

腐蚀产物层的主要成分则为  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ , 其中含有少量的  $\text{Fe}_3(\text{PO}_4)_2$ , 同时, 由图 2(c) 及图 5(b) 可以看出,

该层腐蚀产物出现较为明显的双向生长现象(即腐蚀产物层向内和向外生长)。

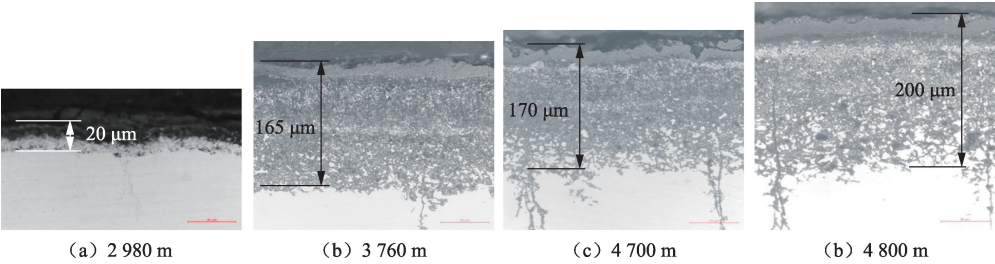


图 4 不同管段超级 13Cr 油管外壁腐蚀产物厚度测量结果

Fig. 4 Corrosion product thickness measurement results of super 13Cr tubing outer wall in different pipe segments

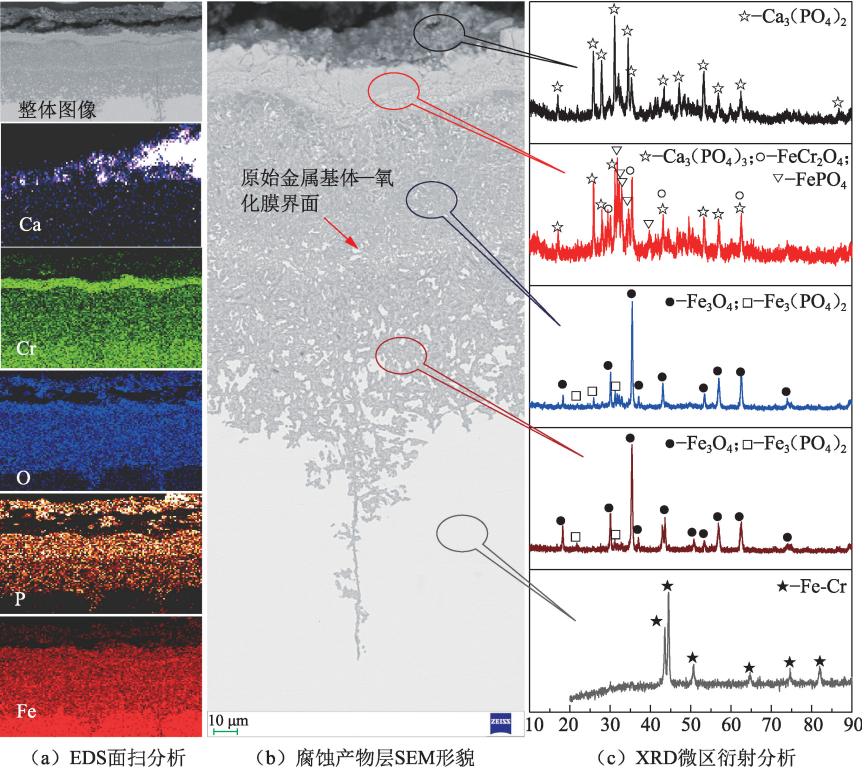


图 5 超级 13Cr 油管外壁腐蚀产物膜成分分析结果

Fig. 5 Corrosion film composition analysis of super 13Cr tubing outer wall

2.2 腐蚀机制

超级 13Cr 油管在制造过程中, 由于穿孔(铸坯加热后穿孔——无缝钢管制造的第一道工序)和回火温度过高(穿孔温度约为 1 200 ℃, 而回火温度则大于 900 ℃), 油管外表面不可避免地发生高温氧化。尽管在制备过程中也采取了一定措施, 如高压水除鳞, 但仍不可能完全去除氧化皮。由于超级 13Cr 成品油管外壁一般不进行喷砂(或喷丸)处理, 从而使超级 13Cr 油管表面在出厂时已经存在高温氧化膜。图 6 为制备状态(未使用过)超级 13Cr 油管外壁表面膜的形貌和成分分析。从图 6 中可以看出, 其外壁确实存在厚度约为 10 μm 的  $\text{FeCr}_2\text{O}_4$ 、 $\text{Fe}_2\text{O}_3$  高温氧化膜。

图 7 为超级 13Cr 油管的腐蚀机制示意图。由于超级 13Cr 油管柱外腐蚀工况为高 pH 值磷酸盐完井液, 其中含质量分数 1% ~ 3% 的铬酸盐强氧化剂, 并且在生产过程中环空发生了完井液漏失, 持续向 A 环空注入未除氧的高 pH 值磷酸盐完井液。因此, 超级 13Cr 油管的外腐蚀类似于不锈钢的碱液钝化过程<sup>[12]</sup>, 即在强氧化剂铬酸盐的作用下, 溶解氧在原始氧化膜的外表面得到电子形成氧离子( $\text{O}^{2-}$ ), 由于 Fe、Cr 的高价氧化物( $\text{FeCr}_2\text{O}_4$  或  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ )具有 p 型半导体特性, 有利于  $\text{O}^{2-}$  向内扩散, 而金属离子向外扩散则受到抑制, 从而在氧化膜与金属基体之间形成  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  腐蚀产物(图 7(b)); 当  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  形成完整的腐蚀产物膜后, 由于其既具有 p 型半导体特性, 也具有 n

型半导体特性,那么  $O^{2-}$  可以通过  $Fe_3O_4$  腐蚀产物层向内扩散,在金属基体- $Fe_3O_4$  腐蚀产物膜界面与  $Fe^{2+}$ 、 $Fe^{3+}$  形成  $Fe_3O_4$ ,腐蚀产物膜向内生长;同时,  $Fe^{2+}$ 、 $Fe^{3+}$  也可以通过  $Fe_3O_4$  腐蚀产物层向外扩散,在  $Fe_3O_4$  腐蚀产物膜——原始氧化膜界面形成  $Fe_3O_4$ ,腐蚀产物膜向外生长,从而导致腐蚀产物层明显增厚

(图 5(b)及图 7(c))。因此,超级 13Cr 油管在该工况中的腐蚀机制为金属离子和氧离子在氧化膜和腐蚀产物膜中的反应扩散过程,也可视为“不受控”的碱性溶液钝化过程。而关于  $Fe_3O_4$  腐蚀产物膜中少量  $Fe_3(PO_4)_2$  的存在,则是由于微量  $PO_4^{3-}$  离子在腐蚀产物膜中的扩散,与  $Fe^{2+}$  反应的结果。

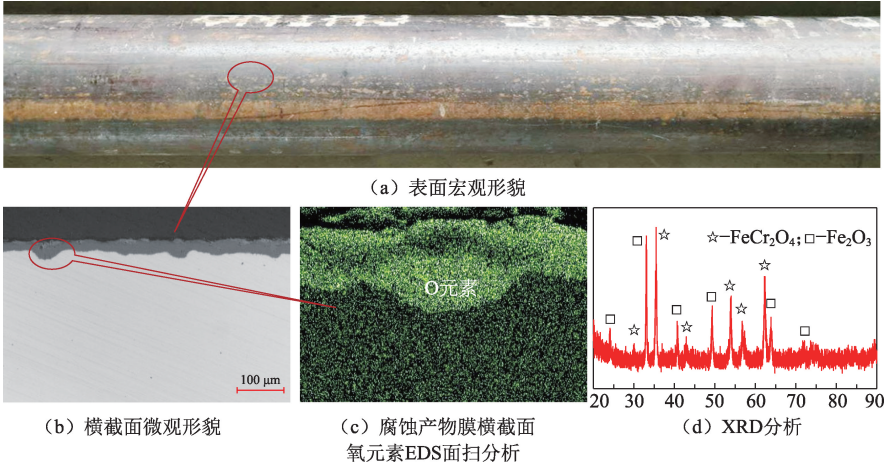


图 6 超级 13Cr 油管 (制备状态) 外壁表面膜的形貌和成分分析

Fig. 6 Surface film morphology and composition analysis for outer wall of super 13Cr tubing (in fabrication)

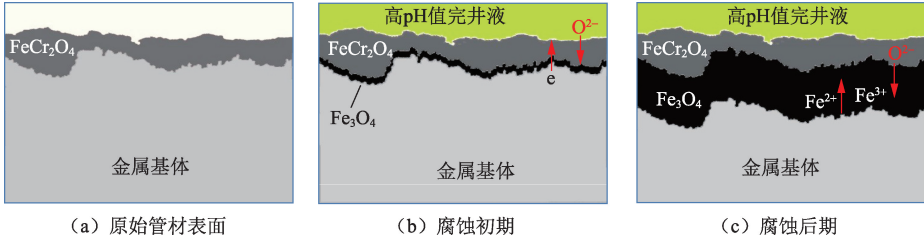


图 7 超级 13Cr 油管腐蚀机制示意图

Fig. 7 Schematic diagram of corrosion mechanism for super 13Cr tubing

氧化膜的存在并不是超级 13Cr 油管在该环境中发生严重腐蚀的关键因素。即使没有高温氧化膜的存在,清洁的不锈钢表面也会在该环境中形成金属的高价氧化物(如  $Fe_2O_3$ 、 $Cr_2O_3$  等),一旦形成完整的膜层之后,其腐蚀机制与上述分析相同,从而导致超级 13Cr 发生严重的腐蚀,这在试验室已经得到

验证(图 8,密度为  $1.40\text{ g/cm}^3$  的高 pH 值完井液+  $O_2$ ,  $180\text{ }^\circ\text{C}$ )。因此,在钻完井过程中,应重视完井液的除氧过程,并且要充分考虑完井液与所用管柱材质的匹配性,从根本上解决超级 13Cr 油管在井下工况中的腐蚀问题<sup>[13-14]</sup>。

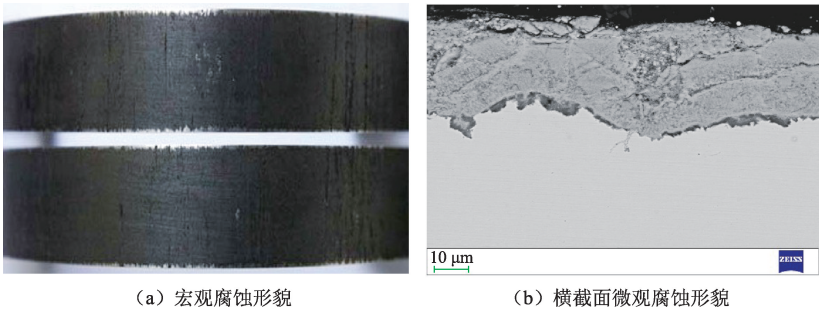


图 8 超级 13Cr 光滑 C 环试样宏观腐蚀形貌及横截面微观腐蚀形貌

Fig. 8 Macroscopic corrosion morphology and cross-section micro corrosion morphology of super 13Cr smooth C ring sample

### 3 开裂机制

关于金属材料的 SCC, 目前存在阳极溶解机制、吸附机制、氢致开裂机制(包括吸附氢、固溶氢以及氢化物形成机制)、空位机制、表面迁移机制、腐蚀增强局部塑性机制以及膜致开裂机制等<sup>[15-20]</sup>。这些机制均可以合理解释特定金属材料在特定环境中的 SCC, 但对某一特定机制切实可行的适用性仍有诸多争议。

#### 3.1 阳极溶解机制

阳极溶解机制认为垂直于外加应力方向的活性阳极区的金属原子优先脱离, 阳极金属的不断溶解导致局部腐蚀的发生, 进而促进 SCC 裂纹的形核和扩展, 最终造成合金结构的断裂<sup>[21]</sup>。这些分析表明, 超级 13Cr 油管的 SCC 裂纹大多起源于

油管外壁腐蚀产物膜下局部腐蚀坑处(图 9(a))。由于氧化膜在管材表面的覆盖不均匀或厚度不均匀、局部脱落, 均可导致超级 13Cr 油管在高 pH 值完井液中发生不同程度的腐蚀, 因此腐蚀产物膜下的局部腐蚀, 也可视为阳极溶解过程。图 9(b) 中所示腐蚀产物膜下的金属基体已经出现了明显的局部腐蚀; 另外, 在管材制备过程中所形成的表面缺陷, 如主要沿晶界进行的高温氧化(图 9(c)), 也会促进应力集中。在轴向应力、管内压力产生的环向应力、油管表面残余应力(100ksi 钢级的超级 13Cr 油管表面残余应力可高达 100 MPa 以上<sup>[7]</sup>)等和环境介质的共同作用下, 促使 SCC 裂纹在超级 13Cr 油管的外壁形核及萌生, 其后沿晶界或特定晶面扩展, 最终导致油管在使用过程中发生 SCC 开裂。

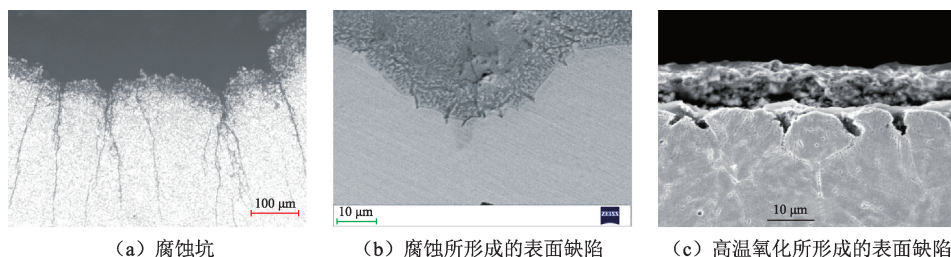


图 9 超级 13Cr 油管 SCC 裂纹起源及表面缺陷

Fig. 9 SCC crack origin and surface defects of super 13Cr tubing

#### 3.2 膜致开裂机制

Sieradzki 等<sup>[22]</sup>提出的韧性材料 SCC 膜致开裂(FIC)模型包括重复性步骤: ①环境诱发脆性腐蚀产物膜在金属表面或裂纹尖端形成; ②腐蚀产物膜快速脆性断裂; ③脆性断裂延伸至下层金属基体, 且深度远大于膜的厚度; ④止裂和钝化。超级 13Cr 油管在高 pH 值完井液中所形成的腐蚀产物膜非常致密(图 5), 在正常生产条件下, 由于工况调整(如快速关井), 造成管柱表面应力急剧增加(类似于快速加载), 从而致使这种脆性腐蚀产物膜发生快速脆性断裂, 进而延伸至下层金属基体, 最终导致管柱发生 SCC。由于所观察到的金属膜致开裂通常为穿晶解理开裂<sup>[20]</sup>, 而超级 13Cr 油管在高 pH 值完井液中的 SCC 裂纹扩展在初始阶段也满足这一特征。因此, 膜致开裂机制在超级 13Cr 油管 SCC 失效过程中也发挥了一定作用。

另外, 超级 13Cr 油管在高 pH 值完井液中所形成的  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  腐蚀产物的体积要大于所消耗的金

属体积, 从而可在金属基体表面缺陷处产生较大的楔入应力, 促进 SCC 裂纹的萌生, 其影响可以通过有限元法进行分析。由于 Fe 在生成  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  的过程中, 体积膨胀了 2.1 倍, 对于一特定边长的立方体微元, 膨胀后边长增加了 1.28 倍。因此, 可以假设  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  的线胀系数为  $0.28/^\circ\text{C}$ , 同时假设超级 13Cr 的线胀系数为 0, 则当温升为  $1^\circ\text{C}$  时产生的体积膨胀量等于 Fe 生成  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  所产生的膨胀量。通过分析, Fe 生成  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  所产生的楔入应力可转化为给模型施加  $1^\circ\text{C}$  温升所产生的应力。图 10 为腐蚀产物膜厚度为  $200\text{ }\mu\text{m}$  时, 其楔入作用在超级 13Cr 油管(规格为  $\Phi 88.9\text{ mm} \times 6.45\text{ mm}$ )表面 V 型缺陷处形成应力分布的有限元建模和计算结果, 基于对称性取 X 轴上部的 1/2 进行分析, 在 X 轴上设对称边界条件, 并限制右侧部分管体的 Y 向位移, 最后给整体模型施加  $1^\circ\text{C}$  的温升, 结果表明腐蚀产物在 V 型缺口尖端可产生 29 MPa 的环向拉应力。

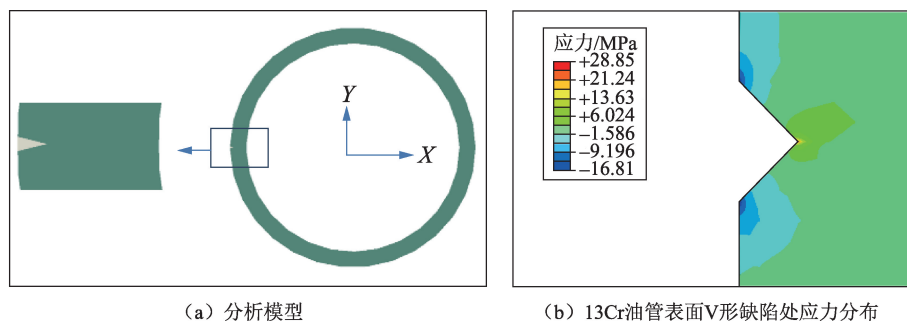


图 10 腐蚀产物膜的楔入作用在油管表面 V 型缺陷处形成应力分布的有限元分析结果

Fig. 10 Finite element analysis results of stress distribution formed by chock action of corrosion product film at V-shaped defects on tubing outer surface

### 3.3 腐蚀疲劳

油管柱在井下受力状态非常复杂,除受到一般的持续载荷(静载荷)以外,还受到疲劳载荷的作用,如管柱震动屈曲(高周疲劳)、环空泄漏及补压(低周疲劳)等。当小的循环载荷叠加在持续载荷上时,SCC 门槛应力可能会更低,裂纹扩展速率可能会更高。超级 13Cr 油管柱在井下这些所谓的持续载荷和“波动载荷”的共同作用下,当应力比  $R$  比较高(0.9~0.95)时,其开裂过程相当于腐蚀疲劳;而当  $R$  比较低时(即管柱通常所处的疲劳载荷状态),疲劳过程可叠加在 SCC 过程之上。超级 13Cr 油管断口分析结果表明,开裂表面未见明显疲劳辉纹(止裂标记),腐蚀疲劳特征不甚明显,但裂纹扩展由穿晶解理开裂转变为沿晶开裂(腐蚀疲劳裂纹扩展的典型特征)。因此,疲劳载荷不是导致超级 13Cr 油管柱在高 pH 值完井液发生开裂的关键因素,但其对 SCC 裂纹的萌生和扩展起到显著地促进作用。

综上所述,超级 13Cr 油管的 SCC 开裂以阳极溶解机制为主,辅以膜致开裂机制,而疲劳载荷的存在,则促进了 SCC 裂纹的萌生和扩展。

## 4 结 论

(1) 超级 13Cr 油管在井下高 pH 值完井液中发生了 SCC,裂纹大多起源于油管外壁局部腐蚀坑处,其扩展由穿晶解理开裂转变为沿晶开裂。

(2) 超级 13Cr 油管外壁发生了明显的腐蚀,随井深增加,腐蚀产物层厚度明显增大,并且出现分层现象,由外到内依次为  $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$  沉积层、 $\text{FeCr}_2\text{O}_4$  高温氧化产物层及  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  主要腐蚀产物层,其中  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  腐蚀产物层出现较为明显的双向生长现象。

(3) 超级 13Cr 油管在井下工况中的腐蚀机制为金属离子和氧离子在氧化膜和腐蚀产物膜中的反

应扩散过程,也可视为“不受控”的碱性溶液钝化过程。

(4) 超级 13Cr 油管的 SCC 开裂以阳极溶解机制为主,辅以膜致开裂机制,而疲劳载荷的存在,则促进了 SCC 裂纹的萌生和扩展。

### 参考文献:

- [1] 崔国栋,张亮,任韶然,等. 油藏  $\text{CO}_2$  驱及封存过程中地化反应特征及埋存效率[J]. 中国石油大学学报(自然科学版),2017,41(6):123-130.  
CUI Guodong, ZHANG Liang, REN Shaoran, et al. Geochemical reactions and  $\text{CO}_2$  storage efficiency during  $\text{CO}_2$  EOR process and subsequent storage[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2017,41(6):123-130.
- [2] SKAR J I, OLSEN S. Super martensitic stainless steel and sour service-testing and evaluations: the 70th NACE Annual Conference, Dallas, TX, March 15-19, 2015 [C]. Houston: Omnipress, 2015.
- [3] 李大朋,张雷,石凤仙,等. 温度对 13Cr 不锈钢在高  $\text{CO}_2$  分压环境中腐蚀行为的影响[J]. 工程科学学报, 2015, 39(11):1463-1468.  
LI Dapeng, ZHANG Lei, SHI Fengxian, et al. Effect of temperature on the corrosion behavior of 13Cr stainless steel under a high  $\text{CO}_2$  partial pressure environment[J]. Chinese Journal of Engineering, 2015, 39(11):1463-1468.
- [4] 闫怡飞,董卫,邵兵,等.  $\text{CO}_2$  和  $\text{H}_2\text{S}$  共存酸性环境 OCTG 材料选用研究[J]. 中国石油大学学报(自然科学版),2015,39(4):159-164.  
YAN Yifei, DONG Wei, SHAO Bing, et al. Material selection of OCTG in sour environment with  $\text{CO}_2$  and  $\text{H}_2\text{S}$  coexisting [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2015,39(4):159-164.
- [5] ISHIGURO Y, FUJIMURA K. Choice of buffer solution for stainless steel OCTG materials at laboratory corrosion

- test to carry out SSC and SCC resistance; the 72th NACE Annual Conference, New Orleans, LA, March 26-30, 2017[C]. Houston: Omnipress, 2017.
- [6] 吕拴录, 杨向同, 宋文文, 等. 某井超级 13Cr 钢特殊螺纹接头油管接箍横向开裂原因分析[J]. 理化检验—物理分册, 2015, 51(5): 297-301.
- LÜ Shuanlu, YANG Xiangtong, SONG Wenwen, et al. Causes analysis on coupling transversal cracking of super 13Cr steel premium connection tubing[J]. PCTA (Part A: Phys Test), 2015, 51(5): 297-301.
- [7] 常泽亮, 李丹平, 赵密锋, 等. 某气井超级 13Cr 完井管柱腐蚀及开裂原因分析[J]. 焊管, 2018, 41(7): 14-20.
- CHANG Zeliang, LI Danping, ZHAO Mifeng, et al. Analysis corrosion and cracking in gas well of super 13Cr completion tubing strings[J]. Welded Pipe and Tube, 2018, 41(7): 14-20.
- [8] SONG F M, HUIZINGA S, SKOGSBERG L, et al. Qualification of super 13Cr-110 in HPHT sour well service with concentrated brines; the 71th NACE Annual Conference, Vancouver, BC, Canada, March 6-10, 2016[C]. Houston: Omnipress, 2016.
- [9] 常泽亮, 岳小琪, 李岩, 等. 超级 13Cr 油管在不同完井液中的应力腐蚀开裂敏感性[J]. 腐蚀与防护, 2018, 39(7): 549-554.
- CHANG Zeliang, YUE Xiaoqi, LI Yan, et al. Stress corrosion cracking sensitivity of super 13Cr in different completion fluid environment[J]. Corrosion & Protection, 2018, 39(7): 549-554.
- [10] 谢俊峰, 岳小琪, 赵密锋, 等. 超级 13Cr 不锈钢在磷酸盐完井液中的应力腐蚀开裂敏感性研究[J]. 材料保护, 2018, 51(3): 11-16.
- XIE Junfeng, YUE Xiaoqi, ZHAO Mifeng, et al. Stress corrosion cracking sensitivity of super 13Cr stainless steel in phosphate completion fluid environment[J]. Materials Protection, 2018, 51(3): 11-16.
- [11] MORANA R, NICE P I, MARTIN J W. Updated application limits for 13Cr super martensitic steel bar-stock materials; the 71th NACE Annual Conference, Vancouver, BC, Canada, March 6-10, 2016[C]. Houston: Omnipress, 2016.
- [12] 陈天玉. 不锈钢表面处理技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2017: 241-242.
- [13] 刘克斌, 周伟民, 植田昌克, 等. 超级 13Cr 钢在含  $\text{CO}_2$  的  $\text{CaCl}_2$  完井液中应力腐蚀开裂行为[J]. 石油与天然气化工, 2007, 36(3): 222-226.
- LIU Kebin, ZHOU Weimin, MASAKATSU Ueda, et al. Stress corrosion cracking behavior of super 13Cr stainless steel in  $\text{CO}_2$ -containing  $\text{CaCl}_2$  completion fluid[J]. Chemical Engineering of Oil & Gas, 2007, 36(3): 222-226.
- [14] 滕学清, 杨向同, 徐同台, 等. 甲酸盐完井液技术[M]. 北京: 石油工业出版社, 2016: 130-131.
- [15] HALL M M. Film rupture model for aqueous stress corrosion cracking under constant and variable stress intensity factor[J]. Corrosion Sci, 2009, 51: 225-233.
- [16] LYNCH S P. Metallographic contributions to understanding mechanisms of environmentally assisted cracking[J]. Metallography, 1989, 23: 147-171.
- [17] LYNCH S P. Comments on 'a unified model of environment-assisted cracking'[J]. Scripta Mater, 2009, 61, 331-334.
- [18] GALVLE J R. Recent developments in the surface-mobility stress-corrosion-cracking mechanism[J]. Electrochimica Acta, 2000, 45: 3537-3542.
- [19] SEREBRINSKY S A, GALVELE J R. Effect of the strain rate on stress corrosion crack velocities in face-centred cubic alloys: a mechanistic interpretation[J]. Corrosion Science, 2004, 46: 591-612.
- [20] RAJG V S, TETSUO S. Stress corrosion cracking theory and practice[M]. Oxford-Cambridge-Philadelphia-New Delhi: Wood Publishing Limited, 2011: 18-19.
- [21] FORD F P, ANDRESEN P L. Corrosion mechanisms in theory and practice: environmentally assisted cracking in light water reactors[M]. 2nd ed. New York: Marcel Dekker, 2002: 605-642.
- [22] SIERADZKI K, NEWMAN R C. Brittle behavior of ductile metals during stress corrosion cracking[J]. Philosophical Magazine A, 1985, 51: 95-132.

(编辑 沈玉英)

文章编号:1673-5005(2020)01-0149-07

doi:10.3969/j.issn.1673-5005.2020.01.017

# 大尺度连续泄漏航空煤油流淌火热辐射模型研究

刘全义, 吕志豪, 智茂永, 李志法, 孙中正

(中国民用航空飞行学院民航安全工程学院, 四川广汉 618307)

**摘要:**航空煤油储运过程中因泄漏引发的火灾爆炸事故导致严重危害,流淌火是油料燃烧和流淌的复杂过程。为保证航空煤油储运安全和机场消防的安全,对连续泄漏的航空煤油流淌火的热辐射进行研究。为此设计并搭建流淌火燃烧试验平台,以航空煤油为试验油料,选择水平表面 $0^\circ$ (流淌试验为基准),改变坡度,开展大尺度连续泄漏航空煤油流淌火试验。测量燃油泄漏速率、泄漏时间以及流淌火的热辐射热流等,分析不同泄漏速率下连续泄漏航空煤油的热辐射热流密度,建立航空煤油流淌火固体火焰模型并研究坡度的影响。结果表明:可将矩形油槽内的航空煤油流淌火看作长方体固体火焰模型,估算出大尺度航空煤油流淌火的表面发射功率约为 $25.7\text{ kW/m}^2$ ;流淌火的热辐射热流强度的实测值与经验值相吻合;对比坡度工况,水平工况下对于辐射热流强度的预测更准确。结合固体火焰辐射模型的计算结果和人体受热辐射的伤害判定标准,可以预测不同时刻溢油流淌火周围的安全距离。

**关键词:**民航安全;航空煤油流淌火;油槽坡度;固体火焰模型;热辐射模型

**中图分类号:**X 937      **文献标志码:**A

**引用格式:**刘全义,吕志豪,智茂永,等.大尺度连续泄漏航空煤油流淌火热辐射模型研究[J].中国石油大学学报(自然科学版),2020,44(1):149-155.

LIU Quanyi, LÜ Zhihao, ZHI Maoyong, et al. Study on thermal radiation model of large-scale continuously released jet fuel spill fire[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2020,44(1):149-155.

## Study on thermal radiation model of large-scale continuously released jet fuel spill fire

LIU Quanyi, LÜ Zhihao, ZHI Maoyong, LI Zhifa, SUN Zhongzheng

(College of Civil Aviation Safety Engineering, Civil Aviation Flight University of China, Guanghan 618307, China)

**Abstract:** Fire and explosion accidents caused by leakage during the storage and transportation of jet fuels will lead to serious harm and damage to facilities. Spill fire is a complex process of oil combustion and flow coupling. For the sake of ensuring the safety of jet fuel storage and transportation and fire safety in airports, the thermal radiation of continuously released jet fuel spill fire was studied. An experimental platform was designed and built for jet fuel spill fires. The jet fuel was selected as the fuel in the continuous spill fire, and the horizontal surface (with the slope angle  $0^\circ$ ) was taken as the baseline case. Then the experiment on the large-scale continuously released jet fuel spill fire was performed with different substrate slopes. The radiant heat flux of spill fires was measured as well as the leakage rate, the leakage time, et al., and the thermal radiation intensity of continuous leakage of jet fuel with different leakage rates was analyzed. A solid flame model for continuous jet fuel spill fire was established and the effect of substrate slope on the thermal radia-

收稿日期:2019-02-22

**基金项目:**国家重点研发计划项目(2018YFC0809500);国家自然科学基金项目(U1633203, U1733126);四川省科技计划项目(2018GZYZF0069);中国民用航空飞行学院基金项目(J2018-36, X2018-22);灭火救援技术公安部重点实验室开放课题(KF201807)

**作者简介:**刘全义(1987-),男,副教授,博士,研究方向为低压火行为、航空运输锂电池热灾害防治、新一代机载灭火技术等航空安全与消防。E-mail:quanyiliu2005@126.com。

tion was examined. The results show that the jet fuel spill fire in a rectangular oil tank can be regarded as a cuboid solid flame model. Based on this model, the surface emission power of the solid flame model is estimated to be about 25.7 kW/m<sup>2</sup>. The thermal radiation intensity of the spill fire measured by the experiment agrees well with the empirical value. By comparing different conditions of jet fuel spill fire, it is found that the prediction of thermal radiation intensity with the substrate slope 0° is more accurate. The safe distance of spill fire at different leaking moments can be predicted on the basis of the calculation results of the solid flame radiation model and the injury criteria to human bodies caused by the thermal radiation.

**Keywords:** civil aviation safety; jet fuel spill fire; substrate slope; solid flame model; thermal radiation model

流淌火灾是油气储运过程中常见的一种火灾事故,其本质是泄漏油品流淌过程遇火燃烧引发火灾爆炸而造成严重灾害的过程。2005年12月11日,位于英国伦敦的邦斯菲尔德油库发生大规模溢油事故,并引发大面积火灾和连续爆炸<sup>[1]</sup>。2010年大连新港附近中石油输油管道起火爆炸,附近海域被原油污染<sup>[2]</sup>,形成流淌火的过火面积至少50 km<sup>2</sup>。2017年中国石油天然气股份有限公司大连分公司140万 t/a重油催化裂化装置原料油泵发生泄漏引发火灾,经济损失和社会危害巨大。因此,研究流淌火灾蔓延燃烧耦合机制特性,对确保油气储运安全乃至国民经济发展具有重要意义。国内外已经开展了大量有关水面上燃油泄漏、蔓延和燃烧过程的研究<sup>[3-6]</sup>。美国联邦航空管理局(FAA)<sup>[7-8]</sup>针对机场燃油流淌、池火开展了全尺寸试验,对倾斜表面流淌火、引擎舱流淌燃烧及灭火过程开展了研究。庄磊等<sup>[9]</sup>针对航空煤油池火研究了航空煤油池火的燃烧速率等特征参数的变化规律,并基于燃烧速率建立了池火火焰高度与油池直径之间的理论模型。孔得朋等<sup>[10]</sup>对小尺度溢油池火方面进行了试验,对不同直径及初始油层厚度对燃烧速率的影响进行了研究。Mealy等<sup>[11]</sup>对流淌火燃烧动力学过程进行了深入研究。刘全义等<sup>[12-16]</sup>研究了水平和变坡度下正庚烷和航空煤油流淌火试验,重点研究了火焰高度、燃烧速率、流淌面积等燃烧特性。在火灾热辐射方面,李玉等<sup>[17]</sup>依据相同的火焰宽度、燃烧速原则建立了火焰热辐射改进点源模型,在热辐射计算精度方面较之前有了改善。这些研究更多关注的是航空煤油池火的燃烧特征和小尺度蔓延燃烧试验的研究,对大尺度航空煤油的溢油流淌火燃烧尤其是热辐射规律的研究较少<sup>[18]</sup>。笔者为深入研究航空煤油在不同倾斜表面上的流淌燃烧机制,通过开展大尺度流淌火试验,研究不同流淌坡度对航空煤油热辐射模型的影响。

## 1 试验设置

### 1.1 试验平台搭建

所用试验平台为拼接型倾角可调式燃油流淌火燃烧试验平台<sup>[19]</sup>,如图1所示。该试验平台包括油料供应装置、布流槽、流淌槽、数据收集及控制系统等。油料供应装置由支架、油料桶、蠕动装置和称重装置组成,蠕动装置采用直流无刷电机以便于速度调整,以确保泄漏速率相同。布流槽的功能是将油品溢流到流淌槽。流淌槽作为该试验平台的关键部件,主体框架尺寸为5.85 m×0.8 m×0.15 m,其底部设有6根支撑柱,每根支撑柱均设有一个万向调节器,用于保持流淌平面的水平。其中前、中部分的4个支撑柱内设有可调的插销,对流淌平面倾角进行调节。流淌面为通过高温胶粘接的防火玻璃,底部为不锈钢衬板。流淌槽为防止油品侧流而采用硅酸钙板进行防护。由于试验时会产生很多热量,所以采用岩棉和硅酸钙板作为隔热防护物固定在框架上和前端部分。试验前对试验平台所有组件进行安装、流淌槽表面和布流槽出油面进行调平、调试,完成之后即可开始正常试验。试验开始期间,在蠕动泵的作用下,航空煤油从油桶中流出,经软管流入布流槽中并逐渐从布流槽溢出。一旦发现油品进入流淌槽便立即点火试验。试验结束后,将回收未燃烧的油品。试验过程中数据采集及控制系统对燃油泄漏速率、泄漏时间、流淌槽倾斜角度和辐射热流密度等进行采集和测量,并通过视频录像记录流淌火试验过程。

在火灾试验研究中,常使用数字图像处理(digital image processing)手段对火焰图像进行分析,将火焰图像的形状信息转化为具体的数字坐标,以获得火焰高度和火焰前沿位置等火焰特征参数<sup>[20-22]</sup>,用于后续热辐射模型的建立。图1(c)是某组试验的图像处理过程,左侧是数码摄像机拍摄的原始图像。通过分析该帧图像中各像素点的RGB值(火焰边缘为红色的大于200,蓝色的小于140,绿色的小于150),将符合判断依据的像素点标记为红色,不

符合判断依据的像素点标记为黑色。

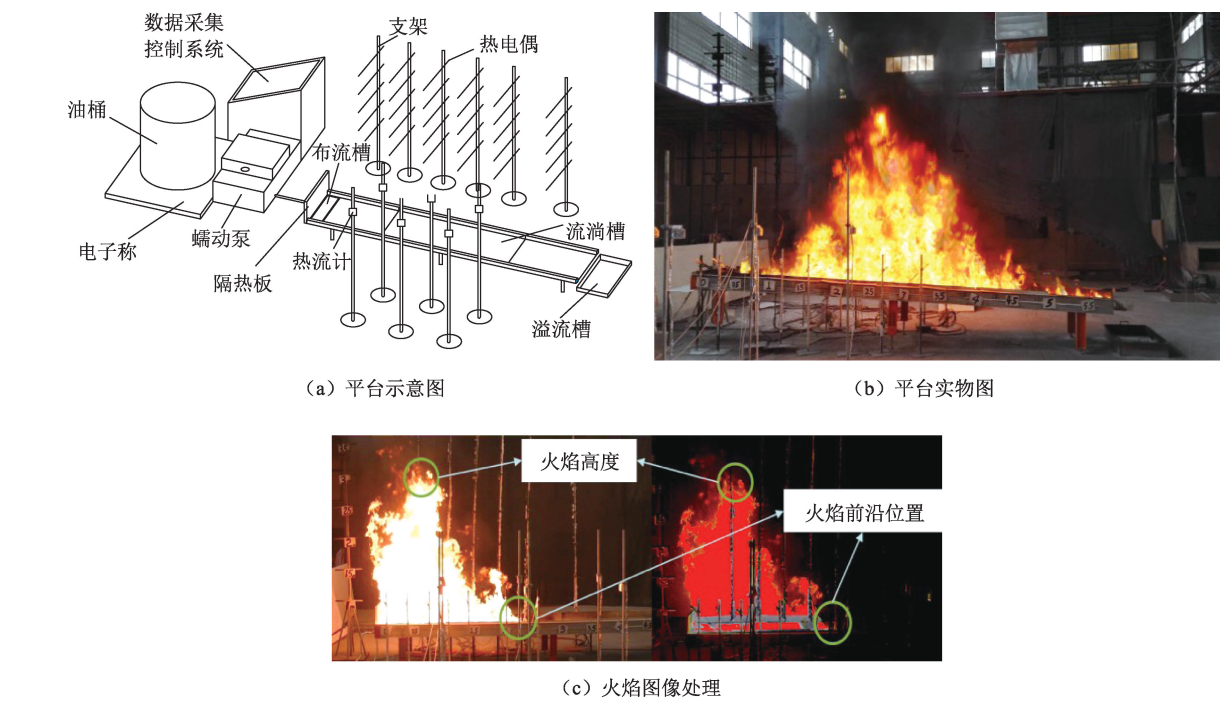


图 1 拼装型倾角可调式燃油流淌火燃烧试验平台

Fig.1 Assembling-type experimental platform with adjustable slope for liquid oil spill fire

1.2 试验工况

选用航空煤油 (Jet A-1) 作为试验油品,在试验过程中通过布流槽流淌在流淌槽表面。航空煤油是喷气式飞机发动机专用的航空燃油,其密度为  $790.6\text{ kg/m}^3$ ,闪点为  $38\text{ }^\circ\text{C}$ ,自燃温度为  $425\text{ }^\circ\text{C}$ ,露天燃烧温度为  $260\sim 315\text{ }^\circ\text{C}$ ,最大燃烧温度可达  $980\text{ }^\circ\text{C}$ 。

在进行不同坡度航空煤油流淌火试验之前,首先调节蠕动泵转速,进行了坡度为  $0^\circ$ 即在水平流淌槽表面上开展不同泄漏速度的航空煤油泄漏流淌火试验,实时记录辐射热流密度。蠕动泵转速设置为  $50、100、200、250\text{ r/min}$ ,与之对应的泄漏速度为  $0.93、2.05、4.39、5.39\text{ L/min}$ 。在以上试验基础上,改变流淌槽的的坡度为  $0.5^\circ、1^\circ、3^\circ$ 。开展相同泄漏速度下不同坡度的航空煤油流淌火试验,并记录数据用于后续分析。

2 试验结果分析

2.1 溢油流淌火辐射模型

发生火灾时,辐射是最主要的传热方式之一。溢油流淌火的主要危害体现在不断变化的热辐射传热对周围罐体和设施产生的威胁,使其他设施破损或失效,造成新的泄漏,从而引发更大规模的火灾、爆炸或危化品泄漏事故。辐射热流密度与火焰表面发射功率 (emissive power) 以及视角系数 (view factor) 等因素

有关。对放置在矩形油槽侧向的辐射热流计而言,视角系数主要由溢油流淌火的火焰形状以及火焰相对热流计的位置决定。在大尺度试验中测量了溢油流淌火侧面两个高度为  $1\text{ m}$  位置处的辐射热流密度。

根据视角系数定义,在  $t$  时刻,传感器  $R_{\text{sensor}}$  接收到的辐射热流密度  $R(t)$  可表示为

$$R(t)=\tau P_{\text{SEP}}(ds)F(ds,R_{\text{sensor}})ds. \tag{1}$$

式中,  $\tau$  为火焰辐射穿透比,通常可近似认为其值为  $1$ ,即不考虑穿透比的影响<sup>[23]</sup>;  $ds$  为溢油流淌火火焰面上任意一个小的微元面,  $\text{m}^2$ ;  $F(ds,R_{\text{sensor}})$  表示微元面  $ds$  对传感器接收面的视角系数;  $P_{\text{SEP}}(ds)$  为微元面  $ds$  的火焰表面发射功率,  $\text{kW/m}^2$ 。

在火焰的辐射研究中,建立固体火焰模型是一种常见方法,即把火焰看作具有与火焰类似形状和发射功率的固体表面<sup>[24-26]</sup>。图 2 给出了流淌火固体火焰模型,观察图 2(a) 所示的试验图像,可将溢油流淌火的火焰近似看作长方体,其长宽高分别是燃烧油膜的长度  $L$ 、矩形油槽宽度  $D$  及火焰高度  $H$ ,如图 2(b) 所示。

在长方体形状的溢油流淌火中,燃烧产生的热量以辐射的形式向顶部和四周传递。假设溢油流淌火固体火焰模型每个表面的发生功率相等,且不随时间变化。表面发射功率 ( $P_{\text{SEP}}$ ) 估算值为

$$P_{\text{SEP}}=\xi V\rho_L h_c/\int_0^t M(t)dt. \tag{2}$$