

文章编号 :0253-2697(2005)01-0074-05

聚合物驱油技术在大庆油田的应用

王德民 程杰成 吴军政 王 刚

(大庆油田有限责任公司 黑龙江大庆 163453)

摘要:利用室内研究与现场试验相结合的手段和方法,总结分析了大庆油田 7 年多的聚合物驱油生产实践过程,研究了聚合物驱油提高采收率的实际值,分析了提高采收率的主要影响因素,论述了获得均匀聚合物驱前缘及降低聚合物驱油生产成本的方法,大庆油田的应用实践对聚合物驱油技术在中国的进一步推广应用具有一定的指导意义。

关键词:大庆油田;聚合物;驱油技术;应用效果;采收率

中图分类号:TE357.431 **文献标识码:**A

Application of polymer flooding technology in Daqing Oilfield

WANG De-min CHENG Jie-cheng WU Jun-zheng WANG Gang

(Daqing Oilfield Company Limited, Daqing 163453, China)

Abstract: According to the results of the research in the laboratory and field tests, the experiences of polymer flooding in Daqing Oilfield in seven years are analyzed. The actual recovery in the field and the major factors influencing recovery efficiency are investigated. The methods for enhancing recovery efficiency, the measures to obtain a uniform polymer flooding front and ways to lower the costs for producing crude oil by polymer flooding are discussed. The effectiveness of polymer flooding technology applied in Daqing Oilfield can provide some references for further application of polymer flooding in China.

Key words: Daqing Oilfield; polymer; flooding technology; applied effectiveness; recovery efficiency

1 概 述

截止到 2003 年底,大庆油田已投入聚合物驱工业化区块 26 个,面积达 245.8 km²,动用地质储量为 4.26 × 10⁸ t,投入聚合物驱 4222 口井。其中注入井 1945 口,生产井 2277 口。累积注入聚合物干粉为 41.9 × 10⁴ t,累积采油量为 6036.8 × 10⁴ t,累积增油 2550.6 × 10⁴ t。2003 年,大庆油田工业化聚合物驱全年产油量为 1044.4 × 10⁴ t,加上工业化聚合物驱区块的空白水驱产量和三次采油试验区的产量,大庆油田三次采油年产量已达到 1234.9 × 10⁴ t,累积采油量为 6723.2 × 10⁴ t。

2 现场应用效果

2.1 注聚合物后采收率的提高状况

北一断西区块是大庆油田第一个工业化规模的现场试验区,区块井距为 250 m,于 1993 年开始进行聚合物驱,比水驱提高采收率 12.6%。从 1996 年开始,在其余 6 个总面积为 59.1 km² 的区块 1012 口井上进行

了聚合物驱工业化推广应用。除喇嘛甸南东块外,所有区块效果都好于北一断西区块,这表明工业化规模现场应用的采收率提高值高于工业化试验区。分析结果表明,喇嘛甸南东块驱油效果不好,是由于该区块注聚合物井和采出井的油层连通程度太低造成的。

图 1 是 3 口密闭取心井的岩心驱油效率曲线,从中可以看出,占 38% 的有效厚度注聚合物后,其驱油效率高于水驱^[1,2],这表明聚合物驱能提高产油层的

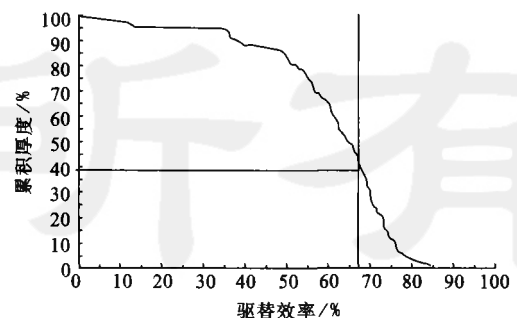


图 1 密闭取心井聚合物驱后的岩心驱油效率

Fig. 1 Displacement efficiency of cores of pressure coring after PAM flooding

基金项目:国家重点基础研究发展规划“973”项目(G1999022500)部分成果。

作者简介:王德民,男,1937年2月生,1960年毕业于北京石油学院,现为大庆油田有限责任公司科学技术委员会副主任,教授级高工、中国工程院院士。E-mail:wangdm@daqing.com

驱油效率^[3,4],也表明 97.3% 的厚度见到驱油效果,提高了体积波及系数。在大庆油田,对于相似的水驱油层,只能有约 80%~90% 的厚度见到驱油效果。通过聚合物驱提高原油采收率 13%,主要是由于提高驱油效率和体积波及系数这两个因素而实现的,每一个因素大约占提高原油采收率值的 50%。

2.2 注聚合物后油藏的非均质改善程度

在聚合物注入段塞结束时(大约是 0.6PV),从表 1 看出,不同井的含水率和聚合物采出浓度存在很大

差异。实验室和现场数据都表明,聚合物驱可以很大程度地改善油藏的非均质性,增加体积波及系数。但是在大庆油田,聚合物驱也不能从根本上克服非均质性的影响,流度控制也是如此,这可以从聚合物采出浓度变化得知。聚合物采出浓度逐渐地升高而后又逐渐降低,表明聚合物首先通过油层的一小部分(高渗透率层),然后逐渐增加通过的厚度。这与聚合物采出浓度的减少是一致的。因此,除聚合物驱外,为了得到更为均匀的聚合物驱前缘,同时也应该采用其他措施。

表 1 聚合物段塞注入后含水率和产出聚合物浓度变化情况

Table 1 Difference in water-cut and produced polymer concentration after injecting polymer plug

含水率	井数	所占比例	产出聚合物浓度/(mg·L ⁻¹)							
			>570		450~570		350~450		<350	
			井数/口	占比/ %	井数/口	占比/ %	井数/口	占比/ %	井数/口	占比/ %
>90	61	28.37	26	42.62	13	21.31	13	21.31	9	14.75
90~85	49	22.79	20	40.82	10	20.41	10	20.41	9	18.37
85~80	47	21.86	19	40.43	10	21.28	6	12.77	12	25.53
<80	58	26.98	14	24.14	14	24.14	5	8.62	25	43.10
总计	215	—	79	36.74	47	21.86	34	15.81	55	25.58

2.3 聚合物的采出程度

在聚合物驱结束时,可采出 30%~50% 注入的聚合物。对于较均质的油藏,采出较少的聚合物;反之也是如此。当变异系数 V_{DP} 大于 0.6 时,占聚合物驱 90% 的开采期间,生产井有聚合物采出,产出聚合物最大浓度约是注入浓度的 2/3。因此,必须考虑产出聚合物对采出、集输及采出液处理系统的影响。

3 提高采收率的影响因素

3.1 油藏条件对提高采收率的影响

1998 年,对油田北部油藏非均质程度比较严重的区块开始进行聚合物驱油,从北到南 4 个区块的变异系数分别为 0.75~0.81、0.68~0.78、0.6~0.65 和 0.58。示踪剂分析表明,在不同方向上的流体速度存在差异,分别为 5.8m/d、5.5m/d、2.6m/d 和 1.8m/d,含水率和聚合物产出浓度与聚合物注入量的关系曲线分别见图 2 和图 3。油藏越均匀,生产井聚合物驱见效时间越长(4 个区块聚合物注入量分别为 30.5mg/L、58.1mg/L、128mg/L 和 127mg/L);生产井见效越慢,含水率下降越快,有时含水率上升也较快。造成上述现象的原因是,当油藏是比较均匀时,聚合物流体推进就比较均匀(比非均质油藏推进速度慢),需要很长时间生产井才见效并见到聚合物,整个油层将同时见效,因此含水率下降和上升都较为迅速。

萨尔图南区块聚合物驱目前将要结束,已提高采收率 12.69%,与北部区块非均质油藏相比提高采收

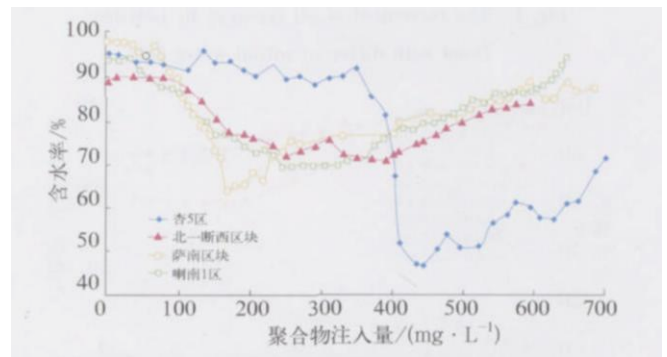


图 2 4 个区块含水率与聚合物注入量的关系曲线

Fig. 2 Water-cut of four areas with polymer flood

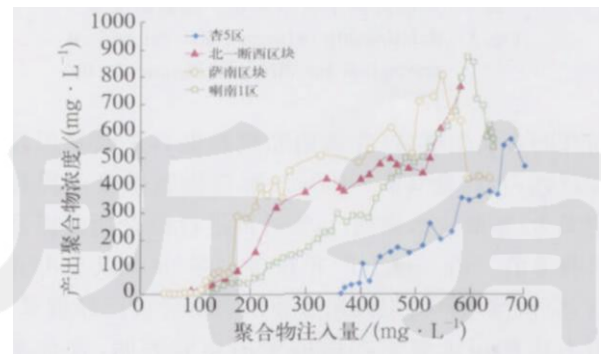


图 3 4 个区块产出浓度与聚合物注入量的关系曲线

Fig. 3 Produced polymer concentration of four areas with polymer flood

率幅度基本相当。当油藏非均质程度越高,体积扫油效率就提高幅度越大;当油藏越均匀,被聚合物流体波及到体积越大的,驱油效率就越高。体积扫油效率和驱油效率这两个因素基本保持平衡,当一个增加,另一

个就减少;反之亦然,因而提高的采收率值几乎是一样的。现场应用结果表明,对于大庆油田,变异系数 V_{DP} 在 0.6 ~ 0.8 范围内变化时,采收率提高幅度均为 12% ~ 15%,油层的连通度、聚合物的分子量和注入量以及其他因素对采收率的影响比变异系数的影响更大。

3.2 聚合物驱的不同时期对提高采收率的影响

对于初始为水驱而后为聚合物驱的油藏采收率提高值见图4。聚合物驱开始前,采收率与含油饱和度(或含水率)的关系见图5。从图4可见,聚合物驱开始

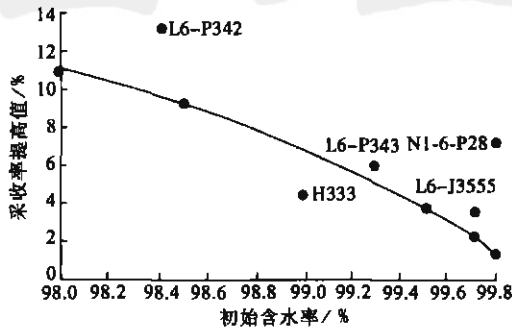


图4 初始含水率不同情况下的采收率提高值
Fig.4 The increment of oil recovery by polymer flood with different initial water-cut

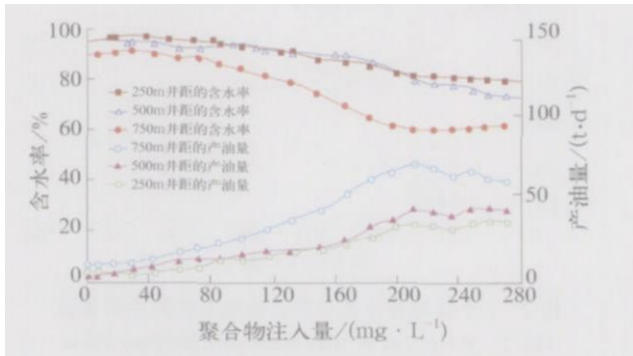


图5 不同井距下含水率和产油量的关系
Fig.5 Relationship between water-cut and oil production for different distance wells

前井的含水率越高(含油饱和度越低),采收率提高程度越低,大约是 2% ~ 10%。聚合物驱采收率提高值定义为:水驱含水率达 98% 后再进行聚合物驱提高的采收率值。当一口生产井在含水率 98% 以上再开采时,应该被计算为提高采收率的一部分油已经被采出。用大庆油田天然岩心做的室内实验表明,含水率从 98% 以后再提高 1% 的含水率,又有 6% ~ 8% 的地质储量被采出。这意味着高含水井进行聚合物驱时(含水率高于 98%),采收率提高值应低于含水率 98% 时的提高值。各种类型井的采收率提高值折算到含水率 98% 为起点时大致是相同的。

聚合物驱前含油饱和度越高,含水率降低幅度和产量上升幅度越大,与原注水井井距在 250m、500m

和 750m 时的采出井相应数据分别是:含油饱和度分别为 53.2%、53.6% 和 55.3%;含水率分别降低 16.6%、22.4% 和 29.7%;油井产量分别增加 379%、590% 和 610%。

3.3 不同井网条件对提高采收率的影响

对实验室的均质和非均质岩心 ($V_{DP} = 0.72$) 研究发现,采收率分别提高 6% 和 11%;密井网(井距为 108m)现场试验提高采收率 11.6% ~ 14%^[5],大井距(250m)提高采收率 12% ~ 15%。由此可见,当井距变大,采收率%提高幅度也变大。上述现象是由于大庆油田油藏的平面非均质性严重造成的,井距越大,井间的非均质性越严重。聚合物驱可以有效降低井间的非均质性。可以通过示踪剂测量流体的流动速度,聚合物流体速度比水驱速度低 46% ~ 78%,并且各方向速度相差也不大。因为大井距聚合物驱区域的非均质性和波及效率都高,所以采收率提高值也高。

井网优化依赖于油藏的平面非均质性。井间距离增大,井间非均质性并不连续增长,而油层的连通度将降低,这使得采出程度降低。

4 现场实际应用的影响因素

4.1 配制聚合物母液用水矿化度的影响

随着配制聚合物母液用水矿化度的增加,聚合物溶液的粘弹性将随之降低,这降低了聚合物驱的体积波及系数和驱油效率。

1998 年进行了用污水(矿化度为 3800mg/L)配制非抗盐聚合物的现场试验,试验区面积为 1.6km²,油藏条件有利于聚合物驱。但试验结果表明,含水率降低和产油量增加幅度都低于用清水配制聚合物母液的相邻区块(矿化度为 600mg/L),预计采收率仅提高 5.48%,低于相邻区块采收率提高值 50%。

为了解决这个问题,大庆油田采用运河引来的嫩江河水(矿化度为 200 ~ 300mg/L)及使用耐盐聚合物,后者已经进入现场试验阶段。

4.2 采出井和注入井井间油层连通关系的影响

大庆油田大多数的聚合物驱井网为五点法,如果一口产出井的油层与对应的 4 口注入井相连通,连通率为 100%,这种情况下,因为油来自各个方向,所以产油量增加较多;如果仅与一口注入井相连通,连通率为 25%,增加的产油量较少。

连通率和增油量之间的实际关系见表 2 和图 6。从表 2 可知,含水率降低与油层的连通率也有很大关系。为了增加连通率,应在井网设计时重点考虑。对于现有井网,可以采用钻加密井或通过补射产出井的相应层来实现。

表 2 连通率与增油量和含水率下降的关系

Table 2 Relation of interconnectedness with oil increment and water-cut decrease

连通率 / %	井数 / 口	有效厚度 / m	剩余油饱和度 / %	含水率下降 / %	累积产油量 / (t · m ⁻¹)
< 40	31	12.2	53.2	13.0	468
40 ~ 70	26	13.3	53.3	26.1	1021
> 70	33	14.8	53.1	31.7	1815
平均	90	13.5	53.2	25.1	1179

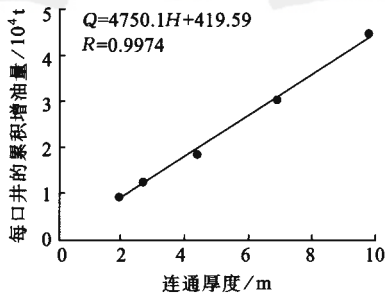


图 6 增油量与有效连通厚度之间的关系

Fig. 6 Relationship between oil increment and thickness of connected pay zone

4.3 层间渗透率级差的影响

当油层是多层时,层间有较大的渗透率级差。低渗透层进入的聚合物较少,整体增油效果将下降。现场数据表明,当渗透率级差高于 2.5 ~ 3 时,采收率将降低 1% ~ 3%。

当层间有连续的不渗透夹层时,调整渗透率级差的最好方式是采用分层注入,控制进入每一层的流量。在北二东块,11 口注入井采用了分层注入。1.5 年以后,周围的 19 口产出井还仍然有效。每口井含水率降低了 1.8%,增油量为 31t/d,聚合物浓度从 625mg/L 降低到 527 mg/L。一般情况下,流体进入高渗透层的比例从 81.8% 下降到 66.4%,进入低渗透层的比例从 18.2% 上升到 33.6%。

当层间不存在连续的不渗透夹层时,调整处在不同渗透率层流体前缘的最好方式是采用深度调剖。在北一断西北块,对 14 口注入井采用了深度调剖(与之相邻的有 54 口生产井)。将这 54 口井与其他邻近的 183 口井进行效果对比,受效的 54 口生产井的含水率下降幅度较大,产出井见到的聚合物浓度较低。但是,并非所有的深度调剖井都有同样好的结果,许多井在初期阶段有好的效果。有一些井与正常井比较,在整个生产周期内都有比较好的效果;而另外一些在初期阶段有好效果的井,后期效果与正常井是一样的。出现上述现象的原因仍须进一步证明,但不渗透夹层的

连续性和调剖剂的实际到达深度可能是其主要原因。

当停止注入聚合物时,含水率增长很快;当连续不停地注入聚合物时,含水率下降快,因此增加注聚合物量可以提高采收率。

5 均匀聚合物驱前缘的获取方法

得到均匀聚合物驱前缘的方法除了上述提到的聚合物分层注入和深度调剖方法外,还有其他一些方法。

(1) 降低产出井的流压:可以通过调整泵的参数或用大排量泵(例如用潜水电泵代替抽油泵)。在北一断西东块,22 口生产井采取措施后流压都得到降低。每口井平均日产液增加了 49.3% (75t/d),日产油增加了 50% (28 t/d),含水率下降了 0.8%。此后,含水率高于邻近未采取措施的井,因而不同井的含水率很快上升到大致相等的水平,累积增油量也没有显著增加(见图 7)。

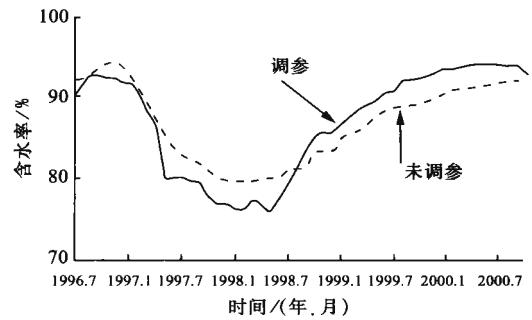


图 7 调参井与未调参井的含水率

Fig. 7 Comparison of water-cut for wells with changed and unchanged pumps

(2) 生产井的增产措施:对于聚合物驱见效慢的井,可以采用压裂措施来改善前缘速度。例如在北一断西东块压裂 56 口井,压裂后每口井的产液量上升了 82.3% (71t/d),产油增加了 110% (22t/d),含水率下降了 1.8%,每口井累积增油 4330t。56 口井的含水和聚合物采出浓度与聚合物注入孔隙体积的关系与那些未压裂的井是相似的(见图 8),这表明压裂除了可以

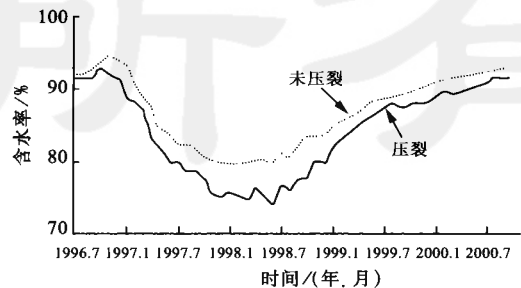


图 8 北一断西东块压裂井和未压裂井在北东区块含水率的对比关系图

Fig. 8 Comparison of water-cut of fractured and unfractured wells in NE area

提高采油速度外,还提高了采收率。

压裂和降低抽油井的流动压力都能提高产液量、采油速度以及加快流体前缘速度,然而通过降低流压,所有层提高采油速度的同时,含水率和产出液中的聚合物浓度也基本以相同的速度升高,因而原油采收率并没有提高。当压裂时,因为大庆油田主要采用的是选择性压裂(只有低渗透层被压开),所以含水率和产出液中的聚合物浓度与压裂前相比不会上升很快,因此提高了原油采收率。选择性压裂比降低油井流压对实现均匀聚合物驱前缘是一种更好的方法。

(3) 提高聚合物注入液体的浓度:提高聚合物注入液体的浓度使油层中剩余油能被较快地开采,但这种方法仅可以用在具有高注入能力的井。1996年,在喇嘛甸二区,21口井的聚合物注入浓度从1000mg/L提高到1200~1500mg/L,注入1年后,该区块含水率下降很快,产油量增加,采收率比注入正常浓度聚合物驱时又提高了0.65%。

(4) 注入高分子量的聚合物保护段塞:高分子量聚合物具有粘性高、流度控制好以及体积波及系数高等特点,有利于获得均匀的驱动前缘和高的采收率。

但是,对于注入聚合物,其分子量有一个上限值,实验室数据表明聚合物分子的回旋半径必须小于孔隙通道半径的1/5,否则聚合物溶液将堵塞油层孔隙通道。分子量为 17×10^6 的聚合物溶液堵塞了油田南部渗透率为 $100 \sim 200 \mu\text{m}^2$ 的油层,但是并没有堵塞油田北部渗透率为 $700 \sim 1000 \mu\text{m}^2$ 的油层。现场试验表明,当聚合物分子量不太高,且配置母液所用的水又达到标准时,聚合物溶液就不会堵塞油层。

(5) 其他方法:提高注入速度、油井的选择性堵水及分级射孔(先射开低渗透层,然后射开高渗透层)等方法都对得到较为均匀的聚合物驱前缘有效。

6 聚合物驱的原油生产成本

通过实际资料分析可以看出,注聚合物比注水的

化学剂成本有所增加,但由于油井含水率下降及产油量增加,并且注聚合物的吨油折旧费、维护费、服务费、人工费、水处理费及能源消耗等都有下降,且成本下降幅度与增幅大致相同,因而聚合物驱的成本与水驱相当。降低聚合物驱成本最重要的条件是实现:高的原油采收率;低含水率;高的采油速度。如果这3个因素的综合效果是好的,那么聚合物驱成本就会比水驱低,否则,其成本就会高于水驱。

7 结 论

(1) 通过聚合物驱在现场应用表明,提高采收率为12%~15%,驱油效率和体积波及系数对总体提高采收率的影响因素约各占50%。

(2) 影响采收率有许多因素,但影响最大的是配置聚合物用水的矿化度、聚合物分子量及聚合物注入量。

(3) 可以采用许多方法来得到一个较为均匀的聚合物驱前缘,其中最重要的是调整注入和产出剖面及调整注入和产出速度。

(4) 提高采油速度和采收率,降低含水率是影响聚合物驱成本的最重要因素,在一定情况下,聚合物驱成本可以比水驱低。

参 考 文 献

- [1] 王德民. 发展三次采油新理论新技术,确保大庆油田持续稳定发展(上)[J]. 大庆石油地质与开发,2001,20(3):1-7.
- [2] 王德民. 发展三次采油新理论新技术,确保大庆油田持续稳定发展(下)[J]. 大庆石油地质与开发,2001,20(4):1-5.
- [3] 夏惠芬,王德民,刘中春,等. 粘弹性聚合物溶液提高微观驱油效率的机理研究[J]. 石油学报,2001,22(4):60-65.
- [4] 王德民,程杰成,夏惠芬,等. 粘弹性流体平行于界面的力可以提高驱油效率[J]. 石油学报,2002,23(5):48-52.
- [5] 王德民,郝悦兴. 大庆油田中区两个聚合物驱现场试验的结论[R]. SPE26401,1993:1-9.

(收稿日期 2004-01-26 改回日期 2004-06-07 编辑 孟伟铭)

2004 年中国石油天然气集团公司科技十大进展

中国石油天然气集团公司科技发展部评选出 2004 年该公司科技领域的十大进展:

渤海湾滩海勘探技术取得突破性进展; 体膨颗粒深部调剖技术成功研制,现场试验获得成功; 四川气藏欠平衡钻井技术打开天然气勘探新局面; 推出物探 Geo East V1.0 数据处理解释一体化软件; 肯基亚克盐下碳酸盐岩油藏综合技术应用取得重大进展; 大幅度提高石油采收率基础研究取得重大成果; 高效天然气藏形成分布与凝析低效气藏经济开发基础研究获得新突破; EILog-100 测井系统研制完成,现场试验获得成功; 新型催化汽油辅助提升管改质技术投入商业化应用; ABS 生产工艺研究取得突破。

摘自《石油综合信息》