

酸性油气田油套管抗腐蚀开裂设计新方法

李天雷^{1,2}, 徐晓琴³, 孙永兴⁴, 曹晓燕^{1,2}

(1. 中国石油工程设计有限公司西南分公司, 四川 成都 610017; 2. 中国石油天然气集团公司石油管力学和环境行为重点实验室四川研究室, 四川 成都 610017; 3. 国内贸易工程设计研究院, 北京 100069; 4. 川庆钻探工程公司钻采工艺技术研发院博士后科研工作分站, 四川 广汉 618300)

摘 要: 屈服设计方法和断裂力学设计准则是材料设计的主要方法。NACE TM0177 - 2005 方法 D 已给出了材料的环境断裂韧性试验方法, ISO 11960 也给出了材料允许的最小环境断裂韧性值, 但在油气田的选材上尚未采用断裂力学的设计方法。对油、套管断裂韧性试验方法进行了详细介绍, 计算出含不同深度裂纹的相同几何尺寸的 C110 和 T95 两种套管的应力强度因子, 分析了油、套管环境开裂机理, 在满足屈服准则条件下, 油套管强度也要满足断裂力学设计方法, 为油套管用户在选材上提出了新的参考依据。

关键词: 设计方法; 断裂力学; 断裂韧性; 油套管

文章编号: 1006-5539(2010)01-0014-03

文献标识码: A

0 前言

随着高含硫化氢油气田的开发, 油套管的工作环境也趋于恶劣和复杂, 尤其是高温高压的油气井中, 高强度的油套管开始在工程中得到应用, 高强度油套管在高含硫、高温、高压环境中断裂的问题日趋突出。

目前国内的油套管设计中一般都是采用屈服设计准则, 而断裂力学的设计方法尚未应用。采用的屈服设计准则只能满足强度设计要求, 不能够对油套管是否发生环境断裂进行定量的准确判断和分析。本文对不同油套管断裂韧性试验方法进行了详细介绍, 计算出含裂纹油井管的应力强度因子, 分析应力状态对油套管环境开裂机理, 进而提出油套管在高含硫化氢环境下断裂力学设计方法。

1 环境断裂韧性的试验测试方法

NACE TM0177 - 2005 标准方法 D 法即双悬臂

梁(DCB)试验方法^[1], 是用于测量金属材料抗裂纹扩展能力, 用临界应力强度系数 K_{ISSC} 来表示, K_{ISSC} 即为环境断裂韧性值, 用于硫化物应力开裂的断裂力学指标, 是一种开裂 - 停止型的断裂力学试验。其试验原理是将受楔形块加载的试样暴露于规定的试验溶液中, 在规定的试验时间以后取出试样, 根据试样所产生裂纹的长度和裂纹止裂时楔子载荷求得 K_{ISSC} , 得出不同材料抗硫化物开裂的敏感性, 确定材料是否符合抗硫标准, 试样示意图如图 1 所示^[1]。

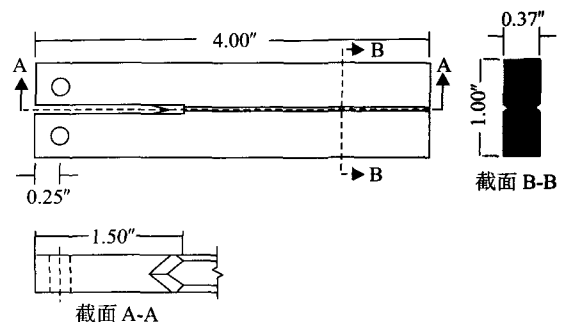


图 1 DCB 试样示意图

NACE 双悬臂梁(DCB)试验涉及到材料的环境

收稿日期: 2009-06-30

作者简介: 李天雷(1980-), 男, 河南周口人, 工程师, 硕士, 主要从事材料与腐蚀防护工作。电话: (028)86014357。

断裂力学评价。在一般强度设计中,假设外载应力达到材料屈服强度时,构件就会失效。当构件中存在裂纹时,其强度判据就转变成了材料抗裂纹扩展的能力和裂纹尖端某种力学参量之间的关系。

在腐蚀介质中,即使外载应力比不发生 SSC 环境中的 K_{IC} 小很多,裂纹尖端仍存在使裂纹扩展的某种驱动力,使裂纹失稳并断裂。如果外载应力低于某一值,材料在腐蚀介质中工作足够长的时间,裂纹虽有扩展,但不会失稳,对应于此状态的应力强度因子称为某腐蚀介质环境的临界应力强度因子。某腐蚀介质环境的临界断裂韧性,记为 K_{IEC} 。如果是 H_2S 环境,记为 K_{ISSC} 。

随着断裂力学的发展,材料的断裂韧性 K_{IC} 广泛应用在结构设计和防断选材上。目前在输送管长输管道方面,已经采用了断裂力学方法评选材料^[2],研究断裂力学意义上的材料开裂和止裂。目前,工程应用上多采用应力强度因子来测定裂纹扩展速率和估算油井管剩余寿命,比传统使用强度极限 σ_b 作为设计准则要准确的多。但是,这些材料性能评价主要还停留在无腐蚀的环境中,即只考虑材料的断裂韧性没有考虑材料的硫化物应力腐蚀影响。在油套管或井眼系统中,以腐蚀环境下的断裂力学设计方法尚未引用。

H_2S 腐蚀环境下的设计准则一直采用 NACE TM0177-2005 中 A 方法进行材料的评价,即 NACE TM0177-2005 标准中要求所有抗硫钢材需满足标准 A 溶液环境,材料屈服强度在 80%~90% 应力水平下的抗硫化物断裂试验,超出此应力水平将增加应力开裂的敏感性。NACE 方法 A 主要只是以强度理论为判据来进行抗硫化氢应力腐蚀开裂材料评选,不能用于不同应力水平硫化物应力开裂的计算。可以用以下方法解决问题:按照 NACE 方法 D 求出在一定腐蚀环境下某种材料的临界强度断裂因子,这样在设计时只涉及外载使材料的应力不超过临界强度因子,那么这种材料就可以采用。

2 应力强度因子的计算

油套管经常处于复杂载荷和井下腐蚀介质的恶劣条件下工作,油井管管体不可避免存在微裂纹,由裂纹发展致穿孔或完全断裂时有发生,管体上裂纹

成核、扩展、刺漏及断裂的控制是确保钻油套管运行安全的重要措施。因此,对带裂纹油井管的承载能力做出预测,分析并求出含裂纹油套管的应力强度因子具有重要的工程价值。

根据 ISO 10400《石油天然气工业-套管、油管、钻杆和管线管性能公式及计算》标准^[3],当管子存在不可避免的裂纹时,应采用韧性断裂公式和裂纹失稳断裂公式计算抗内压强度。其中规定含硫油气井中的套管、油管只允许小于 5% 规定壁厚的裂纹存在,普通钢级油套管可允许小于 12.5% 规定壁厚的裂纹存在。

本文的计算根据油气田通常采用的 7" 套管为例,壁厚 12.65 mm。设有一内壁纵向裂纹,深度为壁厚的 5% 递增至壁厚的 20%,得到在内压 55 MPa 下不同裂纹深度下的应力强度因子。应力强度因子的计算方法采用文献^[4]推荐方法进行计算。其计算公式如图 2 所示。

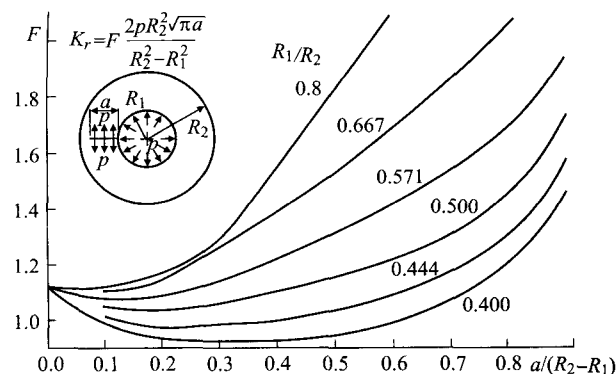


图 2 含内壁裂纹的应力强度因子计算公式

套管的内半径为 R_1 , 外半径为 R_2 , 内壁上裂纹的深度为 a , 内压力为 P 。内壁上的应力为:

$$\sigma_i = \frac{2PR_2^2}{R_2^2 - R_1^2} \quad (1)$$

裂纹尖端的应力强度因子为:

$$K_I = \sigma_i F \cdot \sqrt{\pi a} \quad (2)$$

$$K_{III} = K_{II}$$

图 2 中 F 为修正系数,对不同的 $n = R_2/R_1$ 值给出了 $F-a$ 曲线($\alpha = a/(R_2 - R_1)$),根据内径、外径和裂纹尺寸求出 F ,由 $R_1 = 76.25$ mm, $R_2 = 88.9$ mm, $P = 55$ MPa, $t = 12.65$ mm 及式(2),计算得到 7" 套管不同深度裂纹的裂尖应力强度因子如表 1 所示。

表 1 应力强度因子与缺陷数据表

裂纹缺陷比例 /(%)	a 裂纹缺陷深度 /mm	应力强度因子 K_I /MPa $\cdot$ m $^{1/2}$
5	0.73	21.018
8	1.01	27.061
12.5	1.58	33.766
15	1.90	37.054
18	2.28	41.303
20	2.53	44.288

3 断裂力学设计方法

3.1 材料屈服强度和硬度要求

屈服强度和硬度是材料抗硫化物应力开裂的重要性能参数。强度和硬度太高会导致开裂,适当降低材料的强度和硬度是确定碳钢和低合金钢抗环境开裂的重要指标。通过限制强度等级可以避免硫化物应力开裂。因为硬度与强度有关,硬度能用非破坏性的和较简便的方法确定,因此硬度在酸性环境材料的选择和质量控制的规范中广泛使用。

图 3^[5]表示随着强度增加,硫化氢环境材料临界应力强度因子 K_{ISSC} 降低。由图 3 中数据看出屈服强度大于 100 ksi (689.5 MPa) 后,硫化氢环境材料临界应力强度因子 K_{ISSC} 变得小于 33 MPa $\cdot$ m $^{1/2}$ (注:ISO 11960 要求 C90 和 T95 油套管抗硫化氢环境断裂韧性不低于 33 MPa $\cdot$ m $^{1/2}$ ^[6])。鉴于屈服强度对环境开裂影响较大,因此适合硫化氢环境使用的材料除满足最小屈服强度要求外,还限制最大屈服强度值与最小屈服强度的差值不得超过 15 ksi (103 MPa)。

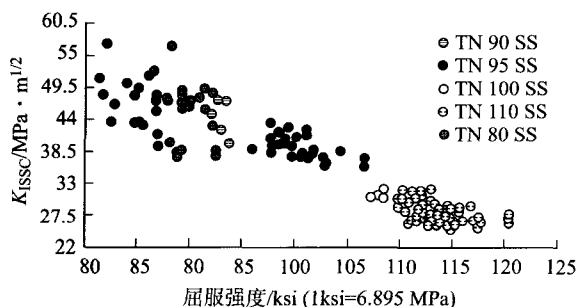


图 3 常用低合金钢强度影响硫化氢环境材料临界应力强度因子 K_{ISSC}

3.2 材料的失效评估

对 C110 和 T95 两种套管进行评估设计。

若按常规强度理论,在相同载荷条件下 C110

的强度储备明显大于 T95,而对于两种套管的抗断裂能力,由材料的断裂力学 K 判据求得。如图 4 可知 110 ksi (758 MPa) 级别的硫化氢环境下的断裂韧性 K_{ISSC} 在 27 MPa $\cdot$ m $^{1/2}$ 左右,95 ksi (655 MPa) 级别的 K_{ISSC} 在 38 MPa $\cdot$ m $^{1/2}$ 左右,结合表 1 可得两种套管允许的裂纹深度,如图 4 所示。

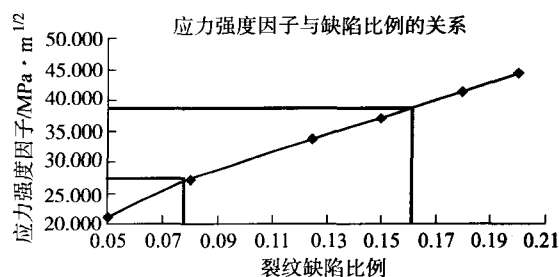


图 4 T95 和 C110 两种钢级允许的裂纹深度

从图 4 看出 C110 允许的裂纹深度为 0.97 mm, T95 允许的裂纹深度为 2.02 mm。从图 3~4 中可知强度愈低含裂纹套管允许的裂纹深度为愈深, C110 断裂应力比 T95 要低,若选 C110 作为套管,发生硫化氢环境断裂的风险更大。

失效评估图 (FAD) 技术目前国际上已普遍采用。运用 FAD 技术评价含有缺陷管道剩余强度是对含有缺陷管道能否适合于继续使用的定量评价,在国际上被称之为适用性 (Fitness For Service) 评价。其目的是在缺陷定量检测基础上,通过严格的理论分析与计算,确定管道安全承压能力,从而解决现役压力下管道能否安全运行和管道能否提压运行的问题。这些只是应用在输气管线上,从理论上来说此种评价方法在油套管上同样可以应用。

在 FAD 图中 (图 5) K_I 为应力强度因子, K_{IC} 为

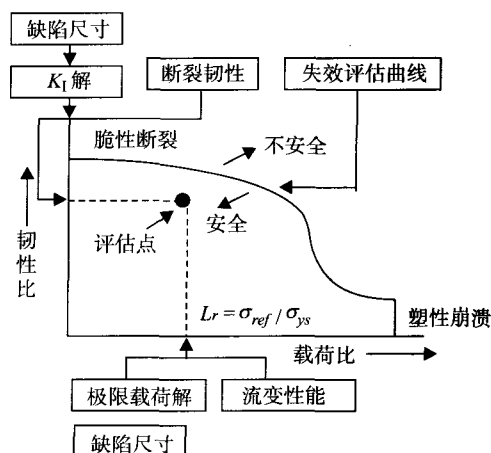


图 5 失效评估示意图

(下转第 43 页)

通过国内部分工程项目GPS拟合高程精度统计的结果,GB 50026-2007《工程测量规范》^[3]中,已规定将GPS拟合高程测量适用于平原或丘陵地区的五等及以下等级高程测量。从表2可以看出,GPS拟合高程已能满足工程测量中对高程精度的要求。

4 问题的探讨

笔者在进行首级控制测量成果解算时,发现可利用的蔡家坟、仲山包两个较近的国家三角点兼容性不好,经检验,平面位置差异较小,高差较差为0.6 m。它们是否相互不兼容?

为了解决这一问题,我们分析了1:10 000地形图的信息,又收集了第三个国家点——董家梁点,加入联测。最后通过多方比较发现,蔡家坟点的精度相对较高,可利用为约束平差的平面和高程起算点,

而仲山包点高程兼容性较差,仅作为网平差的坐标约束点,高程检查点。

5 结束语

龙岗净化厂是龙岗气田的重要组成部分,龙岗净化厂测区的GPS控制测量尤为重要,在满足基本布网原则的基础上,我们更应注重总结和分析GPS网的内符合和外符合精度,在发现起算点不兼容的情况时,应采取适当的措施,以保证GPS控制网的准确性和可靠性。

参考文献:

- [1] 徐绍铨,张华海. GPS测量原理及应用[M]. 武汉:武汉大学出版社,1998,101-103.
- [2] GB/T 18314-2001,全球定位系统(GPS)测量规范[S].
- [3] GB 50026-2007,工程测量规范[S].

(上接第16页)

材料的断裂韧性; σ_{ys} 为材料的流变应力; σ_{ref} 为结构承受的应力。对在硫化氢环境中的失效评估图,材料的断裂韧性即为硫化氢环境断裂韧性 K_{ISSC} 。

对含裂纹油套管进行评价时,若评估点(L_r, K_r)落在评估曲线内,则认为是安全的,否则认为缺陷不能接受。在硫化氢环境中对于C110和T95两种套管失效评估中,在同样载荷和缺陷条件下,在环境断裂的角度考虑T95安全范围较大,塑性失效的范围C110的安全区域较大。

综合以上分析,在满足强度设计的要求条件下,在硫化氢环境下工作的油套管选用T95更为安全。

4 结论

a. 在高含硫化氢的油气井用油套管的设计方法上,考虑断裂力学的基础上进行适用性评价,给出了T95和C110两种套管用钢含裂纹缺陷情况下的断裂力学设计新方法。

b. 在酸性油气田油套管选材上,新的设计方法提供了重要参考价值。

参考文献:

- [1] NACE TM0177-2005, Laboratory Testing of Metals for Resistance to Sulfide Stress Cracking and Stress Corrosion Cracking in H₂S Environments [S].
- [2] 庄 茁. 断裂动力学有限元程序的开发及在天然气管道裂纹扩展问题上的应用[J]. 工程力学, 1999, 16(1):105-113.
- [3] ISO 10400-2007, Petroleum and Natural Gas Industries-Formula and Calculation for Casing, Tubing, Drill Pipe and Line Pipe Properties [S].
- [4] 中国航空研究院. 应力强度因子手册[M]. 北京:科学出版社,1993.
- [5] Kermani M B, Key Tech, U K. Materials Optimization in Hydrocarbon Production, NACE Annual Corrosion Conference [A]. Houston Tx: Paper 05111, 2005.
- [6] ISO 11960-2004, Petroleum and Natural Gas Industries-Steel Pipes for Use As Casing or Tubing for Wells [S].