GAOHANLIU QICANG
KAIFA FUSHI KONGZHI
JISHU YU SHIJIAN

高含硫气藏开发腐蚀控制技术与实践

唐永帆　张　强◎编著



石油工业出版社

责任编辑：张　倩　马金华　李　中
责任校对：罗彩霞
封面设计：乘设伟业

高含硫气藏开发腐蚀控制技术与实践

ISBN 978-7-5183-2223-7
9 787518 322237
定 价：76.00元

高含硫气藏开发腐蚀控制技术与实践

唐永帆　张　强　编著

石油工业出版社

内 容 提 要

本书较为系统地介绍了高含硫气藏开发过程中常见的腐蚀类型、腐蚀行为和腐蚀评价方法；从高含硫气藏开发全生命周期、全生产流程腐蚀控制角度，系统地介绍了国内外高含硫气藏开发的主体腐蚀控制技术、腐蚀监测和检测技术；并以四川盆地龙岗礁滩高含硫气藏的开发为例，详细介绍了龙岗礁滩高含硫气藏试采和开发过程中的腐蚀评价和腐蚀控制技术应用实践。

本书可供从事高含硫气藏开发的技术和管理人员使用。也可作为大专院校油气田开发专业、腐蚀与防护相关专业师生的学习参考书。

图书在版编目(CIP)数据

高含硫气藏开发腐蚀控制技术与实践/唐永帆，张强编著. —北京：石油工业出版社，2018.1

ISBN 978-7-5183-2223-7

Ⅰ. ①高… Ⅱ. ①唐… ②张… Ⅲ. ①含硫气体-气田开发-防腐-研究 Ⅳ. ①TE375

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 261481 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)64523710 图书营销中心：(010)64523633

经 销：全国新华书店

印 刷：保定彩虹印刷有限公司

2018 年 1 月第 1 版 2018 年 1 月第 1 次印刷

787×1092 毫米 开本：1/16 印张：14.25

字数：350 千字

定价：76.00 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

《高含硫气藏开发腐蚀控制技术与实践》

编 写 组

组　　长：唐永帆

副 组 长：张　强

成　　员：黄红兵　霍绍全　吴　华　谷　坛

江晶晶　袁　曦　闫　静　蔡绍中

黄刚华　杨　力　陈　文　王　月

刘志德　张楠革　印　敬

前　言

中国高含硫气藏资源丰富，主要分布在四川盆地川东北地区和渤海湾盆地，尤以四川盆地为主，开发潜力巨大。国内高含硫气藏大多赋存于海相碳酸盐岩储层，具有埋藏深、地质条件复杂、高温高压、高含硫化氢和二氧化碳的特点，这就决定了开发这类气藏将面临系列挑战，在气藏开发工程建设和安全清洁生产保障上存在诸多技术难题。

高含硫天然气中高浓度硫化氢的致命性和强腐蚀性使得高含硫气藏开发过程蕴含着巨大的风险。硫化氢和元素硫的存在极大地加剧了金属材质电化学腐蚀，造成设备管线“氢脆”和硫化物应力腐蚀开裂等严重后果。与非含硫天然气气藏开发相比，安全、清洁是高含硫气藏平稳高效开发的关键，其核心是对腐蚀的有效控制。

从20世纪60年代四川盆地威远震旦系高含硫气藏开发开始，中国已陆续成功开发了卧龙河、中坝、龙岗、罗家寨、普光、元坝等大型高含硫气藏以及海外阿姆河大型高含硫气藏，积累了丰富的高含硫气藏开发腐蚀控制技术和管理经验。特别是2000年以来，中国石油天然气集团公司（简称中国石油集团）围绕四川盆地川东北地区罗家寨、龙岗等高含硫气田以及海外阿姆河右岸高含硫气藏的开发，在技术研发平台建设、技术攻关、生产实践等方面开展了大量的工作，取得了长足的发展。2010年建成了国内首个具有国际先进水平的中国石油高含硫气藏开采先导试验基地，2013年又组建了国家能源高含硫气藏开采研发中心，发展和完善了中国高含硫气藏开发配套的技术系列和标准规范体系，全面支撑了国内和海外高含硫气藏的安全、清洁、高效开发。

本书以高含硫气藏为对象，在介绍高含硫天然气开发腐蚀基本理论和主要机理的基础上，全面展示高含硫气藏从设计、建设、试采到生产运行等开发不同阶段，从井筒、地面集输系统到净化厂等不同工艺流程的腐蚀控制整体设计、主体腐蚀控制技术选择、腐蚀控制措施实施效果评价、腐蚀控制措施优化改进等系列技术和技术新进展。

本书由中国石油西南油气田分公司长期从事含硫油气田开发腐蚀控制技术研究和应用实践工作的专业技术人员，结合四川油气田多年从事高含硫气田勘探开发腐蚀控制技术研究和实践的成果编写完成，具有较强的理论指导和实际应用价值。全书由唐永帆和张强统编。第一章由唐永帆、张强编写；第二章由闫静、江晶晶编写；第三章由黄红兵、袁曦、陈文等编写；第四章由张强、黄刚华、刘志德等编写；第五章由霍绍全、谷坛、唐永帆等编写；第六章由吴华、唐永帆、印敬等编写；第七章由蔡绍中、杨力、王月等编写；第八章由唐永帆、张强、张楠革等编写。

本书在编写过程中，教授级高级工程师原青民等专家和中国石油西南油气田分公司天然气研究院许多直接从事高含硫气藏开发腐蚀控制的专业技术人员提出了许多宝贵意见和丰富

材料。在此，对所有提供指导、关心、支持和帮助的单位、领导、技术人员以及为本书所引用参考资料的有关作者表示衷心的感谢！

鉴于编者水平有限，本书难免存在一些不足之处，敬请使用本书的读者批评指正，特此表示衷心感谢。

编者

2017 年 10 月

目　录

第一章　概论 …… (1)
第一节　国内外高含硫气藏开发概况 …… (1)
第二节　腐蚀和腐蚀控制技术研究新进展 …… (3)
第三节　高含硫气田腐蚀和腐蚀控制技术展望 …… (8)
参考文献 …… (9)
第二章　高含硫气田腐蚀行为及评价方法 …… (10)
第一节　高含硫气田的腐蚀类型 …… (10)
第二节　高含硫气田的腐蚀机理 …… (18)
第三节　高含硫气田的腐蚀影响因素 …… (28)
第四节　腐蚀评定方法 …… (39)
参考文献 …… (46)
第三章　高含硫气田腐蚀控制方法 …… (49)
第一节　材料的选择 …… (49)
第二节　缓蚀剂防腐工艺 …… (54)
第三节　表面涂覆 …… (60)
第四节　阴极保护 …… (66)
第五节　非金属材料 …… (68)
第六节　控制及优化操作参数 …… (75)
第七节　合理的设备设施结构 …… (76)
第八节　腐蚀控制效果评价 …… (77)
参考文献 …… (79)
第四章　腐蚀监测和检测技术 …… (81)
第一节　腐蚀监测和检测点的设置 …… (81)
第二节　常用的腐蚀监测和检测方法 …… (84)
第三节　腐蚀监测和检测方法的选择 …… (97)
第四节　腐蚀评价和预测系统 …… (98)
参考文献 …… (120)
第五章　井下腐蚀控制技术 …… (122)
第一节　高含硫气田井下生产系统概况 …… (122)

第二节　井下腐蚀控制技术 …… (125)
参考文献 …… (135)
第六章　地面集输系统腐蚀控制技术 …… (136)
第一节　概述 …… (136)
第二节　地面系统材料的选用 …… (140)
第三节　地面集输系统的缓蚀剂防腐技术 …… (143)
第四节　地面集输系统的外腐蚀控制技术 …… (146)
第七章　净化厂腐蚀控制技术 …… (149)
第一节　净化厂主要腐蚀状况 …… (149)
第二节　净化厂工艺装置腐蚀控制技术 …… (155)
第三节　净化厂循环水系统腐蚀控制技术 …… (158)
参考文献 …… (164)
第八章　龙岗气田腐蚀控制技术应用实践 …… (165)
第一节　龙岗气田概况 …… (166)
第二节　龙岗气田腐蚀评价 …… (167)
第三节　龙岗气田腐蚀控制设计 …… (173)
第四节　龙岗气田腐蚀控制实施与效果 …… (186)

第一章 概 论

随着世界经济的发展，全球能源结构也在发生着变化，即以煤为主要能源改为以石油、天然气为主要能源。根据 BP 公司 2015 年公布的“Statistical Review of World Energy”统计，石油所占的比例为 32.6%，天然气所占的比例为 23.7%，煤炭所占的比例为 30.0%，其他（核电、水电等）为 13.7%。2015 年，我国天然气供应结构为国产气 $1350\times10^8m^3$，净进口气 $614\times10^8m^3$，天然气消费量达到 $1932\times10^8m^3$。中国政府制定行动计划，将大力提高天然气的消费比重，扩大天然气的使用规模，力争 2020 年天然气消费在一次能源消费中的占比达 10% 左右，2030 年天然气消费占比达 15% 左右。

天然气作为一种清洁高效的化石能源，是指自然界中天然存在的一切气体，包括大气圈、水圈和岩石圈中由于各种自然过程形成的气体。天然气的主要成分为烷烃，其中 CH_4 占绝大多数，另有少量的 C_2H_6、C_3H_8 和 C_4H_{10}。除此之外一般还有 H_2S、CO_2、N_2 和 H_2O 气和少量 CO 及微量的稀有气体，如 He 和 Ar 等[1]。

对于高含硫气田的定义，国内外不尽相同，如美国和加拿大将 H_2S 含量大于 5.0%（摩尔分数）的气田称为高含硫气田。在中国，根据 SY/T 6168—2009《气藏分类》的规定将 H_2S 含量在 2.0% ~10.0%（摩尔分数）的称为高含硫气田[2]；根据 SY/T 5225—2012《石油天然气钻井开发、储运防火防爆安全生产技术规程》的规定将 H_2S 含量高于 5.0%（摩尔分数）的称为高含硫气田。

H_2S 极毒，人吸入浓度为 $1000mg/m^3$[相当于天然气中含 0.064%（摩尔分数）]的 H_2S 在数秒钟内即可死亡。同时，H_2S 的化学活动性强，对钻杆、油套管、地面集输管线和站场处理设备等的腐蚀作用强烈，容易造成不同形式的材料破坏和失效，引发安全环境事故。因此，高含硫气藏的开发存在较高的安全风险，必须采取各种技术措施和管理制度来削减和控制风险，实现安全、清洁、高效开发。

第一节 国内外高含硫气藏开发概况

高含 H_2S 天然气在全球资源储量巨大，是天然气资源的重要组成部分。目前全球已发现 400 多个具有工业价值的高含 H_2S 和 CO_2 气田（藏），主要分布在北美、欧洲和中东地区。仅北美以外地区 H_2S 含量大于 10%（摩尔分数）的天然气储量就已超过 $9.8\times10^{12}m^3$。加拿大有众多高含 H_2S 气田，在开发方面拥有丰富经验，在已开发的 28 个含硫气田中，硫含量超过 10%（摩尔分数）的就有 12 个。其中，位于 Albert（艾伯塔）省的 Caroline（卡罗琳）气田，储量 $650\times10^8m^3$，H_2S 含量高达 35%（摩尔分数）。位于法国西南部的 Lacq（拉克）气田是法国主要的高含硫气田，探明地质储量 $3200\times10^8m^3$。俄罗斯是世界上天然气资源最丰富的国家，其中 Astrakhan（阿斯特拉罕）气田可采储量 $2.6\times10^{12}m^3$，H_2S 含量在 16.03% ~28.30%（摩尔分

数)之间,CO_2 含量也维持在较高水平。中国高含 H_2S 天然气资源丰富,主要分布在渤海湾盆地陆相地层的赵兰庄气田和四川盆地海相地层的普光、渡口河、罗家寨、中坝、威远、卧龙河等气田,H_2S 含量一般为 5% ~92%(摩尔分数)。

一、国外高含硫气藏开发概况

国外典型的高含硫气田(藏)基本情况列于表 1 -1。20 世纪 50 年代,加拿大和法国最先成功规模开发高含硫气藏,随后美国、德国和俄罗斯等国家相继成功规模开发了一些代表性的高含硫气田,这些气田包括加拿大的 Kaybob South 气田和 Caroline 气田、法国的 Lacq 气田、俄罗斯的 Orenburg 气田和 Astrakhan 气田等。

表 1 -1 国外典型的高含硫气田

国家	气田	H_2S 含量 %(摩尔分数)	S 含量 g/m^3	CO_2 含量 %(摩尔分数)	T ℃	p MPa
加拿大	Bearberry	84 ~91	72 ~89		116 ~120	37 ~38
	Panther River	69 ~75	16		79.4	26.4
	East Crossfield	36		12	93	
	Kaybob South	17.74		3.4	114	32.4
美国	Black Creek	78	11.3	20	196	95.4
	Thomasville	28 ~46		2.0 ~9.2	185 ~196	122 ~154
	BEC	21		40	138	24
	New Hope	13		3	135	41.4
法国	Lacq	15.6		9.3	130	63.9
德国	South Oldenburg	1.2 ~25	0 ~3.5	6 ~15	125 ~142	41 ~47
	Deutschland	0 ~25	0 ~4.6	4 ~45	126	55.2
	Zechstein	15 ~20	0.2 ~2.0	20 ~50	120 ~135	
俄罗斯	Astrakhan	25		15		

国外已成功开发的一批酸性气体含量较高的气田,在投入正式生产前开展了大量的实验室研究和先导性试验,经过试采后才投入大规模的工业生产。加拿大 Bearberry 气田发现于 1969 年。从 1985 年开始,壳牌—加拿大公司投入 5700 万美元,花了三年时间进行室内研究工作,于 1990 年建成先导性试采装置,1996 年投入工业性开发生产。法国 1951 年发现 Lacq 气田,1957 年才全面开发。美国 New Hope 气田 1953 年发现,1957 年试开采,1970 年才全面开发。俄罗斯的 Astrakhan 气田,1976 年发现,1986 年才投入试生产。

上述典型高含硫气藏的成功开发,逐步建立了世界高含硫气藏开发技术系列及标准规范体系,代表了世界高含硫气藏开发的先进水平,为其他国家高含硫气藏的安全开发利用奠定了基础,推动了世界天然气工业技术的发展。

二、国内高含硫气藏开发概况

我国高含硫天然气资源也十分丰富,累计探明高含硫天然气储量逾 $10000 \times 10^8 m^3$,其中

四川盆地占了90%以上的高含硫天然气资源，包括罗家寨、渡口河、铁山坡、龙岗、普光、元坝等。我国主要高含硫气田的基本情况列于表1-2。

表1-2 我国典型的高含硫气田(藏)

气田	储量，$10^8 m^3$	H_2S 含量，%(摩尔分数)	CO_2 含量，%(摩尔分数)
中坝	186.3	6.7~13.3	2.9~10.0
卧龙河	408.8	5.0~7.8	1.3~1.5
渡口河	359.0	9.7~17.1	6.4~8.3
铁山坡	373.9	14.3	
罗家寨	797.3	6.7~16.6	5.8~9.1
龙岗	720.3	1.2~4.5	2.4~7.1
普光	3812.6	15.2	8.6
元坝	1834.2	2.5~6.6	1.6~11.3

20世纪60年代以来，中国在四川盆地的威远震旦系高含硫气藏进行了开发实践。随后陆续成功开发了卧龙河、中坝雷三段等高含硫气藏，积累了针对高含硫气田开发的经验，发展了开发配套技术，为后续高含硫气藏开发奠定了一定基础。2000年以后，随着四川盆地川东北地区罗家寨、渡口河、铁山坡、龙岗、普光、元坝等高含硫气藏的相继发现，国内高含硫气藏的勘探开发进入了发展的快速期。中国石油、中国石化等石油公司和相关大学、科研院所相继开展了针对高含硫气藏的开发技术、标准规范和HSE管理体系等方面的研究，并开展了高含硫气藏开发实践。经过不断的研究和实践，逐步完善了高含硫气藏开发配套技术和标准规范体系，缩小了与国外的差距。2007年以来陆续成功规模开发了龙岗、普光、元坝、罗家寨等大型高含硫气田。特别是2009年国内四川龙岗、普光高含硫气田以及中国石油海外首个大型高含硫气藏土库曼斯坦阿姆河右岸气田相继成功投产，标志着我国高含硫气藏开发技术取得了突破，我国高含硫气藏开发水平得到显著提升，具备了开发国内高含硫气藏和海外高含硫气藏的能力和实力。

第二节 腐蚀和腐蚀控制技术研究新进展

高含硫气藏开发过程中，高含H_2S、高矿化度、高温、高压为腐蚀特征的苛刻环境使管线和设备面临严峻的安全风险。2000年以来，国内科研机构围绕高含硫气藏开发进行了腐蚀行为评价、腐蚀控制和控制效果监测和检测的深入研究。中国石油西南油气田分公司经过技术攻关与实践，取得了长足的进步，腐蚀行为评价体系日趋完善，腐蚀控制措施趋于多元化，控制效果监测和检测体系化，直接支撑了我国高含硫气藏的安全、清洁、高效开发。

一、腐蚀分析与评价技术

高含硫气田开发过程中，需要对材料在腐蚀介质中腐蚀行为、腐蚀主控因素、材料的适应性和各种腐蚀控制措施防腐效果进行研究和评价，并对现场失效部件进行腐蚀分析和评价。

建立和完善高含硫气田开发腐蚀分析与评价技术体系，不仅为高含硫气田开发腐蚀基础研究试验提供手段，还为现场腐蚀控制方案设计、跟踪评价、优化完善提供基础，进一步为气田安全生产提供保证。中国石油西南油气田分公司结合生产需要和多年的技术积累，建立了获得国家计量认证资质的实验室，按照 NACE、ISO、GB 相关标准和实验规范，建立了较为完善的高含硫气田开发腐蚀分析与评价体系，包括室内腐蚀分析与评价技术体系和现场腐蚀评价手段。

1. 室内腐蚀分析与评价技术

通过分析评价方法的建立、试验仪器设备的搭建、专业技术人员队伍的配置，西南油气田分公司建立和完善了室内腐蚀分析与评价体系。在腐蚀行为分析方面，可对高含硫气田腐蚀机理、腐蚀程度、腐蚀主控因素等开展研究评价；在材料适应性评价方面，可模拟现场的温度、压力、腐蚀介质和流动状态，开展油管、地面管线、净化厂设备、分离器排污管、放空管线等材料的抗硫性能评定以及适应性评价；在缓蚀剂研发方面，按照 SY 5273—2014《油田采出水处理用缓蚀剂性能指标及评价方法》标准规范，可开展缓蚀剂作用机理、防腐效果、经济用量等分析。主要分析和评价装置包括：(1)高温高压评价装置：高温高压电化学腐蚀试验装置、高温高压动态腐蚀试验装置、高温高压应力腐蚀试验装置、高温高压静态腐蚀试验装置、循环回路评价系统；(2)常压评价装置：旋转挂片腐蚀试验装置、耦合多电极测试装置、应力腐蚀试验环、电子材料万能试验机、2273 电化学工作站、硬度试验机；(3)微观物相和成分分析装置：液相色谱和质谱分析、水质分析系统、SEM、能谱分析仪等。其中，多数评价装置的性能达到国际先进水平，能满足高含硫气田全流程腐蚀分析和评价需求。标志性试验装置高温高压动态腐蚀试验装置示意图如图 1－1 所示，最高工作温度 260℃，最高工作压力 35MPa，最高转速 2000r/min。

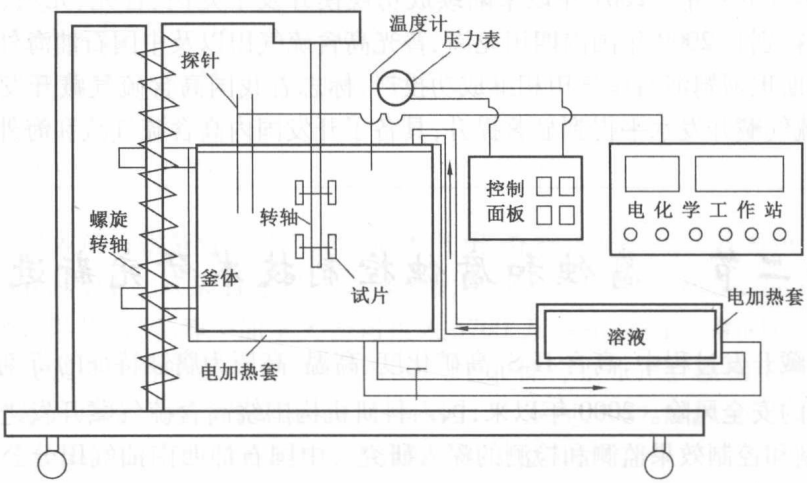


图 1－1　高温高压动态腐蚀试验装置

2. 现场腐蚀评价装置

中国石油西南油气田分公司在“十一五”末，建成了高含硫气田现场腐蚀评价装置，流程如图 1－2 所示，工艺参数见表 1－3。该装置通过电加热改变环境温度，通过电化学探针和腐

蚀挂片对腐蚀数据进行监控，实现了腐蚀程度、材料性能和缓蚀剂应用效果的在线评价。该装置包括立式罐、卧式罐、直管段等三个试验段，该试验装置主要包括 PN 35MPa/PN 16MPa 橇装试验装置和 PN 16MPa/PN 10MPa 橇装试验装置以及缓蚀剂等化学药剂注入系统等。

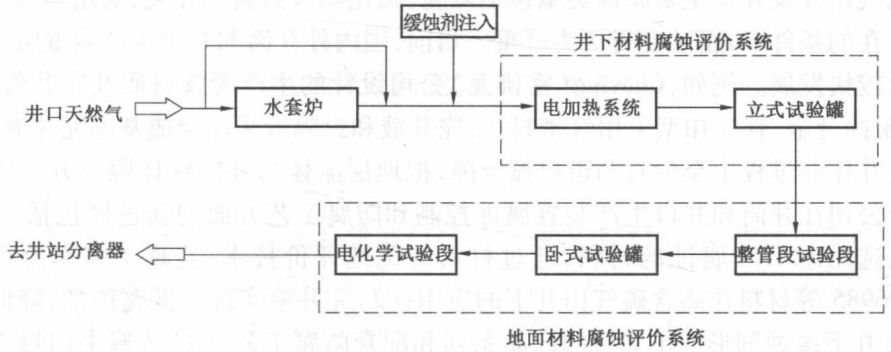


图 1-2 高含硫现场腐蚀评价试验装置流程图

表 1-3 试验装置工艺参数

参数	PN 35MPa 腐蚀试验系统	PN 16MPa 水合物抑制剂试验系统	PN 16MPa 腐蚀试验系统
设计流量 Q，$10^4m^3/d$	20 （电加热时为 12）	20	20
设计压力 p，MPa	35	16	16
工作压力 p_w，MPa	33.3	15.2	15.2
设计温度 T，℃	110	60	50
工作温度 T_w，℃	90	≤30	30
设计流速，m/s	5 左右 （模拟井下条件的立式试验罐）	—	8 左右 （管道内的流速）

该装置实验条件以天东 5-1 井生产条件为基础。天东 5-1 井于 2002 年 1 月 24 日完井，2004 年投产，设计生产规模为 $50.9\times10^4m^3/d$，关井油压为 29.7MPa。目前天东 5-1 井的产量为 $7.0\times10^4m^3/d$，产水量约 $0.5m^3/d$，天然气中 H_2S 浓度为 89.1~104.8g/cm³，CO_2 浓度为 50.5~53.2g/cm³。该工艺流程是引自天东 5-1 井井口经水套加热炉加热前或后的天然气原料气（可根据现场试验的需要选择单独进气与混合进气），经预留阀门由旁通管线先进入 PN 35MPa/PN 16MPa 橇装试验装置，经两级节流减压后，再进入 PN 16MPa/PN 10MPa 橇装试验装置。之后，由旁通管线经预留阀门回到天东 5-1 井工艺装置生产管线，经分离和计量后出站。橇装试验装置的排污管线接入天东 5-1 井的排污管线。

二、高含硫气田腐蚀控制技术

近年来，高含硫气田腐蚀控制技术的新进展主要集中在高含硫气田开发的防腐工艺设计、抗硫材料的应用与工艺设计的完善与集成、缓蚀剂防腐及配套工艺技术、表面涂层和喷涂防腐技术等方面。

1. 材料选择与防腐工艺

1）井下材料选择和防腐工艺

高含硫气田开发井下主要腐蚀类型包括氢脆、硫化物应力腐蚀开裂、电化学腐蚀。在有氯离子和水存在的条件下，腐蚀变得更为严重。目前，国内外井筒和井口生产装置腐蚀控制技术和工艺有了较快发展。例如，Chevron（雪佛龙）公司设计的生产套管材质及完井管柱采用4C以上CRA耐蚀合金，管柱扣型采用气密封扣；完井液和封隔液采用合成基的完井液和封隔液；在固井和完井作业过程中至少有两道机械屏障，把地层流体与井筒液体隔离开。中国石油西南油气田分公司在井筒和井口生产装置腐蚀控制和防腐工艺方面的新进展包括：（1）油套管和井下工具选用耐H_2S腐蚀的材料，通过材料的优选评价技术，实现了镍基合金BG2830、BG2532、N06985等材料在高含硫气田井下的应用；（2）完井液实现了低腐蚀性，降低对油套管的腐蚀；（3）井下缓蚀剂形成了完善的产品系列和配套防腐工艺；（4）普遍采用封隔器完井防腐工艺；（5）对流速进行控制降低冲刷腐蚀。

2）地面集输系统材料选择和防腐工艺

高含硫气田地面集输系统材料选择方面实现了抗硫耐蚀钢L360NCS和L360QCS的应用，有效提高了耐H_2S应力腐蚀开裂能力。

高含硫气田地面集输工艺普遍采用各单井的原料气经节流、加热、再节流、气液分离输送至集气站或集气总站，再进入净化厂集中处理；集输管网原料气采用多井集气、湿气混输工艺，集气干线、采气管线均采用保温方式；井口设置缓蚀剂和抑制剂加注口，出站管线设置缓蚀剂加注口和清管装置。

为提高高含硫气田建设效率和安全生产，中国石油西南油气田分公司开发了高含硫气田一体化橇装生产装置，实现了集成化安装、模块化建产的含硫气田地面集输工艺。其集气体加热、气液分离、药剂加注、腐蚀监测、现场取样和放空系统于一身，可以实现工厂化批量生产和快捷安装。

3）净化厂材料选择和防腐工艺

天然气净化厂主要参考NACE MR0175—2003《油田设备用抗硫化物应力腐蚀断裂和应力腐蚀裂纹的金属材料》和NACE MR0103—2012《腐蚀性石油炼制环境中抗硫化物应力开裂材料的选择》标准进行选材。目前，净化厂的主要腐蚀控制措施包括合理的材料选择、合理的结构设计、控制合理的工艺参数区间、加注缓蚀阻垢剂等。其中，在净化厂工艺参数设计方面主要考虑控制再生温度、控制酸气负荷和溶液浓度、合理选择流速及加强对储存液体的保护等。近年来，新的水处理技术如量子水处理技术、电渗析和多效蒸发结晶等的应用，为循环水实现腐蚀控制和“零排放”打下了基础。

2. 缓蚀剂防腐工艺技术

1）井下缓蚀剂防腐工艺技术

井下缓蚀剂防腐工艺技术的新进展包括：（1）对于封隔器完井的气井普遍采用环空保护液进行保护，并定期从油管加注缓蚀剂；（2）对于老气田产水气井采用泡沫排水缓蚀剂进行井

下防腐;(3)针对高温深井,开发了适应150℃以上环境的抗高温缓蚀剂。针对气井生产过程中的环空带压现象,利用示踪剂技术对连通程度进行判断取得了初步成果。

高含硫气田开发过程中天然气从井底至井口压力和温度的下降,导致元素硫溶解度不断下降而析出,元素硫具有极为活泼的还原性,沉积在管线、设备内的元素硫与 H_2S_x、H_2S 及 HS^- 等共同作用促进材质腐蚀,导致管线设备出现穿孔和破裂等严重腐蚀结果。近年来,川渝气田针对高含硫气田开发元素硫沉积聚集问题,通过对堵塞物分析,开发了性能优异的硫溶剂,形成了硫溶剂解堵工艺。

2)地面集输缓蚀剂防腐工艺技术

地面集输缓蚀剂防腐工艺技术的新进展包括:(1)高含硫气田长效膜缓蚀剂的研发取得了新进展,实验室测得膜的持久时间超过200h,有效地延长了现场集气管线的预膜周期;(2)集气管线通过清管器实现缓蚀剂预膜工艺,连续加注和预膜工艺共同构成了高含硫气田缓蚀剂防腐工艺技术;(3)建立了包括缓蚀剂残余浓度分析、氢探针、电化学探针、腐蚀挂片等内容缓蚀剂防腐效果的现场评价方法。

地面集输系统缓蚀剂防腐技术应用后,成功将龙岗气田、土库曼斯坦萨曼杰佩气田等高含硫气田地面系统金属材料均匀腐蚀速率控制在0.1mm/a以下,有效地提高了地面系统的安全性和可靠性。

3)净化厂防腐工艺技术

对于净化厂脱硫单元,通过缓蚀剂实现腐蚀控制并不多见,主要考虑采用材料防腐。对于净化厂配套的工业循环水系统,采用高效缓蚀剂、杀菌剂和阻垢剂实现系统的缓蚀、阻垢和杀菌,达到系统的平稳运行。

3. 双金属复合管及表面涂层技术

1)双金属复合管

在普通集输管线内覆上一层薄壁耐蚀合金,形成双金属复合管,其两端采用特殊方法焊接或特殊结构连接[3]。耐蚀金属可根据油田腐蚀环境选择,常选用22Cr、镍基合金N08825等。双金属复合管在防腐性能方面具有较高可靠性,而价格比整体耐蚀合金管低50%以上,具有十分广阔的应用前景。目前,西南油气田分公司在双金属复合管研究方面主要进展包括:(1)基于NACE TM0177—2005《金属在 H_2S 环境中抗硫化物应力开裂和应力腐蚀》给出的抗硫评价方法进行了补充和完善,形成了复合管焊缝抗环境开裂性能的评价方法;(2)形成了双金属复合管及其焊缝抗环境开裂试验方法的选择程序和耐蚀性能评价程序,并给出了相应的腐蚀评价方法和验收标准;(3)推荐出了高酸性气田双金属复合管的焊接方法和焊接工艺要求,明确了高酸性气田地面集输管线用双金属复合管焊接接头的检验技术要求;(4)在国内首次设计并建造了一套用于高酸性环境整管段腐蚀评价的试验装置,提出了复合管焊接接头在苛刻应力状态下的整管段腐蚀评价方法。

2)内涂层技术

适用于管道内涂层的材料品种较多,主要有环氧酚醛树脂及改体、粉末环氧树脂、聚氨酯、

聚酰胺和煤焦油环氧树脂等。内涂层油管已经在中国石油塔里木油田塔中作业区的高含硫气田进行了试应用，取得了一定应用效果和经验，但内涂层油管的相关评价方法和质量控制标准还需要深入研究。

3）金属表面喷涂技术

金属表面喷涂是用熔融金属的高速粒子流喷在基体表面，以产生覆层的材料保护技术。在高含硫气田应用的国产和进口的 FF 级阀门，通过在闸板和阀座的密封面上喷焊一层硬质合金焊粉，使表面具有较高的耐磨性和抗腐蚀能力。为了增强管线的抗冲蚀性能，对于大产量气井，在二级节流前管线内表面喷涂镍基合金 N06625。

4. 外涂层和阴极保护技术

外涂层和阴极保护技术主要用于含硫气田管线外防腐，技术相对比较成熟，防腐效果受施工质量和日常运行管理影响较大。高含硫气田的外涂层主要为高温型三层结构普通级聚乙烯外防腐层，根据 GB/T 23257—2017《埋地钢质管道聚乙烯防腐层》的要求来确定防腐层厚度。外防腐层的选择应遵守性能可靠、经济合理的原则，并根据现有的涂敷施工装备和施工经验，选择使用适应性好、施工可操作性强、施工管理方便的防腐层。

三、高含硫气田腐蚀监测和检测技术

高含硫气田腐蚀监测和检测为腐蚀控制效果评价提供依据，为安全等级评价及腐蚀危害预测提供数据支持，为腐蚀控制方案跟踪评价和优化完善提供支撑。

井下腐蚀监测和检测技术不断创新。高温高压电化学探针在井下进行了应用，可以测量不同井深的腐蚀速率；中国石油西南油气田分公司发明了井下腐蚀挂片监测技术，获得了国家专利授权；应用流体分析软件和腐蚀预测技术获得的分析数据为腐蚀监测和检测技术提供了必要的补充。在高含硫气田地面系统，形成了包括腐蚀监测和检测点的布置、监测和检测方法的选择、数据的采集和应用等内容的高含硫气田腐蚀监测和检测技术。该技术基于腐蚀回路的划分确定了高含硫气田现场腐蚀监测和检测点，并综合运用失重挂片、电阻探针、FSM、氢探针、柔性超声波等多种技术手段来获取信息，建立腐蚀数据库，开发了腐蚀评价及预测软件，实现了腐蚀控制效果评价与预测。

此外，针对高含硫气田埋地管道缺乏简洁有效的监测和检测技术，中国石油西南油气田开展了管道的内腐蚀直接评价技术研究，创新形成了基于腐蚀机理分析、临界积液分析、多相流模拟分析和腐蚀概率分析技术，将含硫集输气管道的内腐蚀检测评价准确率提高到 70% 以上，为含硫管道内腐蚀管理措施的制定提供科学依据。

第三节　高含硫气田腐蚀和腐蚀控制技术展望

高含硫气田开发腐蚀和腐蚀控制经过多年的研究和现场应用实践，在腐蚀行为认识、腐蚀评价方法、规范与标准体系、腐蚀控制技术、效果评价等方面取得了长足的进步，支撑了气田的安全开发。展望未来，为了满足高含硫气田向更加安全、更加清洁和更加高效目标方向发展的