

油田油水井套管损坏的机理及防治

油田油水井套管

损坏的机理及防治

王仲茂 卢万恒 胡江明 编著



石油工业出版社

(京)登字 082 号

内 容 提 要

本书系统地介绍了油水井套管的受力,API 套管强度计算方法及井下岩体力学基础;详细分析了套管损坏形态、检测以及套管损坏的机理;最后还给出了套管损坏的预防、治理和套损井的利用。

本书适应了油气田开发、钻井等专业的工程技术人员阅读。也可供院校相关专业的师生阅读参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

油田油水井套管损坏的机理及防治/王仲茂等编著.

北京:石油工业出版社,1994

ISBN 7-5021-1190-5

I. 油...

Ⅱ. 王...

Ⅲ. 油层套管-隔水套管-损伤-机理

IV. TE93

石油工业出版社出版

(100011 北京安定门外安华里 2 区 1 号楼)

河北省徐水县冀强印刷厂排版印刷

新华书店北京发行所发行

*

787×1092 毫米 16 开 9½ 印张 237 千字 印 1—5000

1994 年 4 月北京第 1 版 1994 年 4 月第 1 次印刷

定价:10.00 元

前 言

国内外许多油田经过一个时期开发,均出现过大批油水井套管损坏现象。如罗马尼亚的坦勒斯娄油田,开发 22 年已有 20% 油井套管损坏,前苏联的班长达勒威油田有 30% 的井因套管损坏而停产,美国威明顿油田从 1926 年到 1986 年开发 40 年间,由于地下液体大量采出,出现亏空,引起该地区较强的构造运动,油田中心地区地面下沉达 9 米,水平位移 3 米,造成油水井成片错断,损失严重。国内部分油田也存在油水井套管损坏现象,例如吉林扶余油田注水开发十年出现套变井 1511 口,其中油井 1229 口,注水井 282 口,分别占油水井总数的 52% 和 45.5%。吉林新立油田自 83 年全面投入开发到 92 年底,注水井套管变形达 82 口,占注水井总井数的 89%,已严重威胁到油田生产。各油田的套管损坏现象有各自特点,而由于高压注水引起油水井套管成片损坏,应是国内油田套管损坏的主要原因。

当今,越来越多的强化采油措施不断用于生产,如高压注水、压裂、大型酸化、注蒸汽等,取得了明显经济效益,但也使套管的工作环境不断恶化,并且所受的外载不断增加,而多年来套管强度设计的基本理论和方法均以完井施工作为主要考虑因素,对采油、注水措施施工,地应力变化过程中一系列因素考虑较少或未予考虑。现场实际情况表明,油水井投产后,套管承受的外载比完井时大得多。这是造成套管损坏的一个重要因素。因此认真分析和研究套管损坏的各种因素和机理,改进套管设计方法,满足长期采油需要,是一个亟待解决的问题。

国内外对有关套管损坏的机理研究还不够系统和深入,仍处在探索定性阶段,但目前所取得的研究成果,已应用于防止套管损坏。如注水开发油田,在防止套管损坏时,从四个方面开展工作:一是限制注水压力,注水压力限制在地层破裂压力以内;二是防止注入水进入非油层段,特别是泥页岩段;三是保持注采平衡,防止相邻区块间地层压力出现较大压差;四是应用地应力设计套管。采用这些措施后,全国注水开发油田套管损坏已得到控制,并取得很大经济效益。

国内在套管损坏井治理方面,已经形成了系列套管损坏井检测技术和修理工艺。这本书的编写主要目的是系统研究套管损坏的各种机理和防止方法,并介绍套管损坏井的检测技术和治理工艺技术。由于编者水平有限,书中有不妥之处,请予以指正或商讨。

编 者

目 录

第一章 套管类型及套管柱受力	(1)
第一节 套管类型	(1)
第二节 套管受力	(1)
第二章 API 套管强度计算方法	(7)
第一节 外挤毁压力计算公式	(7)
第二节 挤毁压力公式的推导及应用范围	(9)
第三节 轴向拉应力作用下的挤毁压力计算	(15)
第四节 套管的抗拉强度 API 计算方法	(18)
第五节 套管的抗内压 API 计算方法	(21)
第三章 井下岩体力学基础	(23)
第一节 岩石的力学性质	(23)
第二节 岩石的强度与破裂	(27)
第三节 岩体的结构面特性和对岩体的强度影响	(35)
第四章 套管损坏形态及检测方法	(41)
第一节 套管损坏的形态	(41)
第二节 套管损坏在平面和井身剖面分布规律	(46)
第三节 套管损坏的检测方法	(52)
第四节 套损方位的检测	(56)
第五章 套管损坏的机理	(61)
第一节 泥岩吸水蠕变造成套管损坏	(61)
第二节 岩层滑动引起套管损坏	(84)
第三节 油田开发过程中断层复活造成套管损坏	(94)
第四节 盐岩对套管损坏的原因	(100)
第五节 油层出砂对套管损坏	(107)
第六节 腐蚀造成套管损坏	(113)
第七节 其它因素使套管损坏	(119)
第六章 套管损坏的预防、治理和套损井的利用	(127)
第一节 套管损坏的预防	(127)
第二节 套管损坏井的修复	(136)
第三节 套管损坏井的利用	(143)
参考文献	(147)

第一章 套管类型及套管柱受力

第一节 套管类型

每口井都要下入一层或数层套管，根据下入套管的用途不同，可分为导管、表层套管、技术套管、生产套管和尾管，见图 1-1。正常压力系统的井通常仅下三层套管：导管、表层套管和生产套管。异常压力系统的井，至少多下一层技术套管。

一、导管

导管的作用是在钻表层井眼时将钻井液从地表引导到钻井装置平面上来。这一层管柱其长度变化较大，在坚硬的岩层中仅用 10~20m，而在沼泽地则可能上百米。

二、表层套管

表层套管下入深度一般在 30~150m，通常水泥浆返至地表。用来防护浅水层污染，封隔浅层流砂、砾石层及浅层气。它也是井口设备（套管头及采油树）的唯一支撑件，以及悬挂依次下入的各层套管（包括采油管柱）载荷。

三、技术套管

技术套管用来隔离坍塌地层及高压水层，防止井径扩大，减少阻卡及键槽的发生，以便继续钻进。技术套管还用来分隔不同压力层系，以便建立正常的钻井液循环。

四、生产套管（采油或采气套管）

生产套管的主要作用是将储集层中的油气从套管中采出来，并用来保护井壁，隔开各层的流体，达到油气井分层测试，分层采油、注水和分层改造的目的。通常水泥返至油层顶部以上 200 米。

五、尾管

尾管是一种不延伸到井口的套管柱，分为钻井尾管和采油尾管。

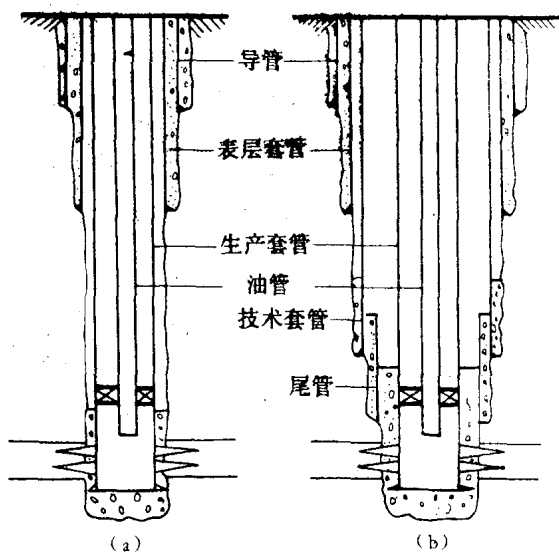


图 1-1 套管类型

(a) 正常压力井； (b) 异常压力井

第二节 套管受力

套管柱下井后受力情况是比较复杂的，而且不同时期受力也不同。例如，下套管过程中与注水泥时套管所受的外载不同，酸化压裂时与正常采油时套管所受的载荷也不一样，而且

不同的地层往往也有差别。如在易变的盐层，由于盐层蠕变产生地应力变化，形成不均匀的外挤压力挤压套管。但控制套管失稳基本外载是轴向拉（压）力、外挤压力和内压力。

一、轴向拉（压）力

套管的拉力载荷主要由套管的自重引起。在生产中可能受到负有效应力，油层压实和井筒温度上升或下降引起轴向拉力或压缩力。

1. 自重引起轴向拉力

自重引起轴向拉力是由下而上逐渐增大，在井口处，套管轴向拉力最大，其计算如下式：

$$T = \Sigma qL \quad (1-1)$$

式中 q ——套管名义单位平均重量（包括接箍在内），kg/m；

L ——套管长度，m；

T ——井口处套管轴向拉力，kg。

考虑浮力时，套管柱在泥浆中的重量计算如下式：

$$\begin{aligned} T_b &= \Sigma qL - \Sigma qL \frac{\gamma_m}{\gamma_s} \\ &= \Sigma qL \left(1 - \frac{\gamma_m}{\gamma_s}\right) \end{aligned} \quad (1-2)$$

式中 γ_m ——泥浆密度，g/cm³；

γ_s ——套管钢材密度，g/cm³；

T_b ——套管在泥浆中重量，kg。

自重引起轴向应力分布见图 1-2。

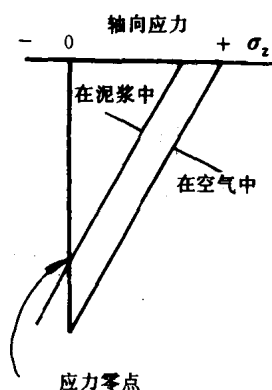


图 1-2 自重引起轴向应力及在

泥浆柱内应力分布图

2. 油层压实引起轴向压缩应力

在油田开发过程中，经常遇见超高压油层，这类油层属于欠压实的，它的孔隙度和渗透率在同一深度上比正常压实油层高。超高压油层在枯竭过程中，地层变形主要出现在井筒附近。由于套管固结在井筒中，所以，套管随固井水泥环一起变形，由于钢的强度高，因而上覆岩层负荷集中套管上，引起套管轴向压缩应力。

3. 负有效应力作用引起轴向拉伸应力

当注水压力足够高时，垂向有效应力呈现为负值，使井口附近上覆盖层隆起，造成与上述所讲压实作用相反的

4. 温度引起轴向力

为了满足采油工艺需要，在稠油开采的井，通常在套管内采用间隔或长期注热蒸汽来提高单井产量，或采用反循环定期热洗井来解决油管（杆）结蜡问题，因而带来井下套管温度变化，温度增高或降低将导致套管柱伸长或缩短。由于套管在井口和水泥环以下固定了，因而在没有固水泥的套管中就会产生相应的轴向压缩或拉伸应力。

温度引起套管长度变化值为：

$$\Delta L = \alpha \cdot L \cdot \Delta t \quad (1-3)$$

式中 ΔL ——温度引起套管长度变化值，m；

α ——钢的膨胀系数，1/℃；

L ——套管长度，m。

如果套管两端固定,不让其伸长和收缩,则温度引起套管轴向应力可用虎克定律求得,即:

$$\frac{\Delta L}{L} = \pm \frac{\sigma}{E}$$

$$\sigma = \pm \Delta L \cdot E / L = \pm \alpha \cdot \Delta t \cdot E \quad (1-4)$$

式中 σ ——轴向应力, MPa;

E ——弹性模量, N/m²。

根据材料力学理论,当轴向拉力存在时,套管抗挤强度降低。而当轴向压缩应力达到临界值时,其管柱将失稳而弯曲。

二、外挤压力

大部分套管的损坏是由于管外外挤压力引起的,而套管柱所受的外挤压力主要来自管外泥浆柱压力、地层流体压力和围岩压力。

1. 泥浆柱压力

当油水井完井时,水泥返高一般不到地面,一般返到上部油层顶界以上 200 米左右。因而未固井井段泥浆柱压力仍作用在套管上,其计算如下:

$$p = GL \quad (1-5)$$

式中 G ——套管外环形空间泥浆柱压力梯度, MPa/m;

L ——管外泥浆柱高度, m;

p ——泥浆柱压力, MPa。

2. 地层流体压力

地层流体压力指井下岩石孔隙内流体压力。对于地层是在正常沉积环境中形成的,地层处于正常的压实状态,地层流体压力保持为静液柱压力,因而为正常地层压力。在异常沉积环境中,地层压力为异常状态。当地层压力小于正常地层压力,称为异常低地层压力。当地层压力大于正常地层压力时,就称为异常高压地层压力,一般称为欠压实地层,见图 1-3。现场实际

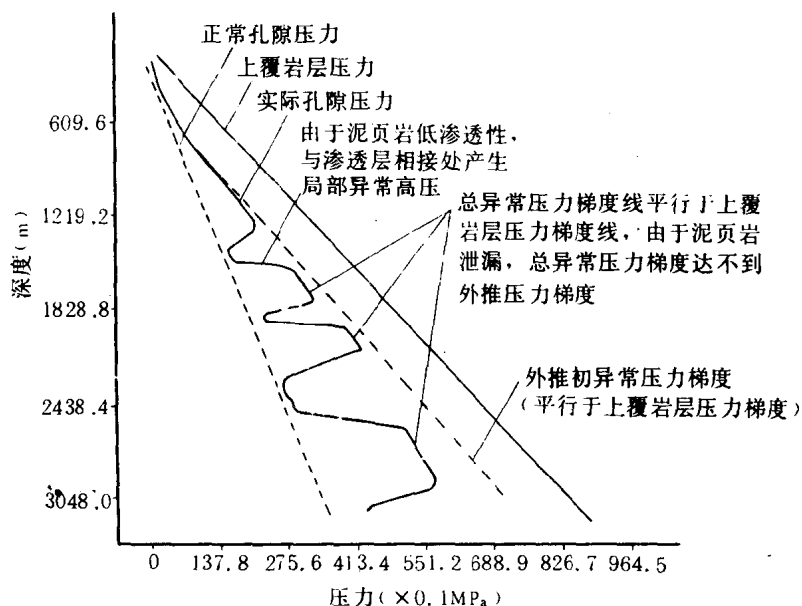


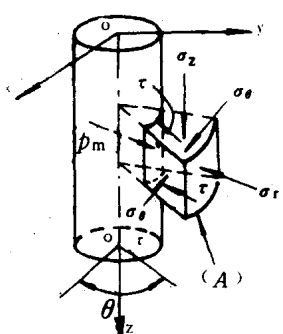
图 1-3 深度与原始地层压力关系

表明,这三类地层压力都能遇到,其异常高压地层更为多见。

3. 围岩压力

钻井后,井眼周围的岩石(简称围岩)中出现了临空面,引起围岩中应力重新分布和围岩变形。这种变形受到套管和管外水泥壳的限制,同时套管也受到围岩的反作用力,我们称此反作用力为围岩压力。

根据岩石力学理论,各种地质构造均系岩石变形的产物,而岩石变形则主要由地壳内的力作用引起的,这力就是地应力。因而可以认为围岩应力重新分布实际上是地应力重新分布,围岩的变形是地应力重新分布产物。故套管受到围岩压力实际上是受地应力,其地应力可用三个主应力表示,这就是垂向主应力 σ_z ,它主要取决于上覆岩的重量;两个水平向主应力,见图1-4,它是由岩石自重引起的应力分量及各种地质作用总的结果所决定。水平向主应力可用两个相互垂直的应力描述:一个为最大水平主应力 σ_x ,另一个为最小水平主应力 σ_y 。理论上讲(第三章、第五章讲述),地应力形成的围岩压力迟早要作用在套管上挤压套管,这个力是影响套管损坏的主要作用力,弄清这个力对防止套管损坏有特殊意义。三个主应力的计算目前公认的方法是由海姆森和法尔赫斯于1967、1970年提出的水力压裂计算,计算三个原始地应力(压应力为正)的公式如下:



$$\left. \begin{aligned} \sigma_z &= \rho g H \\ \sigma_y &= p_{\text{ini}} + p_H \\ \sigma_x &= T_s + 3\sigma_y - (p_F + p_H) - p_s \\ &= T_s + 3p_{\text{ini}} + 2p_H - p_F - p_s \end{aligned} \right\} \quad (1-6)$$

图1-4 井眼围岩压力在极坐标系应力状态

式中 ρ ——岩石平均密度, g/cm^3 ;

H ——岩层深度, m ;

p_{ini} ——压裂时瞬时停泵压力,即岩石形成裂缝后瞬时停泵裂缝保持张开所需压力(地面上测量), MPa ;

p_F ——破裂压力,即水力压裂达到岩层形成裂缝的最高压力(地面上测量), MPa ;

p_s ——岩层的孔隙压力, MPa ;

p_H ——压裂层中部静水柱压力, MPa ;

T_s ——岩石抗张强度,由三轴模拟试验确定或在压裂排量相同的条件下由破裂压力减去重张压力来确定它的近似值, MPa ;

利用此方法测试地应力,关键技术是如何利用水力压裂施工曲线求得。一般在压裂测试过程中,连续记录工作压力和排量,在获得破裂压力之后,保持排量不变,瞬时停泵2~3次,获得瞬时停泵压力。图1-5是大庆油田129井水力压裂施工曲线,从曲线上可确定 p_F , p_{ini} 值,利用此值就能很容易确定 σ_x 和 σ_y 。

垂向主应力可直接由上覆地层密度所决定。一般地层垂向主应力可近似用 $\sigma_z = 0.023H$ 计算。

除用上述方法测定地应力外,还可声发射凯塞(Kaiser)效应法、差应变方法、波速方法和柱状应力分布法测定。

表1-1为用水力压裂法测定江汉潜江地区深部地应力一览表,图1-6为潜江地区地应力与深度关系图。

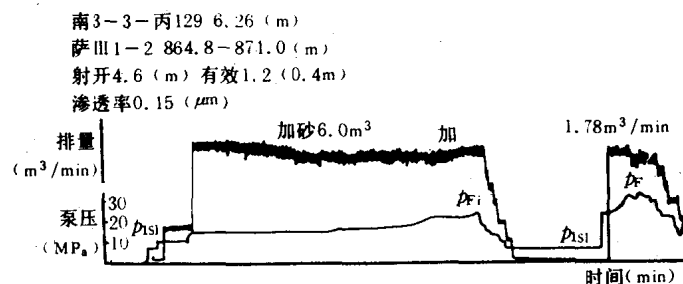


图 1-5 大庆油田 129 井水力压裂施工曲线

表 1-1 潜江地区深部地应力测量表

观测深度 (m)	最大水平主应力 (10^{-1}MPa)	最小水平主应力 (10^{-1}MPa)	垂向主应力 (10^{-1}MPa)	水平应力比
1989	565	379	403	0.71
2692	729	539	565	0.74
2829	853	563	494	0.66
3045	792	558	639	0.71
2494	570	404	511	0.71

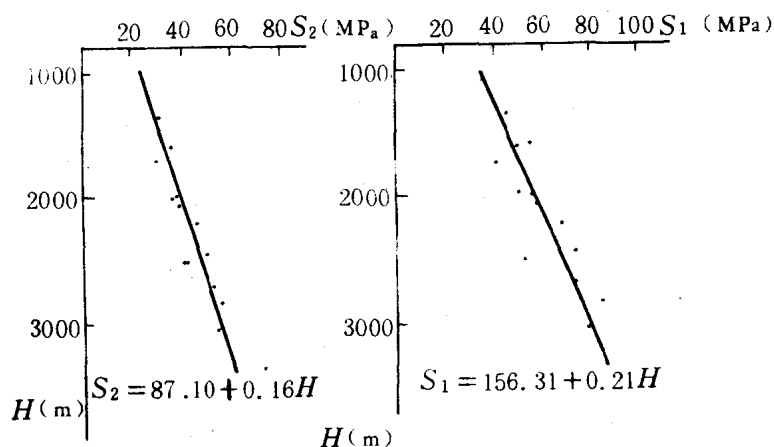


图 1-6 潜江地区地应力与深度关系图

三、内应力

井口打开时套管内压力等于管内液柱或气柱压力，井口关闭或打压时套管内压等于液柱或气柱压力与井口压力之和。

套管所受最大内压多发生在井喷关井时或进行压裂、酸化等特殊作业。由于套管内外压互相抵消一部分，因此套管所受内压大小并不很主要。但是要指出的是，在高压注水、压裂、酸化施工中应考虑内压影响。尤其是由于用腐蚀性很强的液体通过套管改造油层或套管磨损很严重时，一定要考虑套管的缺陷造成的抗内压下降的影响，以防止内压损坏套管。

四、套管弯曲应力

当井斜较大,尤其是所下套管直径较大时,套管因弯曲作用而在截面上引起相当大的正应力,这个正应力在套管设计中应给予考虑。弯曲最大应力可采用下面方法计算,即

$$\sigma_{\max} = \frac{ED\alpha}{115L} \quad (1-7)$$

式中 D ——套管外径,m;

α ——井斜角,度;

L ——弯曲井段长度,m;

$\sigma_{\max}$ ——最大弯曲应力,MPa;

E ——钢的弹性模量,MPa;

弯曲应力 $\sigma_{\max}$ 乘以套管横截面积 $A_s(\text{cm}^2)$,即得套管弯曲载荷 $Q_B(\text{N})$:

$$Q_B = A_s \sigma_{\max}$$

弯曲在外侧产生拉应力,增大套管拉力载荷,因而降低了套管抗挤强度。

上面所讲的是套管所受的四种典型力。除这四种外,套管还受其它力作用,如摩擦力、侧向挤压力等。因此对于一口具体套管损坏井,要作具体受力分析,才能找到套管损坏是受何力作用的结果。

第二章 API 套管强度计算方法

套管抗静水外压的挤毁能力是套管设计中一项非常重要的内容。就世界范围看,当今已成为规范或标准的只有两种计算方法。一是美国石油学会标准(API);另一种是前苏联国家标准(ГОСТ)。目前我国已广泛采用 API 标准进行设计、校核抗挤、抗拉强度。因而本章仅介绍 API 计算方法,以便为第五章讲述套管变形机理打下基础。

第一节 外挤毁压力计算公式

套管在外挤压力作用下的破坏,相似于受压直杆件的破坏形式。根据径厚比($\frac{D}{t}$)不同可分为失稳破坏、强度破坏两种形式。径厚比($\frac{D}{t}$)较大时属于失稳破坏,即当外压力达到某一临界值时,套管产生弯曲变形被挤扁。当径厚比较小时属于强度破坏,即当外压力达到某一值时,套管管壁发生强度破坏。根据现有套管尺寸,大部分套管属于失稳破坏。

API 标准根据套管外径与壁厚比值($\frac{D}{t}$)和套管屈服强度,将套管抗挤毁压力的计算分为四种公式分别进行计算,即屈服强度的挤毁压力 p_{yp} 、塑性挤毁压力 p_p 、塑弹性挤毁压力 p_r 、弹性挤毁压力 p_E ,这四种公式应用的范围取决于 $\frac{D}{t}$ 值的大小。

1. 屈服强度挤毁公式

当 $(\frac{D}{t}) \leq (D/t)_{yp}$ 时

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

$$(\frac{D}{t})_{yp} = \frac{\sqrt{(A-2)^2 + 8(B+6.894757C/Y_p) + (A-2)}}{2(B+6.894757C/Y_p)} \quad (2-2)$$

2. 塑性挤毁公式

当 $(\frac{D}{t})_{yp} \leq (\frac{D}{t}) \leq (\frac{D}{t})_{PT}$ 时

$$p_p = Y_p \left[\frac{A}{(D/t)} - B \right] - 6.894757C \quad (2-3)$$

$$(\frac{D}{t})_{PT} = \frac{Y_p(A-F)}{6.894757C + Y_p(B-G)} \quad (2-4)$$

3. 塑弹性挤毁公式

当 $(\frac{D}{t})_r \leq (\frac{D}{t}) \leq (\frac{D}{t})_{TE}$ 时

$$p_r = Y_p \left[\frac{F}{(\frac{D}{t})} - G \right] \quad (2-5)$$

$$(\frac{D}{t})_{TE} = \frac{2+B/A}{3(B/A)} \quad (2-6)$$

4. 弹性挤毁公式

当 $(\frac{D}{t})_{TE} \leq (\frac{D}{t})$ 时

$$p_E = \frac{323.7088 \times 10^6}{(\frac{D}{t})[(\frac{D}{t}) - 1]^2} \quad (2-7)$$

上述式中 Y_P ——最小屈服强度(其值为钢号字母后面数标的 1000×6.894757), kPa;

D ——套管管体名义外径, mm;

t ——套管管体名义壁厚, mm;

p_{yp} ——屈服强度挤毁压力, kPa;

p_p ——塑性挤毁压力, kPa;

p_T ——塑弹性挤毁压力, kPa;

p_E ——弹性挤毁压力, kPa;

$(\frac{D}{t})_{yp}$ ——屈服与塑性挤毁分界点的 $(\frac{D}{t})$ 值;

$(\frac{D}{t})_{PT}$ ——塑性与塑弹性挤毁分界点上的 $(\frac{D}{t})$ 值;

$(\frac{D}{t})_{TE}$ ——塑弹性与弹性挤毁分界点上的 $(\frac{D}{t})$ 值;

上述公式中的 A, B, C, F, G , 及分界点的 $(\frac{D}{t})$ 值列于表 2—1。

表 2—1 API 公式的 D/t 分界值及其系数

钢级	D/t 范围			p_p			p_T	
	$(\frac{D}{t})_{yp}$	$(\frac{D}{t})_{PT}$	$(\frac{D}{t})_{TE}$	A	B	C	F	G
H—40	16.4	26.62	42.70	2.950	0.0463	755	2.047	0.034125
H—50	15.24	25.63	38.83	2.976	0.0515	1056	2.003	0.0347
I—K—55	14.80	24.99	37.20	2.990	0.0541	1205	1.990	0.0360
D—60	14.44	24.42	35.73	3.005	0.0566	1356	1.983	0.0373
D—70	13.85	23.38	33.17	3.037	0.0617	1656	1.984	0.0403
C—75	13.67	23.09	32.05	3.060	0.0642	1805	1.985	0.0417
L—80 和 N—80	13.38	22.46	31.05	3.070	0.0667	1955	1.998	0.0434
N—90	13.01	21.69	29.18	3.166	0.0718	2254	2.017	0.0466
C—95	12.83	21.21	28.25	3.125	0.0745	2405	2.047	0.0490
C—100	12.70	21.00	27.60	3.142	0.0768	2553	2.040	0.0499
P—105	12.55	20.66	26.88	3.162	0.0795	2700	2.052	0.0515
P—110	12.42	20.09	26.20	3.180	0.0820	2855	2.075	0.0535
P—120	12.21	19.88	25.01	3.219	0.0870	3151	2.092	0.0565
P—125	21.12	19.65	24.53	3.240	0.0895	3300	2.102	0.0580
P—130	12.02	19.40	23.94	3.258	0.0920	3451	2.119	0.0599
P—135	11.90	19.14	23.42	3.280	0.0945	3600	2.129	0.0613
P—140	11.83	18.95	23.00	3.295	0.0970	3750	2.142	0.0630
P—150	11.67	18.57	22.12	3.335	0.1020	4055	2.170	0.0663
P—155	11.59	18.37	21.70	3.356	0.1047	4204	2.188	0.06825
P—160	11.52	18.19	21.32	3.375	0.1072	4356	2.202	0.0700
P—170	11.37	18.45	20.59	3.413	0.1123	4660	2.132	0.0698
P—180	11.23	17.47	19.95	3.449	0.1173	4966	2.261	0.0769

5. 非 API 钢级套管挤毁压力计算

对于非 API 标准的套管, 计算式中 A 、 B 、 C 、 F 、 G 可用下列公式求得, 即:

$$\left. \begin{aligned} A &= 2.8762 + 0.10679 \times 10^{-5} K + 0.21301 \times 10^{-10} K^2 \\ &\quad - 0.53132 \times 10^{-16} K^3 \\ B &= 0.026233 + 0.50609 \times 10^{-6} K \\ C &= -465.93 + 0.03086 K - 0.10483 \times 10^{-7} K^2 \\ &\quad + 0.36989 \times 10^{-13} K^3 \\ F &= \frac{32.7088 \times 10^5 [3(B/A)/(2+B/A)]^3}{Y_p \left[\frac{3(B/A)}{2+(B/A)} - (B/A) \right] \left[1 - \frac{3(B/A)}{2+(B/A)} \right]^2} \\ G &= F \left(\frac{B}{A} \right) \\ K &= Y_p / 6.894757 \end{aligned} \right\} \quad (2-7a)$$

$$(2-7b)$$

第二节 挤毁压力公式的推导及应用范围

一、屈服强度挤毁压力公式的推导

当外挤压力使套管上产生的压应力已达到或超过了套管屈服强度值时, 被认为是不安全的, 因为已出现了塑性变形。塑性变形时, 应力可利用厚壁筒的拉梅 (Lame) 公式求出, 即:

$$\left. \begin{aligned} \sigma_r &= \frac{pr_0^2}{r_0^2 - r_i^2} \left[1 - \left(\frac{r_i}{R} \right)^2 \right] \\ \sigma_t &= \frac{pr_0^2}{r_0^2 - r_i^2} \left[1 + \left(\frac{r_i}{R} \right)^2 \right] \end{aligned} \right\} \quad (2-8)$$

式中 σ_r 、 σ_t ——分别为套管管壁径向和周向应力, MPa;

p ——外挤压力, MPa;

r_0 、 r_i ——分别为套管外、内半径, mm;

R ——套管壁上任意一点至套管轴线的距离, mm。

由 (2-8) 式可以看出, 周向应力在管子内壁处最大, 径向应力在管子外壁处最大, 但是周向应力比径向应力大得多, 因此按内壁处周向应力为管在外压力作用下的计算应力。将 $R=r_i$ 代入 (2-8) 式, 得

$$\sigma_t = \frac{2pr_0^2}{r_0^2 - r_i^2} \quad (2-9)$$

它的破坏条件是内壁处周向应力达到材料最小屈服强度, 即套管发生屈服破坏。用 Y_p 表示材料的最小屈服强度, 用 p_{yp} 表示危险点达到最小屈服强度时的外挤压力, 则发生套管强度破坏时:

$$\begin{aligned} Y_p &= \frac{2P_{yp}r_0^2}{r_0^2 - r_i^2} \\ \text{即 } p_{yp} &= \frac{Y_p(r_0^2 - r_i^2)}{2r_0^2} \end{aligned} \quad (2-10)$$

以径厚比 $(\frac{D}{t})$ 代替 (2-10) 中 r_0 和 r_i , 并视外挤压力为正值, 则

$$p_{yp} = 2Y_p \frac{(\frac{D}{t} - 1)}{(\frac{D}{t})^2}$$

此式就是(2—1)式,该式的物理意义是当外挤力达到 p_{yv} 值时套管发生屈服破坏。

采用上式必须注意 $(\frac{D}{t})$ 的适应范围,即只有当 $(\frac{D}{t})$ 小于某一种规定值时,才适用于(2—1)式,各种钢级套管 $(\frac{D}{t})$ 见表 2—1。从表 2—1 看出强度愈高的套管,适用的径厚比 $(\frac{D}{t})$ 愈小。

二、套管失稳破坏的计算公式推导

当径厚比 $(\frac{D}{t})$ 值大于表 2—1 中数值时,在外力作用下,套管首先被挤扁,丧失稳定。但失去稳定的临界外压力随着不同的径厚比应用不同计算公式,这与受压直杆相似,随着长细比的不同,应分别采用欧拉公式与经验公式来计算临界外压。当不同的径厚比 $(\frac{D}{t})$ 时,发生三种不同情况的丧失稳定。即塑性、弹塑性和完全弹性的丧失稳定,因而有相应的三种临界外压力计算公式。

1. 塑性挤毁压力公式

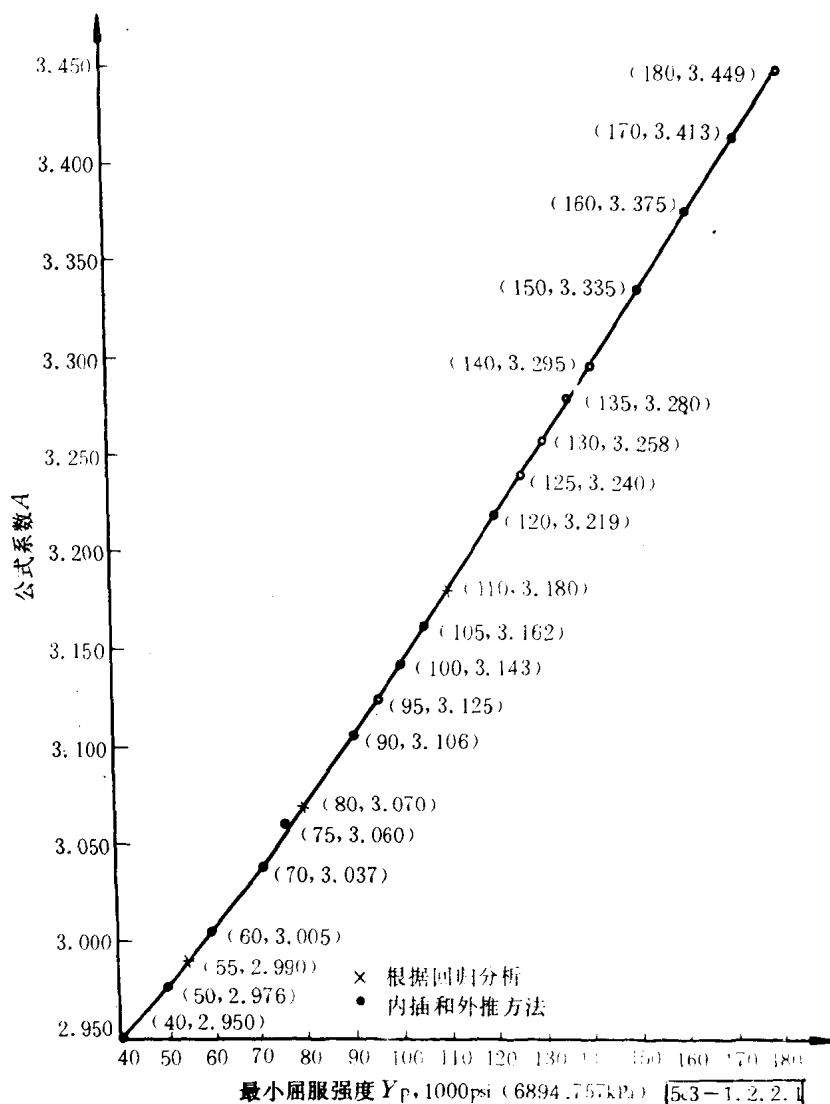


图 2-1 塑性挤毁公式系数 A

塑性挤毁压力公式是建立在实验基础上的经验公式。公式(2-2)中, A 、 B 、 C 三个系数, 是对 K-55、N-80、P-110 钢级的套管分别进行了 402 次、1440 次和 646 次挤毁试验的资料, 应用数理回归统计理论得出来的。其试验塑性挤毁压力公式系数 A 、 B 、 C 分别见图 2-1、图 2-2、图 2-3。

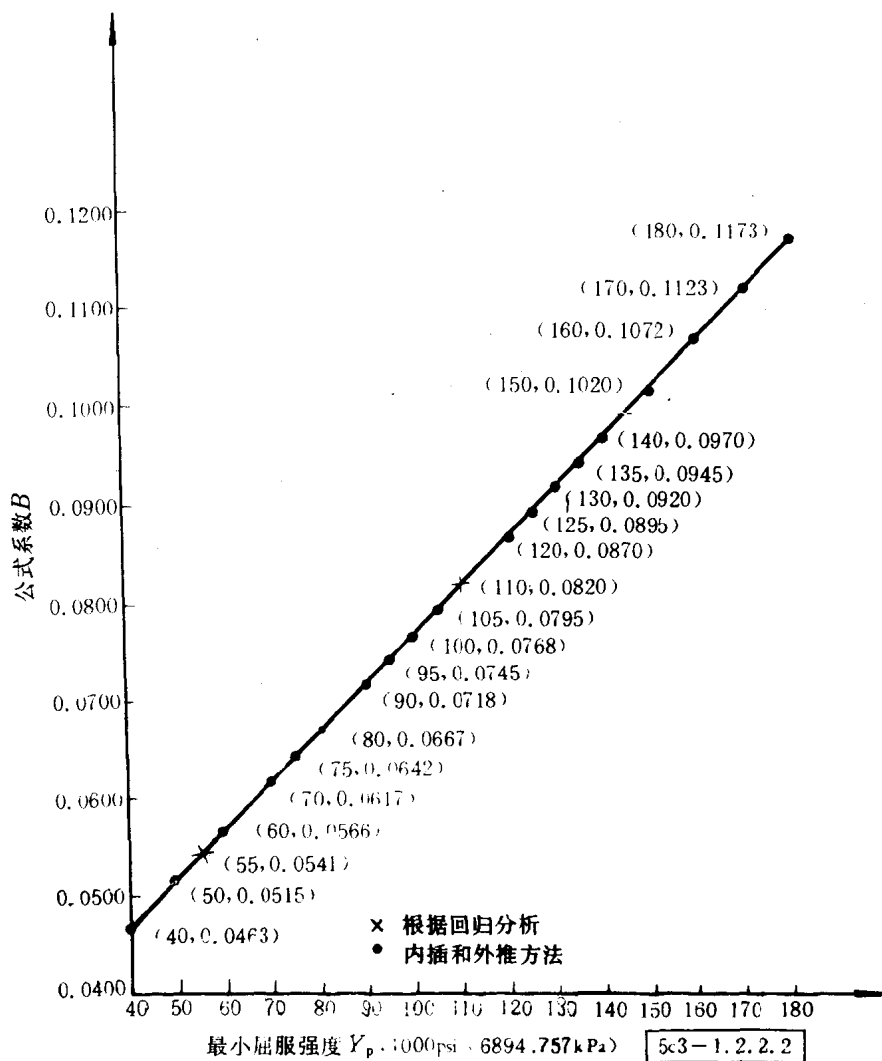


图 2-2 塑性挤毁公式系数 B

N-80 钢级的平均挤毁压力公式如下:

$$p = \left(\frac{24560}{D/t} - 5336 \right) \times 6.89475 \quad (2-11)$$

根据统计理论算出 N-80 钢级套管误差极限 C 是 1955, 从式(2-11)减去 C 值, 得 N-80 钢级套管最小挤毁压力值的计算式:

$$p_p = \left(\frac{24560}{D/t} - 7291 \right) \times 6.89475$$

塑性挤毁压力公式是按可靠程度为 95% 得出来的, 也就是说, 其超过最小状态挤毁压力的失败率不大于 5%。

塑性挤毁压力计算公式也可用图表示出来。为了便于使用内插和外推方法来计算其它钢

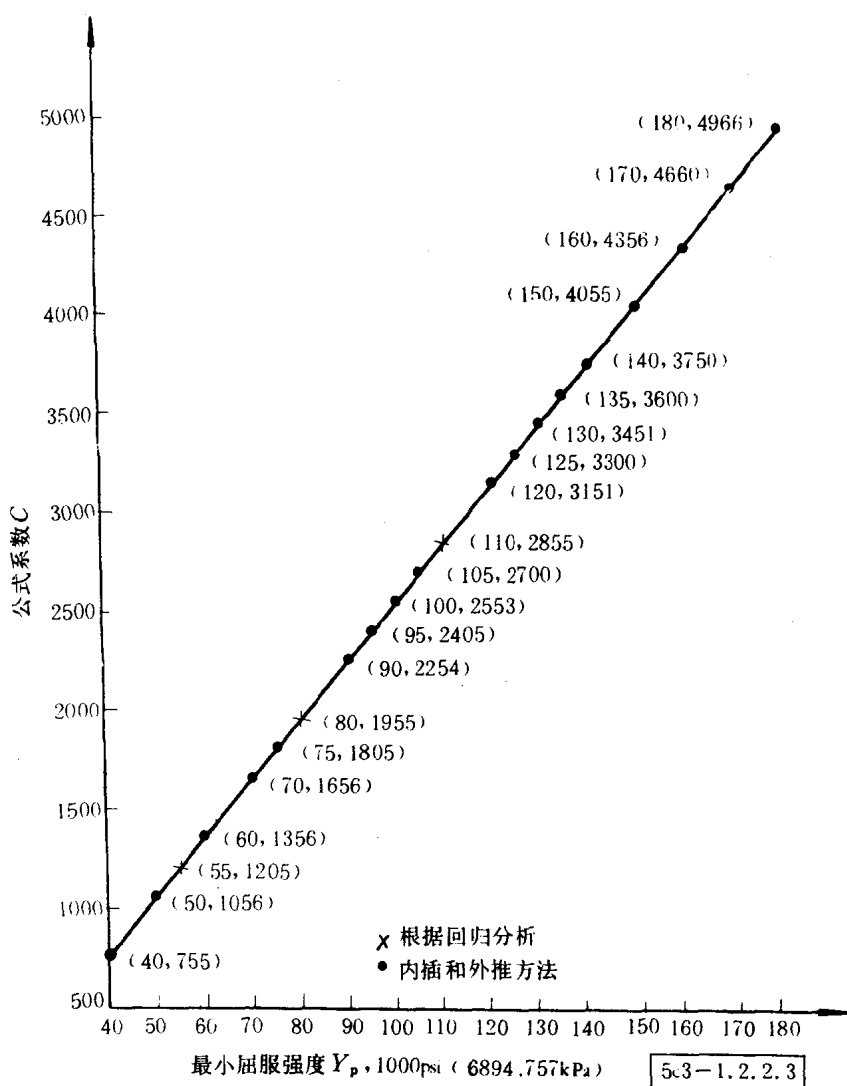


图 2—3 塑性挤毁公式系数 C

级的挤毁压力,故将塑性挤毁压力计算式变换成下列的标准形式:

$$p_p = Y_p \left[\frac{A}{\left(\frac{D}{t}\right)} - B \right] - 6.894757 \quad (2-12)$$

常见几种钢级的 A 、 B 、 C 见表 2—1。对强度和级别与上述不同的其它套管 A 、 B 、 C 系数。可根据图 2—1、图 2—2、图 2—3 上的曲线用内插和外推法确定。

2—12 式的物理意义是, 当外挤压力达到由该式算出的临界外挤压力 p_p 时, 套管发生永久变形, 外压力撤除后仍不能恢复原来的形状。

2. 塑弹性过度挤毁压力公式

如图 2—4 所示, 最小塑性挤毁压力曲线延伸到较大 $\left(\frac{D}{t}\right)$ 值时, 并不与最小弹性挤毁压力曲线相交。为了克服这一异常情况, 令平均挤毁压力为零得到横坐标上一点 $\left(\frac{D}{t}\right)$ 。并由此

点作一曲线与弹性挤毁压力曲线相切，高于塑性挤毁压力曲线，令切点与交点之间的新曲线

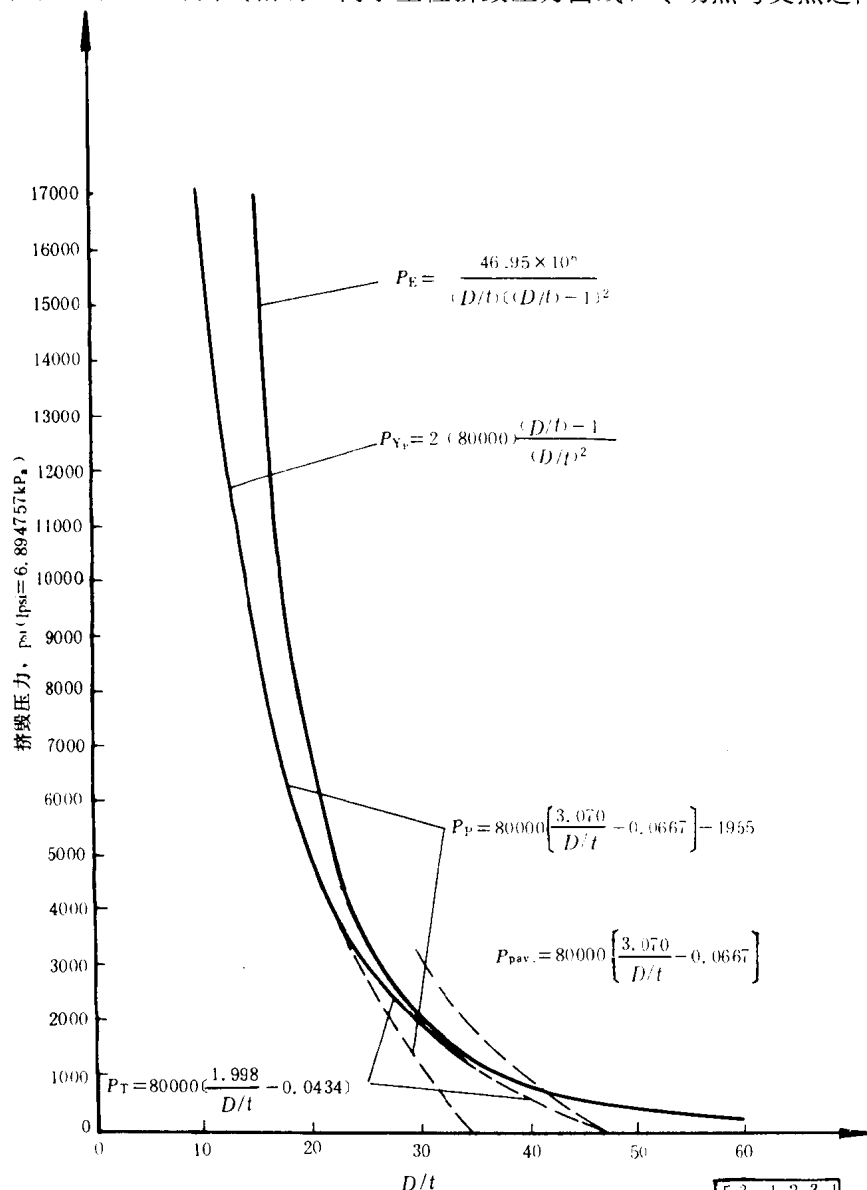


图 2-4 N 80 钢级的塑弹性挤毁压力公式的导出 [5c3-1.2.3.1]

的方程为：

$$p_T = Y_p \left[\frac{F}{\left(\frac{D}{t}\right)} - G \right]$$

式中 p_T ——最小塑弹性过渡挤毁压力。

这一新曲线的边界条件如下：

- (1) 与平均挤毁压力 $p_v = Y_p \left[\frac{A}{\left(\frac{D}{t}\right)} - B \right]$ 曲线相交于横坐标上，即 $p_v = 0$ 时有交点 $\left(\frac{D}{t}\right)_0$ ；
- (2) 由 $\left(\frac{D}{t}\right)_0$ 作一曲线相切于弹性曲线 $p_E = \frac{323.71 \times 10^6}{\left(\frac{D}{t}\right) \left(\frac{D}{t} - 1\right)^2}$ 。

由条件(1)得知：