

'94 国际石油与石油
化工科技研讨会论文

火烧油层技术开采重油油藏

沈 燮 泉

(石油勘探开发科学院热采所)

1994 年 9 月 北京

火烧油层技术开采重油油藏

摘 要

本文介绍火烧油层技术的驱油机理、特点及实用性,并概述据此机理建成的我国火驱物理模型配套装置及其功能;利用该模拟装置对我国 300~500m 浅层、3~6m 薄层、6000~10000mPa·s 重油油藏的油样进行了燃烧参数的筛选试验,并获得了该油田实施火驱开采可行性研究的成果。最后的研究结论是:

(1)该配套装置较好地模拟了油层燃烧过程的热平衡条件,试验结果能有效地用于火驱数模进行效果预测和开发设计,以及指导现场火驱实施。

(2)证明了类似上述油藏特性的油田,利用火驱开发是可行的,其采收率可达 49.7%, $AOR=3385m^3(\text{空气})/m^3(\text{油})$ 。

(3)火烧油层技术具有综合驱油的特点,是一种充分利用石油资源较彻底的开采技术,特别用于开采残余油藏更具有发展潜力,因为残余油各油田是大量存在的。

引 言

根据采收率筛选标准,蒸汽驱的适用油层厚度应大于 6m,而较薄的重油油藏是大量的。为了充分利用重油资源的目的,对我国一个薄、重油藏在火烧油层(火驱)物模和数模试验研究的基础上,进行了该油藏特征的火驱可行性研究,其研究结果具有现实的意义。

火驱驱油机理和特点

火驱是提高油田采收率的重要方法之一。它与其它采油方法不同之处,在于它是利用油层本身的部分裂化产物作燃料,不断燃烧生热,依靠热力等多种驱动的作用,实现提高采收率的目的。

其驱油机理(图 1)是:首先把注入井的油层点燃,并不断向油层内注入氧化剂助燃,形成一个移动的燃烧前缘,热源前方的原油受热降粘、蒸馏,蒸馏后的轻质油气和燃烧烟气驱向前方;未被蒸馏的重质碳氢化合物在高温下产生裂化分解,最后留下的裂化产物(焦炭),作为维持油层继续燃烧的燃料,使油层燃烧不断蔓延,在高温下油层束缚水,注入水及燃烧生成水变成蒸汽,携带热能

传递给前方油层。从而形成多种驱动作用的复杂过程,把原油驱向生产井。

从其驱油机理不难看出,它具有以下综合特性:

(1)具有注气保持油层压力的特点,其面积波及系数比气驱高,五点井网气驱为 45%,火驱为 70%。

(2)具有水驱相似的面积波及系数,但它的驱油效率比水驱要高得多。

(3)具有蒸汽驱和热水驱的作用,但火驱的热效率更高。同时,由于裂化结果,提高了产物轻质油成分。

(4)具有注入 CO_2 的性质,但节省了制造 CO_2 的配套设备。

(5)具有混相驱降低原油界面张力的作用,但它的驱油效率和波及系数较混相驱高得多。

由于火驱的热源是移动的,因此它的井网、井距不像化学驱、蒸汽驱那样受到严格限制。

火驱物理模型配套装置

物理模型是研究火驱的基础,为了对现场火驱实施方案提供科学依据,根据其驱油机理,设计研制了如图 2 所示的管状物模配套装置。其主要

注:油藏基本特征和井网距部分由河南石油勘探局提供,深表谢意。

结构为：装砂内径(D_i)170mm,装砂长度(L)2000mm,轴向上装有11对温度补偿器和11对多点温度和压力传感器;利用气相色谱仪自动分析进出口气体的组分,利用气体质量流量控制器、湿式流量计分别控制和测量进出口气体流量,利用微机系统实现温差控制、数据采集及数据处理。物模装置可轴向转动 $\pm 60^\circ$ 倾角。

火驱管状物模的关键在于模拟实际油层在燃烧过程中的热平衡条件。这是因为火驱热源是移动的,燃烧前缘的温度很高($400\sim 800^\circ\text{C}$),若不模拟实际油层的热平衡条件,则模拟试验中的径向热损失要比实际油层大得多。欲使燃烧持续下去,必须要使燃烧速度比实际油层快得多才行。这样,模拟试验的结果就失去了指导现场的意义,也就失去了提供火驱物模进行动态预测和方案设计价值。因此,能否模拟实际油层的热平衡条件,是衡量火驱物模水平的关键。对火驱管状模型而言,只要模拟了径向热平衡条件,则轴向就与实际油层一致了。

1. 模拟热平衡条件

模拟热平衡条件基于如下假设。

(1)在单位体积油层内发生的热传导过程是一维的,在任一横截面上的温度分布是均匀的。

(2)除热传导外,无其它形式的导热。

(3)径向温度分布是线性的。

根据上述假设,按传热学原理,先计算实际油层在燃烧过程中,单位体积油层在单位时间内向顶、底盖层的热损失;有

$$Q_p = (K_o/H_o + K_d/H_d)(T_i - T_p)/H \quad (1)$$

Q_p 的单位为($\text{kJ}/(\text{h} \cdot \text{m}^3)$)。

计算模型装置在燃烧过程中,每一测量控制段(热补偿器)单位体积油砂在单位时间内的径向热损失为

$$Q_m = 2K_s \Delta t / R_i^2 \ln(R_o/R_i) \quad (\text{kJ}/\text{h} \cdot \text{m}^3) \quad (2)$$

热平衡条件时:

$$Q_p = Q_m \quad (^\circ\text{C})$$

$$\Delta t = \frac{R_i \ln(R_o/R_i)}{2K_s H} (K_o/H_o + K_d/H_d) \cdot (T_i - T_p) \quad (^\circ\text{C}) \quad (3)$$

式(3)中: K_s 、 K_o 、 K_d :分别为模型壳体、顶盖层、底盖层的导热系数($\text{kJ}/\text{h} \cdot \text{m}^\circ\text{C}$);

H 、 H_o 、 H_d :分别为实际油层顶底盖层厚度(m);

T_i 、 T_p :分别为油层燃烧过程不同位置温度和原始温度, ($^\circ\text{C}$);

R_i 、 R_o :分别为管状模型内、外半径(m)。

将方程(3)编制成软件,利用微机程序系统跟踪控制燃烧过程每一测温控制段内外壁的温差,以实现模拟实际油层在燃烧过程的热平衡条件。测温控制段越短,模拟也越精确。

2. 火驱管状模型配套装置的主要功能:

(1)能模拟实际油层的热平衡条件;

(2)能模拟油层倾角对火驱的影响;

(3)能进行燃烧方式、燃烧参数等筛选实验的研究;

(4)能进行燃料生成量及燃料利用量影响因素的实验研究;

(5)能进行燃烧机理,包括燃烧前缘位置与产液量变化规律等实验研究;

(6)能进行火烧增产、增注及焦化防砂技术等实验研究。

火驱可行性研究

利用这套火驱物模和火驱数模,对河南井楼油田零区薄、重油藏进行了火驱可行性研究。

表 1 零区油藏特征及流体物性表

油藏特征	油层倾角	11.3°	油层深度	327~385m
	油层厚度	5.45 m	孔隙度	33%
	渗透率	2.5 μm^2	含油饱和度	60%
	油层温度	31 $^\circ\text{C}$	油层压力	3.5 mPa
	顶底盖层岩性	泥质砂岩和泥质粉砂岩		
油体物性	平均厚度	3.3 m 油层密封性好		
	油层原油粘度	6000 mPa·s	脱气原油粘度	10000 mPa·s
	原油密度	0.95 T/m ³	沥青胶质含量	31.5%~42.7%
	含蜡量	6%	含硫量	0.25%
	凝结点	0~8 $^\circ\text{C}$	原油发热值	42856 kJ/kg

油藏基本特征和井网井距

零区位于井楼鼻状构造中部,构造由东向西抬高,倾角 11.3° (图 3)。目的层为第三系 III_2 砂层组,埋藏深度 $327\sim 385\text{m}$,平均油层厚度 5.45m ,孔隙度 0.33 ,含油饱和度 0.6 ,渗透率 $2.5\mu\text{m}^2$,原油密度 $0.95\text{kg}/\text{cm}^3$,油层粘度 $6000\text{mPa}\cdot\text{s}$,脱气粘度 $10000\text{mPa}\cdot\text{s}$,胶质沥青含量 $31.5\%\sim 42.7\%$,凝固点 $0^\circ\text{C}\sim 8^\circ\text{C}$,发热值 $42856\text{kJ}/\text{kg}$ (表 1)。顶、底盖层为泥质砂岩和泥质粉砂岩,平

均厚度 3.3m ,油层密封性好。

试验区由已完钻的 13 口井组成 4 个反五点井网,注采井距 100m ,生产井距 141m ,面积 8 公顷,地质储量 85816 吨 (图 3)。

模拟试验结果

利用试验区油样,模拟试验结果见表 2。

表 2 零区原油物模试验结果表

(1)油样自燃温度	413 $^\circ\text{C}$
(2)燃料生成量	$30\sim 37\text{ kg}/\text{m}^3$,占储量的 $9.2\%\sim 11.4\%$
(3)燃烧参数筛选结果	
· 合理通风强度	$0.5\sim 3\text{ m}^3/\text{h}\cdot\text{m}^2$
· 燃烧速度	$0.002\sim 0.114\text{m}/\text{d}$
· 燃烧率	$358\sim 600\text{ m}^3(\text{空气})/\text{m}^3(\text{油砂})$
· 风水比(AWR)	$400\sim 800\text{m}^3(\text{空气})/\text{m}^3(\text{水})$
· 产液规律	见图 4、5、6、7

表 3 各阶段燃烧参数预测结果表

火线距离 $r_i - R_i$ m	燃烧体积 $V_i = \pi(R_i^2 - r_i^2)h\rho$ m^3	阶段空气量 $Q_i = V_i A_i$ ($\times 10^4\text{m}^3$)		火线速度 $V_i = \frac{24\varphi F}{A_i}$ (m/d)		燃烧时间 $t_i = \frac{R_i - r_i}{v_i}$ (d)		平均日注空气量 $q_{Ai} = \frac{Q_i}{t_i}$ ($\times 10^4\text{m}^3/\text{d}$)	通风强度 $\varphi_i = \frac{q_{Ai}}{48\pi R_i h}$ ($\text{m}^3/\text{h}\cdot\text{m}^2$)	
		阶段	累计	平均	最小	阶段	合计		平均	最小
0.1-16	3285.7	164.3	164.3	0.144	0.054	111.1	111.1	1.48	3	1.125
16-32	9857.1	492.9	657.2	0.096	0.054	166.7	277.8	2.96	2	1.125
32-48	16428.5	821.4	1478.6	0.072	0.045	222.2	500.0	3.70	1.5	0.937
48-64	22999.9	1115.0	2628.6	0.0624	0.041	256.4	756.4	4.485	1.3	0.853
64-75	19624.3	781.2	3609.8	0.072	0.05	152.8	909.2	6.422	1.5	1.043
备注 $h=5.45\text{m}$, $P=0.75$, $A_s=500\text{m}^3/\text{m}^3$										

表 4 湿烧阶段动态预测表

燃烧距离 $r-R$ (m)	采收率 $K = \frac{Q_p}{Q_o}$ (%)	燃烧(生产)时间 $t_i = \frac{R-r}{v_i}$ (d)	井组产油量			年产油速度 $V_o = \frac{Q_p}{Q_o}$ (%)	注 入 量		耗气(水)量		动力费 $W = AOR \times F_A + WOR \times F_w$ ($\text{元}/\text{m}^3$)
			可产量 $Q_p = KQ_o$ (m^3)	年产量 $Q_p = \frac{3650Q_o}{t_i}$ (m^3/Y)	日产量 $Q_p = \frac{Q_p}{t_i}$ (m^3/D)		空气 $Q_A = VA_s$ ($\times 10^4\text{m}^3$)	水量 $Q_w = \frac{Q_A}{AWR}$ ($\times 10^4\text{m}^3$)	耗空气 $AOR = \frac{Q_A}{Q_p}$ (m^3/m^3)	耗水 $WOR = \frac{Q_w}{Q_p}$ (m^3/m^3)	
0.1-16	5.1	111.1	1094.1	3594.5	9.85	5.1	164.3	—	1501.7	—	45.1
16-32	9.9	166.7	2124.0	4650.7	12.74	21.68	492.9	0.821	2320.8	3.9	73.5
32-48	11.8	222.2	2531.5	4158.5	11.40	19.4	821.4	1.369	3244.7	5.4	102.7
46-64	10.3	256.4	2209.7	3145.7	8.62	14.66	115.0	1.917	5204.3	8.7	164.8
64-75	7.6	152.8	1630.5	3894.8	10.67	18.15	981.2	1.635	6017	10.03	190.5
井组合计平均	44.7	909.2	9589.8	3850	10.55	17.94	3609.8	5.742	3764	6.0	118.9
备注 反五点井网,注采井距 100m ,井组储量 $Q_o=21454\text{m}^3$, $A_s=500\text{m}^3(\text{气})/\text{m}^3(\text{油层})$,风水比 $AWR=600\text{m}^3(\text{气})/\text{m}^3(\text{水})$,体积波及系数 0.6 , $f_A=0.03\text{元}/\text{m}^3(\text{气})$, $f_w=1.0\text{元}/\text{m}^3(\text{水})$											

表 5 火烧井组综合经济指标

井组	采收率 $K\%$	燃烧(生产)时间 t_i	产油 量		年采油速度 $S_o = \frac{365Q_p}{t_i Q_o} \%$	注 入 量		耗空气(水)量		动力费用 $W = AOR f_A + WOR f_w$ 元/ m^3 (油)
			可采量 $Q_p = K Q_o$ m^3	日产量 $Q_r = \frac{Q_p}{t_i}$ m/d		空气 $Q_A = V A_i$ $\times 10^3 m^3$	水量 $Q_w = \frac{Q_A}{AWR}$ $\times 10^4 m^3$	耗空气 $AOR = \frac{Q_A}{Q_p}$ $m^3(气)/m^3(油)$	耗 水 $WOR = \frac{Q_w}{Q_p}$ $m^3(气)/m^3(油)$	
湿烧	44.7	909.2	9590	10.6	17.95	3609.8	5.742	3764	6.0	116.9
余热驱	5.0	144.5	1073	7.4	12.63	/	7.95	/	7.4	7.4
合计 (平均)	49.7	1053.7	10663	10.12	17.22	3690.8	6.537	3385	6.13	107.7
备注			地质储量 $Q_o = 21453.6 m^3$, $F_A = 0.03$ 元/ m^3 (空气), $F_w = 1.0$ 元/ m^3 (水)							

产液规律一般为:当燃烧前缘为注采井距 20%~30%时,开始产液见效;当 40%~60%时,热效明显,产量成十倍地增长,原油密切、粘度下降,含水率和水中 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 Fe^{2+} 离子增加,pH 值下降;当 75%时,产油量下降,含水率上升快,85%的油量已被产出;当 85%时,油井井底温度上升快,原油粘度增加,乳化严重,含水率高达 85%(图 4~图 7)。

根据燃烧前缘位置的上述变化规律,为防止油井高温损坏,减少腐蚀,保证原油质量,降低风油比(AOR),应选择燃烧前缘位置为注采井距 75%时,停止注汽,改为注水,以充分利用油层的余热,将剩余原油驱向生产井为宜。

利用火驱数模,按零区油藏特征和物模筛选资料,对注采井距为 100m 的一个反五点井组干式和湿式燃烧阶段采收率预的结果见图 8 和表 3~表 5。

选择的平均通风强度(φ)1.3~3 m^3/hm^2 之间,燃烧率(A_o)500 m^3 (空气)/ m^3 (油砂),风水比(AWR)600 m^3 (空气)/ m^3 (水),垂直燃烧率(E_v)75%,波及系数(E_R)60%,燃烧前缘距离(L)75m 的条件下,采收率(E_o)44.7%,耗气量(AOR)3764 m^3/m^3 ,耗水量(WOR)6 m^3/m^3 ,累计燃烧时间(ΣT)909 天(表 3 和表 4)。

注水利用余热阶段的效果是根据现场统计资

料,我国两个燃烧井组注水利用余热的采收率分别为 5.1%和 9.1%,罗马尼亚 8 个井组提高采收率在 4%~9%之间。根据零区油藏特性和燃烧前缘距离,在注水强度 10 $m^3/d \cdot m$,注水量为剩余孔隙体积 2 倍(即为 7948 m^3)条件下,取采收率统计低值 5%计算,注水余热利用阶段的耗水量(WOR)为 7.4 m^3/m^3 ,开采时间 144.5 天。其综合效果为最终采收率 49.7%,开采时间 1053.7 天,耗气量(AOR)为 3385 m^3/m^3 ,耗水量(WOR)为 6.1 m^3/m^3 。与零区目前蒸汽吞吐油气比(OSR)0.43 m^3/m^3 、采收率 17%比较,火驱的动力费用低 28%,采收率约高 3 倍。

结 论

(1) 研制的火驱管状物理模型配套装置,采用了微机程序跟踪控制和温度、压力、注、产气量等参数的控制、采集、处理系统,并用气相色谱仪对注、产气的组分含量进行监测、处理。模型可以用于火驱机理、燃烧参数、燃烧方式及对火驱效果影响因素的实验研究。

(2) 研究结果表明,类似井楼零区的薄、重油特性油田,用干、湿燃烧结合的开采方式是可行的。该研究成果具有指导意义。

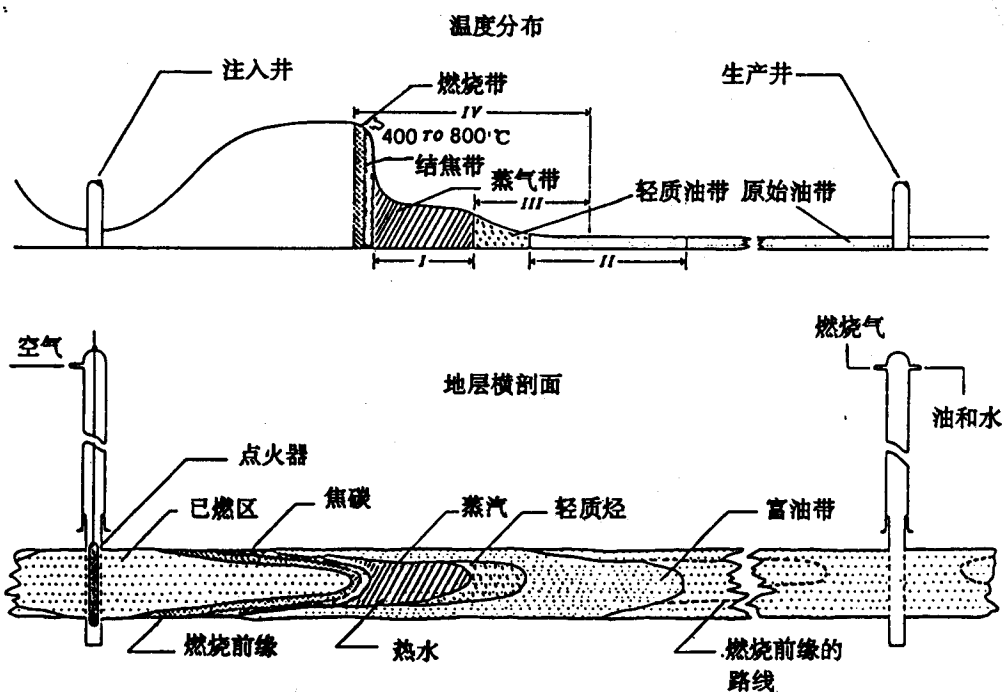


图 1 正向燃烧驱油机理示意图

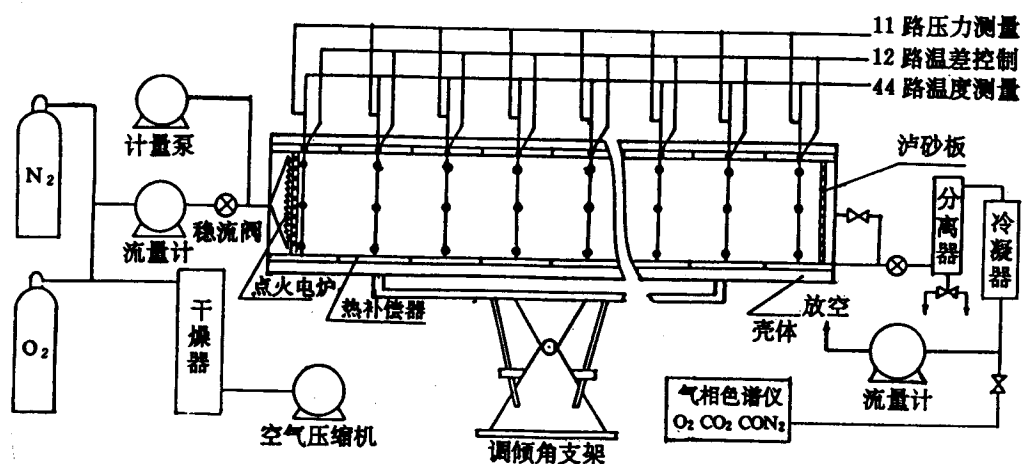


图 2 火驱管状模型流程示图

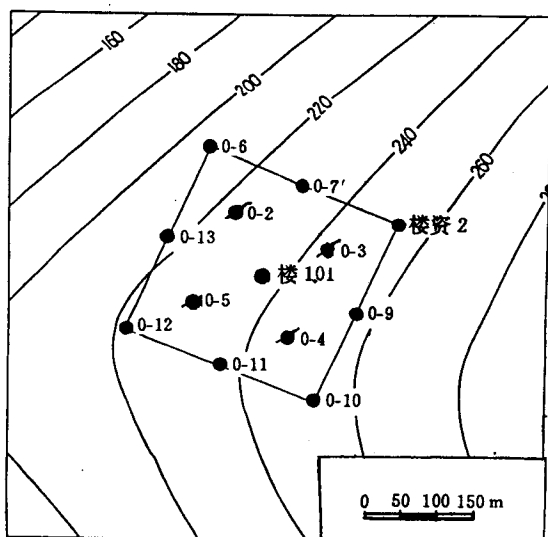


图 3 井楼零区试验区构造井位图

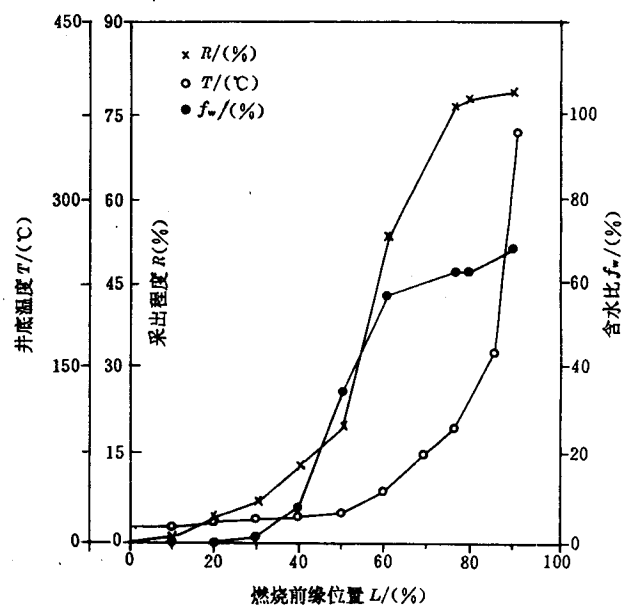


图 4 燃烧前缘位置与产量、温度、含水率关系曲线

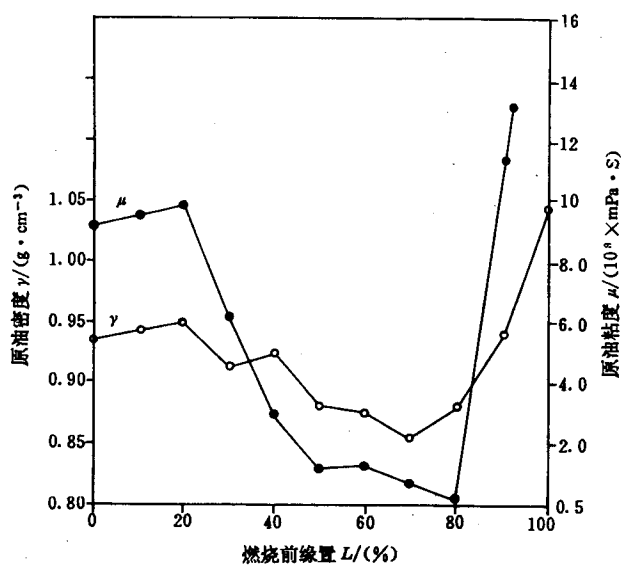


图 5 燃烧前缘位置与原油密度、粘度关系曲线

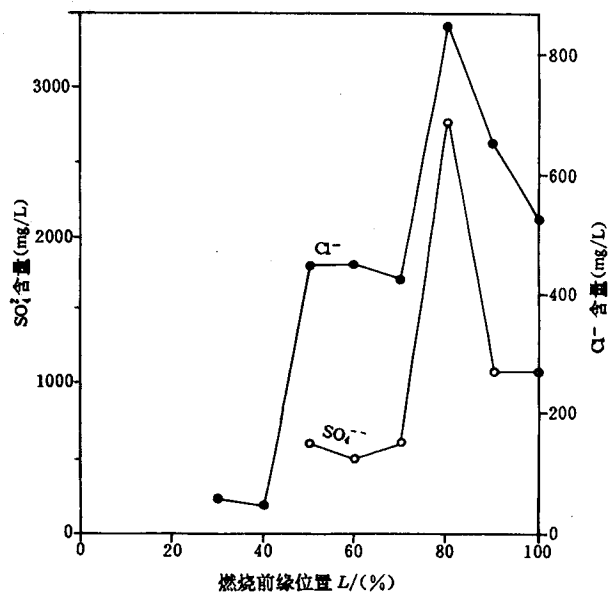


图 6 燃烧前缘位置与水中 Cl^- 、 SO_4^{2-} 变化曲线

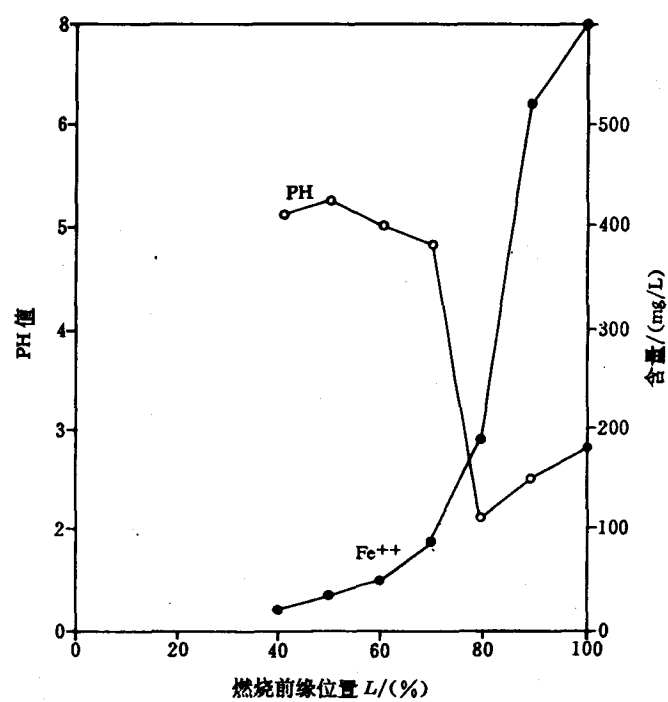


图 7 燃烧前缘位置与水中 pH 值 Fe^{2+} 变化曲线

石油物探局制图印刷厂
照排印刷