

实时监测和分析水力压裂施工过程的现场计算机化工作系统

M. P. Cleary, Massachusetts Inst. of Technology

A. M. Buharali and A. R. Crockett

Resources Engineering Systems Inc.

I. A. Salehi, Gas Research Inst.

赵金洲 译

李平 沈家骏 康德泉 校

摘 要

为了在现场上能够对整个水力压裂施工过程进行实时监测、分析和有效的控制, 设计和发展了一种新的工作系统, 通称为 RT-MACS (实时监测、分析、控制系统)。在目前电子计算机硬件的水平上研制了许多系统样机, 从微型计算机到全便携式系统。这些样机具有一系列的功能: 从标定的传感器上收集数据, 处理数据, 并且储存数据于中央数据库内, 在屏幕上显示处理后的数据, 模拟整个过程, 运用实际工程模型进行分析, 显示整个施工状况 (包括模型模拟的结果)。所研制的样机系统在许多方面具有独特之处: 采用实时方式输入数据, 用一种新的历程拟合法实时确定地层参数和流体参数 (这些参数通常难以取得), 并且应用最先进的三维分析方法计算裂缝的高度、宽度、长度和压力。车装的和便携式的系统样机均在多次商业性现场施工作业中应用成功, 这些标准作业是在一些有关的采油公司提供的协作油井上进行的, 没有出现问题。这些样机的出现是很有实际影响的, 目前这种便携式系统已更广泛地向全行业提供。

一、引 言

与许多石油开采方法相比, 水力压裂也许是一种最复杂而又最难以用技术手段来考证的方法。即使是最好的施工设计方案, 都可能因为现场上一些难以预料的情况变化而失败, 几乎没有什么直接的资料来说明施工作业实际上有多大的效果以及施工后井产量仍然很低时的问题出在哪里。因此, 水力压裂技术以一种可以理解的保守方式在发展⁽¹⁾; 井的所属者和施工人员都希望避免在盲目试验中潜在的危险。并且由于受到技术和经费的限制, 服务公司还不能建立许多必要的机构来对施工方法和程序进行研究、验证和控制。这使得一些本可以得到解决的疑难不能得到解决。从某种意义上来说, 工业部门必要的竞争可能妨碍了为提高技术所需要的合作。

清楚地认识到这一缺陷, 特别是考虑到将来美国低渗透性气藏的开采处于后期的情况,

天然气研究所 (GRI) 对于解决妨碍水力压裂技术发展的某些主要问题正在进行更为协调的努力。该所计划包括: 数据的收集、分析、工程作业的设计与实施; 而工程作业的详细内容包括测井、岩心分析、完井技术、压裂前测试、详细的压裂设计和实时分析以及压裂后测试。这个研究所的更为综合详细的计划见文献[2]以及本文的姊妹篇文献[3]。

本文所介绍的内容是GRI (天然气研究所) 计划的主要部分, 也是整个计划的核心。通过收集和整理资料数据, 设计施工方案和进行实时分析, 施工人员可随时进行全面评价, 在预测的情况被证实以后, 允许将控制反馈到设备操作上。

促成研制这套工作系统的动力是因为认识到了目前水力压裂工艺技术的许多不足:

(1) 如果在施工过程中出现了问题, 施工人员几乎没有什么应变能力。

(2) 施工人员对整个施工状况无法做到心中有数和随时评价, 例如施工过程的变化, 对随时采集的资料数据作出可能性的解释等。

(3) 在施工过程中, 压裂设计所使用的模型无法跟踪描述设计方案的实际结果。

(4) 使用的模型常常似乎很不符合实际——而且没有任何一种验证这些模型预测准确性的具体方法。直到更好的裂缝诊断技术出现之前, 还不能够检测造的裂缝。这是促使天然气研究所制定该全面计划的另一主要因素。

(5) 在其它井施工作业中所获得的经验, 只不过在服务公司和作业公司顾问们的脑子里有一个定性概念, 不能有效地用于当前井的施工。

为了弥补这些不足, 本文所述工作系统具有下列主要功能供施工人员掌握:

(1) 把以前施工作业中获得并经过处理的资料数据存入数据库。对于目前施工井出现的问题, 可即时调出有关井的数据进行比较。

(2) 在施工期间, 工作系统实时运行, 所以数据的收集、检索以及处理和显示都是瞬时完成的, 这就使得施工人员可以随时全面掌握整个施工状况。

(3) 由于工作系统以实时方式运行模型, 所以随时可以估计施工效果, 预测可能发生的问题。因此施工人员可以立即采取措施, 改变施工工序。

(4) 所用模型较为实际地描述了压裂过程和流动机理。这些模型应用实际流动参数作为输入值, 实时运行。并且通过模拟整个过程采用实时拟合法测定储层参数。这就改进甚至减少了从费用昂贵的岩心分析和测井中获取数据的必要性。

(5) 用户方便地使用屏幕显示改进了质量控制, 并且施工人员能够放心地将其反馈到设备操作上去。如果工作系统的可靠性得到保证, 有些控制可实现计算机自动化。

下面各部分更为详细地介绍这些功能以及它们在现场上的应用。

二、实时工作系统的概貌

典型的现场施工井场布置如图1所示。与常规水力压裂作业的不同之处是增加了分布在整个工作系统中的传感器附件: 胶液的流动参数、流变性和pH值用安装在混砂车和泵前面的“吸入管汇组”上的仪器测定; (核子) 密度计安装在“排出管汇组”上, 在其上也可能要安装一个流量计 (例如基于多普勒频移的流量计而不是涡轮流量计); 在井口测量压力 (包括油管压力、环空压力或套管压力) ——当环空注液时, 油管压力一般作为“反映井底压力”。此外, 在某些井的施工作业中 (见图4(c)), 井底压力可以通过导线直接测量。

为了今后现场的实际应用，也正在设计制定其它的测量系统：管柱内的压差 Δp 的测定将会更有助于描述流体在管道（套管、环空、油管）中流动时的流变性。这样通过测量井口压力就能更好地计算井底压力，因而避免了在此后的正常施工中附设额外的管线。若裂缝诊断技术（例如依靠井下仪器测绘裂缝图）被证明是可靠的，那么通过该技术方法所获得的资料数据也可以加到这样的系统内。总之，如图 1 所示的计算机系统，将会收集和和处理对进行施工作业的实时评价可能有价值的任何资料。

完成这种实时评价所需要的硬件设备如图 2(a) 所示。图 2(a) 特别标出了该系统中的 GRI 主计算机车 (MCT) 包括的主要组成部分，其中有：

1. 数据收集组件：目前使用的这些组件由装在便携式 IBM-PC 兼容微机扩展槽内的高速 A/D 板组成。这些板都是按规格定制的。这种便携系统在 MCT 不可能使用的地区施工作业中能够用于收集数据，这些数据经过处理鉴定后存放在数据库里，以供今后参考。

2. 中央处理机 (CPU)：现在用的是 DEC VAX 11/750 机，但不久也可以装备其它的微型机以更好地完成其主要的功能，这一技术正迅猛发展。发展方向是应用可移运系统即可实时运行最复杂的模型。

3. 磁存储器：通过中央处理机 CPU 上的 VMS 操作系统，用可装卸式硬盘提供虚拟存储能力；VMS 不仅可以极其有效地完成多项复杂的工作，而且还可以极其有效地用于大型模拟程序的计算，就象是在一个更大的 RAM（随机存取存储器）系统上一样。此外，有一磁带机作为备用并作数据转录工作。

4. 图象显示装置：一个 Megatek 7200 阴极射线管图象显示装置可以迅速显示出的讯息有：按滚动窗口幅面展示的数据，流程图和施工工序等。此外，一个 Tektronix 4115 B 光栅阴极射线管图象显示装置可以提供具有高分辨颜色能力的显示，例如显示出整个施工状况、注入工序、用模型与数据的历程拟合以及地下情况（如裂缝几何尺寸）的模型估计值。

5. 文本复印装置：DEC LA120 行式打印机直接与 CPU 联系在一起。而 Versatek V-80/121 打印一绘图机可以马上将施工情况或综合评价打印或制出图来。

这些硬件和后面要介绍的软件总和起来组成的计算机装置起着下列主要的作用：

(1) 通过传感器，例如图 1 所示的压力传感器、流量计、密度计、流变性测量仪，高质量地收集数据。这就要求与服务公司在现场上的设备的联结可靠，但不要突出（图 1）：特殊的仪器安装在可移运的橇座上（橇座用于连接 GRI 主计算机车）。而实际传感设备的接口也正在研制，可见图 1 中的虚线框。随着设备和技术的更新，数据测量的质量与可靠性也将大大提高。

(2) 施工人员可方便地显示数据（在后面工作系统的应用部分详细讨论）。这一点有两个目的：注入物质的质量控制和快速检查工作系统的任何响应，例如瞬时压力状态。目前使用的图象显示装置具有即刻放大、分解合理的多窗口显示一切所获数据的功能。因而远远扩大了显示装置目前在工业领域中的功能。

实际上，目前使用的监测仪器只具有这两个功能，而这种新的工作系统大大扩展了这些功能并使其更加完美。主要扩展性能如下。

(3) 为了真实模拟物理过程直接输入数据进行实时分析。这种新功能使得我们可以立即对施工状况作出评价以及预测潜在的问题。压力响应是检验模型精确性的主要手段。其它的诊断技术与 RT-MACS 工作系统一样正处于发展阶段。事实上，为了确定许多地层参

数，模型可能要用早期观察的结果进行拟合，然后用这些参数对当时的施工状况进行测算或预报将来的响应。

(4) 实时显示模型结果和表示注入程序的施工状况，预测某一时刻相应的裂缝几何尺寸和此后的状态。这样使得施工人员能有根据地决定以后的注入程序。

(5) 这种全面评价和即刻报告的方法，使施工人员对施工过程有一个完整的了解并能估算投产后施工投资的收益率。

与这些硬件相联系的软件如图2(b)所示。它们分为四类：

- (1) 数据收集、储存和检索软件。
- (2) 实时操作软件。
- (3) 图象显示软件，阴极射线管及硬拷贝。
- (4) 物理模拟软件。这类软件在下节详细介绍。

三、水力压裂过程的物理模拟

为了实际逼真地模拟整个水力压裂过程，建立了一套集成的综合程序包（称为FRAC-WELL）。这一程序包有四个主要部分，通过适当的组合在RT-MACS结构内实时运行。这些模块包含最新的实际数据、数学公式和描述下述过程的模型的计算机方法：

1. 压裂液和混砂液在管柱和射孔孔眼内的流动；包括交联、形成泡沫和支撑剂浓度对成胶液流变性的影响。这样就有关管道中流动的室内数据和矿场实测数据结合了起来——无论在何处，只要同时收集有井口和井底压力的矿场实测数据，就可由此模拟管道中的实际流动情况。其主要目的就是要根据井口测量的压力准确地计算井底压裂压力。而省去了收集井底压力。关于管道摩阻的计算又发展了一套新的综合公式，这套公式的计算结果较好，并且改进了目前服务公司所给出的一些与实际不太相符之处。流动模型的主要参数包括：

- (1) 流体的流变性、稠度系数 K' 和流态指数 n' 。
- (2) 流体的密度和压缩系数。
- (3) 支撑剂的密度和浓度。
- (4) 管径、粗糙度和形状结构。

这一模块主要是利用邻接的模块的井底压力根据井口压力计算井底压力；或者相反。

2. 裂缝的生成、延伸、合拢和闭合：这一模块是建立在应力、压力分布和注入混合压裂液时诱导张开缝的三维模拟之上的。它综合考虑了岩石变形和破裂的力学机理、压裂液在裂缝中的流动特性及压裂液与裂缝周围地层的热交换。

求解这套模型所需要的主要参数为：

- (1) 压裂液的流变性：压裂液在平板缝内流动时的稠度系数 K 和流态指数 n （因为交联的作用和流体的剪切降解以及热活化作用， K 和 n 与 K' 和 n' 一般是不同的）。
- (2) 压裂前的地应力分布。
- (3) 压裂层和邻近层的岩石模量。
- (4) 岩石裂缝的韧度（用于地层破裂分析）。

这套模型用于计算裂缝的维度尺寸（高度、宽度和长度）以及裂缝入口处（孔眼外）的井底压力。

3. 油藏模拟：这一模型的精确度满足实际要求，它考虑了流体在裂缝周围地层内的渗流和热交换，因而能够用于计算压裂液的滤失、压裂液的温度变化以及次生应力，并且最后计算通过支撑裂缝的油气流量。

求解这一模型所需要的主要参数有：

- (1) 地层渗透率和孔隙度。
- (2) 地层导热系数和比热。
- (3) 地层流体的饱和度和孔隙压力。
- (4) 压裂液的滤失参数和滤饼参数。

这一模型用于计算裂缝的有效性和压裂液的热流变性。

4. 支撑剂的输送和铺置：这一模型主要计算支撑剂随着压裂液的运移，包括沉降或悬浮运动，计算砂堤的形成，或可能出现的砂堵以及裂缝壁面闭合及形成的可渗通道。

求解这一模型的参数有：

- (1) 支撑剂的粒径和浓度。
- (2) 支撑剂密度和液体密度。
- (3) 在有固体颗粒的情况下液体的流变性。

这一模型主要计算支撑裂缝的长度和宽度，进而计算投产后的裂缝导流能力。

程序包FRAC-WELL似乎比目前使用的任何模型的功能都强，它具有下列特征：

(1) 它最全面最实际地模拟了水力压裂作业的有关物理过程，可以实际地应用于施工作业。

(2) 模型能实时运行，由于输入的是实际流动参数，所以在施工期间可以连续地跟踪整个过程。

(3) 它具有拟合功能，可以实时测定某些关键的参数，例如用其它方法不容易测定的地层渗透率、地层应力和模量的分布。主要是通过进行小型压裂或者在正式压裂前的前置液注入阶段以观测的压力拟合计算的数值。拟合后所确定的参数就用于预测此后的状况，并且跟踪模拟更为重要的混砂液注入阶段的施工状况。

(4) 在泵压脉动或粘度改变时它具有自检的功能，在此期间产生瞬时压力，而瞬时压力取决于此时的裂缝几何形状和尺寸。因此用该方法可以确定裂缝的几何尺寸。这就间接地提供了一套简便低廉的裂缝测绘技术，这一技术可能会被证明实际上比目前采用的或正在追求的其它一些费用昂贵的诊断技术更优越。

(5) 在整个施工过程中可以应用和检验这一程序包：在施工前的设计阶段用户可以方便地用此作为设计程序。在施工期间它又实时运行，可以按照施工人员的要求即刻改变施工工序。因此，它可以为矿场上的操作人员随时提供一个完整的施工状况图象，并且仍然可以更改。

四、工作系统的现场应用

到目前为止，通过GRI（天然气研究所）的承包商和许多作业公司的通力协作，RT-MACS系统设备已经在四口井进行了实时应用⁽³⁾。此外，在其它许多井应用便携式系统或用数据测量车测取了大量的资料数据⁽³⁾。这些数据经过后继处理后所产生的矿场报告与RT-MACS在现场进行实时分析时所得的报告相类似。这样，随着工作系统的运行，一个大的数

据库正在形成,丰富的经验也在不断地积累。

为了描述工作系统的使用方法,我们在一口协作井上应用了GRI(天然气研究所)研制的适用于致密砂岩气藏的程序。大规模的测井、取心或其它压裂前的有关测试由GRI的各承包商与Prairie生产公司协作进行。这口井靠近得克萨斯东部的Nacogdoches,选取层段是 Travis Peak/Hosston地层。这一地区及其地层正是GRI(天然气研究所)计划的主要目标。

施工期间测取的关于流动特性、流变性、支撑剂的数据如图4(a)所示。作业基本上是按照施工程序进行的,而且质量控制是好的。相应的井口和井底压力如图4(b,c)所示,图中比较了物理模型的计算值与实测值。未知的地层参数和摩阻参数可以用历程拟合法得到。应用历程拟合法时将压力的实测值与模型预测值进行比较,以期缩小两者之间的差别。在前置液段历程拟合所得的参数可以用于此后的加砂阶段计算,以保证模型的最佳预测结果。从图4(b)中可以看到:由井筒流动模型计算的井口压力值与实测值吻合非常好。尽管模型中选用的管道摩阻形态和摩阻系数与我们所收集到的所有实验室和矿场数据的平均值非常接近(例如参考文献[7]中所介绍的),通过历程拟合法对这些参数细微调整计算后,在整个压裂施工期间仍可以把误差降低到5%以内。注意我们没有使用对数坐标,因为对数坐标图容易掩盖许多重要的影响。

更使人感兴趣的是图4(c)所示的井下(裂缝)压力的比较。只要能够把影响裂缝压力的其它因素鉴别和分离出来,就可以根据压力的升降估计裂缝垂向的延伸范围。在初始阶段(仍然用三维模型讨论)之后,我们看到在施工的早期阶段,当裂缝的垂向延伸没有受到遮挡时,压力值与实测值吻合很好。其中压力的大幅度上升是由于50磅交联液首次进入裂缝。在此之后,压力继续增加,这第二阶段实测值与计算值吻合最好,这一点似乎表明裂缝可能延伸到真正接近了遮挡层。当然,在某些情况下,压力的升高也有可能是由于注入了支撑剂使流动阻力增加所致。在施工的后期,当支撑剂的注入量很高时,压力开始急剧上升。因为模型的模拟计算表明,单靠遮挡层的遏制不可能导致这样急剧的压力上升,这就明显表明已经出现砂堵。

尽管我们已经能够认识到像滑移阻力、砂堤筑起、砂堵等是影响压裂中压力的主要潜在因素(图4(c)上最后的压力上升就是这些因素引起的^[11]),但在我们的模型中还不能够把这些机理最后定下来。直到这些机理可以用于模型之前,对许多施工作业来说,还不能由压力曲线推断遮挡层的遏制影响。如果要获得比较恰当的解释,Nolte-Smith的分析方法^[9,10]也需要详细地模拟这些机理。尽管这样的分析目前已成为矿场上施工监测的主要焦点^[7,8],但是很显然,仍然需要更加详细的模拟。通过采用图3所示的模型,RT-MACS系统最终可以为遮挡层遏制影响的分析提供一个基础。

鉴于这种情况,相应于不同程度遮挡层的遏制状态下的裂缝几何尺寸,可能如图4(d)所示。所以压裂施工的设计和分析应包含有最好和最坏情况的裂缝受遮挡层遏制的问题。如果能更准确地拟合历程压力,则将有可能对最终裂缝几何尺寸作出最佳预测。通过这种历程拟合法可以确定主要的影响参数——遮挡层与产层的地应力之差。其它参数,例如流体滤失系数,可以通过小型压裂或压后裂缝闭合过程中的压力数据应用已经确定的技术方法^[8]计算。支撑剂输送的相应距离(支撑长度)如图4(e)所示。图4(e)表示了有遮挡层遏制和不受遏制的两种情况。裂缝几何形状和有关的施工工序也显示在现场上使用的彩色屏幕上,此处无法示出。

预测裂缝宽度,高度,特别是长度(如图4(d,e)所示)是最后的关键。一旦裂缝的支撑

长度和宽度已知，那么就可以计算油、气产量¹³。RT-MACS系统的另一个优点是在施工中随时都可以计算出裂缝的支撑长度和宽度。所以在任意时刻都可以作出停泵（或改变注入程序）的决定。这一点在许多情况下都是有用的：例如可以避免即将发生的砂堵事故，保证施工不致失败。当不得不修理设备时，还可以暂停下来待检修后再在原来已生成的压裂长度的基础上重新施工。

五、结论和今后的工作

为了实时监测、分析和最后控制水力压裂施工，已经设计出了一套综合的工作系统（RT-MACS）。研制了一些样机，并且在现场常规施工中进行了多次试用，顺利地将标准设备与施工操作挂上了钩。通过施工人员，服务公司的职员和其它承包商或顾问们之间的通力合作，对压裂过程有了一个更清楚的认识。尽管某些目前使用的设施（例如参考文献[7,8]也有助于促进这种认识，但是RT-MACS系统似乎可以进行更综合的分析，因而可以更可靠地了解整个施工作业过程的概况。

通过RT-MACS系统的现场实际应用和现场经验丰富的人员的实际操作，正在逐步积累大量的经验。RT-MACS系统通过对多次施工作业的监测和分析也正在储存大量的数据。这种存放有经过科学处理后的数据汇成的数据库，会有助于更好地解释在典型的施工作业中观察到的现象，以及有助于更好地解决所遇到的许多难题。因而这套工作系统可以给予施工人员巨大的帮助，并且有效地体现了许多专家们的专长，执行有效的施工作业，需要这些专家们的帮助。

我们对新型便携式RT-MACS系统的研究将会大大加速经验的积累。这种便携式系统运输非常方便（可通过飞机或汽车运输），因而可适用于更加广泛的施工作业，比GRI的大型主计算机应用范围广。这不仅可以大大扩展数据库，而且对作业公司更有吸引力，因为他们只需很低的成本就可以将RT-MACS系统用于绝大多数井的施工作业。因而这种技术将会迅速推广。

这种技术的推广将会对施工方式带来巨大的改进：设备将会更新，仪器将会有极大地改进，质量控制也将更有效。同时，压裂施工的有效性将会提高。一旦在技术上能保证对地下裂缝的形成和扩展作出可靠的实时估测（这就是说在现场上能使用在实验室已被证明是可行的方法），那么就可以根据施工过程中所收集的新的数据来动态调整施工工序。这个调整反过来又要求更灵活的施工组织，更高的自动化程度和更灵活的反馈控制。这与目前那种简单地将所收集的数据资料置之—边的作法完全不一样。

当然这个技术发展的最终成果是要从致密砂岩气藏中获得更加稳定的增产以及更可靠的投资收益率。我们相信本文所介绍的设备装置将会发展成熟而有助于这个目标的实现。

参 考 文 献

1. Veatch, R.W., "Overview of Current Hydraulic Fracturing Designs and Treatment Technology" - Parts I and II, *Journal of Petroleum Technology*, pps. 677-687, April 1983 and pps. 849-864, May 1983.
2. O'Shea, P. and W.O. Murphy, "GRI Program for Tight Gas Sands Research", Paper No. SPE/DOE 10898, presented at Symposium on Unconventional Gas Recovery, Pittsburgh, May 1982.
3. Holditch, S.A., Robinson, B. and W.S. Whitehead, "Pre-Fracture and Post-Fracture Formation Evaluation necessary to characterize the 3D Shape of a Hydraulic Fracture", Paper No. SPE/14086, to be presented at 2nd International SPE Meeting, Beijing, China, March 1986.
4. Cleary, M.P., Kavvas, M. and K.Y. Lam, "Development and Testing of Fully Three-Dimensional Model of Hydraulic Fracturing", SPE/DOE Paper No. 11631, presented at Symposium on Low Permeability Gas Reservoirs, Denver, March 1983.
5. Settari, A. and Cleary, M.P., "Three-Dimensional Simulation of Hydraulic Fracturing", Paper No. SPE 10504, presented at Symposium on Numerical Simulation, New Orleans, Feb. 1982; also in *Journal of Petroleum Technology*, pps. 1177-1180, July, 1984.
6. Cleary, M.P., "Theoretical and Laboratory Simulation of Underground Fracturing Operations", Fifth Annual Report of the MIT UFRAC Project, MIT Resource Extraction Laboratory Report No. REL-85-3, 1985.
7. Hannah, R.B., Harrington, L.J. and L.C. Lance, "The Real-Time Calculations of Accurate Bottomhole Fracturing Pressure from Surface Measurements, using Measured Pressures as a Base", SPE Paper 12062, presented at 50th SPE Annual Meeting, San Francisco, September 1983.
8. Cooper, M.P., Nelson, S.G. and M.D. Schopper, "Comparison of Methods for Determining In-Situ Leakoff Rate Based on Analysis with an On-Site Computer", SPE Paper No. 12223, presented at 5th SPE Annual Meeting, Houston, Sept. 1984.
9. Nolte, K.G. and M.B. Smith, "Interpretation of Fracturing Pressures", *Journal of Petroleum Technology*, pps. 1767-1775, 1981.
10. Nolte, K.G., "Determination of Proppant and Fluid Schedules from Fracturing Pressure Decline", Paper No. SPE 13278, presented at 59th Annual Meeting, Houston, Texas, Sept. 1984.
11. "In-Focus - Tight Gas Sands" (ed. I. Salchi), published by Gas Research Institute, Fall 1985.

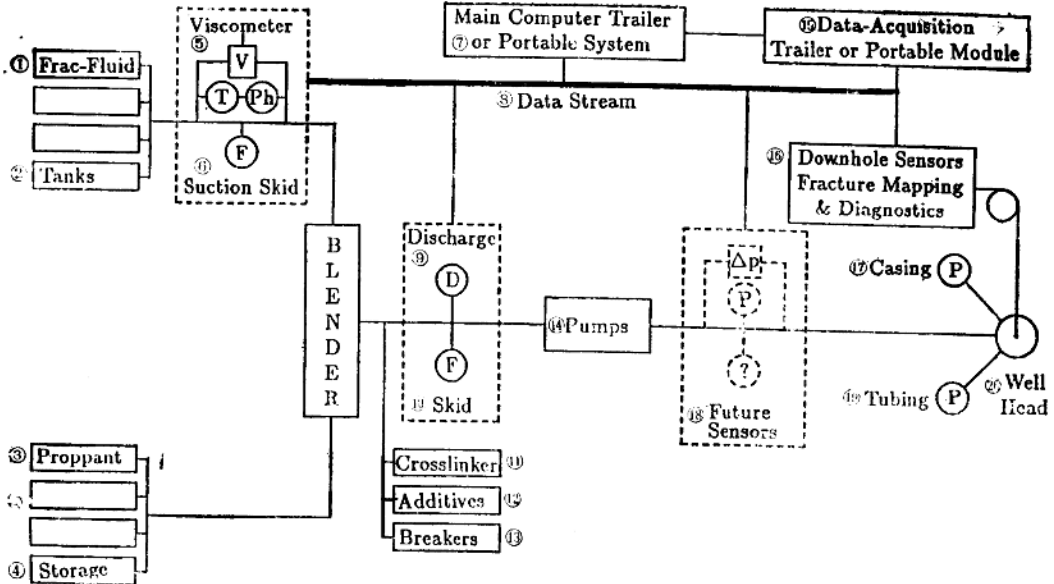


图 1 现场设备与RT-MACS系统连接示意图

- ①、②压裂液罐；③、④支撑剂储罐；⑤粘度计；⑥吸入管汇组；⑦主计算机车或便携式计算机系统；⑧数据通道；⑨、⑩排出管汇组；⑪交联剂；⑫添加剂；⑬破胶剂；⑭泵；⑮数据测取车或便携式数据测取系统；⑯井底传感器，裂缝测绘图显示仪和诊断仪；⑰套管；⑱传感器（将来的）；⑲油管；⑳井口

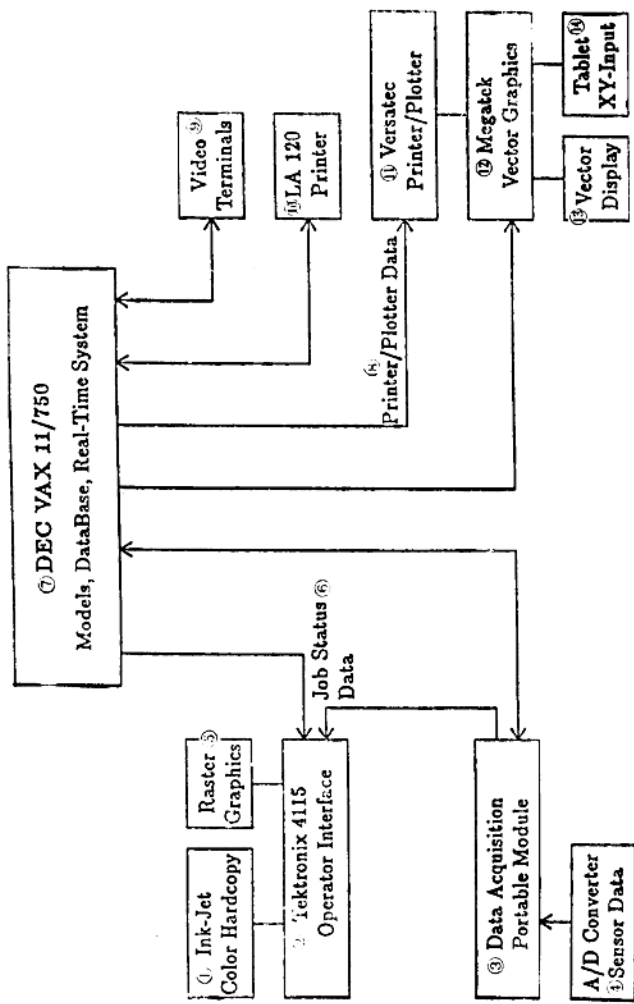


图 2(a) RT-MACS系统的硬件简图

- ①喷墨彩色硬拷贝；
- ②Tektronix 4115控制器接口；
- ③便携式数据采集器；
- ④A/D传感数据转换器；
- ⑤光栅图像器；
- ⑥施工状况和数据；
- ⑦DEC VAX 11/750模型，数据库，实时系统；
- ⑧打印机/绘图机数据；
- ⑨显示终端；
- ⑩Versatec打印机/绘图机；
- ⑪Megatek矢量显示器；
- ⑫矢量显示器；
- ⑬XY输入制表

① Real-Time Monitoring Analysis and Control System

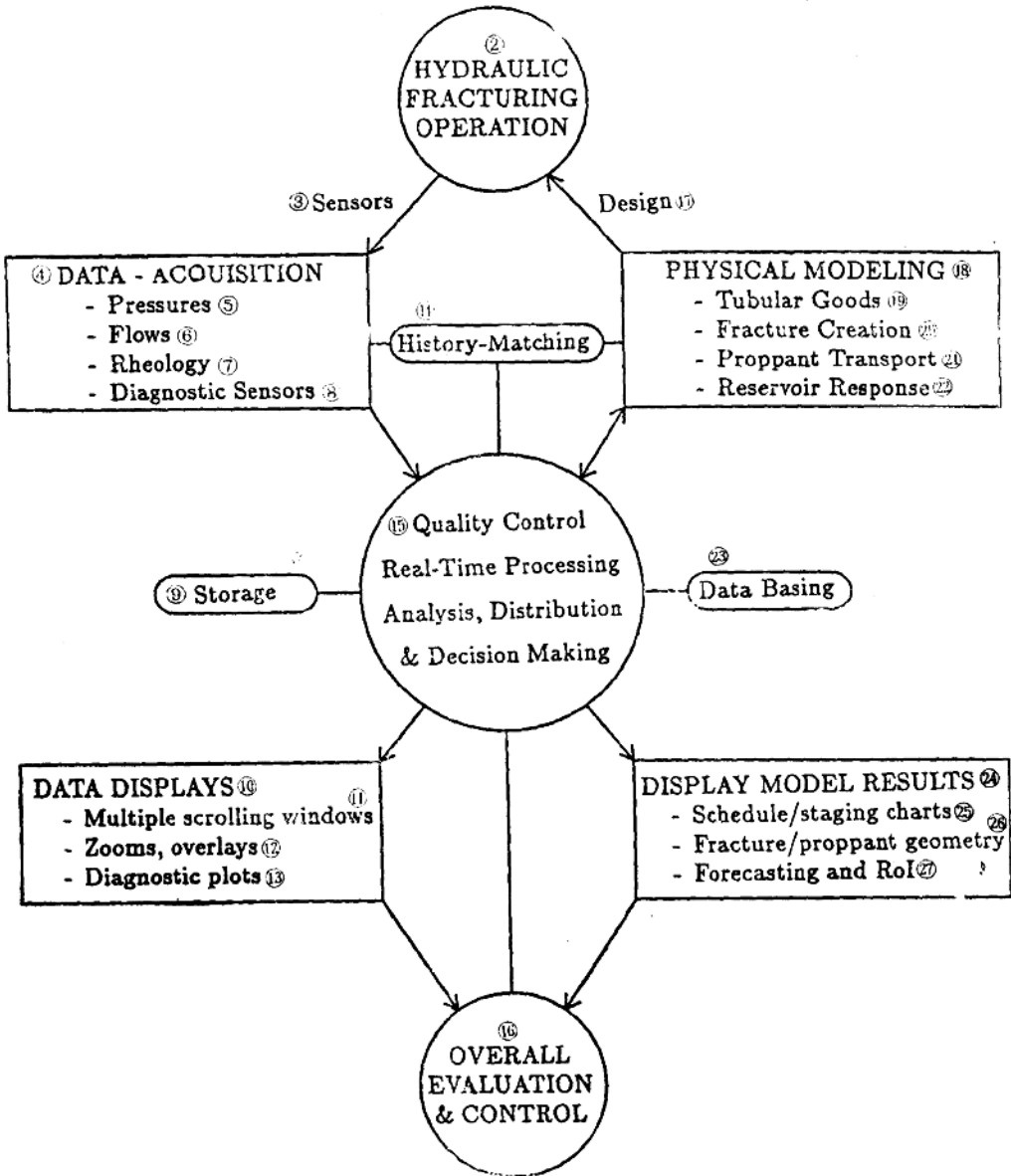


图 2(b) RT-MACS系统软件简图

①RT-MACS实时监测分析和控制系统；②水力压裂施工；③传感器；④数据收集；⑤压力；⑥流量；
 ⑦流变性；⑧诊断传感器；⑨储存；⑩数据显示；⑪屏幕显示；⑫图象放大，覆盖；⑬诊断绘图；⑭历
 程拟合；⑮质量控制，实时处理，实时分析，分类和决策；⑯全面评价和控制；⑰设计；⑱物理模拟；
 ⑲管柱；⑳裂缝生成；㉑支撑剂输送；㉒储层反应；㉓数据库；㉔显示模型结果；㉕注入程序/阶段数
 划分图；㉖裂缝/支撑的裂缝几何形态；㉗预测和投资收益率

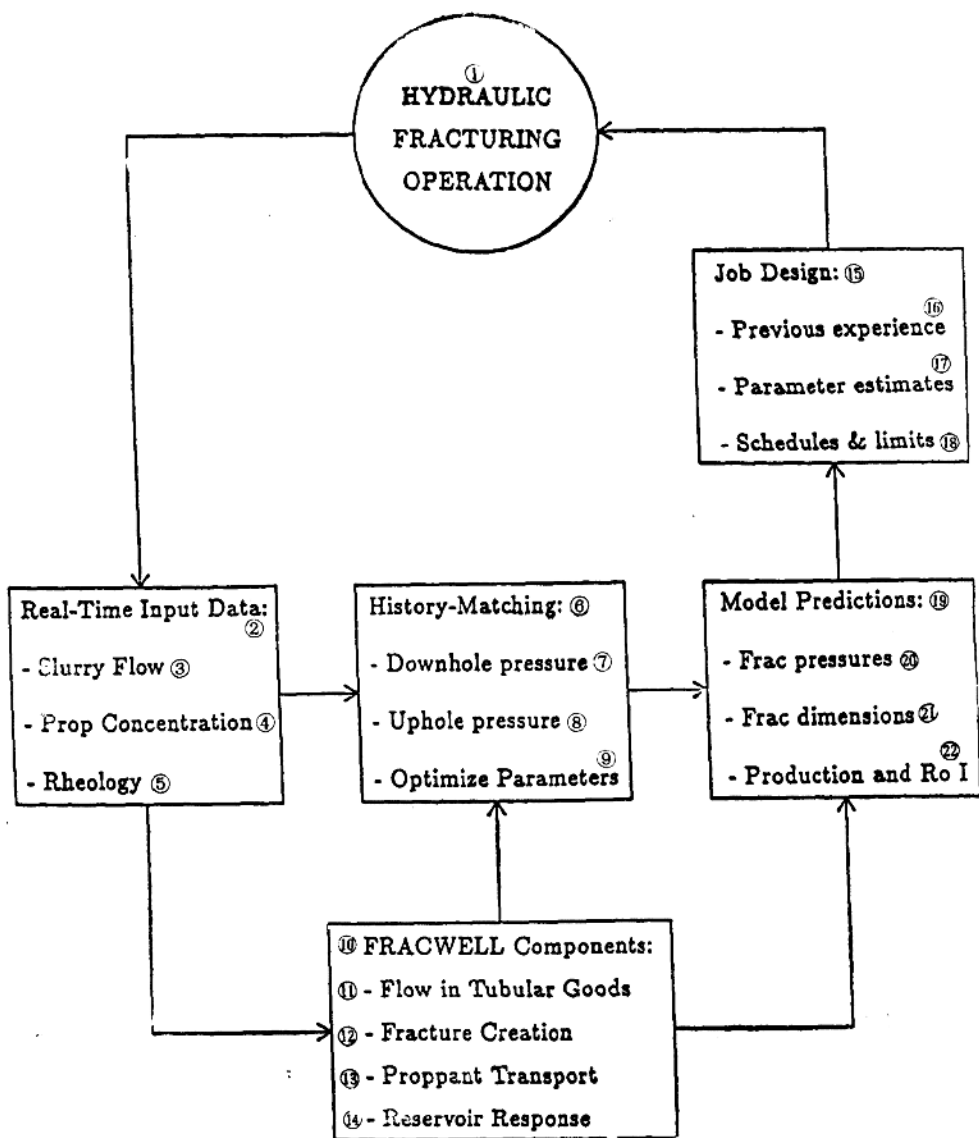
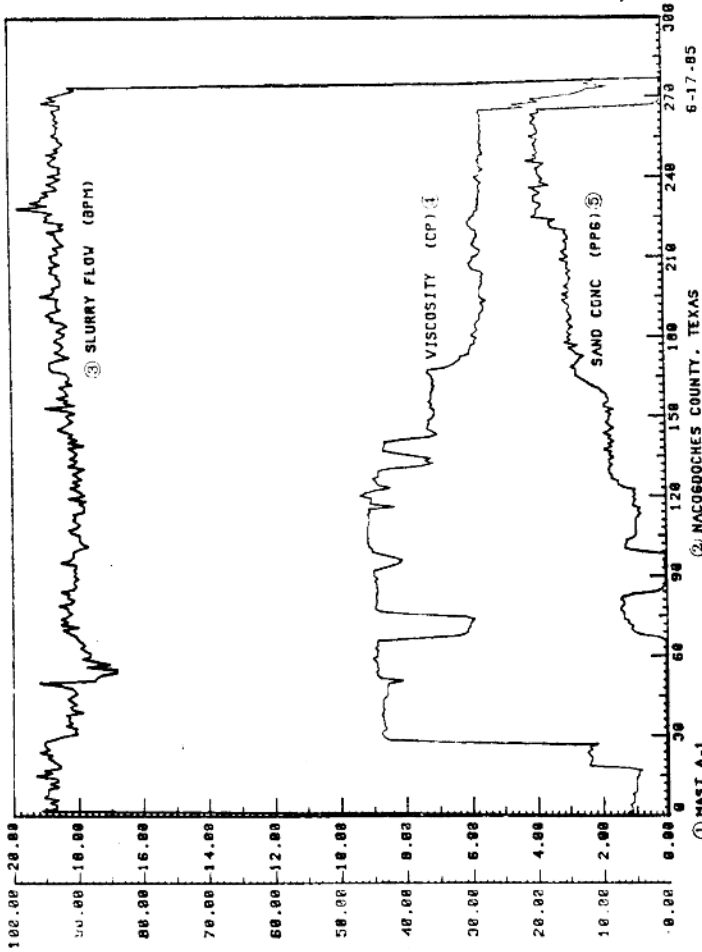


图 3 水力压裂过程的物理模型，流程图

- ①水力压裂施工作业；②实时输入数据；③混砂液流量；④支撑剂浓度；⑤流变性参数；⑥历程拟合；
 ⑦井底压力；⑧井口压力；⑨优化参数；⑩FRAC-WELL的组成部分；⑪管柱内的流动；⑫裂缝生成；
 ⑬支撑剂输送；⑭储层反应；⑮作业设计；⑯以前的经验；⑰参数计算；⑱注入程序和条件限制；⑲模
 型预测；⑳压裂压力；㉑裂缝维度尺寸；㉒产量和投资收益率



① MAST A-1
 ② MACOGDOCHES COUNTY, TEXAS 6-17-85

图 4(a) Prairie Mast A-1 井的流量、流变性和支撑剂数据，时间单位为分
 ① MAST A-1 井；② 得克萨斯州 Macogdoches 郡；③ 悬砂液流量，箱/分；④ 粘度，厘泊；⑤ 砂浓度，磅/加仑

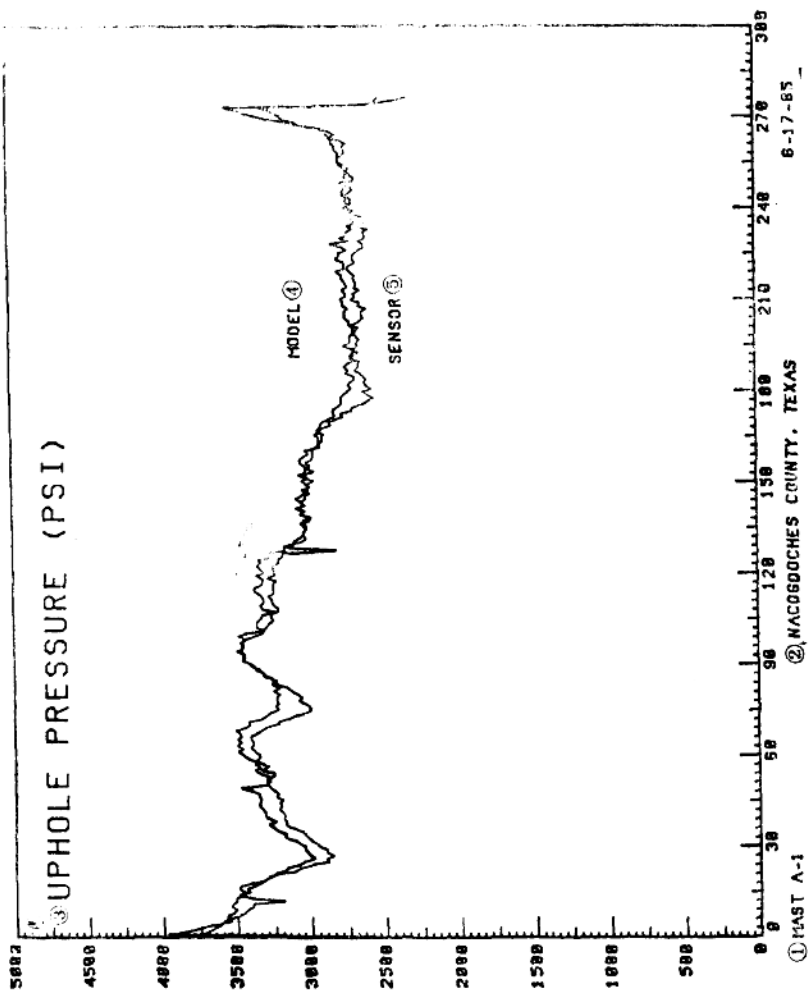
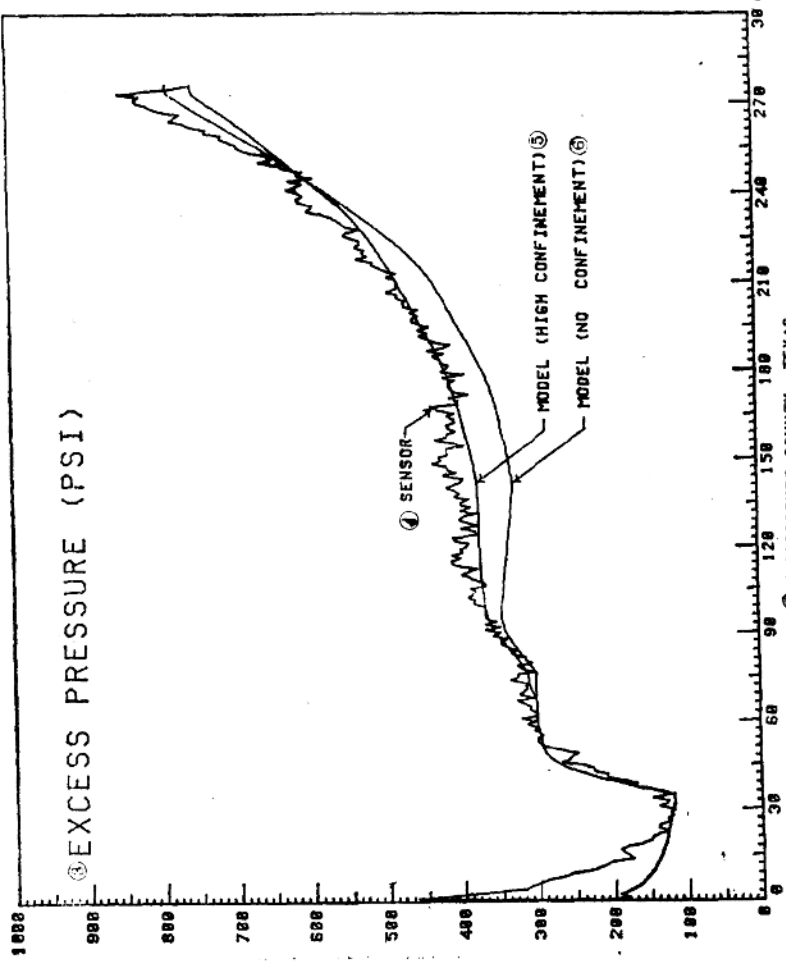
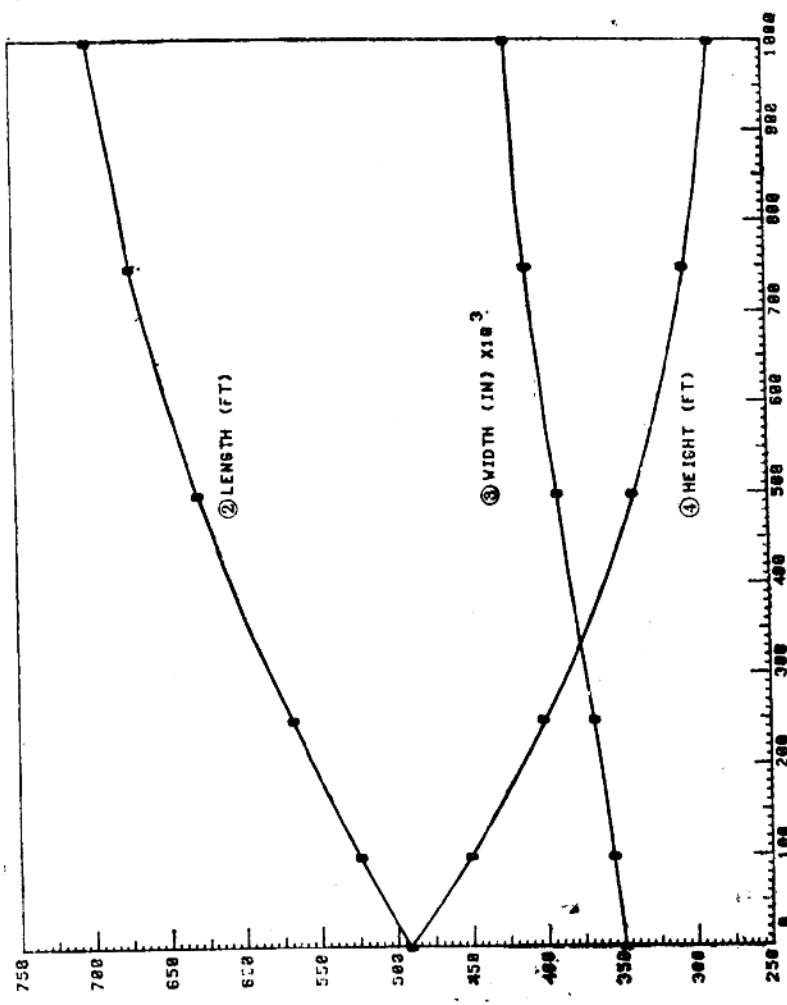


图 4(b) Prairie Mast A-1井井口压力数据 (模型压力与实测压力的比较), 时间单位为分
 ①、②同图4 (a); ③井口压力, 磅/英寸²; ④模型计算值; ⑤传感器实测值



① PRAIRIE MAST A-1
 ② NACOSDOCHES COUNTY, TEXAS
 ③ 剩余压力, 磅/英寸²;
 ④ 传感器实测值;
 ⑤ 模型计算值 (强遏制);
 ⑥ 模型计算值 (不受遏制)

图 4(c) Prairie Mast A-1 井的井底压力数据, 为比较起见, 示出了用粘度和支撑剂阻力影响加以校正的模型计算值



① STRESS CONTRAST (PSI)

图 4(d) 遮挡层与产层地应力差及从图4(c)的最优选对最终裂缝长度、宽度和高度影响的模拟计算值

①应力差, 磅/英寸²; ②裂缝长度, 英尺; ③裂缝宽度 $\times 10^3$ 英寸; ④裂缝高度, 英尺

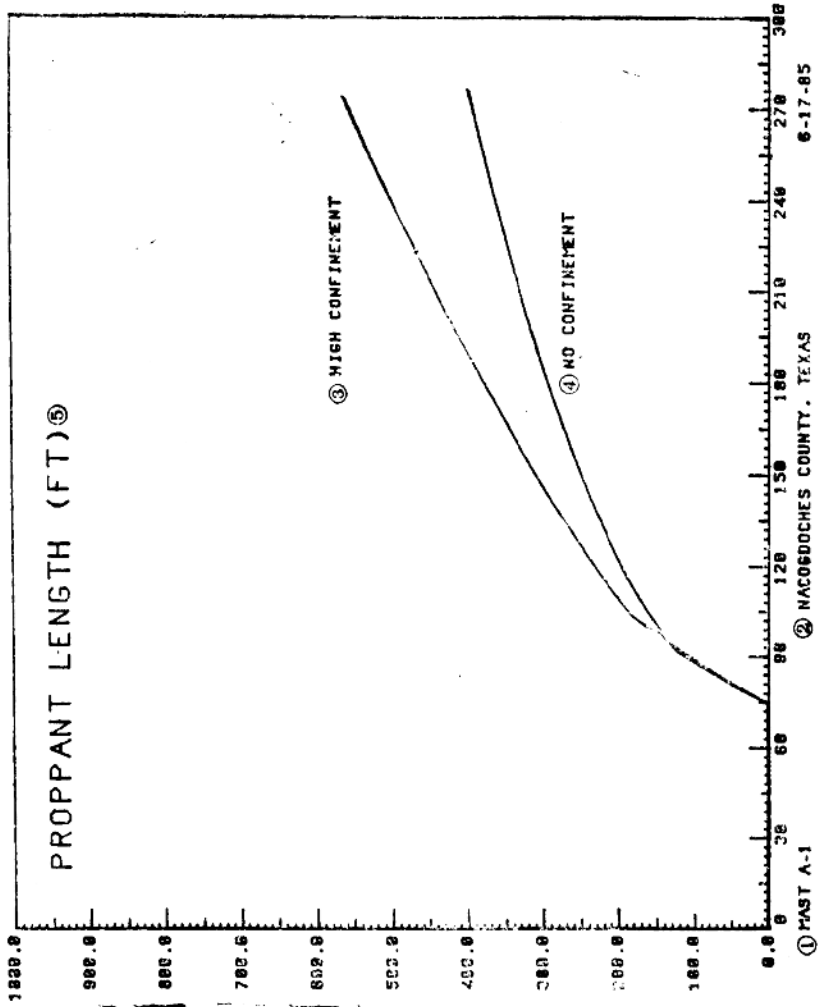


图 4(e) 随时间变化和受遏制影响的支撑长度的模型计算值, 时间单位为分
 ①、②同图4 (a) ; ③受强遏制; ④不受遏制; ⑤支撑裂缝长度, 英尺

