

Research on Key Technologies of Fire Driven Exhaust Gas Injection

Qiang Meng Shubai Han Yonggang Shang

Special Oil Development Company of CPC Liaohe Oilfield Company, Panjin, Liaoning, 124010, China

Abstract

In order to solve the problem of low steam thermal efficiency and rapid production decline in the later stage of SAGD well group development in Liaohe Oilfield, this study focuses on the key technology of fire drive tail gas injection. Firstly, a calculation method for the explosion limit and critical oxygen content of fire drive tail gas under high temperature and high pressure is established. It is clarified that the explosion limit under 240 °C and 6MPa environment is 0.89-55.96%, and the critical oxygen content is 5.52%. Combined with the on-site tail gas oxygen content of 1.01-2.1% (including 1.5 times the safety factor), it is determined that there is no explosion risk but oxygen content detection needs to be strengthened; Secondly, a corrosion prediction model was constructed, and it was found that the corrosion rate of commonly used pipe column materials exceeded 0.076mm/a, requiring the use of anti-corrosion measures such as over 13Cr materials, coatings, or corrosion inhibitors. The innovation lies in establishing for the first time the technology of fire driven exhaust gas injection, the calculation method of explosion parameters under high temperature and high pressure, and the measures to prevent column corrosion, providing support for the safe application of exhaust gas injection and helping to improve the development effect of SAGD.

Keywords

explosion limit; Corrosion of pipe columns; corrosion prevention

火驱尾气注入关键技术研究

孟强 韩树柏 商永刚

中油辽河油田公司特种油开发公司, 中国·辽宁 盘锦 124010

摘要

为解决辽河油田 SAGD 井组开发后期蒸汽热效率低、产量递减快的问题,本研究围绕火驱尾气注入关键技术开展工作,一是建立高温高压下火驱尾气爆炸极限及临界含氧量计算方法,明确 240℃、6MPa 环境下爆炸极限为 0.89-55.96%、临界含氧量 5.52%,结合现场尾气氧含量 1.01-2.1% (含 1.5 倍安全系数),判定无爆炸风险但需加强氧含量检测;二是构建腐蚀预测模型,发现常用管柱材质腐蚀速率均超 0.076mm/a,需采用超 13Cr 材质、镀层或缓蚀剂等防腐措施。创新点在于首次确立火驱尾气回注工艺、高温高压下爆炸参数计算方法及管柱腐蚀防止措施,为尾气回注安全应用提供支撑,助力提升 SAGD 开发效果。

关键词

爆炸极限;管柱腐蚀;防腐措施

1 立项研究的重要性

公司 SAGD 井组经过多年高速开发,目前油藏整体采出程度达到 62.0%,进入蒸汽腔下降阶段,蒸汽热效率降低,产量递减加快,油气比由 0.30 降至目前 0.16,急需探索 SAGD 开发后期接替技术,进一步提高采收率 and 经济效益。

公司自 2014 年开始,借鉴国外成功经验,在兴Ⅵ组实施气体辅助 SAGD 技术,通过注入 N₂、烟道气、CO₂ 等非凝析气体 2339 万标方,有效降低蒸汽分压,减少汽腔顶部

热损失,阶段节约蒸汽 51.8 万吨,实施井组油气比提高 0.05。为解决当前自生 CO₂ 气量不足的问题,需寻找新的非凝析性气体,提高 SAGD 开发效果。

表 1-1 辽河坳陷和国内主要页岩油区生烃指标对照表

注入介质	注入气体量	节约蒸汽量	提高
	(万方)	(万吨)	油气比
氮气	885	20.0	0.06
烟道气	865	18.5	0.04
二氧化碳	589	13.3	0.04
合计	2339	51.8	0.05

经现场勘察,当前可实现将火驱尾气经集气管线增压注入 SAGD 蒸汽腔。尾气组分,以 N₂ (约 70%)、CO₂ 为

【作者简介】孟强 (1970-),男,中国辽宁朝阳人,硕士,高级工程师,从事稠油采油工艺技术研究。

主,并含有CH₄(10%)、O₂(2%)和一氧化碳(0.3%),符合SAGD 降压开采的非凝析气需求。但火驱尾气组份中的CO₂和O₂具有腐蚀作用,若长期持续注入,仍需针对现场实际开展相关技术研究,并优化设计方法。

2 研究内容

2.1.1 防爆理论研究与评价

爆炸极限是指可燃气体或蒸气与空气形成的混合物,在特定条件下能够发生爆炸的浓度范围。这个范围通常以可燃物质在混合气体中的体积百分比表示,分为下限(Lower Explosive Limit, LEL)和上限(Upper Explosive Limit, UEL)。低于LEL或高于UEL时,混合物要么因为太稀薄无法维持火焰传播,要么因为太浓而缺乏足够的氧气支持燃烧。在讨论爆炸极限时,临界含氧量(Critical Oxygen Concentration, COC)是一个重要的概念。它指的是在一个可燃气体或蒸气与空气的混合物中,为了维持燃烧反应,必须存在的最小氧气比例。如果混合物中的氧气含量低于这个临界值,即使可燃气体的浓度处于爆炸极限范围内,也无法支持火焰传播,从而不会发生爆炸。理解和应用可燃气体的爆炸极限知识,不仅有助于保护人员的生命安全,还能减少财产损失,维护环境安全,是实现安全生产不可或缺的一部分。因此,对爆炸极限的计算是十分必要的。

(1) 利用含碳原子数计算爆炸极限

脂肪碳氢化合物爆炸极限的计算,可以根据脂肪族碳氢化合物含碳原子数(n)与其爆炸上限C_U和爆炸下限C_L的关系求得。

$$\frac{1}{C_L}=0.1347 \times n+0.04343 \quad (2-2-1)$$

$$\frac{1}{C_U}=0.1337 \times n+0.15151 \quad (2-2-2)$$

(2) 利用经验公式计算爆炸极限

爆炸极限可以用经验公式计算,但计算数据与实测数据可能有出入,但也可供参考。

计算爆炸下限的公式

$$C_L=\frac{100}{4.76(N-1)+1} \quad (2-2-3)$$

计算爆炸上限公式

$$C_U=\frac{4 \times 100}{4.76 N+4} \quad (2-2-4)$$

式中,N为每摩尔爆炸性气体完全燃烧所需氧原子数。

(3) 高温条件下原油伴生气爆炸极限的理论计算

爆炸性气体混合物的原始温度越高,则爆炸极限范围越大,即爆炸下限降低而爆炸上限增高。因为系统温度升高,其分子内能增加,使更多的气体分子处于激发态,原来不燃的混合气体成为可燃、可爆系统,所以温度升高使爆炸危险

性增大。若初始温度为25℃时的下限为C_L' ,上限为C_U' ,则t时的下限C_{Lt}' 与上限C_{Ut}' 分别为

$$C_{Ut}'=C_U' \left[1+\frac{721(t-25)}{10^6} \right] \quad (2-2-8)$$

$$C_{Lt}'=C_L' \left[1-\frac{721(t-25)}{10^6} \right] \quad (2-2-9)$$

2.1.2 现场火驱尾气爆炸评价

火驱尾气回注的现场工况压力范围为1-6MPa、温度240℃左右,组分及含量如下表,根据上述计算的爆炸极限范围及临界含氧量判定,240℃、6MPa的环境下爆炸极限为0.89-55.96%,临界含氧量为5.52%,考虑到危险性 & 计算误差,设计安全系数为1.5,火驱尾气中氧含量1.01-2.1%,不会发生爆炸,但要加强火驱尾气中氧气含量的检测。

表 2-1 火驱尾气成分及含量

序号	CO ₂ (%)	N ₂ (%)	CH ₄ (%)	O ₂ (%)	CO (%)	其他 (%)
1	18.65	49.26	29.39	1.01	0.000	1.69
2	18.94	47.57	30.14	1.48	0.000	1.87
3	17.75	69.01	10.25	2.20	0.097	0.69
4	17.66	70.87	9.50	1.44	0.000	0.53
5	15.98	77.00	4.28	1.84	0.371	0.53
6	15.40	77.53	4.51	1.72	0.343	0.5
7	19.05	68.96	9.80	1.61	19.05	0.28
8	18.89	70.11	9.07	1.38	18.89	0.55

2.2 管柱腐蚀机速率评价

火驱尾气中含有CO₂、O₂等气体会对管柱造成腐蚀,尤其是在高温高压的环境下,对管柱的腐蚀会进一步加大,需对常用管材(N80、110H、P110、130TT)进行腐蚀机理研究及腐蚀速率评价。

2.2.1 二氧化碳腐蚀类型

CO₂ 腐蚀主要以均匀腐蚀和三种局部腐蚀形式出现,三种局部腐蚀为点蚀、台地状腐蚀和流动诱导局部腐蚀。在研究CO₂ 腐蚀时,应明确区分纯CO₂ 腐蚀侵蚀和CO₂ 腐蚀的综合作用,后者可能因CO₂ 腐蚀而加剧。

均匀腐蚀是CO₂ 形成全面腐蚀时的主要腐蚀方式。发生均匀腐蚀的条件一般有两点。一是温度在60℃以下,钢铁材料表面存在少量软而附着力小的FeCO₃ 腐蚀产物膜,金属表面光滑,以均匀腐蚀为主;二是CO₂ 分压低于0.483×10⁻¹MPa时,易发生均匀腐蚀。

点蚀发生在气井的低速和露点温度附近。在实际生产中,点蚀现象不经常发生,这些点蚀要么是意外地出现在非金属夹杂物附近,要么是初期台面侵蚀。点蚀敏感性随温度和CO₂ 分压的升高而增加。

2.2.2 二氧化碳腐蚀的影响因素

CO₂ 腐蚀受许多参数的影响,包括环境、物理和冶金变量。影响CO₂ 腐蚀的重要参数包括:水化学、pH值、水

润湿性、碳氢化合物特性和相比影响的流体组成；CO₂ 含量；温度；钢表面，包括腐蚀膜形态、蜡的存在和沥青质；流体动力学；钢化学。所有参数都是相互依赖的，可以通过多种方式相互作用来影响 CO₂ 腐蚀。影响水相固有腐蚀性的环境因素会影响 CO₂ 腐蚀。这些因素包括 CO₂ 分压、温度等的影响。

(1) CO₂ 分压

在大多数情况下，CO₂ 分压和腐蚀速率之间都建立了关系。随着 CO₂ 分压的增大，腐蚀速率逐渐增大，但增大的幅度变化趋势不明显。这是因为随着压力的增大，CO₂ 的溶解度大幅度增加，在水中电离出大量的 H⁺、HCO₃⁻ 和 CO₃²⁻，致使溶液的 pH 值降低，酸性环境促使腐蚀加剧；同时，钢表面产生的腐蚀产物膜厚度较小、分布许多微孔、不具有黏附性，无法覆盖材料表面，容易使溶液中离子向基体渗透形成局部腐蚀，增大钢本体的腐蚀速率。所以在生产过程中，要尽量控制 CO₂ 分压，降低腐蚀速率。

(2) 环境温度

环境温度对表面膜的性质、特性和形态有重大影响，而这又会影响 CO₂ 的腐蚀过程。当温度超过约 80℃时，溶液中 FeCO₃ 的溶解度会降低，过饱和度过高会导致 FeCO₃ 沉淀。在低温范围（< 约 70℃）下，腐蚀速率会随着温度升高而逐渐增加，直至达到中间温度范围（70℃至 90℃之间），之后腐蚀速率会逐渐降低。然而，在 FeCO₃ 形成发生破坏的位置，腐蚀过程会不受阻碍地进行，这可能会导致严重的局部腐蚀。低温范围内腐蚀速率的增加是由于流动效应和 FeCO₃ 形成速率缓慢而导致的质量传递速率增加所致。在腐蚀环境温度为 160℃左右时腐蚀速率达到最小值，之后随着温度的升高腐蚀速率增大。这是因为随着温度的升高，钢体表面形成了附着力极大的产物膜，晶粒致密，对钢体本身保护性极强，附着在钢体表面致密的产物膜会与水反应，生成质地较为疏松的 Fe₃O₄，很难对腐蚀速率产生抑制作用，致使钢体的腐蚀越来越快。

2.2.3 防腐措施

(1) 耐腐蚀材质

结合腐蚀气体分压，推荐采用超级 13Cr 材质，采用气密封螺纹扣。

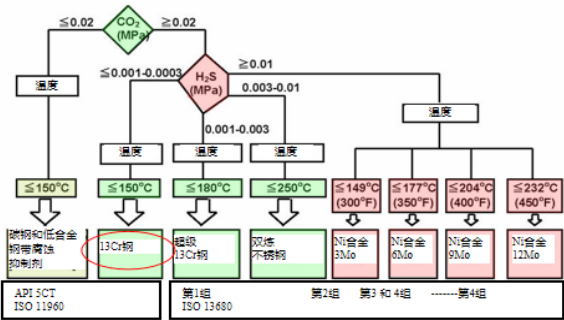


图 2-1 选择依据

表 2-2 选择结果

CO ₂ 分压 MPa	油管
< 0.021	API Spec 5CT 普通碳钢
0.021~0.21	API Spec 5CT 普通碳钢，或加注缓蚀剂；若温度较高时，宜选用普通 13Cr 钢
0.21~1.0	API Spec 5CT 普通碳钢和加注缓蚀剂或选用普通 13Cr 钢，当腐蚀介质中的 Cl ⁻ 浓度超过 50000mg/L 时，应选用普通 13Cr 钢
1.0~7.0	超级 13Cr 钢，或普通 13Cr 钢加注缓蚀剂，当腐蚀介质中 Cl ⁻ 浓度超过 150000mg/L 时，应选用超级 13Cr 钢
≥7.0	超级 13Cr 或更优质材料

(2) 防腐涂层

为保证生产安全，也可以采用镍钨镀层的注汽管柱，表面更容易形成氧化钨钝化膜，更有效防止腐蚀介质透镀层，渗入基材，对基材起到保护作用。目前，在长庆地区的 CCUS、储气库、CO₂ 驱等管柱中已采取实施，应用效果良好。辽河实施前，应针对辽河井况对镍钨镀层进行室内实验评价。

表 2-3 镍钨镀层应用效果

序号	应用地区 / 项目	应用效果
1	长庆 - 黄 3 区 CCUS 先导试验 油管	2017 年 8 月，注气井下入油管 6000m，2019 年生产井下入油管 4500m，服役 8 个月取出检测油管镀层情况良好，持续正常工作。
2	长庆 - 榆 37 储气库 114.3mm 油管	2021 年 11 月下井使用 3000m，在最大 130 万方 / 天注采条件下，未有不良反应，目前正常工作。
3	长庆 - 黄 3 区 CO ₂ 驱 139.7mm 套管	2022 年 4 月下井使用套管 3100m，目前工作正常。

表 2-4 涂层性能评价

序号	项目	数量	单位
1	成分检测	5	件
2	金相组织分析	2	件
3	力学性能测试	2	件
4	抗粘扣循环上 / 卸扣试	10	次
5	接头的密封性能	1	件
6	高温高压电化学实验	10	组
7	镀层理化性能评价	4	组
8	高温高压浸泡试验	8	组 · 小时
9	SEM 测试	20	小时
10	EDS 测试	10	组
11	XRD	10	组
12	点蚀评定	5	组

(3) 缓蚀剂

注气井：采用防腐气密封隔器配套环空保护液，保障油套管不受腐蚀；

腐蚀监测：采用腐蚀挂片监测油套管腐蚀速率，定期进行缓蚀剂残余浓度监测，确保防腐效果。

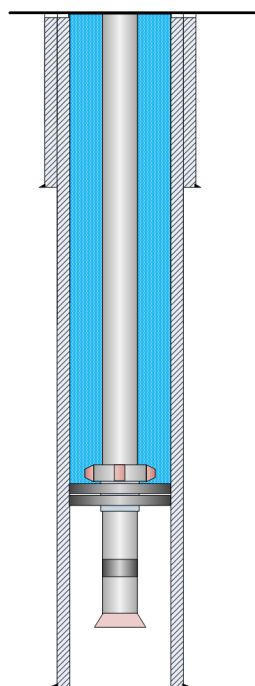


图 2-2 环空保护液示意图

3 结论

火驱尾气的爆炸极限、临界含氧量随着温度的升高而降低，也就是说，温度的升高扩大了火气尾气爆炸的含量范围以及减小了对氧气的依赖度。240℃、6MPa 的环境下爆炸极限为 0.89-55.96%，临界含氧量为 5.52%，考虑到危险性及计算误差，设计安全系数为 1.5，火驱尾气中氧含量 1.01-2.1%，不会发生爆炸，但要加强火驱尾气中氧气含量的检测。

2、常见管柱材质在火驱尾气腐蚀条件下的腐蚀速率均大于 0.076mm/a，需采用超级 13Cr 材质或镀层等方式提高耐腐蚀，同时需加强气体组分检测及腐蚀监测，保障安全生产。

参考文献

- [1] 田欣. 储罐及埋地管网区域性腐蚀与防护研究[D].黑龙江:大庆石油学院,2007.
- [2] 利进飞. 油气管线的腐蚀与防护[J].西安石油大学学报(自然科学版),2017,28(3):37.
- [3] 许满贵. 工业可燃气体爆炸极限及其计算[J].西安科技大学学报,2005(2):9-12.