

石油套管失效分析

刘智勇¹, 董超芳¹, 李晓刚¹, 谭宏强², 严建奇²

(1. 北京科技大学腐蚀与防护中心, 北京 100083; 2. 华北油田公司工程监督部, 河北 任丘 062550)

摘 要:通过化学成分和金相分析、宏观和微观断口形貌观察、力学性能测试及相关的理论计算对断裂的 N80(1) 石油套管进行失效分析, 结果表明: N80(1) 石油套管断裂是由于套管材质的组织韧性较差、化学成分分布不均和冲击韧性过低等因素造成的。

关键词:石油套管; 断裂; 失效分析

中图分类号: TG111.9 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-0963(2008)03-0058-05

Failure Analysis of API Oil Casing

LIU Zhi-yong¹, DONG Chao-fang¹, LI Xiao-gang¹, TAN Hong-qian², YAN Jian-qi²

(1. Corrosion and Protection Center, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China;

2. Project Supervision Department, Oil Field in North China, Renqiu 062550, Hebei, China)

Abstract: According to visual examination, chemical analysis, metallographic examination, mechanical inspection, scanning electron microscope examination and fracture mechanics analysis of the failed N80(1) oil casing, the main reason for the failure of pipe is the combination of bad metallic phase, non-homogeneous chemical constitution and poor impact ductility.

Key words: oil casing; fracture; failure analysis

油管开裂是油管失效的主要形式, 常造成巨大的经济损失^[1,2]。笔者结合华北油田某油井 N80(1) 石油套管的失效案例, 探讨了油管开裂失效的普遍规律和特殊现象, 为预防同类事故的发生提供理论和实践依据。

断裂套管为直径 139.7 mm、壁厚 7.72 mm、材质 37Mn5 的 N80(1) 石油套管。失效前, 地面拉力约 250 kN, 断裂后断口上部套管悬重 60 kN。管内设计压力为 70 MPa; 井斜 < 3°。该套管是在进行压裂处理时开裂并断裂, 断裂时管内压力为 30.12 MPa。经磁定位测井判断油层套管于地下 257 m 处断裂, 断裂处温度为 5~10 ℃。

1 实验方法

为了了解失效 N80(1) 石油套管的性能, 确定断裂失效原因和断裂机制, 对失效套管进行断口宏观和微观检测分析、化学成分分析、金相组织和夹杂

物分析、管体不同部位组织的微区成分分析、管道材质的力学性能(包括拉伸性能、冲击性能、断裂韧性和硬度)测试, 并结合套管实际服役环境进行相应的理论分析, 以判定 N80(1) 石油套管的断裂原因。

2 实验结果及分析讨论

2.1 宏观观察

失效 N80(1) 石油套管的断口形貌如图 1 所示。可见, 部分断口呈“人”字形, 其余断口走向基本与管子轴向垂直, 断口没有出现轴向宏观裂纹、断口表面比较平整, 断口处管径无明显变形, 管壁没有明显减薄, 可以肯定该套管属于脆性断裂。但由于断口面上多处被机械划痕擦损, 尤其是“人”字形突出处被破坏, 致使对裂纹源和断裂方向的判断受到一定影响。

套管断口缘上的二次裂纹均指向远离“人”字形突起的方向, 由此可以判断裂纹源应该在“人”字形突起的尖端处或在残留井下的另外一段套管上。

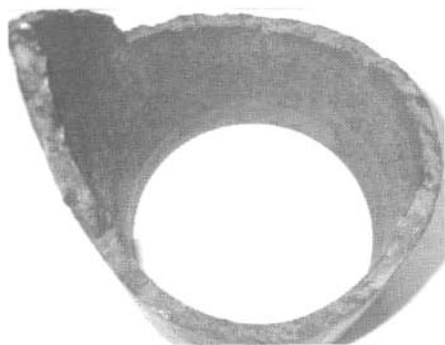


图1 N80(1)石油套管的断口形貌
Fig. 1 Fracture surface of N80(1) pipe

2.2 金相分析

观察断口附近和远离断口的管壁材料的金相组织可见,管壁横断面组织与纵向组织相同,没有明显的轧制组织特征。组织为网状铁素体+珠光体(图2),这种组织韧性较差^[3,4],晶粒较大并均匀,晶粒度平均为4~5级,部分大晶粒达到2~3级。晶粒异常长大将导致材料韧性下降,使其脆性增加^[5]。从失效套管断口的二次裂纹扩展模式[图2(b)]可见,裂纹扩展呈穿晶断裂,这种裂纹扩展模式通常都是脆性断裂裂纹。

2.3 断口形貌

用SEM观察失效套管断面的微观形貌可见,断口表面微观形貌为典型脆性断口,断口上同一晶粒的

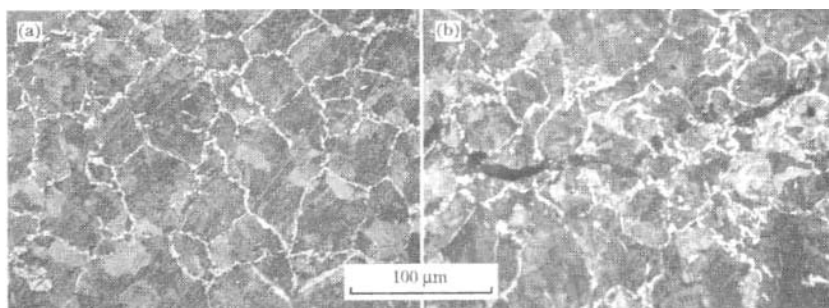


图2 管壁纵截面金相组织(a)和裂纹形貌(b)
Fig. 2 Optical micrograph (a) and racking mode (b) of failed tube

断裂面比较平整,为片状珠光体(图3)。这种断口表明断口处材质脆性很高,所以套管失效断裂是材料韧性过低所致。

对失效套管的非断裂区按API 5CT标准(第8版)进行全壁厚拉伸实验,观察到断口中存在大面积脆性区(图4)。脆性区中有些晶粒内部为脆性解理断裂,晶界附近有韧窝形貌。说明晶粒内部脆性很高。结合金相分析可知,晶粒内部的珠光体组织脆性很高,而晶界上的铁素体组织的韧性相对较好。分别对脆性区和韧窝区进行EDS分析可知,脆性区(晶粒内部)的硫和磷含量明显高于韧性区(晶界上),说明晶粒内部硫、磷富集是导致脆性较高的原因之一。

2.4 化学成分分析

分别对失效套管断口附近和远离断口处的管壁材料进行了化学成分(质量分数)分析并与API Spec 5CT标准^[6]规定进行对比,结果如表1所示。

可见,失效套管的硫、磷平均含量均低于API Spec 5CT标准要求。通常以Mn/C比来控制普通套管的强度和韧性,锰含量的上限可提高到 $w(\text{Mn})=1.5\%$, $\text{Mn}/\text{C}=4\sim 5$ ^[7]。失效套管的 $\text{Mn}/\text{C}=4.14$ 。

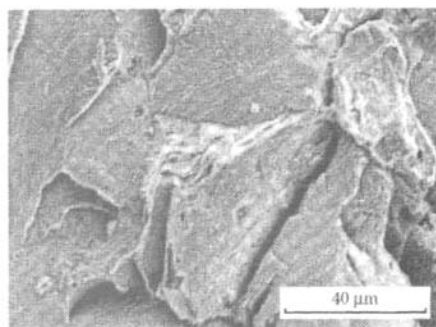


图3 断口表面SEM微观形貌
Fig. 3 SEM photograph of fracture surface of failed pipe

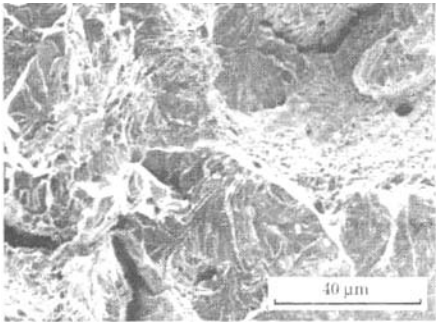


图 4 失效套管拉伸试样的断口形貌
Fig.4 SEM photograph of test specimen for failed pipe

对失效套管断口表面不同部位的 EDS 分析发现,靠近管壁内侧(图 5 中 1、2)的硫含量明显高于管壁外侧(图 5 中 3、4),而且也高于 API Spec 5CT 标准的要求(表 2)。套管内壁是钢管原坯钻孔前的芯部位置,因硫等有害元素易在钢坯芯部偏析,可以推断,在生产过程中,失效套管原钢坯芯部存在成分偏析。由于高硫、磷含量部分脆性较大,这就导致了套管材质存在局部劣化现象,而这种性能劣化现象在质量检测时很难检测到,但却是导致套管发生失效的内在原因之一。在 API Spec 5CT 标准中,只规定了平均硫、磷含量的范围,没有限制硫、磷的偏析和偏聚程度,也未规定相应的检测手段。

表 1 失效套管不同部位的化学成分
Table 1 Composition in different part of failed pipe

	C	Mn	Mo	Ni	Cu	P	S	Si
断口附近	0.34	1.45	<0.005	0.007 4	0.012	0.010	0.010	0.26
远离断口	0.36	1.45	<0.005	0.007 2	0.013	0.010	0.010	0.27
API 5CT	—	—	—	—	—	≤0.030	≤0.030	—

2.5 力学性能分析

为了全面了解失效套管材质的力学性能,根据 API Spec 5CT 标准的要求,进行了拉伸实验和 1/2 尺寸纵向夏比冲击实验,并根据断裂韧性(K_{IC})测试

结果估算 K_{IC} ,结果列于表 3。可见,失效套管的强制性力学性能指标均符合 API Spec 5CT 标准的要求,但 3 块试样的冲击功均低于 API Spec 5CT 标准的要求,而且其中 1 块试样的冲击功低于 API Spec 5CT 标准最低要求的 2/3。过低的冲击韧性不能保证套管具有足够的韧性抵抗运输、吊装、安装和服役过程中的冲击载荷,极易在冲击作用下产生微裂纹,从而导致在管内升压过程中,发生断裂。

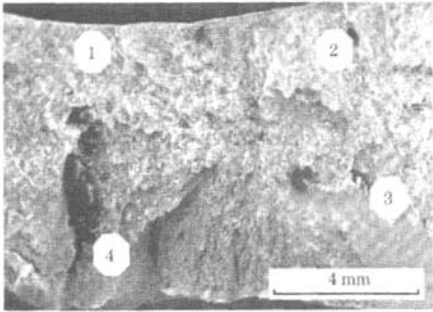


图 5 微区成分分析取样部位
Fig.5 Positions of composition analysis by EDS

3 理论计算及分析讨论

3.1 计算

由服役条件可知,套管管壁只受轴向拉力(重力+拉力)和管内外压差产生的周向拉应力的作用。所以,套管断口处管壁所受的轴向拉力约 190 kN。按套管公称直径(139.7 mm)和公称壁厚(7.72 mm)计算,轴向拉力产生的应力为: $\sigma_1=78$ MPa,由内压力产

表 2 微区 EDS 分析结果
Table 2 EDS analysis of microregion composition

内 壁 侧			外 壁 侧			API Spec 5CT
在图 5 中位置	S	P	在图 5 中位置	S	P	S
1	0.06	0.00	3	0.02	0.00	对成分不均匀分布无要求
2	0.11	0.00	4	0.00	0.00	

表 3 · 套管的力学性能
Table 3 Results of mechanical property tests

项 目	检测结果	API Spec 5CT 标准要求
$A_{50.8}/\%$	5 块试样 15.5~16.5	≥ 15
R_m/MPa	5 块试样 865~875	≥ 689
$R_{0.5}/\text{MPa}$	5 块试样 610~650	552~758
1/2 尺寸纵向夏比冲击功/J	3 块试样分别为 6、12、14	≥ 15 , 3 块试样只允许 1 块试样的结果小于规定最小冲击功, 且在任何条件不能低于最小冲击功的 2/3
$K_{IC}/(\text{m}^{1/2} \cdot \text{MPa})$	≤ 46	无要求

生的管壁内周向应力为： $\sigma_2=273\text{ MPa}$ 。

由工程力学可知：

$\sigma_\alpha=(\sigma_1+\sigma_2)/2+(\sigma_2-\sigma_1)\cos 2\alpha/2+\tau_{12}\sin 2\alpha$ (1)

$\tau_{12}=(\sigma_2-\sigma_1)\sin 2\alpha/2-\tau_{12}\cos 2\alpha$ (2)

式中， $\alpha=\pi/4$ 。

对式(1)和式(2)两边求导，并令导数=0，可以求得最大剪切应力： $\tau_{\max}=\tau_{12}\alpha=(\sigma_2-\sigma_1)/2=97.5\text{ MPa}$ 。

计算可知，正常情况下，管壁中的应力明显低于测得的管壁材料的屈服强度，而且由于最大剪切应力 τ_{\max} 远小于主应力 σ_2 和材料的屈服强度，所以可以肯定主应力在失效套管断裂过程中起主要作用。因此，可以用压力容器安全评估方法计算失效套管的断裂韧性。由断裂力学可知，对于管壁较厚的压力容器，直径为 $2a$ 的半圆形表面裂纹（裂纹面平行于轴向），断裂韧性和材料的缺陷尺寸近似满足（平面应变状态）下式^[8]：

$K_{IC}^2=\pi a\sigma_2^2/[1-(\sigma_2/R_m)^2/2]$ (3)

式中， a 为裂纹的 1/2 尺寸，mm； σ 为垂直裂纹的拉应力，即本文中 σ_2 ，MPa； R_m 为屈服强度，本实验中， $R_m=R_{0.5}$ （平均值），MPa。

因为失效 N80(1) 套管的主应力方向为周向，则平行于管道轴向的裂纹源导致的断裂可以用式(3)计算。

K_{IC} 可以用“破裂前渗漏准则”来判断。确定 $a\geq\delta$ （壁厚）为套管破裂的临界尺寸 $a_c=7.72\text{ mm}$ ，用式(3)即可近似计算得到 $K_{IC}=44.6\text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ 。

由此可见， K_{IC} 的估计值与条件断裂强度因子 K_q 差异不大。

从以上计算还可看出，对于失效 N80(1) 套管，当 $a\approx\delta$ 时，仅在 30 MPa 压应力条件下就可使裂纹扩展，最终在轴向作用力的协同作用下致使套管断裂。在井下 300 m 处（温度为 5~10℃）， $K_{IC}(10\text{ }^\circ\text{C})<K_{IC}$ （室温）。所以，井下失效套管的实际断裂韧性小于

K_q （室温）。因此，裂纹源尺寸一般小于 15.5 mm，甚至仅 1~2 mm 时就可导致套管发生开裂。

3.2 分析讨论

通常，石油套管断裂是因地下水和石油介质中的腐蚀性离子（如 CO_2 和 Cl^- 等）或严重的腐蚀减薄及穿孔导致的^[9~11]。而该失效套管尚未服役，断裂发生在安装和施压过程中。因此，可以认为断裂与环境介质因素无关。

由失效分析得知，虽然管壁材质的平均化学成分和拉伸性能达到了 API Spec 5CT 标准的要求，但管壁上硫元素存在明显的宏观和微观分布不均匀性，管壁内侧的硫含量高于 API Spec 5CT 标准的要求，这导致管壁内侧和晶粒内部的韧性大大下降，而且管壁处晶粒比较粗大，晶粒组织为少量网状铁素体+珠光体，这种组织韧性很差，致使耐冲击性能和止裂性能大大降低，所以失效套管抗动载荷冲击的性能很差，故而套管在生产、运输、吊装和安装等过程中，受冲撞时易损伤而引发裂纹源。结合对裂纹源判断的分析可以推断，该失效套管遭受冲击而引发裂纹源形核的可能性很大。虽然因 N80(1) 套管厚度不够导致的条件应力强度因子 K_q 不能作为 K_{IC} 的有效判据，但根据对 K_{IC} 的计算结果可知，该失效套管的断裂韧性值较低，也就是说该套管对管壁缺陷的容限能力很小，在服役条件下，较小的裂纹源就能导致开裂。

4 结论

(1) N80(1) 石油套管虽然平均化学成分和拉伸性能均达到 API Spec 5CT(第 8 版) 标准的要求，但有害元素分布不均匀，局部有害元素含量过高，致使材料组织性能局部劣化。

(2) N80(1) 石油套管管壁晶粒度较大且晶粒有异常长大现象，组织为网状铁素体+珠光体。这 2 种

情况都可使材料韧性下降,脆性增加。

(3)N80(1)石油套管管壁材料的低温冲击韧性很低,抗冲击载荷性能差,所以冲击载荷可能是导致套管开裂并断裂的主要原因。

参考文献:

- [1] 冉箭声,张兆彦,史庆建,等.油管常见事故原因分析及防治对策[J].钻采工艺,2004,27(1):73.
- [2] 李鹤林.油井管发展动向及若干热点问题(上)[J].钢管,2005,34(6):1.
- [3] 任海鹏,马洪梯,刘春明,等.非调质油井管钢的开发应用[J].钢铁,2002,37(1):61.
- [4] 耿文范.非调质钢的发展现状[J].钢铁研究学报,1995,7

(1),74.

- [5] 高惠临,辛希贤.论管线钢韧性的控制因素[J].焊管,1995,18(5):7.
- [6] API Spec 5CT-2005,套管和油管规范(中文版)[S].
- [7] 吉玲康,李鹤林,宋 治.提高非调质套管抗射孔开裂能力的重要措施[J].石油机械,2000,28(2):41.
- [8] 何庆芝,酆正能.工程断裂力学[M].北京:北京航空航天大学出版社,1993.
- [9] 张 清,李全安,白真权,等.N80油管钢 $\text{CO}_2/\text{H}_2\text{S}$ 腐蚀的阴极过程EIS分析[J].焊管,2006,29(3):25.
- [10] 陈长风,路民旭,白真权,等.N80油管钢 CO_2 腐蚀点蚀行为[J].中国腐蚀与防护学报,2003,23(11):22.
- [11] 顾春元,狄勤丰,王掌洪.N80钢在地层水中的应力腐蚀行为研究[J].石油学报,2006,27(2):141.

(上接第 57 页)

(2)该检测系统在测量原理、硬件成本及抗干扰能力上均较其它系统有明显的优势,具有广阔的工业应用前景。目前正对该检测系统的检测精度、适应范围和运行环境等问题进行进一步的研究。

参考文献:

- [1] 杨溪林,邱忠义,金国藩.激光板形检测技术及发展[J].冶金自动化,1998,21(1):29.
- [2] 黄思德,宦晓峰,王 娅.平直度仪在热轧板厂的应用[J].梅山科技,2004,6(2):1.
- [3] 张 勇,李长江,何正春.计算机图像处理技术在钢板板形检

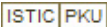
测中的应用[J].重庆工业高等专科学校学报,2002,17(1):43.

- [4] Degner M, Friedrich K E. Topometric Online Flatness Measuring System for Hot Strip [J]. Metallurgical Plant and Technology International, 1998, 12(6): 60.
- [5] 刘文耀.光电图像处理[M].北京:电子工业出版社,2002.
- [6] 刘 江.直线型激光板形检测系统关键技术研究[J].钢铁研究学报,2003,15(5):60.
- [7] 陆润民.计算机图形学教程[M].北京:清华大学出版社,2003.
- [8] 刘传才.图像理解与计算机视觉[M].厦门:厦门大学出版社,2002.

石油套管失效分析

作者：[刘智勇](#), [董超芳](#), [李晓刚](#), [谭宏强](#), [严建奇](#), [LIU Zhi-yong](#), [DONG Chao-fang](#), [LI Xiao-gang](#), [TAN Hong-qian](#), [YAN Jian-qi](#)

作者单位：[刘智勇,董超芳,李晓刚,LIU Zhi-yong,DONG Chao-fang,LI Xiao-gang\(北京科技大学腐蚀与防护中心,北京,100083\)](#), [谭宏强,严建奇,TAN Hong-qian,YAN Jian-qi\(华北油田公司工程监督部,河北,任丘,062550\)](#)

刊名：[钢铁研究学报](#) 

英文刊名：[JOURNAL OF IRON AND STEEL RESEARCH](#)

年, 卷(期): 2008, 20(3)

被引用次数: 0次

参考文献(11条)

1. 冉笛声. [张兆彦](#). [史庆建](#) 油管常见事故原因分析及防治对策[期刊论文]-[钻采工艺](#) 2004(01)
2. [李鹤林](#) 油井管发展动向及若干热点问题(上)[期刊论文]-[钢管](#) 2005(06)
3. [任海鹏](#). [马洪梯](#). [刘春明](#) 非调质油井管钢的开发应用[期刊论文]-[钢铁](#) 2002(01)
4. [耿文范](#) 非调质钢的发展现状 1995(01)
5. [高惠临](#). [辛希贤](#) 论管线钢韧性的控制因素 1995(05)
6. API Spec 5CT-2005. 套管和油管规范(中文版)
7. [吉玲康](#). [李鹤林](#). [宋治](#) 提高非调质套管抗射孔开裂能力的重要措施[期刊论文]-[石油机械](#) 2000(02)
8. [何庆芝](#). [酆正能](#) 工程断裂力学 1993
9. [张清](#). [李全安](#). [白真权](#) N80油管钢C02/H2S腐蚀的阴极过程EIS分析[期刊论文]-[焊管](#) 2006(03)
10. [陈长风](#). [路民旭](#). [白真权](#) N80油管钢C02腐蚀点蚀行为[期刊论文]-[中国腐蚀与防护学报](#) 2003(11)
11. [顾春元](#). [狄勤丰](#). [王掌洪](#) N80钢在地层水中的应力腐蚀行为研究[期刊论文]-[石油学报](#) 2006(02)

相似文献(7条)

1. 期刊论文 [谭宏强](#) [严建奇](#). [宋海英](#). [胡贯平](#) 由石油套管失效看API标准的不完善性 -[石油机械](#)2007, 35(7)
华北油田二连油区某油井在油层压裂的试压过程中,使用的N80-1套管发生横向断裂事故.经国家钢材检测部门检测发现,该套管的化学成分和拉伸性能等强制性指标都能够满足API Spec 5CT标准要求,但套管的金相组织和纵向夏比冲击功等非强制性指标不符合该标准要求,而且化学成分存在分布不均匀现象.这些因素导致了套管的质量缺陷,从而发生失效事故.这起失效事故暴露出API Spec 5CT标准的不完善性.建议API石油套管标准委员会能结合油田生产中出现的套管失效问题,加强有关要求,避免类似失效事故的发生.
2. 期刊论文 [陈浩](#). [刘清友](#). [CHEN Hao](#). [LIU Qing-you](#) 石油套管故障树的建立及定性分析 -[石油矿场机械](#)2000, 29(6)
以套管失效为顶事件建立了石油套管的故障树.通过对故障树的定性分析,得到了最小割集,确立了套管的主要失效形式为潜在损坏、套管挤毁、套管断裂及严重腐蚀,并提出了相应的改善措施.
3. 学位论文 [宋涛](#) 管拧机浮动抱钳夹紧装置研究 2007
在石油套管的加工过程中,拧接箍是一道重要工序.抱钳夹紧装置是管拧机的关键设备,其夹紧效果直接影响到接箍的联结质量和生产效率.由于钢管较长且具有一定的挠度,故在接箍拧接过程中会产生多余的扭矩和径向跳动力,造成夹爪体变形、开裂,偏心轴断裂等不良后果.
本文针对上海宝钢钢管厂目前使用的PMC管拧机抱钳夹紧装置进行研究,分析了其缺点和不足,结合国内外研究成果,研究设计了浮动式抱钳夹紧装置.论文的主要工作包括:
1、对原有的抱钳夹紧装置进行研究,分析其缺点和不足及其产生的原因,在原有设备的基础上,增加了一套浮动机构和液压减振系统,实现对拧接力和额外力的吸收,并使钢管在拧接过程中实现浮动.对偏心轴及夹爪进行受力分析,指出偏心轴断裂的原因.
2、利用三维CAD软件Pro/E完成零件的造型设计和整机装配,并在虚拟环境下完成整机的运动仿真.针对夹紧机构,进行了运动学分析,得出夹爪体夹紧钢管的运动轨迹及对应的液压缸行程.在运动学仿真的基础上完成整机的运动动画及电影剪辑.
3、针对液压减振系统进行分析研究,结合经典控制理论,计算推导出减振系统的数学模型.对模型在理想工作状态下进行仿真分析,得出影响减振系统动态性能的主要参数.在仿真分析的基础上,根据现场要求确定了蓄能器的充气压力和初始工作压力.
4、对现有液压系统进行设计改造,分析了液压系统各个部分的功用及元件作用,并进行了相关的选型计算,并着重介绍了液压站阀块的设计方法和注意事项.
4. 会议论文 [肖远惠](#) 进口石油套管脆裂原因分析及索赔综述 1993
5. 期刊论文 [刘清友](#). [陈浩](#). [LIU Qingyou](#). [CHEN Hao](#) 套管的失效分析 -[西南石油学院学报](#)1999, 21(4)
通过收集石油套管现场失效数据资料,以套管失效为顶事件建立了石油套管的故障树,该故障树共考虑了47个不同的基本事件.通过对套管故障树的分析,得到了套管失效故障树的一阶最小割集27个,二阶最小割集29个,四阶最小割集1个,确立了套管的主要失效形式为潜在损坏、套管挤毁、套管断裂及严重腐蚀,并提出了提高套管可靠性的措施.
6. 期刊论文 [吕泉](#) J积分法测50Mn结构钢的断裂韧性JIC -[贵州教育学院学报](#)2004, 15(2)
50Mn结构钢广泛用于石油套管接头、轴齿轮、轴承密封座等,其韧性指标将决定机件的承载能力和脆断倾向,是进行工程设计的重要参数.用J积分法测50Mn钢的JIC,补充其性能参数,为工程设计提供依据.

7. 学位论文 [谷卫华 管材钢应力腐蚀破裂过程的数值计算](#) 2002

金属腐蚀问题遍及国民经济的各个领域,消耗了宝贵的资源与能源,给人们造成巨大的经济损失.研究材料应力腐蚀破裂(Stress Corrosion Cracking简称SCC)的试验方法存在着周期长、浪费材料等缺点,把数值计算与试验结合,从数值计算的角度解决试验现象,优化试验过程,无疑是有价值的.该研究是以线弹性力学、弹塑性力学、断裂力学的理论为基础,以石油套管N80钢为例,用有限元工程软件ANSYS数值模拟了紧凑拉伸(Compact Tension简称CT)试验在加载点位移保持恒定的情况下,载荷随裂纹扩展而变化的关系.

本文链接: http://d.g.wanfangdata.com.cn/Periodical_gtyjxb200803014.aspx

授权使用: 艾老师(wfsxkjdx), 授权号: f52c0906-1dd5-4872-979a-9e1000f7c63f

下载时间: 2010年10月15日