

聚合物驱注采井节点 系统分析方法及其应用

刘东升 主编



石油工业出版社
PETROLEUM INDUSTRY PRESS

内 容 提 要

本书主要介绍了国内外聚合物驱采油概况,节点系统分析发展历程,注入井、抽油机井和电泵井流入曲线和流出曲线计算方法,同时结合油田生产实践,阐述了聚合物驱注采井节点系统分析方法的应用。

本书内容新颖,条理清晰,许多模型都是作者多年科研工作的总结,可供油田科技人员和石油院校师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

聚合物驱注采井节点系统分析方法及其应用/刘东升等编著.
北京:石油工业出版社,2001.5

ISBN 7-5021-3360-7

I. 聚…

II. 刘…

III. 高聚物-化学驱油-采油井-节点-系统分析-研究

IV. TE357.46

中国版本图书馆CIP数据核字(2001)第24085号

石油工业出版社出版

(100011 北京安定门外安华里二区一号楼)

石油工业出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行

*

850×1168毫米 32开本 4.125印张 110千字 印1—1500

2001年5月北京第1版 2001年5月北京第1次印刷

ISBN 7-5021-3360-7/TE·2519

定价:15.00元

编 委 会

主 编：刘东升

副主编：赵玉昆 曹振发 张惠殊 贾云翔

前 言

聚合物驱作为三次采油技术，从 20 世纪 60 年代初期被提出，到目前经历了室内机理实验、现场试验到大面积工业化推广应用，现已成为国内外油田保持稳产的重要手段。特别是我国的大庆油田，随着聚驱规模的不断扩大，聚驱产量逐年上升，仅 2000 年，聚驱产量就达到了 $900 \times 10^4 \text{t}$ ，占油田总产量的六分之一，这充分表明，聚合物驱在大庆油田具有广阔的应用前景。

本书全面介绍了国内外聚合物驱采油概况，节点系统分析发展历程，注入井、抽油机井和电泵井流入曲线和流出曲线计算方法，同时结合油田生产实践，阐述了聚合物驱注采井节点系统分析方法的应用。书中的许多模型都是作者多年科研工作的总结。我们相信，本书的出版，对提高聚合物驱注采井管理水平和工作效率将起到积极的作用。

全书由刘东升、赵玉昆、曹振发、张惠殊和贾云翔编写，刘东升任主编，中国石油勘探开发研究院郑俊德教授主审。在编写过程中，得到了大庆采油四厂科技人员和大庆石油学院有关老师的大力支持和帮助，在此表示衷心地感谢。

由于作者水平有限，书中定有不当之处，敬请广大读者批评指正。

编著者

2001 年 2 月

目 录

第一章 节点系统分析方法简介	(1)
第一节 国内外聚合物驱油田采油概况	(1)
第二节 节点系统分析基本原理	(4)
第二章 聚合物溶液性质	(11)
第一节 聚合物溶液的化学性质	(11)
第二节 聚合物溶液的物理性质	(14)
第三章 注入井系统	(20)
第一节 注入工艺	(20)
第二节 聚合物溶液的地面井下管流	(25)
第三节 聚合物溶液在多孔介质中的流动	(32)
第四章 抽油机井系统	(36)
第一节 油井流入动态预测方法	(36)
第二节 排量系数影响因素实验研究及理论分析	(44)
第三节 泵吸入压力的确定方法	(70)
第五章 电泵井系统	(77)
第一节 井筒中含聚采出液压力分布计算方法	(77)
第二节 泵吸入压力曲线的绘制方法	(85)
第六章 软件结构设计	(91)
第一节 注入井软件	(91)
第二节 抽油机井软件	(92)
第三节 电泵井软件	(98)
第七章 现场应用	(102)
第一节 注入井节点系统分析	(102)
第二节 抽油机井节点系统分析	(107)
第三节 电泵井节点系统分析	(117)
参考文献	(124)

第一章 节点系统分析方法简介

第一节 国内外聚合物驱油田采油概况

一、国外油田

聚合物驱始于 20 世纪 50 年代末和 60 年代初。美国于 1964 年进行了现场试验，在 1964~1969 年间，进行了 61 个聚合物驱项目；从 70 年代到 1985 年，共进行了 183 个聚合物驱项目；1996 年，美国共有 12 个化学驱油项目，其中 11 个是聚合物驱油项目。但从发展趋势来看，1986 年以来，美国的聚合物驱油项目逐年减少，这说明，90 年代美国聚合物驱油技术的应用规模呈逐年缩小的趋势。除美国之外，前苏联的奥尔良油田和阿尔兰油田、加拿大的 Horsefly Lake 油田、法国的 Chatearenard 油田以及德国、罗马尼亚和阿曼等国都进行了聚合物驱工业化试验，均取得了一定的效果。

由于受市场经济的影响，目前国外如美国等西方国家已基本上停止进行提高采收率（EOR）试验研究，只存在少数的室内研究。在已进行的聚合物驱油试验区所采用的机采方式和水驱油时采用的机采方式比较起来没有什么不同。根据国外资料，电泵、抽油机、螺杆泵和气举等几种主要的机采方式都可在聚合物驱油的采油气水井上使用，但这并不等于说拿来用就可以了，使用时必须注意到聚合物驱油的特殊性，才能使它们正确运转，否则会产生各式各样的问题，这方面应给予充分的注意。

聚合物驱对抽油机井抽油的影响报导主要来自美国怀俄明州的 Byrom 油田和 North Oregon Basin 油田的聚合物驱油试验。在

这两个油田，当聚合物溶液突进到油气水井后，由于是高渗透窜流，产出液水相中聚合物浓度高达 1.48 kg/m^3 (1480ppm)，使这两个油田抽油杆的断脱事故和油管损坏事故急剧增加，他们认为在抽油过程中聚合物把固体颗粒从裂缝中带入井中，固体颗粒对抽油杆和油管既起了摩擦又起了腐蚀作用，从而导致抽油杆的断脱事故和油管损坏事故。聚合物驱电泵采油试验在油气水井上发生的情况以美国新墨西哥州的 vaccum 油田为例，由于采出液粘度不高，电流、泵效都没有严重问题出现。

二、国内油田

与国外聚合物驱发展趋势相反，我国近几年聚合物驱油技术发展很快，目前已从矿场试验阶段发展到大规模的应用阶段，预计在 21 世纪，我国聚合物驱油无论在技术上还是应用规模上都将走在世界的前列。

经过室内研究和现场试验的实践，我国已掌握了聚合物筛选评价、数值模拟预测、井网、注入方式和聚合物注入量的优化、调剖和防窜处理、动态监测、效果评价等一整套工艺技术。特别是针对聚合物机械降解最大的射孔炮眼地带，成功研制了高密度、大孔径、深穿透的射孔新技术，大大降低了聚合物的剪切降解，距注入井 30m 处观察井内取样证实，聚合物溶液的粘度保持率达 60% ~ 70%。无论是先导试验或扩大工业性试验都进行了细致的矿场监测工作，包括钻观察井、密闭取心、示踪剂测试、水淹状况测井取样、定期测吸水和采油剖面、产出液聚合物浓度分析等，保证了试验结果的可靠性。

由于产出液存在着聚合物而难以处理的问题，除了改善地面处理技术以外，还采取了向高渗透层回注的办法，已有一定效果。用我国自己选育的菌株研制了耐温、耐盐的生物聚合物黄原胶，在 80°C 及 17000mg/L 矿化度的条件下老化 300 d 以上，溶液粘度保持率仍可在 60% 以上，已投入生产并用于先导性试验。为了满足工业化推广聚合物驱的需要，已在大庆建成目前世界上

最大的、年产 $5 \times 10^4 \text{t}$ 以上聚丙烯酰胺的制造厂，分散和注入设备也已基本国产化。

当前面临的挑战主要是要解决聚合物驱大规模工业化推广中所出现的一系列工程和技术问题，并进一步提高其经济效益。从我们的实践经验来看，聚合物驱是一个庞大的系统工程，从实验室研究、先导性试验、扩大工业性试验到全面工业化推广的全过程中每一个阶段都会出现一系列新的工程、技术问题需要解决。我们已经取得了前几个阶段的实践经验，今天面临从扩大工业性试验的阶段发展到全面工业化推广的新阶段。我们的对策是加强聚合物驱的油藏管理，全面优化聚合物驱的全过程，以尽可能少的投入获得最多的增产油量和最好的经济效益。为此，需进一步研究油藏的精细描述问题，井网、层系和注入能力的综合优化问题，聚合物分子量与油藏性质的配伍问题，深度调剖与聚合物驱的有效结合以减少聚合物的无效循环问题，发展分层注入工艺以增加波及体积问题，聚合物驱过程中注水井和生产井工作制度的调节以减少聚合物溶液不均匀推进问题，产出液的高效处理问题，利用产出液污水配制聚合物溶液以解决清水来源不足问题，对于高粘度、低渗透、复杂断层以及高温、高盐等特殊类型油藏有效地进行聚合物驱的问题，以及聚合物驱以后如何再进一步提高采收率的问题。以上这些问题，有的已经有了一些办法和经验，有的还没有解决，有待进一步加强研究。

据原中国石油天然气总公司组织的全国注水开发油田三次采油潜力预测结果，大庆萨喇杏油田适合聚合物驱油的储量为 $27.8 \times 10^8 \text{t}$ ，如提高采收率 10%，相当于大庆油田按目前的生产水平连续生产 5 年，这充分说明聚合物驱油在大庆油田具有广阔的应用前景。

大庆油田为保持中高含水采油期原油产量，除了采取加密钻井、压裂、酸化措施外，在“七五”期间进行了各种提高采收率方法研究。被列为国家重点科技攻关项目之一的聚合物驱，经过十几年的科研攻关和矿场试验，目前在大庆油田已进入工业化应

用阶段。自 1996 年推广这项技术以来，已取得了显著的技术经济效益。到 2000 年底，已推广的区块达到了 14 个，其面积为 143.44 km^2 ，地质储量为 $25690 \times 10^4 \text{ t}$ ，油气水井数为 2368 口，其中，注入井 1094 口，生产井 1274 口。聚合物驱产量从 1996 年以来，每年都在接近 300t 的幅度上产，并且 1998 年和 1999 年的年产油量达到了 $800 \times 10^4 \text{ t}$ 以上，2000 年达到了 $900 \times 10^4 \text{ t}$ 以上，占油田总产量的六分之一。由此可见大庆油田已经进入了一个水驱和聚驱并举的开发时期。

从 20 世纪 90 年代开始，辽河、胜利、大港、华北等油田也都相继进入聚合物驱工业化应用阶段。

几年来大庆油田聚合物驱实践表明，虽然取得了显著的增油降水效果，但是由于产出液的非牛顿特性，改变了井液的物理化学性质，对机采设备的应用产生了一定的影响。从大庆油田聚合物驱矿场试验和工业化应用情况来看，目前反映出的注入与采出工艺问题主要有以下几方面：

(1) 随着聚驱目的层由单一油层向多油层组转移，采用笼统注入方式将导致聚合物溶液主要进入高渗透层，造成中、低渗透层波及程度低，使驱油效果变差；

(2) 注聚过程中，部分注聚井井底附近堵塞严重，油层吸水能力下降；

(3) 随着聚合物注入体积的增加，产液指数下降，油气水井流入动态与水驱相比有较大差异；

(4) 油气水井见聚合物后，电泵排量系数随聚合物浓度增加而降低，功耗增大；

(5) 抽油杆与油管偏磨严重，其下部下行速度与行程落后于悬点，杆断率明显增加，抽油机井检泵周期明显缩短等。

第二节 节点系统分析基本原理

节点系统分析是一项对油气水井生产过程进行系统优化设计

分析的方法，该方法最初用于分析和优化设计复杂的电路或管汇系统，1954 年吉尔伯特（Gilbert）首先提出将其用于油气水井生产系统，后来布朗（Brown）等人对此进行了较全面系统的研究，从 20 世纪 80 年代起，随着计算机技术的快速发展，它在油气水井生产系统设计及动态预测中得到了广泛应用。早在节点分析理论建立之前，对各种在多孔介质或管道流动中的多相流动的压力损失问题都已经进行了大量的研究工作，许多比较好的关系式能够在一定范围内准确地预测不同条件下油藏或管流中的压力损失。但对于一口完整的注采井，各环节之间是相互影响相互制约的，这些局部的分析难以解决整个生产系统的问题。在这些研究工作的基础上建立起来的节点分析理论则是以整个系统从注入系统到采出地面设备作为研究对象，充分考虑各个环节之间的关系，从而能对整个生产系统及其各个环节在不同条件下流量和压力的变化动态进行模拟预测，并以此为基础对整个生产系统及其各个环节进行研究和分析。

节点分析的基础仍是能量守恒和质量守恒。在稳定的生产过程中，物质守恒表现为通过系统中各环节的流量及其基本构成应相同，在有分支的情况下，分支点流入量总和应该同流出量总和相等。各环节之间的压力变化则反映了能量守恒关系。另外，各环节在稳定生产的条件下可以假定局部基本达到平衡，任何一点上的各种参数如压力应是稳定惟一的。

对任何一个生产系统，如果要进行节点分析，我们首先要确定系统由哪些主要环节组成，这些环节的主要参数是什么；同时要确定系统上、下游两端的边界条件，原则上说，当这些条件都确定以后，整个系统的状况也确定下来了。但由于在中间环节的计算上涉及到比较复杂的经验关系式，一般无法直接求解，往往要借助于某些数学方法。

通过节点分析的方法我们就建立起了一个生产系统的动态模型，改变生产系统的各个参数就能得到不同的匹配流量和相应的匹配压力，根据这些流量、压力和参数之间的变化关系，在结合

油藏、储运等方面的因素和现场实际情况就可以从中选出我们所需要的最佳工作点，或预测未来的生产动态。

一、节点的设置

节点分析的一般解法是：在系统中选择一点，称之为节点，这一点可以放在系统中有产液流过的任何一个地方，为了便于理解和分析，常把节点设置在井底、井口或某个感兴趣的环节上。通过这个节点，系统被分为节点上游的供液部分和下游的流出部分，对于每个部分分别计算就可以得到该节点的供液和流出动态关系。对注入井、有杆泵井和电泵井而言，最常选的节点位置在图 1-1、图 1-2 和图 1-3 中给出。

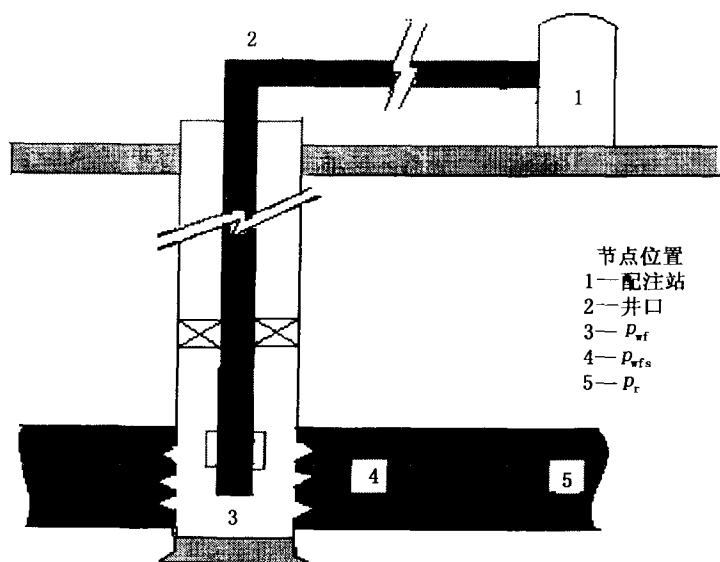


图 1-1 注入井生产系统分析节点图

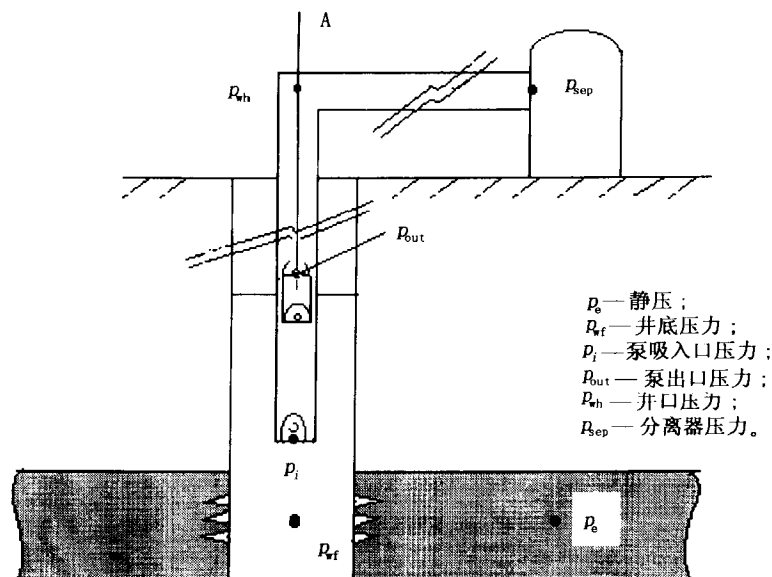


图 1-2 有杆泵井生产系统分析节点图

二、解节点的选择

在运用油气水井节点分析方法解决具体问题时，通常集中分析系统中的某个节点，此节点一般称为解节点。通过解节点的选择，油气水井生产系统被划分为两大部分，即流入和流出部分，分别表明始节点到解节点和解节点到末节点所包括的部分。通过对流入和流出部分的模拟计算求出的流入和流出动态特性，再分析比较流入和流出动态特性，便可以求得油气水井生产动态。

解节点的选择要满足下列要求：

- (1) 解节点处只有一个压力；
- (2) 通过解节点只有一个与该压力相对应的流量。

解节点的选择与系统分析的最终结果无关。换言之，解节点的位置可以在油气水井生产系统内任意选择，原则上要依所要求

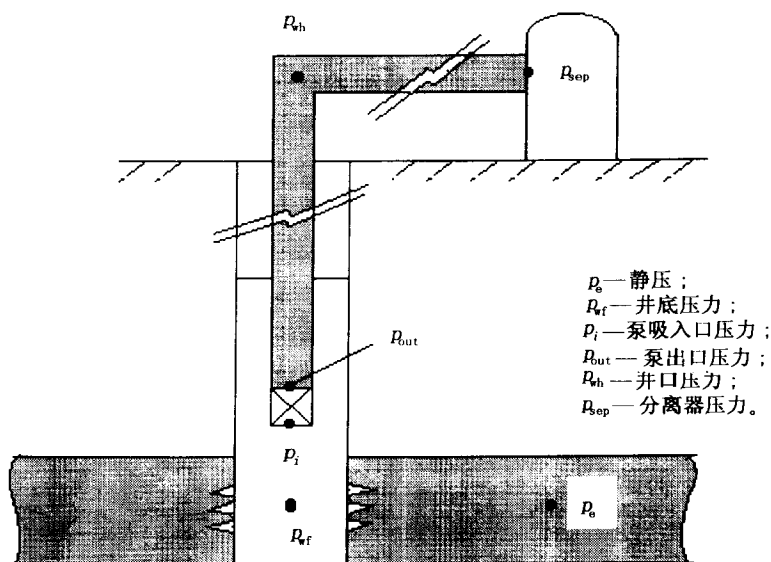


图 1-3 电泵井生产系统分析节点图

解问题的目的而定。例如，在分析地面生产设施的影响时（地面管线长度、管径及分离器压力等），解节点可选择在井口 p_{wh} 处。但大多数油气水井生产系统分析问题中，解节点一般选择在油气水井井底 p_{wf} 处。

三、协调点的确定

对供液部分，从系统的上游端出发，选定一个排量，从边界压力开始利用相应的关系式顺流体流动方向，逐个计算各个环节在给定排量下的压力变化，并进行累加，直到选定的节点处，我们就得到了该点在给定排量下的供液压力，改变排量重复上述过程，就可以得到不同排量下节点的供液压力动态曲线；对于流出部分，从系统的下游端点，逆流动方向反推，也可以得到该节点的流出压力动态曲线。如果上述计算结果是正确的话，节点处的

压力和排量必须同时满足供液和流出两条动态曲线的变化规律，而如前所述，节点处排量和压力都是惟一的，因此整个系统应该在交点处的流量下工作，该节点的压力也就是交点处的压力，这个节点可以称之为匹配点，交点的流量和压力分别为匹配压力和匹配流量。

计算上游的流入压力：

$$\overline{p_e} - \Delta p \text{ (upstream components)} = p_{\text{node}}$$

计算下游的流出压力：

$$p_{\text{sep}} + \Delta p \text{ (downstream components)} = p_{\text{node}}$$

四、敏感参数分析

注入与采出井节点分析方法由于通过模拟生产系统内各个组成部分来模拟整个系统，因而其中采用了相当多的数学相关式，它的分析计算过程也相当复杂，故而它的应用必须用计算机作为计算手段，使计算过程变得很容易，只要给出一组要求的计算参数，计算机就会很快得出相应的计算结果。这就给人们提供了方便。我们可以任意改变其中的某一或某几个参数，很快求得不同的计算结果来作比较，就可以得到某一个或某几个参数的改变对整个生产系统流动特性的影响。这就是通常所说的对油气生产系统的敏感性分析。通过对多个影响参数的敏感性分析和必要的调整和改造措施，使注入与采出井在最佳生产状态下生产。

五、节点分析方法的用途

作为一种油藏工程研究的得力工具，油气水井节点分析方法的应用前景非常广泛。运用油气水井节点分析方法，结合油藏工程及采油工艺生产方面的实际工作经验以及油田开发政策对油田生产提出的指标要求，可以分别对新老油气田的油气水井进行系统优化分析。在新油气田的开发设计中，应用油气水井节点分析方法可以优化采油工艺设计，选定最佳的采油工艺方案。在对老油气田的油气生产井进行系统优化分析研究中，可以尽快寻找出

油气水井的限产因素，为油气井的增产措施和改造提供依据。具体地说，油气水井节点分析方法具有如下几方面用途：

- (1) 确定目前生产条件下注入与采出井的动态特性；
- (2) 优化注入与采出井在一定生产状态下的最优控制产量；
- (3) 对油气水井进行系统优化分析，能迅速找出注入与采出井的限产因素，提出有针对性的注入与采出井改造及调整措施；
- (4) 确定注入与采出井停喷时的生产状态，从而分析确定采出井的停喷原因；
- (5) 可以使生产管理人员很快地找出提高注入与采出井产量的途径。

无论是国内油田，还是国外油田，到目前为止，节点系统分析方法及其相应软件已成功地用于注水井、注气井、自喷井、气井、电泵井和抽油机井等生产实践，在生产中收到了相当好的效果，但这些研究成果都是针对水驱油藏而提出的。

众所周知，聚驱是我国东部高含水期油田保持稳产的重要手段，特别是大庆油田。因此，为使聚驱见效阶段油气水井多产油、多拿油，研制聚驱条件下注入井、有杆泵井和电泵采油井生产系统节点分析方法及其软件，并在生产实践中不断修改完善，使油田工程技术人员能及时掌握油气水井动态，快速找出提高油气水井产量的途径，保证油气水井始终在高效率下正常工作是十分必要的。

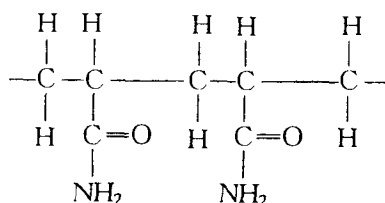
第二章 聚合物溶液性质

第一节 聚合物溶液的化学性质

一、聚丙烯酰胺化学结构

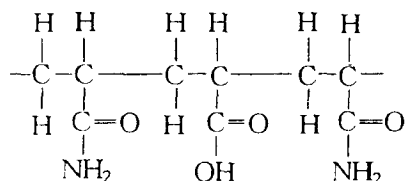
驱油用的聚合物大致分为两类：天然聚合物和人工聚合物。在近 40 年的聚合物驱油研究中，中外学者曾尝试过许多合成的和天然的聚合物，但工业上应用最广泛的多为聚丙烯酰胺。聚丙烯酰胺有非离子型、阴离子型和阳离子型 3 类产品，其中应用于驱油的是阴离子型聚丙烯酰胺。下面给出三种形式聚丙烯酰胺的分子结构。

1. 非离子型



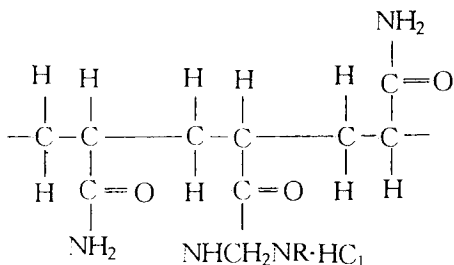
一般水解度小于 4% 均属于非水解聚丙烯酰胺。

2. 阴离子型



阴离子型聚丙烯酰胺习惯上也叫部分水解聚丙烯酰胺，它可以由 PAM 水解或丙烯酰胺与丙烯酸共聚制得。用水解度表示羧基的含量。

3. 阳离子型



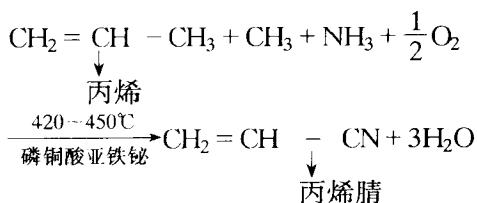
阳离子型聚丙烯酰胺一般不单独作为驱油剂，它通常与阴离子型聚丙烯酰胺联用，作为聚合物驱的防窜剂或调剖剂。

二、聚丙烯酰胺的合成

从石油裂解得到的丙烯出发制造聚丙烯酰胺，包括许多过程：合成丙烯腈、合成丙烯腈、合成丙烯酸、聚合等。

1. 丙烯腈的合成

目前工业上普遍采用氨氧化法，此法对丙烯的纯度要求不高，基本化学反应如下：



2. 丙烯酰胺的合成

硫酸水合的工艺已经基本淘汰，现在工业上广泛应用的骨架铜催化水合法，化学反应式如下：

