

TAOGUAN GONGZUO LIXUE

套管工作力学

林元华 孙永兴 曾德智 邓宽海 著

石油工业出版社

套管工作力学

林元华 孙永兴 曾德智 邓宽海 著



石油工业出版社

内 容 提 要

本书对套管抗挤强度理论及套管整形工作力学进行了系统介绍,针对套管在不同外挤载荷下的力学模型进行了描述,对各种工况下套管的抗挤强度计算方法进行细致的探讨,且用相应的实验数据对套管抗挤强度的新算法进行了检验。本书内容新颖,是作者对新成果和新进展的总结,有利于培养学生的创新意识,拓宽读者的专业知识面,便于读者了解当前国内外套管工作力学研究动态和发展趋势。

本书可供石油工程领域的相关技术人员阅读,也可供大专院校相关专业的师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

套管工作力学/林元华等著.
北京:石油工业出版社,2016.4
ISBN 978-7-5183-1187-3

- I. 套…
- II. 林…
- III. 套管-力学-研究
- IV. TE931

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 055980 号

出版发行:石油工业出版社

(北京安定门外安华里 2 区 1 号楼 100011)

网 址:www. petropub. com

编辑部:(010)64256770 图书营销中心:(010)64523633

经 销:全国新华书店

印 刷:北京中石油彩色印刷有限责任公司

2016 年 4 月第 1 版 2016 年 4 月第 1 次印刷

787 毫米×1092 毫米 开本:1/16 印张:13.25

字数:335 千字

定价:48.00 元

(如出现印装质量问题,我社图书营销中心负责调换)

版权所有,翻印必究

前 言

随着石油天然气能源需求的增加,钻井的工作量呈逐年上升趋势,与此同时所需入井的套管数也不断增加。特别对超深井、特殊结构井、复杂地层、复杂服役环境,还采用了大量的非标套管。由此在套管工作力学方面暴露出以下不足:(1)API 5C3 提出的套管挤毁压力计算公式是基于若干年前大量套管挤毁试验数据,用数学回归方法得出的经验公式或修正的理论公式,近年来世界各主要钢管厂生产套管的制造缺陷已经得到了较严格的控制,按照 API 标准设计套管强度过于保守,浪费管材成本,当务之急是如何建立考虑制造缺陷的套管抗挤强度计算模型。(2)API/ISO Collapse Sub-Team(美国石油学会/国际标准化组织套管挤毁工作组)给出了新的 ISO 抗挤模型,而该模型对径厚比在 8 至 20 之间的套管,ISO 新公式计算的抗挤强度低于现行的 API 5C3 值,显著低于实物试验挤毁强度。当径厚比大于 21 时,ISO 新公式计算结果略高于 API 5C3 的数值,与实物挤毁值基本接近,应考虑如何对新模型进行进一步的完善。(3)在超深井或大位移井钻井过程中,技术套管非均匀磨损较严重,磨损套管抗挤强度该如何计算?(4)在非均匀地应力下套管承受非均布载荷作用,非均匀载荷存在的形式是什么?非均匀载荷下套管抗挤强度应如何计算?(5)在盐岩或软泥岩裸眼井段内,因地层蠕变作用使套管受到非均匀集中载荷作用,按常规套管强度设计套管挤毁或变形事故时有发生,此时套管的抗挤强度如何计算?(6)国内外大部分油气田都存在套管形变问题,套管整形工作量不断上升,地层围压作用下套管的整形力如何计算?

为解决上述 6 个方面的问题,本书对套管抗挤强度理论及套管整形工作力学进行了系统介绍,针对套管在不同外挤载荷下的力学模型进行了描述,对各种工况下套管的抗挤强度计算方法进行细致的探讨,且用相应的实验数据对套管抗挤强度的新算法进行了检验。

全书共分为 7 章,由林元华、孙永兴、曾德智、邓宽海共同编写完成,第一章综合叙述了国内外套管挤毁的研究概况,总结了目前套管挤毁研究亟需解决的问题,针对研究存在的问题提出了相应的解决方法;第二章给出了 API 标准和 ISO 挤毁压力计算公式的适用范围和推导过程,并总结了 ISO 存在的不足之处;第三章建立了套管在均匀外挤载荷作用下的力学模型,并考虑到套管的制造缺陷对其进行了修正,从而得到了套管抗挤强度计算的新公式,并用实验数据对其进行了校正;第四章在研究 ISO 新抗挤模型的基础上,同时考虑套管基本尺寸、屈服极限、椭圆度、微裂纹缺陷等参数对抗挤强度的影响,给出了套管抗挤强度的新公式,并用实验数据对新公式进行了校正;第五章建立了套管在非均匀外挤载荷作用下的力学模型,并应用逆解法对其进行求解,得到套管在非均匀外挤载荷下的抗挤强度计算式;第六章考虑了制造缺陷对套管抗挤强度的影响,应用叠加原理,建立了磨损套管抗挤强度的新算法,并用实验数据对新

算法进行了校正;第七章建立了变形套管修复的理论模型,用相应的实验数据对该模型进行了校正。

本书语言简洁,内容精炼,重点突出、系统性和实用性强,涉及的石油工程信息量大,内容新颖,是笔者对新成果和新进展的总结,有利于培养学生的创新意识,拓宽读者的专业知识面,便于读者了解当前国内外套管工作力学研究动态和发展趋势。本书主要定位于供从事石油工程领域的相关技术人员阅读、参考,也可供大专院校及相关研究机构的师生及研究人员阅读、参考。

本书在编写过程中,参阅了大量的著作、教材和相关技术资料,在此谨对这些著作、教材和相关技术资料的作者表示衷心的感谢!

由于水平有限,书中存在不妥之处在所难免,恳请读者批评指正。

2015 年 7 月

目 录

1 绪论	(1)
1.1 套管抗挤强度研究现状	(1)
1.2 套管抗内压研究现状	(15)
参考文献	(17)
2 套管抗挤强度理论发展历程	(21)
2.1 套管外挤载荷分析	(21)
2.2 API 挤毁压力计算理论	(23)
2.3 ISO 10400 挤毁压力计算理论	(32)
2.4 ISO 挤毁模型与实物挤毁数据对比及分析	(40)
2.5 本章小结	(43)
参考文献	(43)
3 基于 ISO 算法的套管抗挤强度模型	(45)
3.1 基于 Mises 强度理论的套管抗挤强度新模型	(45)
3.2 基于统一强度理论的高抗挤套管抗挤强度新模型	(65)
3.3 本章小结	(76)
参考文献	(77)
4 非均布和集中载荷作用下的套管抗挤强度计算方程	(79)
4.1 非均匀集中载荷下套管抗挤强度研究	(80)
4.2 非均匀载荷下含水泥环的套管抗挤强度研究	(98)
4.3 本章小结	(118)
参考文献	(119)
5 磨损套管抗挤强度的算法研究	(121)
5.1 套管磨损的机理及其防止措施	(121)
5.2 磨损套管在均匀载荷下抗挤强度的研究	(126)
5.3 磨损套管在非均匀载荷下抗挤强度的研究	(129)
5.4 本章小结	(136)
参考文献	(136)
6 套管抗内压强度模型	(138)
6.1 套管抗内压强度计算标准及演变	(138)

6.2 内压屈服失效模型 (140)

6.3 ISO 韧性爆裂模型 (143)

6.4 基于统一强度理论的韧性爆裂模型 (161)

6.5 本章小结 (168)

参考文献 (168)

7 变形套管整形修复的力学理论 (170)

7.1 梨形胀管器整形力的理论研究 (170)

7.2 梨形胀管器修复变形套管的实验研究 (176)

7.3 梨形胀管器修复过程的有限元模拟 (188)

7.4 本章小结 (195)

参考文献 (196)

附录 A ISO/TG 实物挤毁测试数据 (198)

附录 B 国内实物挤毁测试数据 (203)

1 绪 论

在生产实践中,套管的结构完整性和密封完整性是井筒安全的重要因素。当套管承受较高的外压力并超过套管本身的抗挤强度时,套管就会发生强度破坏或结构失稳现象,从而造成套管发生严重变形,造成整个油气井井眼的破坏,严重时将导致全井报废;另一方面,对三高气井(高压、高产、高酸性),套管强度设计问题尤为重要,因此石油行业长期以来都在致力于套管强度计算方法的改进和完善^[1]。

目前国际上认可的套管标准是 ISO 10400 : 2007 (本书中未特殊说明 ISO 10400 均指 ISO 10400 : 2007 标准:石油天然气工业——套管、油管、钻杆和管线管公式计算标准。ISO 10400 标准在国内还没有实施,所以文章中的相关计算单位沿用了英制单位),而长期执行的 API 5C3 是基于经典的弹塑性力学方法和公式推导出来的,并根据大量的实验数据做了必要的修正。API 标准中的四个挤毁压力公式中,套管设计时应用最多的是塑性挤毁公式和弹塑性挤毁公式,它们都是由试验数据经过数学回归统计计算而得到的,仅提供了基本的输入参数,并没有考虑具体的缺陷对套管抗挤强度的影响,不能用来计算高抗挤套管和具有确定的制造缺陷的 API 套管。大量研究表明,套管的各種制造缺陷(椭圆度、壁厚不均度、残余应力等)对套管抗挤强度的影响显著,不可忽视。实际上,各厂家的管材材质和管体缺陷也不相同,随着套管制造工艺水平的不断提高和制造质量的显著改进,高抗挤套管的制造缺陷已经得到了严格的控制。如果仍然沿用 API 标准就可能趋于保守,有的远远超过 API 名义强度,此时继续使用 API 给出的计算公式已不能正确地预测套管实际抗挤强度,对套管的质量控制和设计有较大的影响。

通过大量全尺寸试验证实^[2],对于 API 套管,使用 API 5C3 公式的计算结果比试验值低 16% ~ 30%。若在管柱设计中仍用 API 5C3 公式来计算套管抗挤强度,则在常规井中造成浪费,在某些苛刻井中显得无套管可选。为此,美国石油学会/国际标准化组织套管挤毁工作组(API/ISOCollapseSub - Team,下文简称 API、ISO)认识到这一问题的重要性,并修订了现行 API 5C3 标准,给出了新的抗挤模型,即 ISO 新抗挤模型,该模型充分考虑了套管基本尺寸、管材最小屈服极限、椭圆度、壁厚不均度、残余应力、微裂纹缺陷等参数对套管抗挤强度的影响。

1.1 套管抗挤强度研究现状

1.1.1 均匀载荷下套管抗挤强度研究现状

韩建增、郝俊芳、赵国珍等人^[3-5]对苏联提出的套管抗挤强度理论进行了研究和总结,其研究内容主要包括四个阶段:首先从弹性领域对均匀载荷下椭圆套管抗挤强度计算进行研究,随后考虑了椭圆度和壁厚不均度对套管抗挤强度的影响,其次从弹性领域过渡到弹塑性领域对套管抗挤强度计算进行研究,最后,基于均匀载荷下套管抗挤强度理论的研究成果,对非均匀载荷下套管抗挤强度计算进行了初步的实验研究和理论探讨,也建立了非均匀载荷作用下

套管抗挤强度计算的力学模型。总之,苏联的强度理论主要包括均匀载荷和非均匀载荷下的套管抗挤强度计算公式,强度计算公式的正确性也得到了当时套管挤毁试验数据的验证。因此,其研究结果对后续关于均匀载荷和非均匀载荷下套管抗挤强度的研究工作具有较大的启示和推动作用。然而,由于苏联早期对套管抗挤强度计算的研究在理论和实验条件方面受到了较多的限制,导致其提出的套管抗挤强度计算公式的准确性和可靠性不够高,也没有被收录到美国石油学会标准(API 5C3 标准),从而没有被世界各大石油公司所采用。

20 世纪 70 年代中期以后,美国以及许多国家是以 API 规范作为套管抗挤强度计算标准,API 的套管挤压计算已处于相对变化较小的状态,但是研究工作仍然未停止^[6-10]。受阿莫科公司委托,N. C. Huang 等人应用塑性量论对套管的抗挤能力进行了理论研究。

我国对套管破坏机理研究方面虽然起步较晚,但在这方面的理论探索十分活跃。20 世纪之前,赵怀文、龚伟安等一大批学者对套管抗挤强度的计算问题进行了大量的理论分析和探讨^[11-20];窦益华^[21]、李子丰^[22]和邓金根等^[23-26]运用岩石流变理论对套管变形机理进行了大量的理论研究;赵国珍、张先普、练章华等^[27-30]对华北、中原、塔里木盐岩蠕变作了大量岩石蠕变测试和有限元分析;以上研究成果对套管破坏机理及抗挤强度的研究具有重要意义。

1. 套管抗挤强度的理论研究

20 世纪末期,T. Kyogoku 等人^[31]基于高抗挤套管挤毁实验,开展了轴向载荷对套管挤毁强度影响规律的研究,试验结果显示高抗挤套管的弹性挤毁范围远大于 API 标准所规定的范围;对于沿壁厚具有硬度梯度、残余应力、光滑的应力—应变曲线的套管,拉伸应力对其挤毁强度具有显著降低的影响。

20 世纪末期,Y. Kuriyama 等人^[32]根据曲梁理论提出了处于轴向载荷和外挤压力下的薄壁管弹性挤毁强度计算公式和弹塑性挤毁强度计算公式。

1) 弹性挤毁强度计算公式

Y. Kuriyama 等人基于 Timoshenko 弹性挤毁方程提出了复合管弹性挤毁方程(1.1),并用实验和有限元模拟结果验证了方程(1.1)的准确性。

$$P_{cr} = \frac{3EI}{[(1 - \mu^2)R^3]} \quad (1.1)$$

式中, EI 为抗弯刚度; R 为复合管外半径(mm); μ 为泊松比。

对于复合管而言,其抗弯刚度有两种计算方法:第一种是不考虑中性轴的移动;第二种是考虑中性轴的移动。

第一种情况:不考虑中性轴的移动,即中性轴的长度等于复合管截面总厚度的一半,如图 1.1 所示,基于材料力学理论可得套管抗弯刚度 EI :

$$EI = \frac{uE_1t_1(t_1^2 + 3t_2^2)}{12} + \frac{uE_2t_2(t_2^2 + 3t_1^2)}{12} \quad (1.2)$$

第二种情况:考虑中性轴移动的抗弯刚度 EI ,如图 1.2 所示;为了计算抗弯刚度需要确定中性轴的高度,基于材料力学理论可得 C_f :

$$C_f = \frac{u[E_1t_1(t_2 + t_1/2) + E_2t_2(t_2/2)]}{uE_1t_1 + uE_2t_2} \quad (\text{类似于求形心的方法}) \quad (1.3)$$

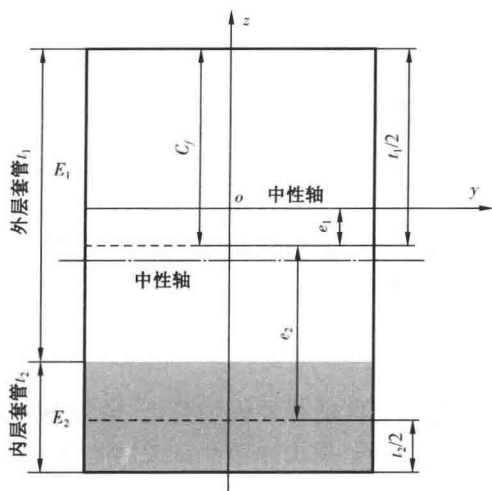


图 1.1 截面惯性矩计算示意图

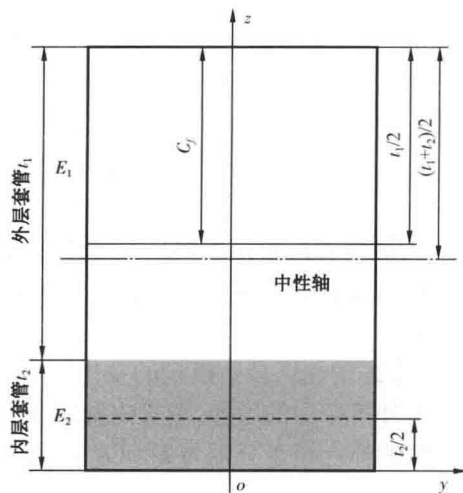


图 1.2 中性轴计算示意图(考虑中性轴移动)

同理,由于内外层材料的弹性模量不同,如图 1.2 所示,需要套管内外截面进行分段处理,因此,基于材料力学理论可得套管抗弯刚度 EI ;

$$\left. \begin{aligned} EI &= uE_1t_1\left(\frac{t_1^2}{12} + e_1^2\right) + uE_2t_2\left(\frac{t_2^2}{12} + e_2^2\right) \\ e_1 &= C_f - \frac{t_1}{2}, e_2 = t_1 + \frac{t_2}{2} - C_f \end{aligned} \right\} \quad (1.4)$$

式中, t_1 和 t_2 分别为外层和内层套管壁厚(mm); E_1 和 E_2 分别为外层和内层套管弹性模量; C_f 为整个套管中性轴的高度。

为验证弹性挤毁公式计算复合管弹性挤毁强度的准确性,首先用单纯的铝管和不锈钢管挤毁测试结果验证了 Timoshenko 方程计算的准确性;其次,分别将方程(1.1)、(1.2)和(1.1)、(1.4)的计算结果与 FEA(美国联邦能源署)进行了对比,结果发现忽略中性轴移动的计算精度大于 14%,而考虑中性轴移动的计算精度小于 4%,说明复合管的弹性挤毁强度不能简单的使用 Timoshenko 方程来计算,需要考虑复合管内外层因材料不同而导致其中性轴位置改变对抗弯刚度的影响。

2) 弹塑性挤毁强度计算公式

(1) 不考虑塑性区杨氏模量的变化。

基于塑性理论和平面应力的假设, Y. Kuriyama 提出了厚壁管弹塑性挤毁强度计算公式:

$$P_y = \frac{Z(3b^2 + c^2)}{4b^2} + \frac{(b^2 - c^2)}{4b^2 \sqrt{4\sigma_y^2 - 3Z^2}} \quad (1.5)$$

其中,

$$Z = -\frac{2}{\sqrt{3}}\sigma_y \sin(\pi/6 + \theta_c)$$

$$c^2/a^2 = \frac{\sqrt{3}}{2\cos\theta_c} \exp[-\sqrt{3}(\theta_c + \pi/6)]$$

$$t_p = c - a$$

$$\cos\theta_c = \frac{(\sigma_1 - \sigma_2) + (\sigma_1 - \sigma_3)}{2\sigma_y}$$

式中, a 为厚壁管内半径(mm); b 为厚壁管外半径; c 为弹性区与塑性区的边界; σ_y 厚壁管屈服强度; t_p 为塑性区的厚度; θ_c 为米塞斯(Von-Mises)屈服准则(简称 Mises 屈服准则)的应力特性指数。

(2) 考虑塑性区杨氏模量的变化。

随着外挤压力的增加, 套管内壁部分进入塑性, 使得塑性区的弹性模量降低, 假设弹性区和塑性区的弹性模量分别为 E 和 H ; 同理基于 Timoshenko 方程, 提出弹塑性挤毁强度方程:

$$P_{PE} = \frac{24EI}{[(1 - \mu^2)(D - t)^3]} \quad (1.6)$$

其中,

$$\left. \begin{aligned} EI &= uEt_1\left(\frac{t_1^2}{12} + e_1^2\right) + uHt_2\left(\frac{t_2^2}{12} + e_2^2\right) \\ e_1 &= C_f - \frac{t_1}{2}, e_2 = t_1 + \frac{t_2}{2} - C_f \\ C_f &= \frac{(Et_1^2 + 2Ht_1t_2 + Ht_2^2)}{2(Et_1 + Ht_2)} \end{aligned} \right\}$$

20 世纪末期, Abbassian 等人^[33] 假设套管为理想刚塑性材料, 基于四铰链挤毁机理, 建立了椭圆套管的抗挤强度计算公式(1.7); 通过分析射孔和割缝两种工艺对套管抗挤强度的影响规律, 分别为射孔套管和割缝套管的抗挤强度计算公式引入了折减系数和, 从而建立了计算射孔套管和割缝套管的抗挤强度计算公式(1.8)和(1.9):

$$P_{pc} = 2 \frac{\sigma_y t}{d_t} \left[\sqrt{1 + 4 \frac{d_t^2}{t^2} \left(1 - \frac{u}{d_t}\right)^2 \frac{u^2}{d_t^2}} - 2 \frac{d_t}{t} \left(\frac{u}{d_t} - \frac{u^2}{d_t^2}\right) \right] \quad (1.7)$$

$$P_{pc} = \mu_1 \times 2 \frac{\sigma_y t}{d_t} \left[\sqrt{1 + 4 \frac{d_t^2}{t^2} \left(1 - \frac{u}{d_t}\right)^2 \frac{u^2}{d_t^2}} - 2 \frac{d_t}{t} \left(\frac{u}{d_t} - \frac{u^2}{d_t^2}\right) \right] \quad (1.8)$$

$$P_{pc} = \mu_2 \times 2 \frac{\sigma_y t}{d_t} \left[\sqrt{1 + 4 \frac{d_t^2}{t^2} \left(1 - \frac{u}{d_t}\right)^2 \frac{u^2}{d_t^2}} - 2 \frac{d_t}{t} \left(\frac{u}{d_t} - \frac{u^2}{d_t^2}\right) \right] \quad (1.9)$$

其中,

$$u = u_0 \frac{1}{(1 - p/p_e)}$$

$$\mu_1 = 1 - \frac{d_p}{a}$$

$$\mu_2 = 1 - \frac{L_s}{a}$$

式中 a ——孔眼在套管纵向的密度;

d_p ——孔眼直径, mm;

L_s ——割缝的长度, mm;

u ——套管在压力 p 作用下的椭圆度振幅, mm;

u_0 ——初始椭圆度振幅, mm;

p_e ——弹性挤毁压力, MPa;

σ_y ——套管的屈服强度, MPa;

d_i ——套管的平均外径, mm;

t ——套管的平均壁厚, mm。

日本住友(Sumiton)金属、新日铁、日本钢管、法国瓦鲁瑞克(Vallarec)等公司研究了套管抗挤毁问题,进行了大量的有不圆度缺陷和壁厚不均度缺陷的套管抗挤强度试验研究工作^[34-36]。

Tamano 抗挤极限状态方程^[36]:

$$p_{c \text{ ult}} = \frac{(P_{eT} + P_{yT}) - [(P_{eT} - P_{yT})^2 + 4P_{eT}P_{yT}H_{ult}]^{1/2}}{2} \quad (1.10)$$

其中,

$$p_{eT} = 1.080 \times 2E / [(1 - \nu^2)(D/t)((D/t) - 1)^2] \quad (1.11)$$

$$p_{yT} = 2f_{\min} \frac{D/t - 1}{(D/t)^2} \left(1 + \frac{1.5}{D/t - 1} \right) \quad (1.12)$$

$$H_{ult} = 0.07\mu_{ov} + 0.0022\mu_{ec} - 0.18(\mu_{rs}/\mu_{fy}) \quad (1.13)$$

研究表明,用 Tamano 抗挤极限状态方程计算的结果要比 API 平均值接近试验值,对研究油套管抗挤强度设计产生了深远的影响。

长期执行的 API 5C3 是基于经典的弹塑性力学方法和公式推导出来的,并根据大量的实验数据做了必要的修正。API 标准中的四个挤毁压力公式中,套管设计时应用最多的是塑性挤毁公式和弹塑性挤毁公式,它们都是由试验数据经过数学回归统计计算而得到的,仅提供了基本的输入参数^[37]。API 5C3 未考虑套管的制造工艺及缺陷对套管抗挤强度的影响,不能用来计算高抗挤套管。研究表明,套管的各種制造缺陷(椭圆度、壁厚不均度、残余应力等)对套管抗挤强度的影响显著,不可忽视^[38-46]。

实际上,各厂家的管材材质和管体缺陷也不相同,随着套管制造工艺水平的不断提高和制造质量的显著改进,高抗挤套管的制造缺陷已经得到了严格的控制。如果仍然沿用 API 标准就趋于保守,有的远远超过 API 名义强度,此时继续使用 API 给出的计算公式已不能正确地预测套管实际抗挤强度,造成三高(高压、高产、高含硫)气井、从而导致选套管困难,也使得用户

难以制定套管交货技术条件。

为此, API/ISO Collapse Sub - Team(美国石油学会/国际标准化组织套管挤毁工作组)修订了现行 API 5C3 标准, 基于 T. Tamano 和 F. J. lever 研究成果^[47], ISO 10400 : 2007^[48] 给出了仅有外压作用下套管的最小抗挤强度方程, 即 ISO 新抗挤模型。ISO 新模型将油管套管的制造方法、热处理、潜在的制造缺陷(椭圆度、偏心度、残余应力、制造裂纹及裂纹检测确信度等)引入套管强度计算标准。2000 年初, 西南石油大学韩建增^[5] 基于大量全尺寸试验数据, 对 API 5C3 套管抗挤强度计算公式进行了详细的研究, 发现对于 API 套管, 使用 API 5C3 公式的计算结果比试验值低 16% ~ 18%, 如果在套管柱设计中仍采用 API 5C3 公式来计算套管抗挤强度, 则在常规井中造成浪费, 在某些苛刻井中显得无套管可选。另外, 考虑到套管椭圆度、壁厚不均度等几何缺陷对套管挤毁性能的影响, 韩建增等人^[49] 运用有限元法研究了椭圆度和壁厚不均度对套管挤毁性能的影响规律, 研究结果发现套管挤毁压力随着椭圆度和壁厚不均度的增加而降低, 且椭圆度对套管抗挤强度的影响显著。

为此, 韩建增基于弹塑性力学理论, 建立了套管在均匀外挤载荷作用下的力学模型; 然后, 经过严格的理论推导, 得出套管抗挤强度计算的新公式:

$$P = 2.308\sigma_y \frac{D/t - 1}{(D/t)^2} \quad (1.14)$$

式中 σ_y ——套管的屈服强度, MPa;

D/t ——套管外径与壁厚之比(径厚比)。

韩建增采用公式(1.14)对套管抗挤强度进行计算, 发现式(1.14)的计算值比试验值偏大。基于对克林顿司特(W. O. Clinedinst)提出的弹性失稳公式和 API 5C3 标准的研究, 发现根据径厚比的不同, 套管在外挤压力作用下的破坏可分为塑性屈服和弹性失稳两种形式, 而式(1.14)只是根据塑性屈服破坏准则得到的。另外, 套管并不是理想的圆柱管壳, 同时存在不圆度、壁厚不均度、残余应力等制造缺陷, 还存在轴向拉伸应力的作用。因此, 韩建增对式(1.14)进行修正, 得到新的计算公式:

$$P_c = \frac{1}{2} \left[P_E + P - \sqrt{(P_E - P)^2 + gP_E P} \right] \quad (1.15)$$

其中,

$$P_E = \frac{454.95 \times 10^3}{(D/t) [(D/t) - 1]^2}$$

$$P = 2.308\sigma_y \frac{(D/t) - 1}{(D/t)^2}$$

$$g = g_1 + g_2 + g_3$$

$$g_1 = 0.3232e(\%)$$

$$g_2 = 0.00228\varepsilon(\%)$$

$$g_3 = -0.5648\sigma_R/\sigma_Y$$

$$e = \frac{2(D_{\max} - D_{\min})}{D_{\max} + D_{\min}}$$

$$\varepsilon = \frac{2(t_{\max} - t_{\min})}{t_{\max} + t_{\min}}$$

一般地,套管不圆度和壁厚不均度为正,而管体残余应力为负(压应力)。可见,不圆度、壁厚不均度、残余应力等缺陷均增大参数 g 的值,从而降低了实际套管的抗挤强度,而 API 5C3 给出的抗挤强度计算公式未考虑管体椭圆度和壁厚不均度等初始几何缺陷的影响。

美国石油学会/国际标准化组织套管挤毁工作组 (API/ISO Collapse Sub - Team) 用式 (1.15)、API 公式、其他成员提供的研究公式对迄今所能得到的数百次试验数据进行了计算和对比,如图 1.3 所示。

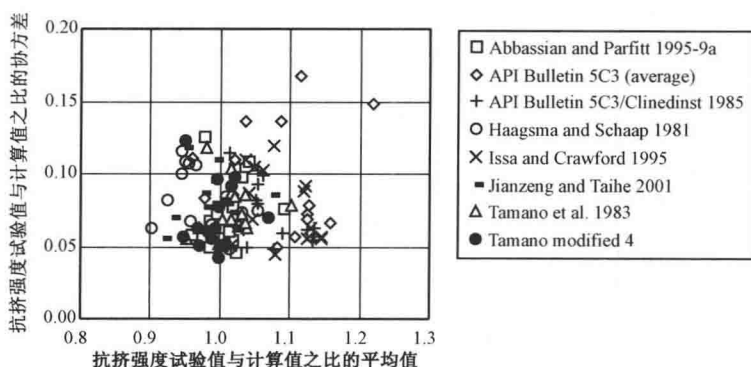


图 1.3 API/ISO 套管挤毁工作组的测试与评价结果

对比结果证明,韩建增提出公式比现行 API 标准的计算精度高,而与上述 API/ISO 国际组织正在研究而尚未定版的某些公式的计算结果相当。

然而,随着套管制造工艺水平的不断提高和制造质量的显著改进,套管制造工艺对套管抗挤强度的影响不容忽视,而韩建增提出的新模型基本没有考虑到套管制造工艺对抗挤强度的影响。2007 年,西南石油大学孙永兴^[50]基于对 API 5C3、ISO 10400 标准的研究,发现 API 5C3 未考虑套管的制造工艺及缺陷对套管抗挤强度的影响,也不能用来计算高抗挤套管的抗挤强度。因此,该模型需要被进一步的完善和改进。

ISO 10400 与 API 5C3 的基本不同点是 ISO 10400 强度公式包含了制造缺陷和不同制造技术对抗挤强度影响的修正系数,这一强度公式称为设计抗挤强度公式,其强度值是设计引用的依据。然而,由于 ISO 新的抗挤模型进行了过多的修正,出现了计算不合理现象,且管的屈服强度与实测差别较大,ISO 抗挤新公式对弹性失稳公式和屈服挤毁公式进行了折减修正,实际上套管的抗挤强度是介于弹性挤毁和塑性挤毁之间的某个数值,而且当前套管生产制造技术的提高,尤其是高抗挤套管的出现,大大提高套管的抗挤毁能力,不需要进行过多的折减修正。为此,孙永兴^[50]基于对 API 5C3 和 ISO 10400 标准的研究,给出了计算套管抗挤强度的新公式 (1.16),该公式考虑材料在使用环境中屈服强度要降低,对屈服强度进行了折减修正,

由弹塑性力学理论对厚壁套管的抗挤强度修正。

$$p = \{ (p_e + p_y) - [(p_e - p_y)^2 + 4p_e p_y Ht]^{1/2} \} / [2(1 - Ht)] \quad (1.16)$$

其中,
$$p_e = 2E / [(1 - \nu^2)(D/t)(D/t - 1)^2] \quad (1.17)$$

$$p_y = 2\sigma_y \frac{D/t - 1}{(D/t)^2} \left(1 + \frac{1.5}{D/t - 1} \right) = 2\sigma_y \left(\frac{t}{D} \right) \left(1 + \frac{t}{2D} \right) \quad (1.18)$$

式中, Ht 取值为 0.17。

用式(1.17)对 ISO/TG 提供的高抗挤数据进行检验, 抗挤强度计算值与实测值的对比如图 1.4 所示。

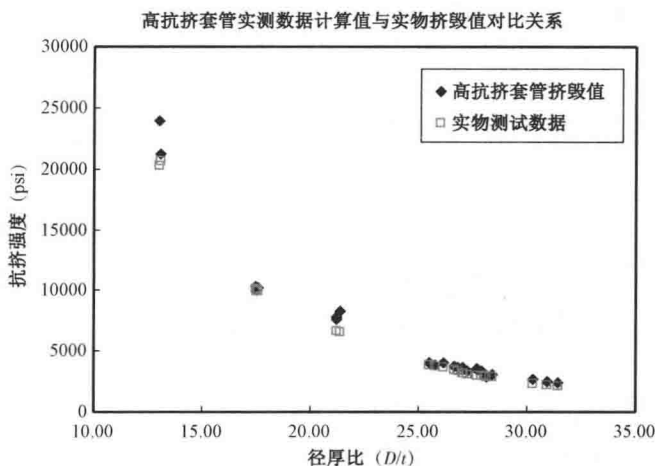


图 1.4 实物挤毁测试数据与计算值对比关系

由图 1.4 可知, 公式(1.16)计算的结果与实物测试挤毁值吻合的比较好。对于椭圆度 $< 0.4\%$, 壁厚不均度 $< 4.0\%$ 的数据, 实测材料的屈服强度比名义屈服强度大 10% 时, 公式计算的结果与实物测试挤毁值基本上是相等的。

然而, 由于当前高抗挤套管挤毁试验难度大, 费用高昂, 能够找到的高抗套管挤毁数据有限。高抗挤套管抗挤的建议模型——式(1.16), 还需大量实物挤毁数据验证, 以便能更好地改进和完善该模型计算的精确度, 为套管设计提供可靠的参考依据。

目前, 针对套管抗挤强度的研究均是以套管呈原始状态且未发生任何变形为前提的。事实上, 在套管下放后, 未固井前, 由于套管自由悬挂于钻井液中, 会使得套管受到自身重力、浮力和内外压力的共同作用, 从而导致套管抗挤强度较原始状态发生了改变。因此, 2011 年, 金春玉等人^[51]基于对套管轴向拉伸和径向压缩变形的考虑, 建立了考虑套管在自身重力、浮力等外载荷作用下变形的新的抗挤强度计算公式, 与 API 5C3 计算公式相比, 该新公式的计算结果与试验结果更为接近。

王建军和闫相祯等人^[52,53]通过对 ISO/TR 10400 : 2007(E) 标准计算套管抗挤强度的 KT 公式研究, 发现 ISO/TR 10400 公式未考虑套管内壁初始椭圆度及其跳跃性对套管抗挤强度的影响, 并开展了具有不同壁厚不均度和内外椭圆度的高抗挤套管的室内试验研究。试验结果

分析了壁厚不均度和内、外椭圆度等参数对高钢级套管抗挤强度的影响,利用试验结果对 KT 公式进行了相应的修正和完善。试验数据与改进 KT 公式的计算结果对比表明:改进后的 KT 公式具有较高的计算精度,可以满足实际工程需要;套管内壁与外壁椭圆度具有耦合作用,且套管内壁椭圆度的存在将会增加其抗挤强度降低的速度。

孙永兴和易炳刚等人^[54]在研究和评价 ISO 10400 和 API 5C3 抗挤模型的基础上,发现:ISO 抗挤模型并不适合所有壁厚段套管强度的计算,API 5C3 计算公式没有考虑套管制造缺陷对抗挤强度的影响,且存在不连续点,计算时需要查表然后选择合适的公式,比较繁琐,为此,研究人员提出了考虑制造缺陷(如椭圆度、壁厚不均度、残余应力等),适合于任何厚壁段套管强度计算的新模型。新模型计算值比 ISO 新抗挤模型计算值及 API 值更接近实物挤毁值,能体现套管生产制造的实际情况,比单一用 API 模型设计油、套管更合理,既能避免材料浪费又能保证管柱的安全可靠性。

孙永兴和林元华等人^[55]通过分析 API 5C3 和 ISO 10400 抗挤模型发现:API 5C3 屈服挤毁设计的基本原理是管内壁屈服失效,但实际上,内壁开始屈服时套管还有很大的抗挤余量;而 ISO 全管壁屈服挤毁压力公式并非是全管壁屈服公式,并不适合所有壁厚段套管强度的计算。为此,研究人员基于弹塑性力学理论和 Mises 强度准则推导出了任意屈服半径处及全管壁屈服挤毁抗挤强度公式。通过计算对比可知:按 Mises 屈服准则计算的抗挤强度要比 API 值高 15145%;而全管壁屈服时的抗挤强度值要比 API 值高出 32178%。以上研究成果解决了 ISO 10400 抗挤模型不适合所有壁厚段套管强度计算的问题,为套管抗挤强度研究的发展提供了理论基础。同时,也为高抗挤套管、非 API 套管和特厚壁套管的抗挤强度设计提供了新思路。

王军和田晓龙等人^[56,57]采用电测法对 80~125 钢级 SEW 高抗挤套管进行了挤毁测试研究,其研究结果表明:套管屈服强度对 80~125 钢级 SEW 高抗挤套管抗外挤性能起决定性作用;径壁比、椭圆度、壁厚不均度和残余应力是影响 80~125 钢级 SEW 高抗挤套管抗挤强度的主要因素;采用 450℃ 以上的热矫直温度,有利于降低残余应力对套管抗外挤性能的影响。提高高抗挤套管的屈服强度和尺寸精度(即降低套管壁厚不均度和椭圆度),减小径壁比,降低残余应力均可改善高抗挤套管抗挤强度。

为了研究石油套管柱的力学性能,赵均海等人^[58]采用统一强度理论,考虑中间主应力和材料拉压比对套管强度的影响,推导出了石油套管柱的单轴抗挤强度、双轴抗挤强度和三轴抗挤强度公式,建立石油套管柱双轴抗挤强度和三轴抗挤强度与单轴抗挤强度之间的关系,并分析材料的拉压比、中间主应力效应、径厚比、荷载工况等因素对套管抗挤强度的影响规律。该结果适用于具有 SD 效应和中间主应力效应的材料,并将多种屈服准则下石油套管柱的抗挤强度表达式分别统一起来,具有广泛的适用性,可为石油套管柱抗挤强度的设计提供参考。

2. 套管抗挤强度的有限元研究

T. A. Netto 等人^[59]基于非线性有限元数值分析及小规模的室内实物实验对腐蚀缺陷套管的抗挤强度进行了研究,建立了计算缺陷套管挤毁压力的有限元模型。该模型考虑了不同套管的材料和几何参数,并利用挤毁测试数据对该模型进行了校正。2009 年,作者围绕不同缺陷和缺陷与套管椭圆度之间的关系^[60],进一步开展了二维和三维有限元模型的研究,最后该模型被发展成检验带有狭窄腐蚀缺陷套管的挤毁压力的简单程序。

在考虑套管几何缺陷等因素的条件下,蔡晓闻和高连新等人^[61]结合全尺寸试验建立了计算套管抗挤强度的有限元模型,该模型可用于模拟石油套管的抗挤强度。利用该有限元模型,作者将不圆度和壁厚不均度单独考虑,分别计算出其中一种缺陷因素(不圆度或壁厚不均度)影响下的套管抗挤强度。并将考虑各种缺陷计算得到的结果与试验结果进行对比分析,对比分析结果表明:理想套管的承载能力高于存在几何缺陷的套管;不圆度对抗挤强度的影响较大;壁厚不均度对抗挤强度的影响相对较小。

基于弹塑性力学理论,高连新和常龙等人^[62]建立了套管抗挤强度计算的有限元模型。通过模型计算得到套管外壁的环向应变,并将计算值与试验值进行对比,从而对该有限元模型进行修正,最后,利用修正后的模型进一步计算出套管的抗挤强度。作者通过有限元模拟得到的失效载荷、应变变化的趋势、失效形貌都与实际吻合。由此可见,将有限元模拟计算与应变检测结合起来,可大大提高有限元的计算精度,对预测套管抗挤强度、指导高抗挤套管的开发具有一定的参考价值。

申昭熙和冯耀荣等人^[63,64]应用统计方法对 213 根套管全尺寸挤毁试验数据进行了方差分析。分析结果表明:径厚比、屈服强度是影响套管抗挤强度的主要因素,而椭圆度、壁厚不均度、残余应力等因素对套管抗挤强度的影响呈随机性分布。利用有限元方法对不同组合的椭圆度、壁厚不均度和残余应力进行了模拟分析。结果表明:相同椭圆度、壁厚不均度和残余应力在套管内分布位置不同时,套管实际抗挤强度可相差 10% ~ 30%。由此说明,在不能确定这些因素的准确数值及分布的情况下,椭圆度、壁厚不均度和残余应力对套管抗挤强度的影响不易用数学公式准确描述。最后,基于套管全尺寸试验数据的统计分析和有限元模拟结果提出了新的套管挤毁压力计算公式。

1.1.2 非均匀载荷下套管抗挤强度的研究现状

近年来国内及国外许多石油公司发现,虽然套管抗挤设计符合 API 标准,但在生产过程中依然会发生挤毁现象。原因是:(1) API 5C3 提出的套管挤毁压力计算公式是基于若干年前大量套管在均匀载荷条件下被挤毁的实验数据,用数学回归方法得出的经验公式或修正的理论公式;(2) 套管在复杂地层受到非均匀载荷的作用,使其抗挤毁强度大大降低^[65];(3) 腐蚀、磨损、冲蚀等因素造成的套管缺陷会对其抗挤强度产生不同程度的影响;(4) 针对复杂地层套管抗挤毁强度的设计思路及设计理念不是很合理。

在实际工程中,地层出砂、滑移、膨胀及水泥窜槽等因素都会导致石油套管受到非均匀分布的挤压力作用,从而导致部分石油套管受到的挤压力是非均匀分布的;套管在酸性油气井中长期使用难免会因腐蚀、磨损等因素而产生相应的缺陷。针对套管(理想套管和含缺陷的套管)外载荷的非均匀分布特性,假设了多种非均匀模式,如椭圆形分布的非均匀(均布)载荷和局部分布的非均匀集中载荷,其中椭圆形分布的非均匀(均布)载荷是将非均匀载荷分解为均匀载荷和非均匀载荷两部分^[66]。目前,许多学者基于理论和有限元方法对非均匀(均布)载荷下的套管抗挤强度进行了大量研究^[66-76],但针对非均匀集中载荷下套管抗挤强度的理论和试验研究鲜见报道。然而,研究发现:椭圆形分布的非均匀(均布)载荷是一种理想的情况,实际上,岩盐蠕变、岩层错动、大型酸化压裂使得套管局部受到较大集中载荷的作用。因此,椭圆形分布的非均匀(均布)载荷不能反映实际井下套管的服役工况。有必要开展非均匀(集中)