中国博士后科学基金项目(2012M520079, 2013T60868); 教育部博士点基金项目(20110205130001, 20120205120001); 陕西省自然科学基金项目(2011JM7002); 长安大学中央高校基本科研业务费专项资金项目(2013G2283007)

通讯作者: 李 艳(1987-), 女, 山东人, 博士生, 从事结构强度理论及工程应用方面的研究(E-mail: liyanlwbdlp@126.com).

作者简介: 赵均海(1960-), 男, 陕西人, 教授, 博士, 博导, 从事强度理论及工程应用、固体力学等方面的研究(E-mail: zhaojh@chd.edu.cn);

李 楠(1987-), 女, 陕西人, 博士生, 从事结构强度理论及工程应用方面的研究(E-mail: 393030751@qq.com);

王 娟(1987-), 女, 陕西人, 博士生, 从事强度理论方面的研究(E-mail: 516493541@qq.com);

吴 赛(1988-), 女, 陕西人, 博士生, 从事强度理论及组合结构方面的研究(E-mail: 497491461@qq.com).

tension strength of casing strings and to bring certain benefits. The internal pressure/external pressure ratio and diameter/thickness ratio also have certain influences on the tri-axial tension strength of casing strings. The applicability of the proposed computational formula is broader and has unified the various expressions for the tri-axial tension strength of casing strings by using different yield criteria. Therefore, it is suitable for all kinds of materials which have both SD and intermediate principal stress effects, and it will assist greatly in the design of thick walled casing strings in oil and gas wells.

Key words: unified strength theory; thick-walled casing string; tri-axial tension strength; SD effect; intermediate principal stress

套管柱是油气井结构的关键组成部分, 研究其强度问题对钻井发展具有重要意义。目前, 国内外学者对套管柱的强度设计进行了大量研究, 如 Li Z F^[1]和 Zhu S D 等^[2]分别进行了套管性能的分析研究和高强套管柱腐蚀问题研究; Huang X 等^[3]和陈占锋等^[4]采用有限元方法, 分别建立了套管柱抗挤强度的计算公式和套管偏心距与套管最大应力关系的计算公式; 韩志勇^[5]对我国套管柱强度设计标准中三轴抗拉强度计算公式存在的问题进行了讨论, 并推导了套管柱三轴抗拉强度新的计算公式; 廖华林等^[6]提出了均布荷载条件下内壁磨损套管剩余抗外挤强度的计算方法等。现有的研究主要针对套管柱的抗挤强度, 而对套管柱的抗拉强度研究较少。采用的研究理论主要是双向应力椭圆理论^[7]和三轴应力强度理论^[8]。双向应力椭圆理论未考虑中间主应力和材料 SD 效应的影响, 三轴应力强度理论考虑了中间主应力的影响, 但忽略了材料 SD 效应的影响。两种强度理论均仅适用于没有 SD 效应的材料。高强度钢具有明显的 SD 效应^[9-11], 韧性金属材料拉压强度比的取值一般为 0.77~1.0, 韧性较低的金属材料拉压强度比的取值一般为 0.33~0.77^[12]。某些新型套管材料也可能存在拉压性能不同的情况。因此, 考虑材料 SD 效应的套管柱强度设计成为必要。

统一强度理论^[13-14]考虑了中间主应力和材料的 SD 效应, 在工程研究领域得到了广泛的应用^[15-19]。本文基于统一强度理论, 推导油气井厚壁套管柱三轴抗拉强度的计算公式, 建立其在不同屈服准则下的定量关系。

1 统一强度理论

统一强度理论^[13-14]是在双剪单元和多滑移机制的基础上发展得到的, 已形成了强度理论的新体系。它的数学表达式为:

$$\begin{cases} F = \sigma_1 - \frac{\alpha}{1+b}(b\sigma_2 + \sigma_3) = \sigma_t, & \sigma_2 \leq \frac{\sigma_1 + \alpha\sigma_3}{1+\alpha} \\ F' = \frac{1}{1+b}(\sigma_1 + b\sigma_2) - \alpha\sigma_3 = \sigma_t, & \sigma_2 \geq \frac{\sigma_1 + \alpha\sigma_3}{1+\alpha} \end{cases} \quad (1)$$

其中:

$$\alpha = \frac{\sigma_t}{\sigma_c}, \quad b = \frac{(1+\alpha)\tau_s - \sigma_t}{\sigma_t - \tau_s}$$

式中: F 和 F' 为主应力强度理论函数; σ_1 、 σ_2 和 σ_3 分别为第一、第二和第三主应力; α 为材料的拉压比, 是衡量材料 SD 效应的指数; σ_t 、 σ_c 和 τ_s 分别为材料的拉伸屈服极限、压缩屈服极限和剪切屈服极限; b 为反映中间主切应力以及相应面上的正应力对材料破坏影响程度的参数, 也是选用不同强度理论的参数, 当 b 取不同值时, 统一强度理论可以退化为或线性逼近多种强度准则。

2 厚壁套管柱三轴抗拉强度

2.1 套管柱力学模型

本文主要研究油气井厚壁套管柱(开口)在均匀荷载作用下的三轴抗拉强度, 其力学模型及一点处的应力状态如图 1 所示。

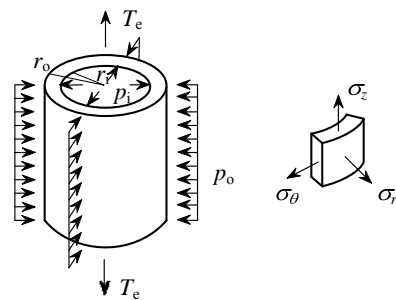


图 1 套管柱力学模型及应力状态

Fig.1 Mechanical model and stress state of casing string

图中: T_c 为套管柱轴向拉力; p_i 为套管柱内压力; p_o 为套管柱外挤压力; r_i 为套管柱内半径; r_o 为套管柱外半径; σ_r 、 σ_θ 和 σ_z 分别为套管柱径向应力、周向应力和轴向应力。

2.2 套管柱三轴抗拉强度

由于套管内壁首先达到屈服^[20], 由拉梅公式得:

$$\begin{cases} \sigma_r = -p_i \\ \sigma_\theta = \frac{r_i^2 + r_o^2}{r_o^2 - r_i^2} p_i - \frac{2r_o^2}{r_o^2 - r_i^2} p_o \\ \sigma_z = \frac{T_e}{\pi (r_o^2 - r_i^2)} \end{cases} \quad (2)$$

2.2.1 内压小于外压情况

当内压小于外压, 即 $p_i < p_o$ 时, 设 $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3$, 则:

$$\sigma_1 = \sigma_z, \quad \sigma_2 = \sigma_r, \quad \sigma_3 = \sigma_\theta \quad (3)$$

令

$$A = \pi(r_o^2 - r_i^2), \quad A_o = \pi r_o^2, \quad A_i = \pi r_i^2 \quad (4)$$

$$\xi = \frac{p_i}{p_o} \quad (5)$$

式中: A 、 A_o 和 A_i 分别为套管柱净截面积、外径对应的圆面积和内径对应的圆面积; ξ 为内外压比。

当外荷载满足 $\frac{T_e}{p_o} \geq \xi A_i - (2\alpha\xi - 2\alpha + \xi)A_o$

时, 有:

$$\sigma_2 \leq \frac{\sigma_1 + \alpha\sigma_3}{1 + \alpha} \quad (6)$$

故将式(2)、式(3)、式(4)和式(5)代入式(1)中的第 1 式, 整理得基于统一强度理论的厚壁套管柱的三轴抗拉强度为:

$$T_a = T_o + \left[\alpha\xi A_i + \frac{\alpha\xi(1-b) - 2\alpha}{1+b} A_o \right] p_o \quad (7)$$

式中: T_o 为套管柱单轴抗拉强度, $T_o = A\sigma_t$ 。同理,

当外荷载满足 $\frac{T_e}{p_o} \leq \xi A_i - (2\alpha\xi - 2\alpha + \xi)A_o$ 时, 将

式(2)、式(3)、式(4)和式(5)代入式(1)中的第 2 式得

$$T_a = (1+b)T_o + \{[(\alpha + ab + b)\xi - 2\alpha(1+b)]A_o + (\alpha + ab - b)\xi A_i\} p_o \quad (8)$$

2.2.2 内压大于外压情况

当内压大于外压, 即 $p_i > p_o$ 时:

$$\sigma_1 = \sigma_z, \quad \sigma_2 = \sigma_\theta, \quad \sigma_3 = \sigma_r \quad (9)$$

当外荷载满足 $\frac{T_e}{p_o} \geq \xi A_i + (2\alpha\xi - 2\alpha + \xi - 2)A_o$

时, 式(6)成立, 将式(2)、式(4)、式(5)和式(9)代入式(1)中的第 1 式, 整理得基于统一强度理论的厚壁套管柱的三轴抗拉强度为:

$$T_a = T_o + \left[\alpha\xi A_i - \frac{\alpha\xi(1-b) + 2ab}{1+b} A_o \right] p_o \quad (10)$$

同理, 当 $\frac{T_e}{p_o} \leq \xi A_i + (2\alpha\xi - 2\alpha + \xi - 2)A_o$ 时:

$$T_a = (1+b)T_o + \{[2b - (\alpha + ab + b)\xi]A_o + (\alpha + ab - b)\xi A_i\} p_o \quad (11)$$

2.2.3 内压等于外压情况

当内压等于外压, 即 $p_i = p_o$ 时, $\xi = 1$, 此时, 式(7)和式(10)同时退化为:

$$T_a = T_o - \alpha(A_o - A_i)p_o \quad \text{当 } \frac{T_e}{p_o} \geq A_i - A_o \text{ 时} \quad (12)$$

式(8)和式(11)同时退化为:

$$T_a = (1+b)T_o + [(-\alpha - ab + b)A_o + (\alpha + ab - b)A_i] p_o \quad \text{当 } \frac{T_e}{p_o} \leq A_i - A_o \text{ 时} \quad (13)$$

式(12)和式(13)即为内压等于外压情况下, 基于统一强度理论的厚壁套管柱三轴抗拉强度的计算公式。式(12)和式(13)验证了前述公式推导的正确性。

综上所述, 基于统一强度理论的厚壁套管柱三轴抗拉强度的解析解为:

$$\left\{ \begin{array}{l} T_a = T_o + \left[\alpha\xi A_i + \frac{\alpha\xi(1-b) - 2\alpha}{1+b} A_o \right] p_o, \\ \quad \text{当 } \frac{T_e}{p_o} \geq \xi A_i - (2\alpha\xi - 2\alpha + \xi)A_o; \quad \xi \leq 1 \text{ 时} \\ T_a = (1+b)T_o + \{[(\alpha + ab + b)\xi - 2\alpha(1+b)]A_o + (\alpha + ab - b)\xi A_i\} p_o, \\ \quad \text{当 } \frac{T_e}{p_o} \leq \xi A_i - (2\alpha\xi - 2\alpha + \xi)A_o; \quad \xi \leq 1 \text{ 时} \\ T_a = T_o + \left[\alpha\xi A_i - \frac{\alpha\xi(1-b) + 2ab}{1+b} A_o \right] p_o, \\ \quad \text{当 } \frac{T_e}{p_o} \geq \xi A_i + (2\alpha\xi - 2\alpha + \xi - 2)A_o; \quad \xi > 1 \text{ 时} \\ T_a = (1+b)T_o + \{[2b - (\alpha + ab + b)\xi]A_o + (\alpha + ab - b)\xi A_i\} p_o, \\ \quad \text{当 } \frac{T_e}{p_o} \leq \xi A_i + (2\alpha\xi - 2\alpha + \xi - 2)A_o; \quad \xi > 1 \text{ 时} \end{array} \right. \quad (14)$$

2.3 套管柱三轴抗拉强度的不同理论解

根据参数 b 和材料 SD 效应指数 α 的不同取值, 式(14)可以退化为一系列基于不同屈服准则的理论解。

当 $\alpha = 1$, $b = 0$ 时, 式(14)退化为基于 Tresca 屈

服准则的理论解:

$$\begin{cases} T_a = T_0 + [\xi A_1 + (\xi - 2)A_0]p_0, & \text{当 } \xi \leq 1 \text{ 时} \\ T_a = T_0 + (\xi A_1 - \xi A_0)p_0, & \text{当 } \xi > 1 \text{ 时} \end{cases} \quad (15)$$

当 $0 < \alpha < 1$, $b = 0$ 时, 式(14)退化为基于 Mohr-Coulomb 屈服准则的理论解:

$$\begin{cases} T_a = T_0 + [\alpha \xi A_1 + \alpha(\xi - 2)A_0]p_0, & \text{当 } \xi \leq 1 \text{ 时} \\ T_a = T_0 + (\alpha \xi A_1 - \alpha \xi A_0)p_0, & \text{当 } \xi > 1 \text{ 时} \end{cases} \quad (16)$$

当 $\alpha = 1$, $b = 1/(1 + \sqrt{3}) \approx 0.366$ 时, 式(14)退化为线性逼近 von Mises 屈服准则的理论解:

$$\begin{cases} T_a = T_0 + [\xi A_1 + (0.464\xi - 1.464)A_0]p_0, \\ \quad \text{当 } \frac{T_e}{p_0} \geq \xi A_1 - (3\xi - 2)A_0; \quad \xi \leq 1 \text{ 时} \\ T_a = 1.366T_0 + [\xi A_1 + (1.732\xi - 2.732)A_0]p_0, \\ \quad \text{当 } \frac{T_e}{p_0} \leq \xi A_1 - (3\xi - 2)A_0; \quad \xi \leq 1 \text{ 时} \\ T_a = T_0 + [\xi A_1 - (0.464\xi + 0.536)A_0]p_0, \\ \quad \text{当 } \frac{T_e}{p_0} \geq \xi A_1 + (3\xi - 4)A_0; \quad \xi > 1 \text{ 时} \\ T_a = 1.366T_0 + [\xi A_1 - (1.732\xi - 0.732)A_0]p_0, \\ \quad \text{当 } \frac{T_e}{p_0} \leq \xi A_1 + (3\xi - 4)A_0; \quad \xi > 1 \text{ 时} \end{cases} \quad (17)$$

当 $\alpha = 1$, $b = (8\sqrt{3} - 10)/23 \approx 0.168$ 时, 式(14)退化为平均剪应力屈服(ASSY)准则^[21]下的理论解:

$$\begin{cases} T_a = T_0 + [\xi A_1 + (0.712\xi - 1.712)A_0]p_0, \\ \quad \text{当 } \frac{T_e}{p_0} \geq \xi A_1 - (3\xi - 2)A_0; \quad \xi \leq 1 \text{ 时} \\ T_a = 1.168T_0 + [\xi A_1 + (1.336\xi - 2.336)A_0]p_0, \\ \quad \text{当 } \frac{T_e}{p_0} \leq \xi A_1 - (3\xi - 2)A_0; \quad \xi \leq 1 \text{ 时} \\ T_a = T_0 + [\xi A_1 - (0.712\xi + 0.288)A_0]p_0, \\ \quad \text{当 } \frac{T_e}{p_0} \geq \xi A_1 + (3\xi - 4)A_0; \quad \xi > 1 \text{ 时} \\ T_a = 1.168T_0 + [\xi A_1 - (1.336\xi - 0.336)A_0]p_0, \\ \quad \text{当 } \frac{T_e}{p_0} \leq \xi A_1 + (3\xi - 4)A_0; \quad \xi > 1 \text{ 时} \end{cases} \quad (18)$$

当 $0 < \alpha < 1$, $b = 1$ 时, 式(14)退化为基于广义双剪应力(GTS)屈服准则^[22]的理论解:

$$\begin{cases} T_a = T_0 + \alpha(\xi A_1 - A_0)p_0, \\ \quad \text{当 } \frac{T_e}{p_0} \geq \xi A_1 - (2\alpha\xi - 2\alpha + \xi)A_0; \quad \xi \leq 1 \text{ 时} \\ T_a = 2T_0 + \{(2\alpha - 1)\xi A_1 + [(2\alpha + 1)\xi - 4\alpha]A_0\}p_0, \\ \quad \text{当 } \frac{T_e}{p_0} \leq \xi A_1 - (2\alpha\xi - 2\alpha + \xi)A_0; \quad \xi \leq 1 \text{ 时} \\ T_a = T_0 + \alpha(\xi A_1 - A_0)p_0, \\ \quad \text{当 } \frac{T_e}{p_0} \geq \xi A_1 + (2\alpha\xi - 2\alpha + \xi - 2)A_0; \quad \xi > 1 \text{ 时} \\ T_a = 2T_0 + \{(2\alpha - 1)\xi A_1 - [(2\alpha + 1)\xi - 2]A_0\}p_0, \\ \quad \text{当 } \frac{T_e}{p_0} \leq \xi A_1 + (2\alpha\xi - 2\alpha + \xi - 2)A_0; \quad \xi > 1 \text{ 时} \end{cases} \quad (19)$$

当 $\alpha = 1$, $b = 1$ 时, 式(14)退化为基于双剪应力(TSS)屈服准则^[23]的理论解:

$$\begin{cases} T_a = T_0 + (\xi A_1 - A_0)p_0, \\ \quad \text{当 } \frac{T_e}{p_0} \geq \xi A_1 - (3\xi - 2)A_0; \quad \xi \leq 1 \text{ 时} \\ T_a = 2T_0 + [\xi A_1 + (3\xi - 4)A_0]p_0, \\ \quad \text{当 } \frac{T_e}{p_0} \leq \xi A_1 - (3\xi - 2)A_0; \quad \xi \leq 1 \text{ 时} \\ T_a = T_0 + (\xi A_1 - A_0)p_0, \\ \quad \text{当 } \frac{T_e}{p_0} \geq \xi A_1 + (3\xi - 4)A_0; \quad \xi > 1 \text{ 时} \\ T_a = 2T_0 + [\xi A_1 - (3\xi - 2)A_0]p_0, \\ \quad \text{当 } \frac{T_e}{p_0} \leq \xi A_1 + (3\xi - 4)A_0; \quad \xi > 1 \text{ 时} \end{cases} \quad (20)$$

由此可见, 本文推导出的计算公式不仅将多种屈服准则下厚壁套管柱三轴抗拉强度的表达式统一起来, 还建立了它们之间的定量关系, 具有广泛的适用性。

3 算例及影响因素

3.1 算例分析

为了研究强度准则对厚壁套管柱三轴抗拉强度的影响, 本文以文献[5]中提供的油井套管柱为例, 直径 $D = 177.8\text{mm}$, 壁厚 $\delta = 13.72\text{mm}$, 分别取 $\alpha = 1$ 和 $\alpha = 0.7$ ^[17], 采用本文计算公式对第 1 段套管柱顶端的三轴抗拉强度进行计算, 并与相关文献的计算方法进行对比如表 1 所示。

表 1 套管柱三轴抗拉强度计算结果比较

Table 1 Comparison of theoretical values of casing tri-axial tension strength

屈服准则	α	b	T_a /kN	T_{a1} /kN	T_{a2} /kN
Tresca	1	0	474.55		
ASSY ^[21]	1	0.168	554.27		
von Mises	1	0.366	648.24	816.42	3188.25
TSS ^[23]	1	1	949.10		
Mohr-Coulomb	0.7	0	1502.52		
GTS ^[22]	0.7	1	3005.04		

注： T_a 为本文计算方法计算所得的理论值； T_{a1} 为文献[5]计算方法计算所得的理论值； T_{a2} 为文献[8]计算方法计算所得的理论值。

表 1 表明，不同屈服准则下的油气井厚壁套管柱三轴抗拉强度的理论预测值差别较大，GTS 屈服准则下套管柱的三轴抗拉强度甚至达到了 Tresca 屈服准则下套管柱三轴抗拉强度的 6.33 倍。可见，强度准则的选用对套管柱三轴抗拉强度的预测值具有显著的影响。因此，进行套管柱的强度设计和校核时，应选择合适的强度准则进行计算，以避免造成危险设计或材料的浪费。

此外，针对该算例，通过将 Tresca 屈服准则与 Mohr-Coulomb 屈服准则下套管柱的三轴抗拉强度进行比较，将 TSS 屈服准则与 GTS 屈服准则下套管柱的三轴抗拉强度进行比较可见，当材料拉压比 α 从 1 降低到 0.7 时，该套管柱的三轴抗拉强度提高 3.166 倍；通过将 Tresca 屈服准则与 TSS 屈服准则下套管柱的三轴抗拉强度进行比较，将 Mohr-Coulomb 屈服准则与 GTS 屈服准则下套管柱的三轴抗拉强度进行比较可见，当参数 b 从 0 增大到 1 时，该套管柱的三轴抗拉强度提高 2 倍。由此可见，材料的 SD 效应和中间主应力对套管柱的三轴抗拉强度均具有较大影响。

3.2 影响因素

以文献[5]提供的油井套管柱为例，对影响套管柱三轴抗拉强度的各因素进行单参数分析。套管柱直径 $D=177.8\text{mm}$ ，壁厚 $\delta=13.72\text{mm}$ 。

当 $\alpha=1, b=1$ 时，即在 TSS 屈服准则^[23]下，由式(20)得内外压比 ξ 的影响曲线如图 2 所示。

由图 2 可见，内外压比 ξ 对油气井厚壁套管柱的三轴抗拉强度具有显著的影响。当 $0 \leq \xi \leq 1$ 时， $\frac{T_a - T_0}{p_0}$ 和 $\frac{T_a - 2T_0}{p_0}$ 均随 ξ 的增大而线性增大，即套管柱的三轴抗拉强度随 ξ 的增大而线性增大。因此，当 $0 \leq \xi \leq 1$ 时，增大套管柱内压 p_1 可以提高套

管柱的三轴抗拉强度。当 $\xi > 1$ 时，在 $\frac{T_e}{p_0} \geq \xi A_1 + (3\xi - 4)A_0$ 条件下， $\frac{T_a - T_0}{p_0}$ 随 ξ 的增大

继续线性增大，在 $\frac{T_e}{p_0} \leq \xi A_1 + (3\xi - 4)A_0$ 条件下

$\frac{T_a - 2T_0}{p_0}$ 随 ξ 的增大而线性减小。因此，当 $\xi > 1$ 时，

ξ 对套管柱三轴抗拉强度的影响与外荷载条件有关。

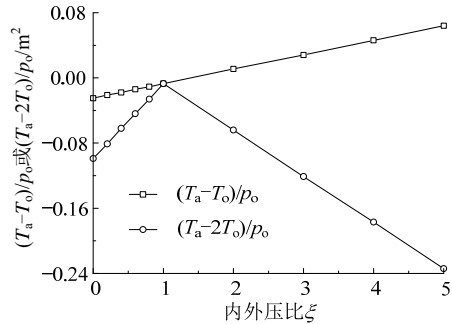
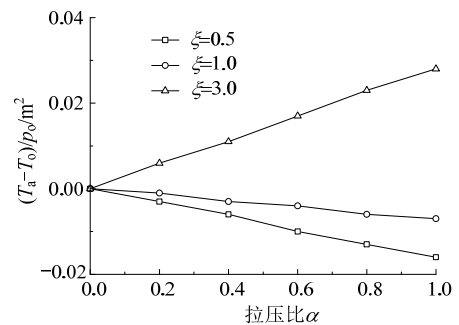


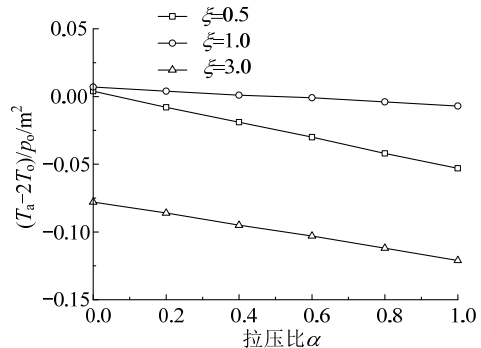
图 2 ξ 的影响曲线

Fig.2 Influence curves of ξ

当 $0 \leq \alpha \leq 1, b=1$ 时，即在 GTS 屈服准则^[22]下，由式(19)得拉压比 α 的影响曲线如图 3 所示。



(a) $\frac{T_a - T_0}{p_0}$ 与 α 的关系曲线



(b) $\frac{T_a - 2T_0}{p_0}$ 与 α 的关系曲线

图 3 α 的影响曲线

Fig.3 Influence curves of α

由图 3 可见, 当 $0 \leq \xi \leq 1$ 时, $\frac{T_a - T_0}{p_0}$ 和 $\frac{T_a - 2T_0}{p_0}$ 均随 α 的增大而线性降低, 即套管柱的三轴抗拉强度随 α 的增大而线性降低, 且 ξ 越小, α 的影响越显著。因此, 当 $0 \leq \xi \leq 1$ 时, 考虑材料的 SD 效应可以提高套管柱的三轴抗拉强度, 节约材料和成本。当 $\xi > 1$ 时, 在 $\frac{T_c}{p_0} \geq \xi A_1 + (2\alpha\xi - 2\alpha + \xi - 2)A_0$ 条件下, $\frac{T_a - T_0}{p_0}$ 随 α 的增大而线性增大, 在 $\frac{T_c}{p_0} \leq \xi A_1 + (2\alpha\xi - 2\alpha + \xi - 2)A_0$ 条件下, $\frac{T_a - 2T_0}{p_0}$ 随 α 的增大而线性减小, 因此, 当 $\xi > 1$ 时, α 对套管柱三轴抗拉强度的影响也与外荷载条件有关。实际工程中, 应综合考虑外荷载条件, 选择抗压比适当的材料进行套管柱的设计。

当 $\alpha=1$, $0 \leq b \leq 1$ 时, 即在双剪统一屈服准则^[13-14]下, 由式(14)得参数 b 的影响曲线如图 4 所示。

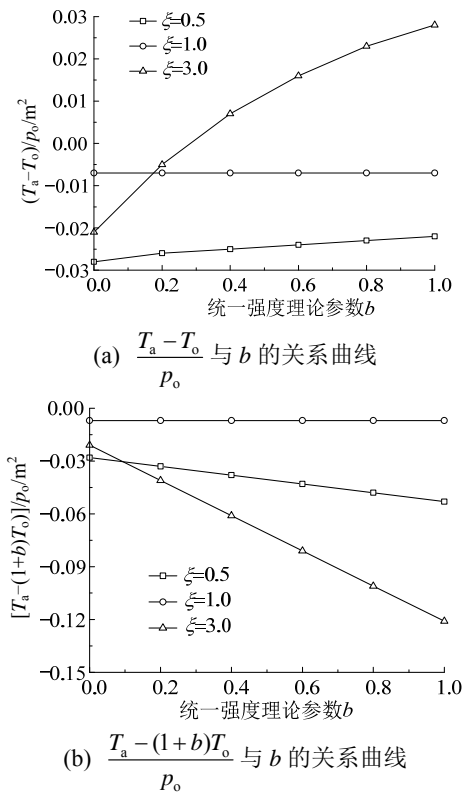


图 4 b 的影响曲线

Fig.4 Influence curves of b

由图 4 可见, $\frac{T_a - T_0}{p_0}$ 随参数 b 的增大而增大,

即考虑中间主应力的影响, 可以充分发挥材料的强度潜能和自承载能力, 从而提高套管柱的三轴抗拉强度, 具有一定的经济效益。此外, 图 4 还表明, 当 $0 \leq \xi \leq 1$ 时, 参数 b 对套管柱三轴抗拉强度的影响较小, 当 $\xi > 1$ 时, 参数 b 的影响较大。

设径厚比 $\eta = \frac{D}{\delta}$, 则当 $\alpha=1$, $b=1$ 时, 即在 TSS 屈服准则^[23]下, 由式(20)得径厚比 η 的影响曲线如图 5 所示。

由图 5 可见, 套管柱的三轴抗拉强度随径厚比的增大不断增大, 且与 $0 \leq \xi \leq 1$ 时相比, $\xi > 1$ 条件下, 径厚比对套管柱三轴抗拉强度的影响更大。

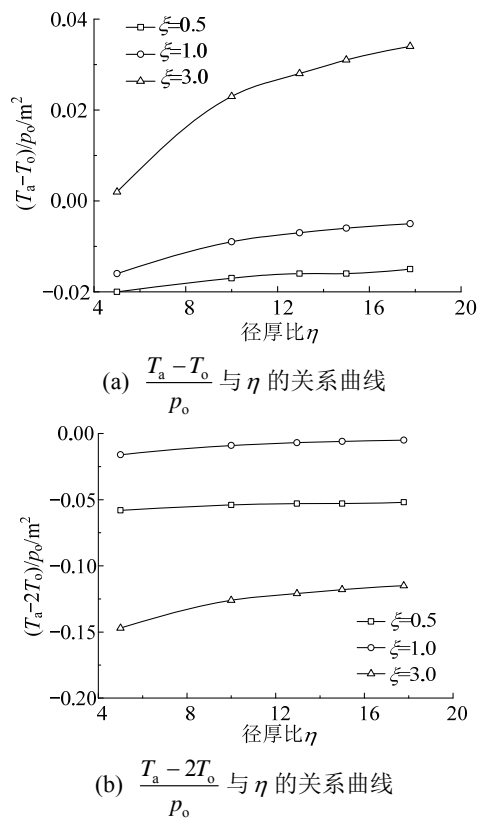


图 5 η 的影响曲线

Fig.5 Influence curves of η

4 结论

(1) 基于统一强度理论, 推导了油气井厚壁套管柱三轴抗拉强度的计算公式, 该公式适用于各种具有 SD 效应和不同程度中间主应力效应的材料, 包括了各种屈服准则下或各种屈服准则线性逼近的厚壁套管柱三轴抗拉强度的表达式, 建立了它们之间的定量关系, 具有广泛的适用性。

(2) 强度准则的选用对油气井厚壁套管柱的三轴抗拉强度具有显著影响, 进行套管柱的强度设计

和校核时, 应选择合适的强度准则进行计算。

(3) 材料的 SD 效应对油气井厚壁套管柱的三轴抗拉强度也具有显著的影响。当内外压比小于或等于 1 时, 考虑材料的 SD 效应可以提高套管柱的三轴抗拉强度, 当内外压比大于 1 时, SD 效应的影响与外荷载条件有关。

(4) 考虑中间主应力的影响, 可以充分发挥材料的强度潜能和自承载能力, 提高套管柱的三轴抗拉强度, 具有一定的经济效益。

(5) 内外压比和径厚比对套管柱的三轴抗拉强度均有一定的影响, 实际工程中应予以考虑。

参考文献:

- [1] Li Z F. Mechanical analysis of tubing string in well testing operation [J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2012, 90/91: 61–69.
- [2] Zhu S D, Wei J F, Cai R, Bai Z Q, Zhou G S. Corrosion failure analysis of high strength grade super 13Cr-110 tubing string [J]. *Engineering Failure Analysis*, 2011, 18(8): 2222–2231.
- [3] Huang X, Mihsein M, Kibble K, Hall R. Collapse strength analysis of casing design using finite element method [J]. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 2000, 77(7): 359–367.
- [4] 陈占锋, 朱卫平, 狄勤丰, 唐继平, 梁红军. 非均匀地应力下套管偏心对抗挤强度的影响[J]. *上海大学学报(自然科学版)*, 2012, 18(1): 83–86.
Chen Zhanfeng, Zhu Weiping, Di Qinfeng, Tang Jiping, Liang Hongjun. Effects of eccentricity of casing on collapse resistance in non-uniform in-situ stress [J]. *Journal of Shanghai University (Natural Science)*, 2012, 18(1): 83–86. (in Chinese)
- [5] 韩志勇. 关于“套管柱三轴抗拉强度公式”的讨论[J]. *中国石油大学学报(自然科学版)*, 2011, 35(4): 77–80.
Han Zhiyong. Discussing on formula of tri-axial tension strength of casing string [J]. *Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science)*, 2011, 35(4): 77–80. (in Chinese)
- [6] 廖华林, 管志川, 马广军, 冯光通. 深井超深井内壁磨损套管剩余强度计算[J]. *工程力学*, 2010, 27(2): 250–256.
Liao Hualin, Guan Zhichuan, Ma Guangjun, Feng Guangtong. Remaining strength calculation of internal wall worn casing in deep and ultra-deep wells [J]. *Engineering Mechanics*, 2010, 27(2): 250–256. (in Chinese)
- [7] American Petroleum Institute. API Bulletin 5C3 Bulletin on formulas and calculations of casing, tubing, drill pipe and line pipe properties [S]. Dallas: API, 1985.
- [8] SY/T 5322-2000, 套管柱强度设计方法[S]. 北京: 石油工业出版社, 2001.
SY/T 5322-2000, Design Method of Casing String Strength [S]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2001. (in Chinese)
- [9] Chaix R. Factors influencing the strength differential of high strength steels [J]. *Metallurgical Transactions*, 1972, 3(2): 365–371.
- [10] Drucker D C. Plasticity theory, strength-differential (SD) phenomenon and volume expansion in metals and plastics [J]. *Metallurgical Transactions*, 1973, 4(3): 667–673.
- [11] Rauch G C, Leslie W C. The extant and nature of the strength-differential effect in steels [J]. *Metallurgical Transactions*, 1972, 3(2): 377–389.
- [12] Li X W, Zhao J H, Wang Q Y. Unified stress solution for sheet forming [J]. *Advanced Materials Research*, 2012, 463/464: 629–633.
- [13] Yu M H. Unified strength theory and its applications [M]. Berlin: Springer, 2004: 136.
- [14] 俞茂宏. 双剪理论及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 1998: 256.
Yu Maohong. Twin shear theory and its applications [M]. Beijing: Science Press, 1998: 256.
- [15] 赵均海, 李艳, 梁文彪, 朱倩. 考虑初应力的哑铃型钢管混凝土拱肋极限承载力统一解[J]. *中国公路学报*, 2012, 25(5): 58–66.
Zhao Junhai, Li Yan, Liang Wenbiao, Zhu Qian. Unified solution to ultimate bearing capacity of dumbbell shaped concrete-filled steel tube arch rib with initial stress [J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2012, 25(5): 58–66. (in Chinese)
- [16] 赵均海, 梁文彪, 张常光, 李艳. 非饱和土库仑主动土压力统一解[J]. *岩土力学*, 2013, 34(3): 609–614.
Zhao Junhai, Liang Wenbiao, Zhang Changguang, Li Yan. Unified solution of Coulomb's active earth pressure for unsaturated soils [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2013, 34(3): 609–614. (in Chinese)
- [17] Jin C W, Wang L Z, Zhang Y Q. Strength differential effect and influence of strength criterion on burst pressure of thin-walled pipelines [J]. *Applied Mathematics and Mechanics (English Edition)*, 2012, 33(11), 1361–1370.
- [18] 马宗源, 廖红建, 党发宁. 中间主应力对金属悬臂梁承载力的影响[J]. *工程力学*, 2013, 30(1): 307–313.
Ma Zongyuan, Liao Hongjian, Dang Faning. Influence of intermediate principal stress on bearing capacity of metallic cantilever beams [J]. *Engineering Mechanics*, 2013, 30(1): 307–313. (in Chinese)
- [19] Zhang C G, Zhao J H, Zhang Q H, Hu X D. A new closed-form solution for circular openings modeled by the Unified Strength Theory and radius-dependent Yong's modulus [J]. *Computers and Geotechnics*, 2012, 42, 118–128.
- [20] 覃成锦, 高德利. 套管强度计算的理论问题[J]. *石油学报*, 2005, 26(5): 123–126.
Tan Chengjin, Gao Deli. Theoretic problems about calculation of casing strength [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2005, 26(5): 123–126. (in Chinese)
- [21] Zhu X K, 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): 663–671.
- [22] Fan S C, Yu M H, Yang S Y. On the unification of yield criteria [J]. *Journal of Applied Mechanics*, 2002, 68(2): 341–343.
- [23] Yu M H. Twin shear stress yield criterion [J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 1983, 25(1): 71–74.