

高温高压井射孔 测试技术论文集

(2010)

张凤山 主编



石油工业出版社

高温高压井射孔测试技术论文集

(2010)

张凤山 主编

石油工业出版社

内 容 提 要

本论文集凝聚了中国石油集团长城钻探工程有限公司 15 年来在高温高压井射孔测试方面的宝贵经验和技術沉淀,从井筒评价与套管保护、测试压井液体系、井下测试工艺、射孔测试联作工艺、地面测试工艺、试井、测试安全管理、项目组织与协调等主题,对高温高压井射孔测试相关技术难题进行了深入、全面、系统地研究、提炼和总结,形成了标准设计、操作程序、生产组织和项目管理流程。

本书是一本非常实用的参考书,可供射孔、测试、井下作业的工程技术人员和管理人員使用,用来指导测试施工设计编写、现场作业、安全管理等。

图书在版编目(CIP)数据

高温高压井射孔测试技术论文集. 2010/张凤山主编.
北京:石油工业出版社, 2011, 12
ISBN 978-7-5021-8549-7

- I. 高…
- II. 张…
- III. 生产井-射孔-文集
- IV. TE257-53

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 135091 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 100011)
网 址: www.petropub.com.cn
发行部: (010) 64523620
经 销: 全国新华书店
印 刷: 北京晨旭印刷厂

2011 年 12 月第 1 版 2011 年 12 月第 1 次印刷
787×1092 毫米 开本: 1/16 印张: 16.25
字数: 410 千字 印数: 1—1000 册

定价: 60.00 元
(如出现印装质量问题, 我社发行部负责调换)
版权所有, 翻印必究

《高温高压井射孔测试技术论文集》

编 委 会

主 编：张凤山

副主编：秦文贵 刘乃震 徐成才 辛俊和

编 委：孙玉玺 周作坤 程存志 徐 洪 曾志清

张 伦 陈 福 刘德胜 蔡长宇 程维营

余 雷 黄生松 李守民 王德有 李天诗

苏庆民 于铁峰 刘 伟

序

随着国内外勘探开发的不断深入，所钻遇的高温高压井不断增加，高温高压射孔测试的技术难题更加突出。国内外油气井测试过程中发生的工程安全事故，如套管挤毁、井喷着火、油气井报废等，严重阻碍了油气井勘探开发的进程。因而高温高压井射孔测试技术难题引起国内外工程技术人员、研究学者的高度重视和关注。经过不断的探索和研究，形成了一些新技术、新工艺和新方法，保证了高温高压井射孔测试的安全作业。

《高温高压井射孔测试技术论文集》以中国石油集团长城钻探工程有限公司 15 年以来国内外高温高压井射孔测试的生产实践为基础，应用了国内外高温高压井射孔测试最新科技成果，凝聚了射孔测试工程技术人员的经验和智慧，经过认真研究编撰而成。本论文集首次引入安全屏障设计理念，规范了测试作业安全设计的工具和方法；在实践中运用 140MPa 地面控制设备、模拟管柱、复合钻井液体系等技术，保障了射孔测试作业安全高效进行。本论文集具有丰富的理论基础和实际应用价值，它的出版标志着中国石油在高温高压井射孔测试技术的研究和发展道路上又迈进了一大步，对于规范测试安全管理、促进测试技术发展将起到积极的作用。

衷心希望中国石油从事射孔、测试专业的广大工程技术人员能够抓住机遇，努力实践，刻苦钻研，不断总结和研发高温高压井射孔测试新工艺、新技术，提升企业核心竞争力，保障中国石油国内外油气勘探开发，提高国际市场占有率，为集团公司建设综合性国际能源公司做出更大贡献。

中国石油工程技术分公司总经理



2011 年 3 月

前 言

钻井、录井、测井为发现一个构造或圈闭是否有油气聚集提供了直接依据，而测试则是最终解决一个构造或一个圈闭是否具有开采价值的有效方法。因此油气井测试技术是石油天然气勘探开发工程技术服务的重要组成部分，在及时发现评价油气层、提高油气采收率、保障油气井产量等方面发挥了极其重要的作用。随着高温高压等高难度油气藏勘探开发的逐年增多，油气井测试技术的重要性愈加突出。

高温高压井测试是一个系统工程，涉及地质、工程、油藏、开发、机械等学科，施工作业现场需要多专业的衔接和配合。高温高压的特点给测试施工作业带来了新的挑战，如因高压容易引起油套管、测试工具的损坏而造成井喷，高温则易导致工具和仪表的失效或测试作业的返工。因此解决高温高压井射孔测试作业面临的技术难题具有现实意义和应用价值。

2010年11月，中国石油集团长城钻探工程有限公司在北京召开了“高温高压井射孔测试技术发布会”，本论文集收录了这次会议的《高温高压井射孔负压设计与实现》、《高温高压井测试安全屏障设计与研究》等论文共计24篇。书中内容涵盖井筒评价与套管保护、测试压井液体系、井下测试工艺、射孔测试联作工艺、地面测试工艺、试井、测试安全管理、项目组织与协调8个主题，总结了140MPa井口换装、射孔负压差实现、套管保护、安全设计等经验，给出了标准设计模板和标准操作程序的技术框架，引入了安全屏障设计理念，形成了配套的新技术、新工艺、新方法，规范了测试现场项目管理流程。

本论文集的编写工作得到了中国石油天然气集团公司工程技术分公司、中国石油海外勘探开发公司、中国石油集团川庆钻探工程有限公司及兄弟单位的大力支持，石油工业出版社为本书的出版付出了许多辛勤的劳动，在此一并表示衷心的感谢！

由于编者水平有限，书中难免有不当之处，敬请读者批评指正。

目 录

井筒评价与套管保护

完井环境对套管强度影响的研究	韩建龙	张建立	王文起	刘 伟	(3)
高温高压井套管强度校核与保护	王凤和	王文起	高会杰	刘 伟	(15)

测试压井液体系

高温高压井循环压耗计算和循环压力控制	左京杰	宋建源	史力卫	杨洪利	(23)
测试液在高温高压井中的应用	左京杰	冯彦林	宋建源	刘百红	(29)
复合测试液体系在高温高压井测试中的应用	于铁峰	蒲海斌	刘海江	孙 鹏	(34)

井下测试工艺

某高温高压井测试管柱应用实践	于铁峰	刘海志	庞战强	冯 敏	(41)
高温高压井测试管柱及工艺研究	徐成才	王立军	黄生松	于铁峰	(45)
模拟试油管柱在高温高压井的应用	于铁峰	曹永祥	刘海江	张显文	(61)
插管封隔器在高温高压井测试中的应用	于铁峰	杨金辉	李国明	王德有	(67)
WSP 油管在某高温高压井测试中的应用	李守民	彭贤强	于 跃		(71)
高温高压井测试工艺中的几个难题与对策	徐 林	张兴辉	殷世江	罗长生	(84)

射孔测试联作工艺

高温高压井射孔负压设计与实现	鹿旭东	沙 峰	王联友	杨晓龙	(91)
高温高压井射孔设计与研究	李光明	鹿旭东	庞占东	崔 雷	(99)
某高温高压井射孔校深实践	谢 飞	沙 峰	夏学锋	徐志立	(105)

地面测试工艺

20K 地面控制设备在高温高压井测试中的应用	刘从军	程存志	张 伦	曾爱民	(111)
20K 采油树安装、拆卸工艺	刘从军	张 伦	李雪宁	于铁峰	(122)
高压高产井地面测试操作工艺浅析	曾爱民	王立军	李国明	杨普国	(130)
如何提高高产井测试气液分离效果	王文起	刘从军	刘海江	周桂楨	(143)
油气井测试作业中常用的三种节流测气法综述	王文起	刘从军	曾爱民	缪 凯	(156)

试 井

正确选择高温高压井低一特低渗储层的测试工作制度	潘劲芳	王 葳	程维营	王德有	(169)
-------------------------------	-----	-----	-----	-----	-------

高温高压井地层流体取样方法及应用条件..... 邓大军 丘永新 王德有 姜显春 (174)

测试安全管理

高温高压井测试安全屏障设计与研究
.....徐成才 刘万里 李菊平 席桐岭 陈靖华 (181)

项目组织与协调

某高温高压井测试项目管理实践 周作坤 曾志清 庞战强 田久贞 (193)
某高温高压井测试作业组织协调与监督指令..... 曾志清 刘烈强 杨永利 庞战强 (215)

井筒评价与套管保护

完井环境对套管强度影响的研究

韩建龙 张建立 王文起 刘 伟

摘 要: 完井套管包括套管头到套管鞋之间相连接的套管和完井工具。完井套管质量关系到油井的寿命,在套管设计时需充分考虑套管使用环境。文章针对完井环境对套管强度的影响展开详细研究,表明完井环境对套管强度影响具体表现在井眼轨迹、下套管作业、地层异常应力、地层流体、固井质量、套管质量、完井配套工具及套管头强度。

关键词: 完井环境 套管强度 影响

完井套管质量关系到整个油井的寿命,所以,在套管设计时要充分考虑套管的使用环境。在各项油井作业时,不要超出油井使用的套管参数指标。

1 套管质量对完井套管强度的影响

套管质量除对套管钢级的化学成分、冶金质量、力学性能、残余应力有严格的指标外,对套管的内径、外径、壁厚、圆度、直度及螺纹参数、密封性能和结构的完整性也有严格的要求。如果上述指标达不到要求,套管入井后就容易发生损坏。套管质量各项指标不合格可能引起套管损坏的形式详见表 1。

表 1 套管质量各项指标不合格可能引起套管损坏的形式

套管损坏形式	影响套管质量因素
套管缩径变形	套管的内径、外径、壁厚不均匀;椭圆度大
套管弯曲变形	套管的直度不直;结构的完整性没有达到要求
套管破裂	化学成分、冶金质量、力学性能、残余应力没有达到指标
套管错断	化学成分、冶金质量、力学性能、残余应力没有达到指标
套管挤毁	套管的内径、外径、壁厚不均匀;椭圆度大;化学成分、冶金质量、力学性能、残余应力没有达到指标
套管脱扣	螺纹参数没有达到指标
套管漏失	螺纹参数没有达到指标,密封性能差;结构的完整性没有达到要求

1.1 套管原材料的影响

不同钢级的套管,有不同的特定指标,如果套管钢级的化学成分、冶金质量、力学性能、残余应力达不到其特定指标,有的原材料甚至出现明显的气泡和裂纹,那么套管强度就会有变化。如果设计的完井套管强度变弱,套管就可能发生表 1 中所述的各种形式的损坏。

1.2 套管制造加工的影响

在制造加工时,套管的内径、外径、壁厚、圆度、直度及螺纹参数、密封性能和结

构的完整性的指标如果达不到要求，套管的抗挤、抗压、抗拉、抗弯曲强度就会大大降低，套管螺纹的连接强度和密封性能就会变差。套管也可能发生表 1 中所述的各种形式的损坏。

2 搬运及下套管作业对完井套管强度的影响

2.1 套管搬运

套管在搬运过程中应轻提轻放，防止对套管的碰撞损坏。如果套管发生碰撞损坏，应及时更换套管，否则套管入井后容易发生损坏。

2.2 下套管作业

上提套管到钻台时应轻提轻放，防止对套管造成碰撞损坏；在连接套管时，套管螺纹要清洗干净，涂抹螺纹脂，按要求扭矩紧扣。在下入过程中要平稳下放，严禁猛提猛放，否则套管入井后容易发生损坏。

3 井眼轨迹对完井套管强度的影响

井眼轨迹由井斜角和方位角来控制，如果全角变化率大到一定值时，套管下入就比较困难，如果用自重硬压入通过后，套管在此段产生了弯曲应力，当弯曲应力大于屈服强度极限时，套管就会发生损坏。如果套管接箍处于此弯曲段时，螺纹就可能产生滑脱或漏失。图 1 为套管在严重狗腿下破坏受力图。

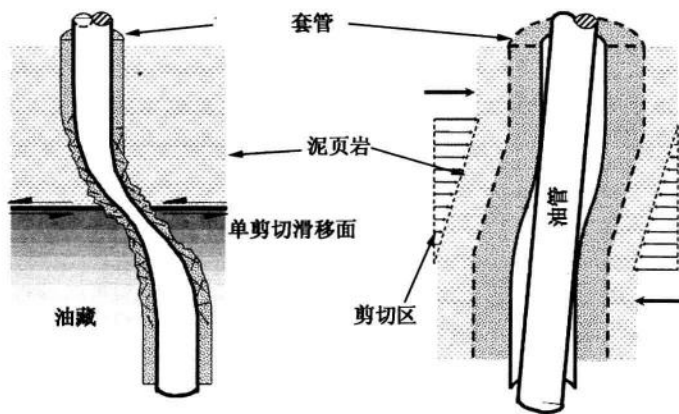


图 1 套管在严重狗腿下破坏受力图

4 地层异常应力对完井套管强度的影响

4.1 盐岩流动

盐岩流动在钻井和下套管过程中是靠钻井液密度来平衡的，固井作业时是靠水泥浆密度来平衡的。当油井生产时，油层产出液的液柱压力小于平衡钻井液液柱压力时，盐岩流动产生的挤压力就作用在水泥石和套管上。当挤压力大于套管的抗挤强度极限时，套管就

会发生缩径，严重时还会发生套管错断。图 2 为盐岩流动引起的套管弯曲与挤毁破坏受力示意图。

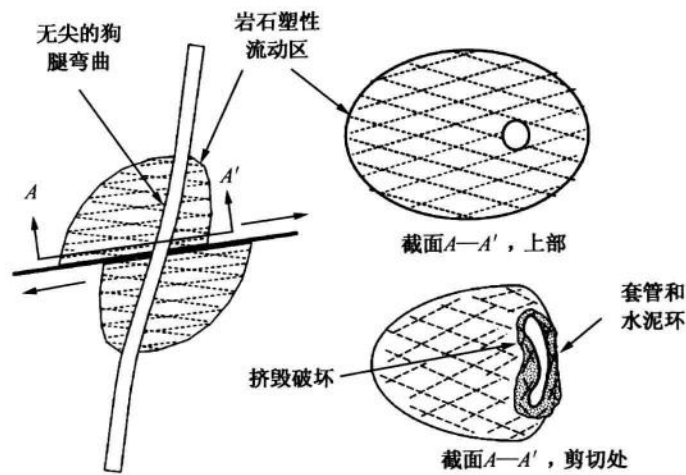


图 2 盐岩流动引起的套管弯曲与挤毁破坏受力示意图

4.2 泥岩膨胀

泥岩遇水膨胀，产生膨胀外挤力作用在水泥环和套管上。当挤压力大于套管的抗挤强度极限时，套管就会发生缩径，严重时就会发生套管错断。图 3 为泥岩遇水膨胀引起的套管挤毁破坏受力示意图。

4.3 断层运移

由于地震或人为因素引起的断层运移，可以造成套管弯曲变形，严重时就会发生套管错断。图 4 为断层运移套管受力图，图 5 为断层运移使套管剪切破坏受力图。

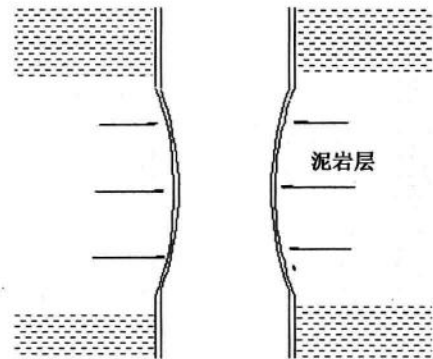


图 3 泥岩遇水膨胀引起的套管挤毁破坏受力示意图

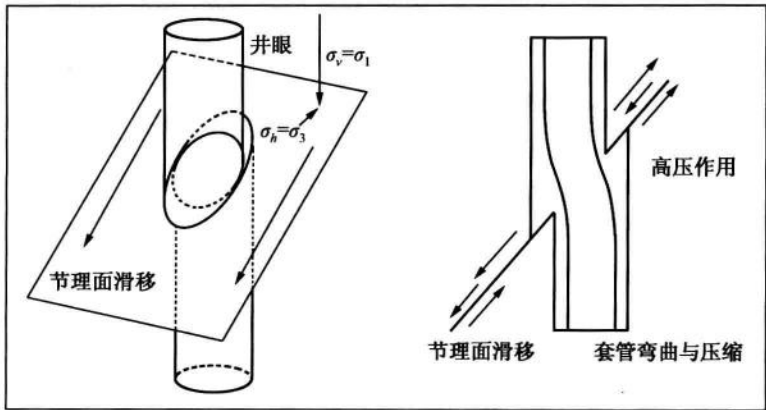


图 4 断层运移套管受力图

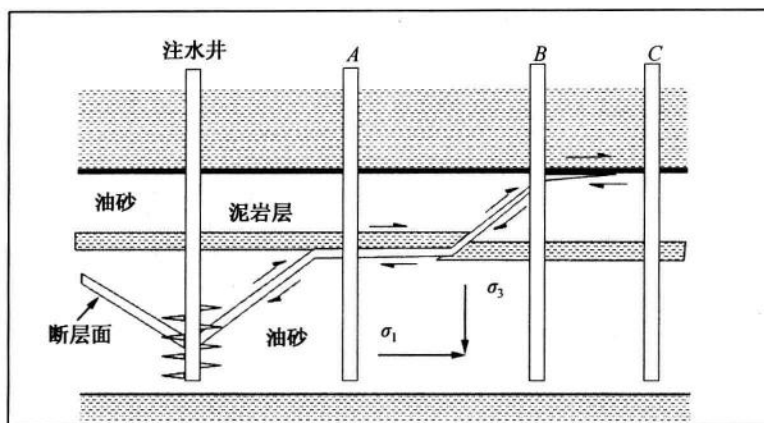


图 5 断层运移使套管剪切破坏受力图

5 地层流体对完井套管强度的影响

5.1 H₂S 的影响

套管在拉应力和硫化物介质的共同作用下易产生应力腐蚀脆性开裂，这是由于 H₂S 腐蚀导致原子氢进入金属的基体内所造成氢脆的一种特殊形式。图 6 为 H₂S 对套管的腐蚀形式。

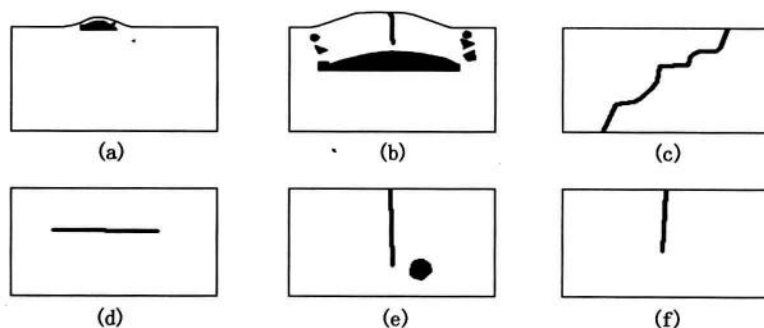


图 6 H₂S 对套管的腐蚀形式

(a) 氢鼓包；(b) 氢鼓包并伴有阶梯状开裂；(c) 阶梯状裂纹；(d) 直线状裂纹；
(e) 低强度钢的硫化物应力腐蚀；(f) 高强度钢的硫化物应力腐蚀

5.1.1 硫化氢应力腐蚀脆性开裂条件

硫化氢应力腐蚀脆性开裂必须具备如下 4 个条件才能发生：

- (1) 必须有硫化氢；
- (2) 必须有水，甚至是微量的水；
- (3) 必须是高强度钢，严格的强度随着钢的成分和微观结构而变化；
- (4) 必须具有拉伸应力和拉伸载荷，应力可能是残余的和外加的。

硫化氢应力腐蚀脆性开裂发生的时间可长可短，如果上述条件都满足，可能在几小时、几天或几年内就会造成硫化氢应力腐蚀脆性开裂。

5.1.2 套管硫化物应力腐蚀脆性开裂的主要特征

- (1) 套管硫化物应力腐蚀脆性开裂一般都在拉应力下产生；
- (2) 腐蚀介质是特定的，只有某些套管和特定介质的结合才会发生腐蚀脆性开裂；
- (3) 套管硫化物应力腐蚀脆性开裂一般经过腐蚀、稳定扩展和失稳扩展 3 个阶段；
- (4) 套管硫化物应力腐蚀脆性开裂一般呈树杈状。

5.1.3 硫化氢应力腐蚀脆性开裂的影响因素

5.1.3.1 钢的成分组织的影响

钢的成分组织对抗硫化氢应力腐蚀脆性开裂性能很重要。低合金钢 4130 和 C-Mn 钢相比，前者因具有较高的淬透性和抗回火性，有较好的抗硫化氢应力腐蚀脆性开裂性能，合金的淬火非常重要，最重要的是淬火要快，这就要求用水淬火。

在合金中，Cr 和 Ni 元素对增强合金钢的抗腐蚀性和抗硫化氢应力腐蚀脆性开裂具有显著功效。

5.1.3.2 温度的影响

常温下最容易产生硫化氢应力腐蚀脆性开裂，温度高于或低于常温时，硫化氢应力腐蚀脆性开裂敏感性均有所降低。当钢的强度水平提高后，不发生硫化氢应力腐蚀脆性开裂的温度也提高。图 7 为温度对套管抗硫化物应力破裂的影响。

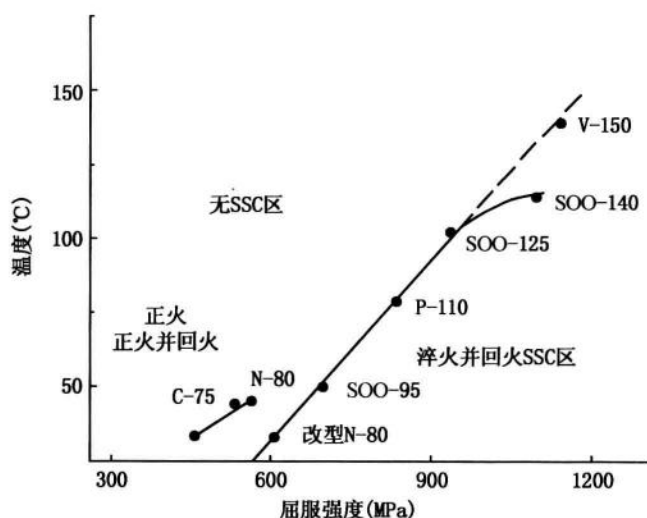


图 7 温度对套管抗硫化物应力破裂的影响

5.1.3.3 H_2S 浓度的影响

氢应力腐蚀脆性开裂时间随 H_2S 浓度减小而增加。正火和正火并回火的钢劣于淬火并回火的钢，而高强度的钢只能承受较少的 H_2S 。图 8 为 H_2S 浓度对套管抗硫化物应力破裂的影响。

5.1.3.4 pH 值浓度的影响

在含有 H_2S 的盐水中，钢的硫化氢应力腐蚀脆性开裂趋势是随着 pH 值的降低而增加。

5.2 CO_2 的影响

CO_2 溶解于水生成碳酸。碳酸虽是弱酸，但是腐蚀性很强。当 CO_2 分压达到一定值时，必然会引起套管失效。

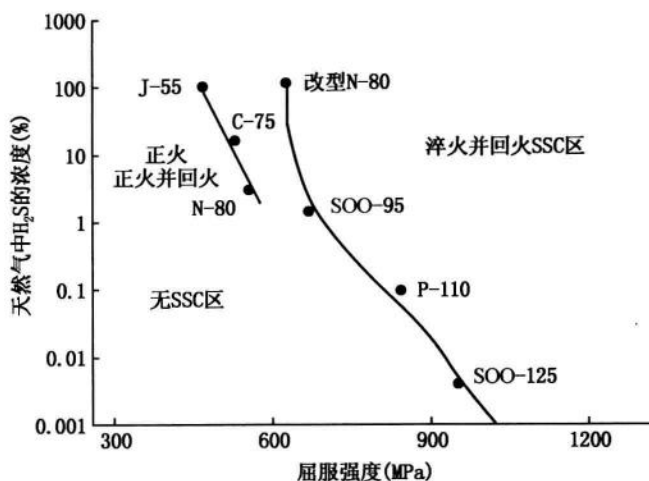
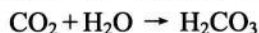


图 8 H_2S 浓度对套管抗硫化物应力破裂的影响

5.2.1 CO_2 腐蚀机理

CO_2 溶解于水生成 H_2CO_3 ，套管在 H_2CO_3 溶液中发生电化学腐蚀，总的反应式为：



在此反应过程中生成的 $FeCO_3$ 多数在套管表面成膜，该膜对于 CO_2 腐蚀速率及其形态影响很大。当 $FeCO_3$ 膜均匀致密地覆盖于套管表面时，隔绝了套管机体与腐蚀介质，对套管提供了良好保护。而当其疏松分布或由于冲刷等作用导致膜的局部破损时，将使套管表面遭受更为严重的局部腐蚀。图 9 为塔里木油田油套管 CO_2 腐蚀形貌图，图 10 为辽河油田油套管 CO_2 腐蚀形貌图。

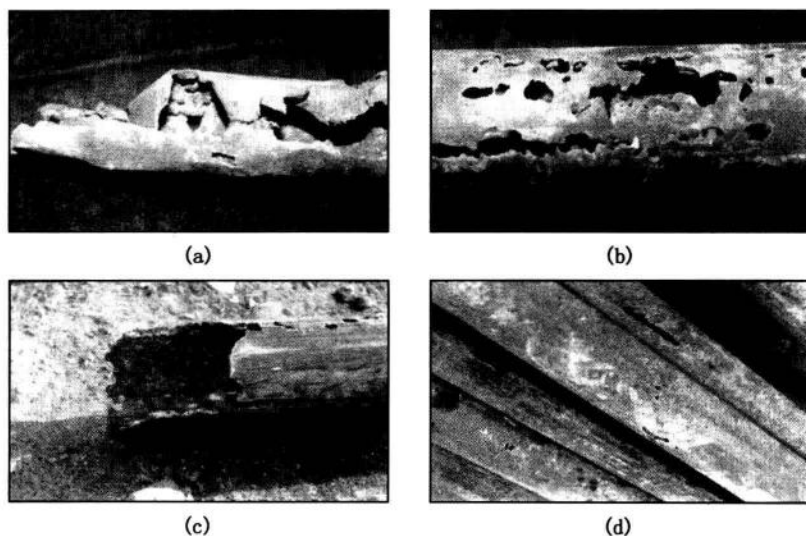


图 9 塔里木油田油套管 CO_2 腐蚀形貌图

(a) 腐蚀挤毁；(b) 局部腐蚀；(c) 腐蚀错断；(d) 表面腐蚀

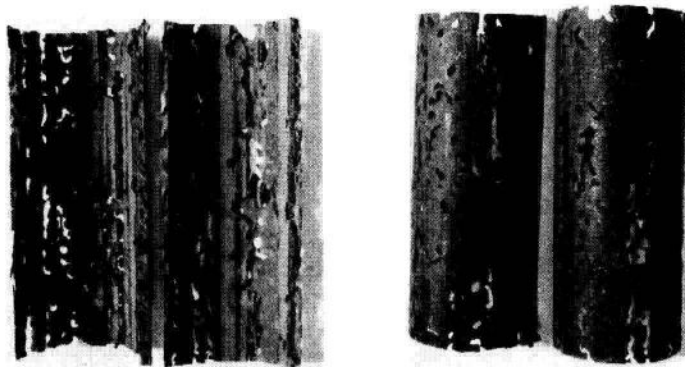


图 10 辽河油田油套管 CO₂ 腐蚀形貌图

5.2.2 CO₂ 腐蚀的类型

发生 CO₂ 腐蚀时, 套管破坏的基本特征是局部腐蚀。其类型主要有台地状腐蚀、坑点腐蚀、癣状腐蚀和冲蚀, 均和沉积在套管表面的 FeCO₃ 膜有关。

(1) 台地状腐蚀。腐蚀过程中形成界面清晰的岛状平台, 腐蚀形成的深坑围绕在平台周围。

(2) 坑点腐蚀。在 FeCO₃ 膜下形成较深的腐蚀坑, 这种腐蚀坑可以在很短的时间内深挖造成套管穿孔。

(3) 癣状腐蚀。很多腐蚀坑点密集分布在同一个区域形成的类似癣状的腐蚀形貌。

(4) 冲蚀。在套管内起下油管 and 洗井过程中, CO₂ 腐蚀形成的 FeCO₃ 膜被破坏, 造成严重的沟槽状腐蚀。

5.2.3 腐蚀速率预测

根据油田现场得到的数据建立了较为切合实际的腐蚀速率计算公式:

$$\lg v_{\text{cor}} = 5.8 - 1710/T + 0.67 \lg p_{\text{CO}_2}$$

式中 v_{cor} ——腐蚀速率, mm/a;

T ——温度, K;

p_{CO_2} ——CO₂ 分压, 10⁵Pa;

此式是目前应用最广泛的腐蚀速率预测模式。

5.2.4 CO₂ 腐蚀的影响因素

CO₂ 腐蚀速率受 CO₂ 分压、流速、温度、保护膜、H₂S 含量和溶液成分等诸多因素影响。

5.2.4.1 CO₂ 分压的影响

在影响 CO₂ 腐蚀的诸多因素中, CO₂ 分压起着决定性的作用。它直接影响 CO₂ 在腐蚀介质中的溶解度和溶液的酸度, 从而影响腐蚀速率。

在气井中, 当 CO₂ 分压大于 0.21MPa 时将发生腐蚀; 当 CO₂ 分压在 0.021~0.21MPa 之间时, 腐蚀有可能发生; 当 CO₂ 分压小于 0.021MPa 时, 腐蚀可忽略不计。

在低硫油井和凝析气井环境中, 当 CO₂ 分压高于 0.1MPa 时, 通常是腐蚀环境; 当 CO₂ 分压在 0.05~0.1MPa 之间时, 可能是腐蚀环境; 当 CO₂ 分压小于 0.05MPa 时, 不是腐蚀环境。图 11 为 CO₂ 分压对铬钢腐蚀的影响; 图 12 为 CO₂ 分压对 N80 钢腐蚀的影响; 图 13 为 CO₂ 分压对 J55 钢腐蚀的影响; 图 14 为 CO₂ 分压对 P110 钢腐蚀的影响。