



中华人民共和国国家标准

GB/T 43231—2023

石油天然气工业 页岩油气井套管选用 及工况适用性评价

Petroleum and natural gas industries—Selection and adaptability evaluation of
casing for shale oil and gas wells

2023-09-07 发布

2024-01-01 实施

国家市场监督管理总局 发布
国家标准化管理委员会

目 次

前言	I
1 范围	1
2 规范性引用文件	1
3 术语和定义	1
4 符号	2
5 套管柱选用、评价和设计	3
5.1 套管柱选用及评价	3
5.2 套管柱强度设计方法	4
5.3 套管柱应变设计方法	6
5.4 安全系数	6
6 技术要求	7
6.1 制造方法	7
6.2 化学成分	7
6.3 拉伸性能	7
6.4 硬度	8
6.5 夏比(V型缺口)冲击吸收能	8
6.6 晶粒度	9
6.7 非金属夹杂物	9
6.8 几何尺寸与质量	9
6.9 静水压试验	10
6.10 残余应力	10
6.11 抗挤强度	10
7 套管工况适用性评价	12
7.1 适用性评价流程	12
7.2 试样	12
7.3 安装要求	13
7.4 适用性评价技术要求	13
7.5 适用性评价试验程序	14
附录 A (规范性) 套管抗剪切性能评价方法	19
附录 B (规范性) 套管抗非均匀外挤评价方法	21

前 言

本文件按照 GB/T 1.1—2020《标准化工作导则 第 1 部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。

请注意本文件的某些内容可能涉及专利。本文件的发布机构不承担识别专利的责任。

本文件由全国石油天然气标准化技术委员会(SAC/TC 355)提出并归口。

本文件起草单位：中国石油集团工程材料研究院有限公司、中国石油天然气股份有限公司西南油气田分公司、中国石油集团川庆钻探工程有限公司、中国石油物资有限公司、中国石油天然气股份有限公司新疆油田分公司、大庆油田有限责任公司、中国石油天然气股份有限公司勘探与生产分公司、中国石油天然气股份有限公司长庆油田分公司、天津钢管制造有限公司、衡阳华菱钢管有限公司、宝鸡石油钢管有限责任公司、西安石油大学、青岛理工大学、东北石油大学、西安三环石油管材科技有限公司。

本文件主要起草人：杨尚谕、韩礼红、王建军、曾波、蔡萌、路宗羽、方伟、魏风奇、宋毅、屈玲、王鹏、欧阳勇、张平、周小金、路彩虹、齐悦、李东风、黄永智、文春宇、赵映辉、刘海平、曹婧、牟易升、闫炎、杨思齐、赵云峰、董小卫、李远征、樊恒、毕刚、赵新波、邵兵、贾善坡、曹峰。

石油天然气工业 页岩油气井套管选用 及工况适用性评价

1 范围

本文件规定了页岩油气井生产套管柱选用、评价和设计,技术要求,套管工况适用性评价。

本文件适用于页岩油气井用生产套管柱选用和评价,同时适用于含泥岩层段、碳酸盐岩层段套管柱选用和评价。

2 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。其中,注日期的引用文件,仅该日期对应的版本适用于本文件;不注日期的引用文件,其最新版本(包括所有的修改单)适用于本文件。

GB/T 6394 金属平均晶粒度测定法

GB/T 9253 石油天然气工业 套管、油管 and 管线管螺纹的加工、测量和检验

GB/T 10561 钢中非金属夹杂物含量的测定 标准评级图显微检验法

GB/T 17745 石油天然气工业 套管和油管的维护与使用

GB/T 18052 套管、油管 and 管线管螺纹的测量和检验方法

GB/T 19830 石油天然气工业 油气井套管或油管用钢管

GB/T 20657 石油天然气工业 套管、油管、钻杆和用作套管或油管的管线管性能公式及计算

GB/T 21267 石油天然气工业 套管及油管螺纹连接试验程序

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1

剪切强度 **shear strength**

使套管内壁上产生最小屈服应力的外部剪切载荷值。

3.2

最大应变 **design strain**

地层滑移工况套管径向产生的最大等效应变。

3.3

许用应变 **allowable strain**

套管能承受的最大应变值。

3.4

螺纹接头 **connection**

一个外螺纹与其相连接箍的组合或一个完整接箍。

4 符号

下列符号适用于本文件。

- A_a ——管端截面积,单位为平方毫米(mm^2)。
- A_c ——接箍截面积,单位为平方毫米(mm^2)。
- A_{jp} ——最末一扣管壁横截面积,单位为平方毫米(mm^2)。
- D ——套管规定外径,单位为毫米(mm)。
- D_{ave} ——管体平均外径,单位为毫米(mm)。
- ΔD_{cc} ——水泥环变形量,单位为毫米(mm)。
- D_{cj} ——接箍外径,单位为毫米(mm)。
- ΔD_{de} ——套管变形量,单位为毫米(mm)。
- ΔD_{dog} ——狗腿度导致套管内通径改变,单位为毫米(mm)。
- ΔD_e ——非均匀外挤工况套管径向弹性变形量,单位为毫米(mm)。
- ΔD_{fo} ——地层滑移量,单位为毫米(mm)。
- D_{max} ——同一横截面上实测的最大外径值,单位为毫米(mm)。
- ΔD_{max} ——非均匀外挤工况套管允许最大径向变形量,单位为毫米(mm)。
- D_{min} ——同一横截面上实测的最小外径值,单位为毫米(mm)。
- ΔD_{se} ——剪切载荷工况套管径向弹性变形量,单位为毫米(mm)。
- ΔD_{smax} ——剪切载荷工况套管允许最大径向变形量,单位为毫米(mm)。
- d ——由规定外径 D 和规定壁厚 t 计算得到的内径, $d = D - 2t$,单位为毫米(mm)。
- d_{cj} ——接箍内径,单位为毫米(mm)。
- ec ——壁厚不均度,数值以百分数(%)表示。
- F_{max} ——非均匀外挤工况套管最大变形时对应地层载荷,单位为千牛(kN)。
- F_n ——套管非均匀外挤强度,单位为千牛(kN)。
- F_s ——套管剪切强度,单位为千牛(kN)。
- F_{smax} ——剪切工况套管最大变形时对应地层载荷,单位为千牛(kN)。
- F_y ——套管轴向等效载荷,单位为千牛(kN)。
- L_j ——螺纹配合长度,mm。
- n ——套管应变设计安全系数。
- ov ——外径不圆度,数值以百分数(%)表示。
- P_{bo} ——抗内压强度,单位为兆帕(MPa)。
- P_{co} ——抗挤强度,单位为兆帕(MPa)。
- P_E ——弹性挤毁压力,单位为兆帕(MPa)。
- P_i ——套管内压,单位为兆帕(MPa)。
- P_{max} ——压裂过程井底最大内压载荷,单位为兆帕(MPa)。
- P_{min} ——压裂过程井底最小内压载荷,单位为兆帕(MPa)。
- P_o ——套管外压,单位为兆帕(MPa)。
- P_p ——塑性挤毁压力,单位为兆帕(MPa)。
- P_y ——屈服挤毁压力,单位为兆帕(MPa)。
- r_i ——套管内半径, $r_i = d/2$,单位为毫米(mm)。
- r_o ——套管外半径, $r_o = D/2$,单位为毫米(mm)。
- ΔT ——温度改变,单位为摄氏度($^{\circ}\text{C}$)。

T_{\max}	——井下最高温度,单位为摄氏度($^{\circ}\text{C}$)。
T_{\min}	——井下最低温度,单位为摄氏度($^{\circ}\text{C}$)。
T_0	——抗拉强度,单位为千牛(kN)。
T_1	——圆螺纹连接断裂强度,单位为千牛(kN)。
T_2	——圆螺纹连接滑脱强度,单位为千牛(kN)。
T_3	——偏梯形螺纹连接管体螺纹强度,单位为千牛(kN)。
T_4	——偏梯形螺纹连接接箍螺纹强度,单位为千牛(kN)。
t	——套管壁厚,单位为毫米(mm)。
t_{cave}	——实测管体平均壁厚,单位为毫米(mm)。
t_{cmax}	——最大套管壁厚,单位为毫米(mm)。
t_{cmin}	——最小套管壁厚,单位为毫米(mm)。
U_c	——接箍最小极限强度,单位为兆帕(MPa)。
U_p	——管材最小极限强度,单位为兆帕(MPa)。
w_t	——计算质量,单位为千克(kg)。
Y_p	——管材屈服强度,单位为兆帕(MPa)。
γ	——线膨胀系数,单位为 $1/^{\circ}\text{C}$ 。
ϵ_{ce}	——水泥环应变。
ϵ_{d}	——许用应变。
ϵ_{dmax}	——套管允许最大应变。
ϵ_{dog}	——钻井狗腿度应变。
ϵ_{fo}	——地层滑移应变。
ϵ_{max}	——最大应变。
ϵ_{T}	——温度应变。
σ_r	——径向应力,单位为兆帕(MPa)。
σ_{vme}	——等效应力,单位为兆帕(MPa)。
σ_z	——轴向应力,单位为兆帕(MPa)。
σ_{θ}	——环向应力,单位为兆帕(MPa)。

5 套管柱选用、评价和设计

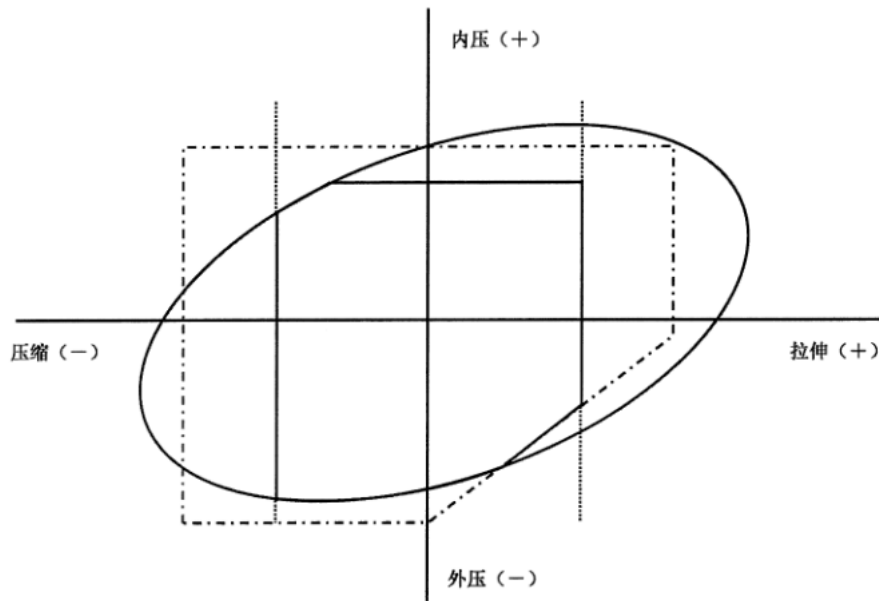
5.1 套管柱选用及评价

5.1.1 页岩油气井用生产套管(以下简称“套管”)常规选用应依据 GB/T 19830、GB/T 20657、GB/T 9253 和 GB/T 17745,基于此,针对工况依据本文件进行选用。

5.1.2 根据页岩油气井钻井、固井、压裂和生产等工况对套管柱性能的需求,钻完井工况套管柱应符合强度设计要求;为保证套管柱在高内压循环工况和储层小位移滑动工况下的服役安全性,压裂工况还宜考虑应变设计。

5.1.3 套管选用包括管体选用和螺纹选用,均应以满足工况要求为目的。依据工况特点,综合考虑井深、压力、温度、载荷、地质工况和环境介质影响,选用相应种类、规格、质量等级以及特殊要求的套管。

5.1.4 套管评价除符合 GB/T 21267 要求外,还应按附录 A 和附录 B 进行剪切和非均匀外挤载荷下的完整性评价,套管三轴强度校核应按图 1 中的方法进行。



说明：
 - - - - - API 系数；
 ○ 等效应力椭圆；
 ······ 接头螺纹极限；
 ———— 设计极限。

图 1 生产套管三轴强度校核方法

5.2 套管柱强度设计方法

5.2.1 通用要求

页岩油气井钻完井阶段生产套管选用应符合强度设计要求，应进行套管柱单轴强度和三轴强度校核，压裂阶段生产套管应符合应变设计要求。

5.2.2 单轴强度校核

5.2.2.1 抗挤强度

生产套管的抗挤强度应符合表 1 规定的最小抗挤强度要求，其中 P_y 应按公式(1)计算：

$$P_y = 2Y_p \left[\frac{(D/t) - 1}{(D/t)^2} \right] \dots\dots\dots(1)$$

P_p 应按公式(2)计算：

$$P_p = Y_p \left[\frac{A}{(D/t)} - B \right] - C \dots\dots\dots(2)$$

式中：

A ——经验系数，为 $2.876\ 2 + 0.154\ 89 \times 10^{-3} Y_p + 0.448\ 09 \times 10^{-6} Y_p^2 - 0.162\ 11 \times 10^{-9} Y_p^3$ ；

B ——经验系数，为 $0.026\ 233 + 0.734\ 02 \times 10^{-4} Y_p$ ；

C ——经验系数，为 $-3.212\ 5 + 0.030\ 867 Y_p - 0.152\ 04 \times 10^{-5} Y_p^2 + 0.778\ 10 \times 10^{-9} Y_p^3$ 。

P_E 应按公式(3)计算：

$$P_E = \frac{32.37 \times 10^4}{(D/t) [(D/t) - 1]^2} \dots\dots\dots(3)$$

表 1 生产套管最小抗挤强度计算公式

D/t	钢级		
	110	125	140
<12.53	$\frac{100 - (3.04D/t - 44.408)}{100} P_y$	$\frac{100 - (2.973D/t - 39.385)}{100} P_y$	$\frac{100 - (4.66D/t - 59.383)}{100} P_y$
$12.53 \sim 20.56$	$\frac{100 + (3.120D/t - 32.180)}{100} P_p$	$\frac{100 + (3.622D/t - 41.548)}{100} P_p$	$\frac{100 + (5.822D/t - 68.111)}{100} P_p$
>20.56	$1.20P_E$	$1.20P_E$	$1.30P_E$

5.2.2.2 抗内压强度

抗内压强度按公式(4)计算:

$$p_{bo} = 0.875 \left(\frac{2Y_p t}{D} \right) \quad \dots\dots\dots (4)$$

5.2.2.3 抗拉强度

圆螺纹套管接头连接强度取套管最后一扣完整螺纹发生断裂、滑脱和接箍断裂之中的最小强度值。偏梯形螺纹套管接头连接强度取管体强度及机紧后与管体端部啮合的接箍螺纹根部的断裂强度二者的较小值。

圆螺纹连接断裂强度值按公式(5)计算:

$$T_1 = 9.5 \times 10^{-4} A_{jp} U_p \quad \dots\dots\dots (5)$$

圆螺纹连接滑脱强度值按公式(6)计算:

$$T_2 = 9.5 \times 10^{-4} A_{jp} L_j \left(\frac{4.99 D^{-0.59} U_p}{0.5 L_j + 0.14 D} + \frac{Y_p}{L_j + 0.14 D} \right) \quad \dots\dots\dots (6)$$

其中 A_{jp} 按公式(7)计算:

$$A_{jp} = 0.785 \cdot 4 [(D - 3.619 \cdot 5)^2 - d^2] \quad \dots\dots\dots (7)$$

偏梯形螺纹连接管体螺纹强度值按公式(8)计算:

$$T_3 = 9.5 \times 10^{-4} A_a U_p [25.623 - 1.007(1.083 - Y_p/U_p) D_c] \quad \dots\dots\dots (8)$$

其中 A_a 按公式(9)计算:

$$A_a = 0.785 (D^2 - d^2) \quad \dots\dots\dots (9)$$

偏梯形螺纹连接接箍螺纹强度值按公式(10)计算:

$$T_4 = 9.5 \times 10^{-4} A_c U_c \quad \dots\dots\dots (10)$$

其中 A_c 按公式(11)计算:

$$A_c = 0.785 (D_{ci}^2 - d_{ci}^2) \quad \dots\dots\dots (11)$$

5.2.3 三轴强度校核

根据 VME 应力计算,结合轴向应力、环向应力和径向应力进行分析,三轴应力按公式(12)计算:

$$\sigma_{vme} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_z - \sigma_\theta)^2 + (\sigma_\theta - \sigma_r)^2 + (\sigma_r - \sigma_z)^2} \quad \dots\dots\dots (12)$$

轴向应力按公式(13)计算:

$$\sigma_z = \frac{F_y}{\pi (r_o^2 - r_i^2)} \quad \dots\dots\dots (13)$$

环向应力按公式(14)计算:

$$\sigma_{\theta} = \frac{r_i^2 + \frac{r_i^2 r_o^2}{r^2}}{r_o^2 - r_i^2} p_i - \frac{r_o^2 + \frac{r_i^2 r_o^2}{r^2}}{r_o^2 - r_i^2} p_o \quad \dots\dots\dots(14)$$

径向应力按公式(15)计算:

$$\sigma_r = \frac{r_i^2 - \frac{r_i^2 r_o^2}{r^2}}{r_o^2 - r_i^2} p_i - \frac{r_o^2 - \frac{r_i^2 r_o^2}{r^2}}{r_o^2 - r_i^2} p_o \quad \dots\dots\dots(15)$$

5.3 套管柱应变设计方法

5.3.1 通则

在满足压裂工况页岩油气井套管柱强度设计的基础上,应开展应变设计方法研究,套管基于应变设计方法允许套管发生变形,变形后的套管允许井下工具顺利通过。

5.3.2 最大应变确定方法

影响页岩油气井套管柱变形的因素包括:地层滑移、水泥环物理/力学、套管力学参数等。最大应变 ϵ_{max} 按公式(16)计算:

$$\epsilon_{max} = \epsilon_{fo} + \epsilon_T + \epsilon_{ce} + \epsilon_{dog} \quad \dots\dots\dots(16)$$

其中 ϵ_{fo} 按公式(17)计算, ϵ_T 按公式(18)计算, ϵ_{ce} 按公式(19)计算, ϵ_{dog} 按公式(20)计算:

$$\epsilon_{fo} = \frac{\Delta D_{fo} - \Delta D_{de}}{d} \quad \dots\dots\dots(17)$$

$$\epsilon_T = -\Delta T \cdot \gamma \quad \dots\dots\dots(18)$$

$$\epsilon_{ce} = \frac{-2 \cdot \Delta D_{ce}}{d} \quad \dots\dots\dots(19)$$

$$\epsilon_{dog} = \frac{-\Delta D_{dog}}{d} \quad \dots\dots\dots(20)$$

5.3.3 套管许用应变确定方法

ϵ_d 按公式(21)计算:

$$\epsilon_d \leq \frac{\epsilon_{dmax}}{n} \quad \dots\dots\dots(21)$$

5.4 安全系数

根据页岩油气井生产套管服役工况,生产套管设计安全系数应按表 2 取值。

表 2 页岩油气井生产套管设计安全系数

项目	设计系数
套管抗挤	≥1.1
套管抗内压	≥1.25
套管抗拉伸	≥1.25
套管三轴强度设计	≥1.25

6 技术要求

6.1 制造方法

6.1.1 制造工艺

套管可用无缝钢管或直缝电阻焊钢管制造。

6.1.2 热处理

热处理工艺包括淬火+回火(Q&T),具体热处理工艺由制造商选择,或者由购方和制造商协商确定。

6.1.3 材料

套管材料应符合 GB/T 19830 规定。

6.1.4 矫直

套管应进行矫直处理,宜选择热矫直工艺。如采用冷矫直后应进行残余应力消除。矫直工艺应符合 GB/T 19830 规定。

6.1.5 检验批

由同一热处理炉,或者同一熔炼炉批或按文件化程序由不同熔炼批组合的、连续热处理制造的同一规格与钢级的管子。

6.1.6 可追溯性

对套管产品应建立完整的溯源体系,根据最终产品管号可确定其生产过程和控制参数。

6.2 化学成分

套管化学成分应符合 GB/T 19830 要求。

6.3 拉伸性能

6.3.1 通则

套管拉伸性能包括屈服强度、抗拉强度和伸长率。

在拉伸试验中,记录或报告伸长率时,若用条形试样,则记录或报告中应写明试样的公称宽度和标距长度;若用圆棒试样,应写明直径和标距长度;若用全截面试样,应写明试样的状态、长度和标距长度。

6.3.2 强度

屈服强度和抗拉强度要求应符合表 3 规定。

表 3 力学性能要求

钢级	品类	载荷下的总伸长率/%	屈服强度/MPa	抗拉强度/MPa	伸长率/%
110	管体及接箍	0.60	758~999	≥862	≥13
125		0.65	862~1 068	≥931	
140		0.70	965~1 206	≥1 034	

6.3.3 伸长率

拉伸试样的最小伸长率由拉伸试样横截面积、规定最低抗拉强度计算确定,该最小伸长率对应的标距为 50.8 mm。

在计算最小伸长率时,三种圆棒拉伸试样(标距内直径为 6.25 mm、标距长度为 25.4 mm,标距内直径为 8.9 mm、标距长度为 35.6 mm 和标距内直径为 12.7 mm、标距长度为 50.8 mm)的横截面积应按 130 mm² 进行计算。

6.4 硬度

套管横截面上各部位硬度应符合 GB/T 19830,或由购方和制造商协商。

6.5 夏比(V型缺口)冲击吸收能

夏比冲击试验采用 V 型缺口试样。母材纵向、横向的夏比冲击吸收能(10 mm×10 mm×55 mm 标准试样)应符合表 4 规定。

夏比冲击试样的取向与尺寸的优先选择顺序应按表 5 规定。

当管子壁厚不够而采用小尺寸试样时,其最小冲击吸收能应根据表 6 比例系数相应减少。当壁厚不足以进行冲击试验时,制造商应提供在产品化学成分、矫直工艺、热处理工艺等方面对冲击吸收能的保证措施。

表 4 夏比冲击吸收能要求

钢 级	试验温度/℃	全尺寸试样冲击吸收能最小值/J	
		纵向	横向
110	0	80	60
125	0	80	60
140	0	80	60

表 5 冲击试样取向及尺寸的优先选择顺序

优先选择顺序	试样取向	试样尺寸/mm×mm
1	横向	10.0×10.0
2	横向	10.0×7.5
3	横向	10.0×5.0
4	纵向	10.0×10.0
5	纵向	10.0×7.5
6	纵向	10.0×5.0

表 6 小尺寸试样冲击吸收能比例系数

试样尺寸/mm×mm	比例系数/%
10.0×10.0	100
10.0×7.5	80
10.0×5.0	55

6.6 晶粒度

套管材料的晶粒度应为 GB/T 6394 中规定的 8 级或更细。

6.7 非金属夹杂物

套管材料各部位非金属夹杂物检验结果应符合表 7 规定(按 GB/T 10561 规定方法检验)。

表 7 夹杂物检验结果限定值

硫化物		氧化铝		硅酸盐		球状氧化物		总和
薄	厚	薄	厚	薄	厚	薄	厚	
≤1.5	≤1.0	≤1.5	≤1.0	≤1.5	≤1.0	≤1.5	≤1.0	≤6.0

6.8 几何尺寸与质量

6.8.1 通用要求

套管所有未规定偏差范围的尺寸应为设计的依据,不应作为验收或拒收的条件。

6.8.2 外径、壁厚和质量公差

套管外径、壁厚和质量公差应符合表 8 规定。

表 8 外径、壁厚和质量公差

项 目		公 差
外 径		0~+1.5%D
外径不圆度	$D \leq 244.48 \text{ mm}$	≤0.60%
	$D > 244.48 \text{ mm}$	≤0.60%
壁 厚	公差	≥-10%t
	壁厚不均度	≤12%
质 量	单根管子	-3.5%wt~+8%wt
	18 144 kg 以上的车载量	>-1.75%wt
	少于 18 144 kg 的车载量	>-3.5%wt

6.8.3 长度要求

长度范围应符合 GB/T 19830 或由购方和制造商协商确定。

6.8.4 外径不圆度和壁厚不均度

外径不圆度由公式(22)计算:

$$ov = 100 \cdot (D_{\max} - D_{\min}) / D_{\text{ave}} \dots\dots\dots (22)$$

壁厚不均度由公式(23)计算:

$$ec = 100 \cdot (t_{cmax} - t_{cmin}) / t_{cave} \dots\dots\dots (23)$$

6.8.5 管端直度

套管偏离直线或弦高不应超过下列规定:

- a) 从套管一端测量至另一端总长度的 0.15%;
- b) 在套管每端 1.5 m 长度范围内的偏离距离应不超过 2.8 mm。

6.8.6 通径要求

套管应进行全长通径检验,并应符合表 9 规定。

表 9 通径要求

规定套管外径 D/mm	通径棒尺寸/mm	
	最小长度	最小直径
<244.48	152	d-3.18
244.48~339.70	305	d-3.97
>339.70	305	d-4.76

6.9 静水压试验

套管应进行静水压试验,标准静水压试验压力应不低于按公式(24)计算的数值,数值圆整到最接近的 0.5 MPa,最大值为 69.0 MPa。静水压试验时,稳压时间不少于 5 s,且在规定的压力试验过程中不应出现任何压降。

$$P_{\infty} = (2 \times 0.85 \times Y_p \times t) / D \dots\dots\dots (24)$$

对接头密封效率低于管体的,静水压试验压力可由制造商和购方协商,但不应低于规定密封压力的 80%。静水压试验可以平端、带螺纹或螺纹和机紧接箍等形式进行,但宜在接箍与管体上扣连接后进行。

6.10 残余应力

套管的环向残余应力宜符合表 10 规定。

表 10 套管最大环向残余应力

钢级	最大环向残余应力/MPa
110	189
125	215
140	241

6.11 抗挤强度

套管的抗挤强度应按照表 1 中的方法确定,最小抗挤强度值应符合表 11 规定。

表 11 套管最小抗挤强度

规格	外径/mm	壁厚/mm	最小抗挤强度/MPa		
			钢级		
			110	125	140
4-1/2	114.30	5.69	50	51.3	57.9
4-1/2	114.30	6.35	64.8	68.2	78.2
4-1/2	114.30	7.37	85.7	91.8	104.7
4-1/2	114.30	8.56	108.3	116.6	130.2
5	127.00	6.43	52.2	53.9	61.1
5	127.00	7.52	73.6	78.2	89.7
5	127.00	9.19	102.9	110.8	124.4
5	127.00	11.10	132.6	144.9	163.3
5	127.00	12.14	147.7	161.4	184.6
5	127.00	12.70	155.6	170.1	196
5-1/2	139.70	7.72	64	67.4	77.3
5-1/2	139.70	9.17	88.3	94.7	107.7
5-1/2	139.70	10.54	109.4	117.9	131.5
5-1/2	139.70	12.70	139.1	152	172.5
5-1/2	139.70	14.27	159.5	174.3	201.4
5-1/2	139.70	15.88	179.8	196.6	230.3
5-1/2	139.70	17.45	199.1	217.8	257.6
6-5/8	168.28	8.94	58.7	61.3	70.1
6-5/8	168.28	10.59	82.2	87.9	100.4
6-5/8	168.28	12.06	101.4	109.2	122.8
7	177.80	8.05	39.6	39.6	42.8
7	177.80	9.19	55	57	64.9
7	177.80	10.36	71.3	75.7	86.8
7	177.80	11.51	86.3	92.4	105.3
7	177.80	12.65	100.3	107.9	121.5
7	177.80	13.72	113	121.7	135.3
7	177.80	15.88	136.2	148.7	168.3
7	177.80	17.45	152.3	166.4	191.2
7	177.80	19.05	168.4	184.1	214

7 套管工况适用性评价

7.1 适用性评价流程

页岩油气井套管工况适用性评价适用井型包括直井、水平井和定向斜井等,具体工况包括钻完井、下套管、固井、复杂压裂等,同时涵盖陆地及海上页岩油气井作业环境。适用性评价试验流程如图 2 所示。

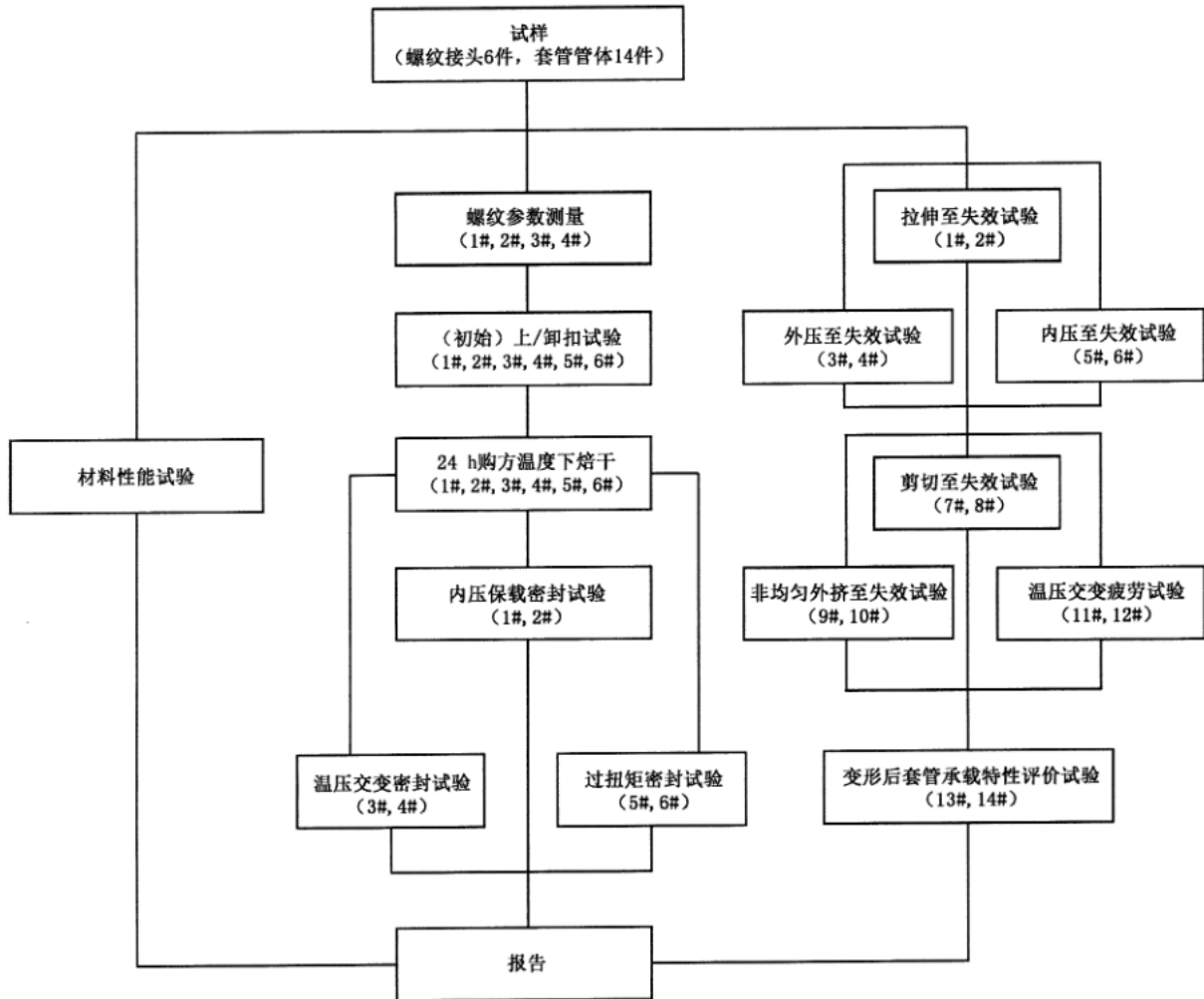


图 2 适用性评价试验流程图

7.2 试样

7.2.1 试验用试样的选择

7.2.1.1 试样的来源

试样选取采用随机抽样的方式进行,可由制造商和购方送样,也可由第三方到制造商或购方现场进行抽样,试样的来源方式应在报告中注明。

所有用于检验的试样均应准备一定数量的备用试样,这些试样可用于预演试验,或用于替换正式检验中途失败的正式试样,或用于重复性试验的平行试样。

7.2.1.2 试样的数量与分组编号

所有试样均应进行分组,各组中所有试样均应进行编号。

注:编号是为了易于区别每个试样,同时也为了保证试验的正确进行。

7.2.2 试样的检测

7.2.2.1 尺寸

试验前测量试样的外径、壁厚等几何尺寸,检验方法应按 GB/T 19830 或技术协议规定的标准进行,记录套管外径和壁厚。

对于破坏性试验,试验前后应测量试样的几何尺寸,并记录全部数据,测量项目包括试样的外径、壁厚、长度等几何尺寸。

7.2.2.2 螺纹参数

螺纹参数主要包括锥度、螺距、齿高、密封直径等,应按 GB/T 9253 及 GB/T 18052 或技术协议规定的标准进行螺纹检验,并记录全部数据。

现场取样应提供现场螺纹检测数据,在试验过程中,根据需要可重新测量上述螺纹参数,并记录全部数据。

7.2.2.3 无损检测

对进行压力试验的试样应进行超声波、磁粉或电磁检测中的一种或两种,检查其是否存在缺陷。

7.3 安装要求

7.3.1 上、卸扣试样

当采用单端上扣时夹具应夹持在接箍不上扣的一端,应选择合适的夹持力,保证试样的中心轴线和钳的大钳的旋转中心线一致。大钳钳牙平面应与试样垂直,力臂和钳牙处于同一平面,力臂与载荷传感器呈 90° 夹角。

7.3.2 压力传感器

压力传感器与试样的内压或外压腔体连接到一起,不应放到加压的孔口。

7.3.3 位移传感器

位移传感器应固定在试样上,测量范围应包含试样连接处,不应偏斜安装。

7.3.4 芯棒

所有内压试验均应在试样内放置芯棒,以减少试验压力介质贮能,但应给轴向留有间隙,以保证上扣试验或压缩试验顺利进行。

7.4 适用性评价技术要求

7.4.1 全尺寸套管实物性能

7.4.1.1 拉伸强度

管体屈服强度应符合 GB/T 20657 中套管管体轴向拉伸性能要求,并符合钻完井过程套管强度安

全要求。

7.4.1.2 抗挤强度

均匀分布外载作用下,套管管体外压挤毁抗力应达到 GB/T 20657 中套管抗挤强度,并符合钻完井下套管过程中强度安全要求。

7.4.1.3 抗内压强度

套管的内压强度首先应符合 GB/T 20657 中套管内压屈服强度;其次,应符合多级压裂工况压力要求,结构保持完整,不发生开裂损伤。

7.4.1.4 抗剪切强度

首先确定套管抗剪切强度;其次,剪切载荷作用下,套管变形后剩余通径应大于井下工具外径,确保不影响工具的顺利通过。

7.4.2 螺纹接头抗粘扣性能

按 GB/T 17745 规定或购方推荐的上扣位置和/或最大扭矩控制,完成三次上扣、两次卸扣,在上扣、卸扣过程中,管端外螺纹和接箍内螺纹均不应出现粘扣现象。

7.4.3 螺纹接头密封性能

7.4.3.1 内压保载密封

钻完井内压条件下,应保持压力过程中套管螺纹连接密封完整,不发生泄漏。

7.4.3.2 温压交变密封

7.4.3.2.1 室温、直井井型,温度-内压循环不低于 50 周次,峰值载荷下保持 4 h,谷值载荷下保持 2 h。温度-内压交变循环过程中套管柱内压应稳定,螺纹连接密封完整,不发生泄漏;同时,套管柱应结构完整,无明显失效现象。

7.4.3.2.2 高温、水平井井型,温度-内压循环不低于 50 周次,峰值载荷下保持 4 h,谷值载荷下保持 2 h。20°/30 m 狗腿度弯曲加载下,温度-内压交变循环过程中套管柱内压应稳定,螺纹连接密封完整,不发生泄漏;同时,套管柱结构应完整,无明显失效现象。

7.5 适用性评价试验程序

7.5.1 全尺寸套管管体实物性能试验

7.5.1.1 拉伸至失效试验

全尺寸套管管体实物性能试验应包括拉伸至失效试验,具体步骤及要求如下。

- a) 对试样施加轴向拉伸加载,拉伸至失效破坏。
- b) 拉伸过程中记录拉伸载荷-位移曲线。
- c) 失效断裂应出现在套管管体上,管端-接箍之间的连接部位应结构完整;同时管体断口位置附近有一定程度的颈缩现象。
- d) 分别记录每次试验的结果,对拉断部位拍照,明确断裂部位,在试验报告中应包括一些有代表性的失效试样照片。

7.5.1.2 外压至失效试验

全尺寸套管管体实物性能试验应包括外压至失效试验,具体步骤及要求如下:

- a) 套管管端采用堵头焊接封堵,在室温下采用液体水加压;
- b) 对试样施加均匀外压直至挤毁失效(失效定义为管体压扁或连接部位出现泄漏);
- c) 分别记录每次试验的结果,在试验报告中应包括一些有代表性的失效试样照片。

7.5.1.3 内压至失效试验

全尺寸套管管体实物性能试验应包括内压至失效试验,具体步骤及要求如下:

- a) 给试样加内压直至其失效;
- b) 分别记录每次试验的结果,在试验报告中应包括一些有代表性的失效试样照片。

7.5.1.4 剪切至失效试验

全尺寸套管管体实物性能试验应包括剪切至失效试验,具体步骤及要求如下:

- a) 确定试验剪切夹具,给试样施加剪切载荷直至其失效,获取剪切载荷-位移关系曲线(按照附录 A 执行);
- b) 分别记录每次试验的结果,在试验报告中应包括一些有代表性的失效试样照片。

7.5.1.5 非均匀外挤至失效试验

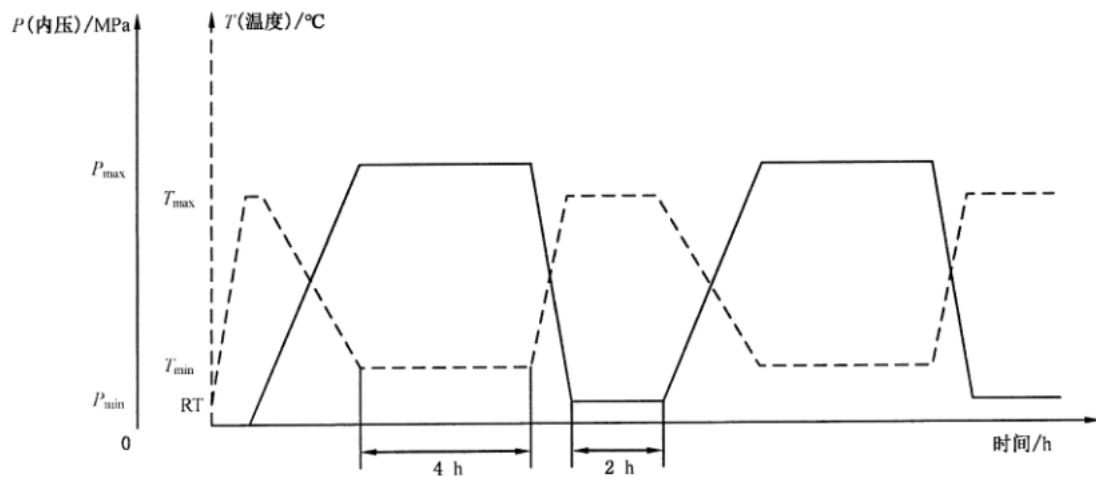
全尺寸套管管体实物性能试验应包括非均匀外挤至失效试验,具体步骤及要求如下:

- a) 确定非均匀外挤系数,给试样施加非均匀外挤载荷直至其失效,获取非均匀外挤载荷-位移关系曲线(按照附录 B 执行);
- b) 分别记录每次试验的结果,在试验报告中应包括一些有代表性的失效试样照片。

7.5.1.6 温压交变疲劳试验

全尺寸套管管体实物性能试验应包括温压交变疲劳试验,具体步骤及要求如下:

- a) 根据现场复杂压裂工况确定套管服役温压载荷条件(最大内压载荷 P_{\max} 、最小内压载荷 P_{\min} 、最高温度 T_{\max} 和最低温度 T_{\min});
- b) 试验加载路径如图 3 和表 12 所示,加/卸载速率不超过 35 MPa/min;
- c) 按照步骤 b) 循环 50 次,循环次数也可由购方与制造商协商确定;
- d) 按照 7.5.1.1 的试验流程确定循环后套管抗拉强度;
- e) 按照 7.5.1.2 的试验流程确定循环后套管抗挤强度;
- f) 按照 7.5.1.3 的试验流程确定循环后套管抗内压强度;
- g) 分别记录每次试验的结果,比对循环前后套管承载特性变化,强度降低幅度均不超过 10%。



说明：

—— 内压, MPa;

----- 温度, °C。

注：RT 表示室温。

图 3 温压交变疲劳试验加载路径(单位周期)

表 12 温压交变疲劳试验载荷步骤(单位周期)

载荷步骤	1	2	3	4	5	6	7
温度/°C	室温	T_{max}	T_{max}	T_{min}	T_{min}	T_{max}	T_{max}
内压/MPa	0	0	P_{min}	P_{max}	P_{max}	P_{min}	P_{min}
时间/h	0	—	—	—	4	—	2

7.5.1.7 变形后套管承载特性评价试验

全尺寸套管管体实物性能试验宜包括变形后套管承载特性评价试验,具体步骤及要求如下:

- 基于现场测井数据,确定套管最大变形量和变形形貌;
- 依据变形形貌,判断试验加载方式为剪切或非均匀外挤;
- 通过位移控制进行模拟试验,按照 7.5.1.4 或 7.5.1.5 的试验程序,得到 a) 中套管的 最大变形量和变形形貌;
- 按照 7.5.1.1 的试验流程确定变形套管的剩余抗拉强度;
- 按照 7.5.1.2 的试验流程确定变形套管的剩余抗挤强度;
- 按照 7.5.1.3 的试验流程确定变形套管的剩余抗内压强度;
- 分别记录每次试验的结果,在试验报告中应包括一些有代表性的失效试样照片。

7.5.2 上/卸扣试验

7.5.2.1 初始上/卸扣试验

应依据 GB/T 17745 和 GB/T 21267 中规定操作。

7.5.2.2 试验机

上、卸扣试验的试验机系统应带有扭矩测试仪、圈数测试仪、扭矩到位自动控制阀,同时能自动采集

并记录上扣扭矩、上扣圈数及上扣时间等参数,并能显示扭矩-圈数及扭矩-时间曲线。试验机整机及所用的载荷传感器、压力传感器等计量器具,应经过具有试验机及传感器检定资格的部门进行检定和校准,检定或校准周期不应超过1年,标定或校准载荷范围内相对误差应不大于±1.0%。

7.5.2.3 螺纹脂

上扣使用的螺纹脂由制造商或购方推荐。应由制造商给出涂抹的最多量和最少量,或者由制造商提供涂抹螺纹脂的图片和详细说明。如果认为螺纹性能不受涂抹的影响,应予以说明。每次上扣前均应彻底清洗螺纹,并称出每个螺纹应涂抹的螺纹脂量。按最大扭矩控制上扣的螺纹,应涂抹最多量的螺纹脂;按最小扭矩控制上扣的螺纹,应涂抹最少量的螺纹脂。每次卸扣后,应重新清洗内、外螺纹。同批试验的所有试样应使用同一种螺纹脂。

7.5.2.4 扭矩和速度的确定

对于符合 GB/T 19830 的套管螺纹,如果制造商推荐上扣扭矩,则最大扭矩、最佳扭矩和最小扭矩按制造商推荐的扭矩确定。如果未推荐,则按三角形标记位置确定。对于特殊螺纹套管,最大扭矩、最佳扭矩和最小扭矩应按制造商推荐的扭矩确定。对于各试样每次上扣,应按规定的扭矩大小控制上扣。对于规定的最大扭矩,可接受最大或更大的扭矩;对于规定最小扭矩,可接受最小或更小的扭矩。如果实际扭矩在最大或最小扭矩之间,则应卸开螺纹重新施加扭矩上扣。上扣速度应按制造商或购方的推荐值,但不应超过 25 r/min。

7.5.2.5 上扣方式

宜使用垂直上扣方式进行上、卸扣试验。

对于接箍连接试样,宜采用每端分别上扣方式,夹具夹持接箍的位置宜在不上扣一端,避免夹持对上扣产生不良影响。对于需要应变测量的上卸扣试验,可采用不夹持接箍只夹持两端管体的浮动上扣方式。

7.5.3 螺纹接头密封试验

7.5.3.1 内压保载密封试验

螺纹接头密封试验应包括内压保载试验,依据 GB/T 21267 中相关规定操作,具体步骤及要求如下:

- a) 采用封堵套管试样,对螺纹连接处的螺纹脂进行焙干;
- b) 缓慢加压充填气体至额定内压载荷,保压 10 min;
- c) 检测套管螺纹连接处是否发生泄漏,泄漏依据内压泄漏检测方法,见 GB/T 21267;
- d) 记录试验结果。

7.5.3.2 温压交变密封试验

螺纹接头密封试验应包括温压交变密封试验,具体步骤同 7.5.1.6 a)~f),随后按照 7.5.3.1 步骤进行试验,并记录试验结果。

7.5.3.3 过扭矩密封试验

如果接头选用的标准上扣扭矩接近材料屈服强度所允许的最大极限,可不再做试验。但如果在最大上扣扭矩和屈服扭矩之间还有超过 10% 的安全富余,应补充购方要求的过扭矩试验。具体步骤及要求如下:

- a) 在 7.5.2 的上扣程序中按 90% 的屈服扭矩进行 2 次上、卸扣试验；
- b) 清洗并测量接头；
- c) 按 90% 的屈服扭矩最终上扣；
- d) 按照 7.5.3.1 步骤进行试验；
- e) 记录试验结果。

附录 A

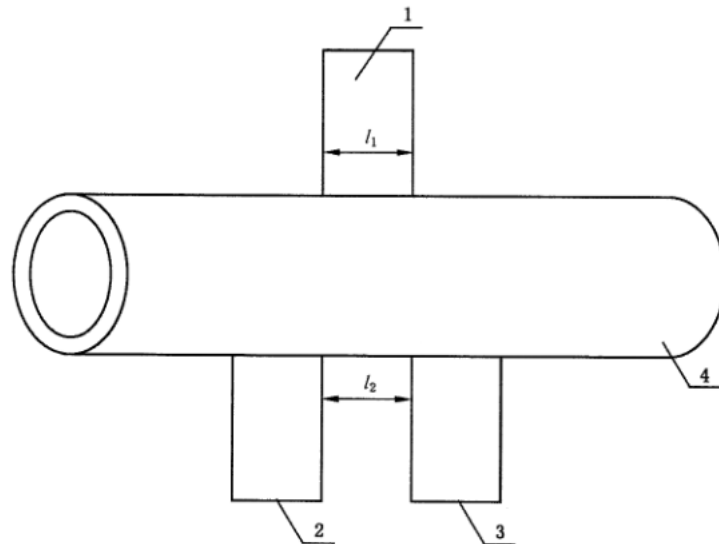
(规范性)

套管抗剪切性能评价方法

套管试样长度的选取应根据抗剪切性能评价装置几何尺寸决定,长度宜为 6 000 mm 或 4 000 mm 两种。具体长度由制造商和购方协商确定。

图 A.1 中上下剪切板安装偏差($l_2/2-l_1/2$)不大于 5 mm,进行剪切试验,得到套管剪切载荷与剪切变形关系曲线,如图 A.2 所示。剪切试验以位移方式加载,当变形套管剩余通径与井下工具最大外径相等时,将此时的套管变形量定义为套管允许最大变形量 ΔD_{smax} ,对应的套管允许最大应变按照公式(A.1)计算,将此时的剪切载荷定义为套管抗剪切强度 F_s ,套管安全系数 n 宜通过套管-水泥环系统抗剪切模拟试验确定, n 宜取 1.1~1.5(具体工况通过试验评价确定)。

$$\epsilon_{dmax} = \frac{\Delta D_{smax}}{d} \times 100\% \quad \dots\dots\dots (A.1)$$



标引序号说明:

- 1 —— 上剪切板;
- 2 —— 第一下剪切板;
- 3 —— 第二下剪切板;
- 4 —— 套管;
- l_1 —— 剪切板宽度;
- l_2 —— 剪切板间距。

图 A.1 套管抗剪切试验模拟装置示意图

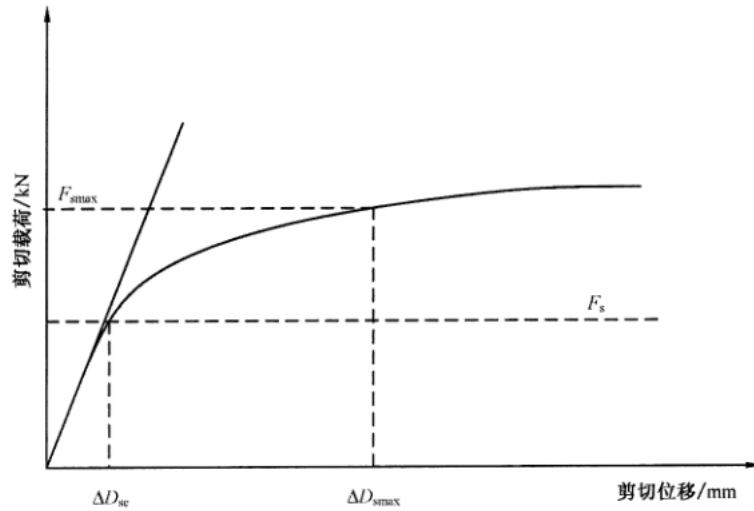


图 A.2 套管剪切载荷和剪切变形关系曲线

试验类型包括：

- a) 纯剪切试验：放置套管试样于试验架上，进行剪切试验；
- b) 拉伸状态剪切试验：在套管试样两端添加堵头，安装在试验架上，进行轴向拉伸，当拉伸载荷达到目标值后进行剪切，堵头与试验架固定连接；
- c) 压缩状态剪切试验：在套管试样两端添加堵头，安装在试验架上，进行轴向压缩，当压缩载荷达到目标值后进行剪切，堵头与试验架固定连接；
- d) 内压状态剪切试验：在套管试样两端添加堵头，安装在试验架上，进行内压加载，当内压载荷达到目标值后进行剪切，堵头与试验架固定连接。

附录 B

(规范性)

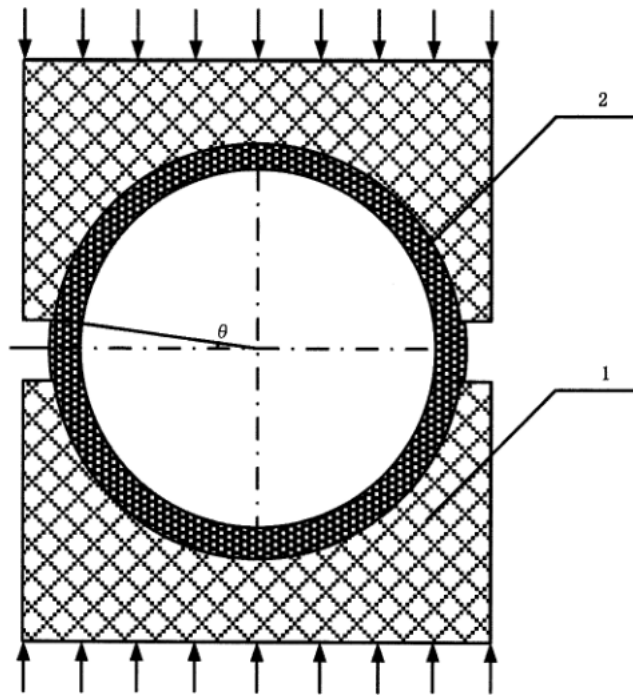
套管抗非均匀外挤评价方法

套管试样长度选取应根据抗非均匀外挤评价装置几何尺寸决定,长度宜为 6 000 mm 或 4 000 mm 两种。具体长度由制造商和购方协商确定。

图 B.1 中的非均匀外挤夹具工装可根据不同的非均匀系数工况进行更换。非均匀系数值由有限元数值模拟方式确定,根据夹具工装尺寸与套管尺寸,建立有限元模型,并模拟计算位移载荷下套管外围的椭圆外挤载荷 $p(\theta)$,有限元模拟结果 $p(\theta)$ 的分布规律满足公式(B.1)时,认为结果模型正确,得到外挤载荷非均匀系数 λ ,见公式(B.2)。

$$p(\theta) = p(0) + p(90) \cos 2\theta \quad \dots\dots\dots (B.1)$$

$$\lambda = \frac{p(90)}{p(0)} \quad \dots\dots\dots (B.2)$$



标引序号说明:

1——外挤夹具;

2——套管截面。

图 B.1 非均匀外挤夹具工装确定示意图

根据非均匀系数工况需求,选取对应的非均匀外挤夹具工装尺寸,通过位移加载方式得到套管非均匀外挤载荷与径向挤压变形对应曲线,如图 B.2 所示。非均匀外挤试验以位移方式加载,当变形套管剩余通径与井下工具最大外径相等时,将此时的套管变形量定义为套管允许最大变形量 ΔD_{\max} ,对应的套管允许最大应变按照公式(B.3)计算,将此时外挤载荷定义为套管抗非均匀外挤强度 F_n ,套管安全系数 n 宜通过套管-水泥环系统抗非均匀外挤模拟试验确定, n 宜取 1.1~1.2(具体工况通过试验评价确定)。

$$\epsilon_{d\max} = \frac{\Delta D_{\max}}{d} \times 100\% \quad \dots\dots\dots (B.3)$$

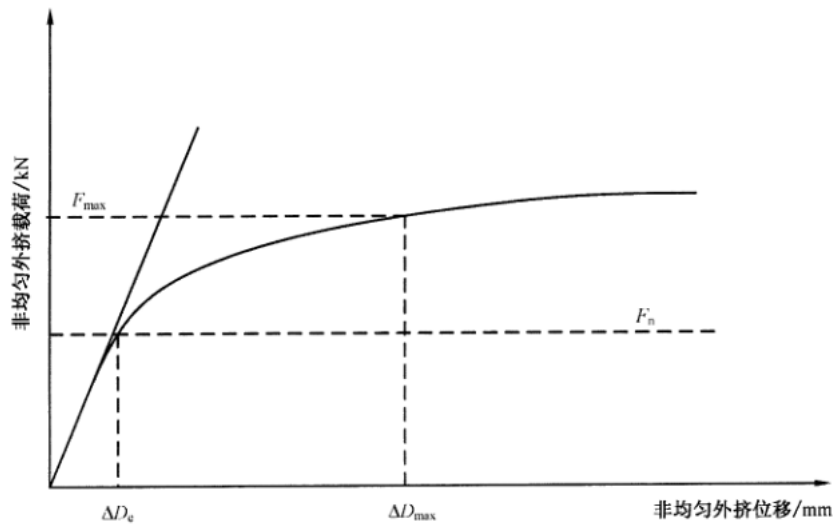


图 B.2 套管非均匀外挤载荷和挤压变形关系曲线

试验类型包括：

- a) 纯非均匀外挤试验：放置套管试样于试验架上，进行非均匀外挤试验；
- b) 拉伸状态非均匀外挤试验：在套管试样两端添加堵头，安装在试验架上，进行轴向拉伸，当拉伸载荷达到目标值后，进行非均匀外挤，堵头与试验架固定连接；
- c) 压缩状态非均匀外挤试验：在套管试样两端添加堵头，安装在试验架上，进行轴向压缩，当压缩载荷达到目标值后，进行非均匀外挤，堵头与试验架固定连接；
- d) 内压状态非均匀外挤试验：在套管试样两端添加堵头，安装在试验架上，进行内压加载，当内压载荷达到目标值后，进行非均匀外挤，堵头与试验架固定连接。