

磨料两相射流理论及 在油井增产中的应用

张永利 于鸿椿 何 翔 著



東北大學出版社
Northeastern University Press

磨料两相射流理论及在油井增产中的应用

张永利 于鸿椿 何 翔 著

东北大学出版社

• 沈 阳 •

© 张永利 于鸿椿 何 翔 2010

图书在版编目 (CIP) 数据

磨料两相射流理论及在油井增产中的应用 / 张永利, 于鸿椿, 何翔著. — 沈阳: 东北大学出版社, 2010.12

ISBN 978-7-81102-894-2

I. ①磨… II. ①张… ②于… ③何… III. ①磨料—射流技术—应用—油气钻井 IV. ①TE2

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2010) 第 255289 号

出 版 者: 东北大学出版社

地址: 沈阳市和平区文化路 3 号巷 11 号

邮编: 110004

电话: 024—83687331 (市场部) 83680267 (社务室)

传真: 024—83680180 (市场部) 83680265 (社务室)

E-mail: neuph @ neupress.com

http: // www. neupress. com

印 刷 者: 抚顺光辉彩色广告印刷有限公司

发 行 者: 东北大学出版社

幅面尺寸: 170mm × 240mm

印 张: 9

字 数: 176 千字

出版时间: 2010 年 12 月第 1 版

印刷时间: 2010 年 12 月第 1 次印刷

策划编辑: 张德喜

责任编辑: 石玉玲

责任校对: 石玉玲

封面设计: 唐敏智

责任出版: 杨华宁

ISBN 978-7-81102-894-2

定 价: 15.00 元

前 言

石油作为主体能源之一，在国民经济和社会发展中占有十分重要的位置。目前还没有其他物质可以替代其作用，但现有探明储量在现有技术水平条件下按目前消费量只能再开采三十余年。而目前在采油技术最先进的国家，其最后采收率也仅为 40%~50%，也就是说在采完后还有半数原油残留于井下。如果尽可能提高采收率，将这部分原油尽可能地多采出一些，特别在当前世界上大部分地区均已勘探完毕，发现更多的大油田可能性不大的情况下，不仅具有重大的经济意义，而且对国民经济和社会文明可持续发展具有重要战略意义，对包括我国在内的世界各采油国家都是亟待解决的研究课题。

油水井水力喷砂割缝增产增注技术和设备是利用磨料两相射流机理开发出来的用于油田提高油井采收率、水井注水量的一项新的技术和设备。本书从两相紊动射流的理论出发，较全面地研究水力喷砂割缝技术的形成、作用效果，以及在油田的试验和应用情况。

在假定磨料两相射流为稳态、平衡、稀相和不可压缩的固液两相流动的基础上，视固体颗粒为伪流体，采用双流体连续介质模型，建立液相流体和固相伪流体的紊流边界层方程。在此基础上采用时间统计平均方法从固液相两个单相边界层方程中推导出了质量守恒方程和动量守恒方程，并最终求得了射流流速的沿程变化规律及其他有关的射流特性参数。

采用上述求得的结果，考虑磨料两相射流对不同材料的作用情况，即金属是受以剪应力为主作用而产生的延性破坏，岩石是受拉应力为主作用而产生的脆性破坏，采用弹性接触和应力波动的模型分别对金属和岩石材料受射流的打击作用进行了分析，得出了在一定工况下磨料射流对金属和岩石的最大打击应力及在岩层中打穿的最远距离。

应用岩体有效应力与孔隙压力、围压和岩石性质的关系，通过对油井割缝后井周岩层的应力和渗透率变化规律的计算和分析，解释了水力喷砂割缝技术增产增注的基本原理是由于割缝后井周围岩的有效应力降低和渗透率提高的结果。在理论计算和室内实验的基础上，确定了磨料两相射流中如压力、流量、喷嘴直径、砂比等一些基本工艺参数。

根据上述的研究结果、现场施工经验及具体施工条件，对割缝设备进行了必要的改进，并分别在大庆、辽河、河南等油田对割缝设备进行了多次地面试验和

井下试验, 确定了现场油井割缝的整个施工工艺过程和施工工艺参数; 同时又在大庆、辽河、胜利、河南、华北等油田进行了割缝施工, 取得了良好的经济效益, 又为割缝工艺和设备的进一步改进和在各油田进一步推广该项技术获得了宝贵的第一手资料。

根据割缝设备研制和在现场施工中遇到的具体情况, 还对割缝设备中溢流阀的研制和调试、割缝后套管的强度、钢球和石英砂的沉降速度等问题进行了理论分析或实验研究。介绍了为在辽河油田实施超短半径水平井系统的需要而应用磨料两相射流技术对油井进行扩孔的情况, 为其在油田进行其他方面的应用作了初步的但却是成功的尝试。

本书共分 8 章, 主要包括两部分的研究。第一部分是关于对磨料射流理论、切割机理及割缝增产增注机理的研究及成果。第二部分包括技术设备的改进、设计、制造、调试及进行地面模拟试验和工业试验, 直至扩大应用范围以及通过数值分析和模拟进行的研究及成果。

在本书的完成过程中, 得到了辽宁工程技术大学章梦涛教授和李成全教授级高级工程师的悉心指导和无私帮助。此外, 在油田现场试验中得到了大庆油田李志恩、李康, 中原油田于欢, 辽河油田朱福宝, 胜利油田谷祖德的大力协助, 在此向他们表示诚挚的谢意。另外, 博士研究生马玉林、程瑶, 硕士研究生路畅、庞清良参与了本书的部分整理工作, 借本书出版之际, 对他们付出的劳动表示感谢。

由于我们的水平有限, 不足和缺点在所难免, 恳请同行和读者予以指正。

著 者
2010 年 10 月

目 录

第1章 绪 论	1
1.1 磨料两相射流的理论发展概述	1
1.1.1 紊动射流理论的发展历史	1
1.1.2 固-液两相流的研究历史	3
1.2 磨料两相射流切割的研究现状	4
1.2.1 磨粒射流切割机理研究概述	4
1.2.2 磨粒射流切割作用下材料失效机理研究	6
1.3 磨料两相射流在油井增产中的应用	7
第2章 固-液两相紊流等效单相流体流动的基本方程	10
2.1 引 言	10
2.2 固-液两相流连续介质双流体模式的基本方程	10
2.3 固体颗粒在流体流动的受力分析	12
2.4 固-液两相流的等效单相流体流动基本方程	14
2.5 固-液两相等效单相紊流的描述方法	16
2.6 固-液两相等效单相紊流基本方程	18
2.7 紊流方程组的封闭性问题	21
2.8 小 结	22
第3章 固-液两相流圆形紊动射流理论	23
3.1 引 言	23
3.2 紊动射流的形成	23
3.3 圆形层流射流边界层方程及其求解	25
3.3.1 单相圆形层流射流	25
3.3.2 圆形固-液两相流层流射流	28
3.4 单相圆形紊流边界层方程及其求解	29
3.4.1 紊流边界层的理论基础	29
3.4.2 圆形紊动射流的流速分布	30

3.4.3 圆形射流的紊动特性·····	32
3.5 固-液两相流紊流边界层方程·····	34
3.6 采用动量积分法求解及讨论·····	36
3.7 小 结·····	38
第4章 磨料射流对材料的打击作用 ·····	41
4.1 引 言·····	41
4.2 磨料射流对材料破坏的作用·····	41
4.3 射流撞击材料时水击压力·····	44
4.4 金属材料在磨料射流作用下破坏机理·····	46
4.4.1 金属材料的破坏形式·····	46
4.4.2 接触应力的确定·····	47
4.5 岩石在磨料射流作用下的破坏机理·····	51
4.5.1 受冲击时岩石失效的原因·····	51
4.5.2 压缩波对岩石的破坏作用·····	51
4.5.3 磨料两相射流中声速的确定·····	54
4.6 小 结·····	56
第5章 油井割缝增产机理及有关射流工艺参数的确定 ·····	58
5.1 引 言·····	58
5.2 油井割缝增产的机理·····	60
5.3 割缝影响区域·····	61
5.4 割缝长度对套管强度的影响·····	64
5.5 磨料射流工艺参数的确定·····	67
5.6 钢球及颗粒的沉降速度·····	68
5.7 小 结·····	70
第6章 井下磨料射流切割设备的设计研制及试验 ·····	72
6.1 引 言·····	72
6.2 井下磨料射流割缝设备设计的改进·····	73
6.3 溢流阀的设计和研制·····	73
6.4 割缝施工工艺参数的选择·····	75
6.5 地面模拟及井下试验·····	77
6.5.1 试验配套设备及其布置·····	77
6.5.2 地面模拟试验·····	77
6.5.3 井下试验·····	81

6.6 小 结	83
第7章 井下磨料射流切割的应用	84
7.1 引 言	84
7.2 一般油层割缝施工设计实例	85
7.3 其他典型情况下割缝施工	89
7.3.1 多层位或特厚油层进行割缝	89
7.3.2 割缝用于薄油层及双层套管代替射孔	90
7.4 井下割缝有关施工参数的确定	91
7.5 割缝设备用于油井扩孔	92
7.5.1 油井水力扩孔的来源	92
7.5.2 水力扩孔方法及成效	93
7.6 割缝设备后续使用状况	95
7.6.1 井下割缝深穿透试验	95
7.6.2 水力割缝技术水井增产应用	96
7.6.3 井下液力喷砂割缝技术现场应用	97
7.7 施工中遇到的主要问题及对策	99
7.8 小 结	101
第8章 油井中磨料射流固、液两相流场的数值模拟	103
8.1 磨料射流固、液两相流场的数学模型	103
8.1.1 磨料射流连续相的数学模型	104
8.1.2 磨料射流离散相的数学模型	105
8.1.3 磨料射流离散相与连续相耦合的数学模型	106
8.2 磨料射流固、液两相流场的数学模型的求解	107
8.2.1 磨料射流数学模型连续性方程的离散	107
8.2.2 磨料射流数学模型动量方程的离散	110
8.3 磨料射流固、液两相流场的数值模拟分析	111
参考文献	126

第 1 章 绪 论

1.1 磨料两相射流的理论发展概述

1.1.1 紊动射流理论的发展历史

磨料两相射流是一种复杂的固-液两相紊动射流。射流是自然界和工程领域中普遍存在的问题,是指从孔口狭缝喷出至周围另一流体领域内的一束运动流体。从不同角度它可以分为许多类型。按流动形态可分为层流射流和紊动射流,在工业领域多为紊动射流;按流体性质可分为可压缩流体和不可压缩流体;按射流断面形状可分为平面、轴对称(圆形)及三维射流;按环境是否有固体边界可分为自由射流和限制射流,如有一贴附固体边界的称附壁射流;以射入周围流体性质是否与射流性质相同而分为淹没射流和非淹没射流,如周围流体是流动的称随动射流;按射流原动力分为动量射流、浮力射流和浮射流三类;按射流流体性质分为气体射流、液体射流及多相流射流等。总之,射流类型繁多、复杂,是流体动力学中最复杂的内容之一。磨粒射流是固-液两相射流,目前对此方面的研究比较少。

射流的研究开始于 20 世纪初,由于研究射流问题的难度较大,至今其理论的研究还仅仅建立在实验的基础上,特别是紊动射流的研究。由于紊流的复杂性,只建立了半经验的理论。最早的研究就是从实验开始的,它采用量纲分析的方法整理实验数据求得经验公式进行分析。现在对于复杂的射流问题如浮力射流和浮射流仍然采用此方法。

Trüpel^[1]1915 首先对圆形自由射流等几种最基本的射流进行了实验。后来 Zimm^[2](1921) 和 Göttingen (1923) 进行了相同的实验,得到了轴对称射流主段速度分布、不同横断面速度分布、轴心速度变化等。通过对实验数据的整理得出如下结论:①与射流接近轴心纵向速度相比,射流中的横向速度很小,在工程应用上,流体可以被视为是平行的,在射流初始段核心区横向速度为零,沿轴向的射流速度可以表示整个射流的速度特性;②自由射流传播规律是射流轴心速度不断下降,而厚度不断增加;③不论射流的起始段还是立体段,如果选择适当尺度,使流动物理量如速度等和坐标无量纲化位于不同断面上这种无量纲分布相同,具有相同的分布函数关系,称为射流各横断面速度分布相似性、自保存性与

自横性；④在自由射流中边界层厚度的发展与距离成比例。

以后，Туркис^[3]（1933）、Förthmann^[4]（1934）、Albortson^[5]（1948）、Абрамович^[6]（1940）、Сипкуу^[7]（1936）又进行了相同的实验，对平面射流主段内速度分布、轴心速度变化、不同断面速度分布等再一次证实了上述结论。

理论分析是1926年Tollmien首先对无限平面平行射流边界层、从极窄出口流出的平面平行射流以及圆形断面射流进行了分析。后来Adpoumonruq综合了不同研究者的实验对Tollmien的理论作了详细的讨论和比较，理论分析和实验结果有很高的近似。Tollmien在进行分析时，以1925年Prandtl建议的混合长度半经验理论作为湍流理论，尤其是纵向尺度远大于横向尺度，射流所形成的类似于边界层的流动是由两部分流速不同的流体的间断面发展而来的，对紊流附面层方程利用流动中自相似性，引入相应的相似变换后把湍流射流边界层偏微分方程转化为一般可分析求解或不太冗长的数值积分方程，得到了射流轴心速度沿轴线的变化规律和沿轴线断面速度分布。

1942年，Gortler采用了Prantle提出的新的紊流半经验理论作为自由紊流的切应力公式求解紊流的附面层，采用偏微分方程进行求解，研究了平面平行射流边界层与平面射流问题。Schlichting^[8]（1960）和Adpamonbuq^[9]（1968）先后采用与Gortler同样的方法通过求解圆形断面射流问题进行了研究。Reichardt通过实验对Tollmien和Gortler圆形平面射流理论计算结果进行了对比，Gortler的结果比较准确接近实验曲线，而他的理论计算结果也比较简单。

求解湍流边界层微分方程是研究紊流射流的一个途径，以后不同学者通过求解湍流边界层研究其他射流问题。除采用Prandtl的紊流半经验理论之外，Adpamonbuq还采用了Tayler的涡量传递理论^[10]以及引用方程直接对射流流场进行分析。由于射流流动对称性和参数分布渐进性，射流在轴心及边界上纵向梯度为零，在轴心处横向速度为零。通过理论分析，对于自由射流各断面动量守恒，对伴随射流则为每一断面动量守恒。

1960年Adpamonbuq提出了动量积分法，研究了紊动射流初始段、立体段边界及射流轴心线上速度变化规律，根据实验证实各断面流速分布是相似的，因而可以事先通过实验或理论分析设定断面上流速分布的规律和模式，这样就可以计算射流流过量动量沿流程的变化。结合实验进行理论分析，各断面上动量通量守恒，按单位宽度考虑写成积分方程式进行积分来求解射流问题。为此还必须对射流边界条件作一假定，可以对射流的厚度变化作线性扩展的假设，也可以对射流从侧边卷吸周围流体流量和边界上流速进行假定。不同的研究者由于分析方法和实验资料的不同，对于射流断面流速分布函数也会有不同，这样就得出了稍有不同的关系式。对最简单最基本射流进行求解与实验结果比较也有较好近似。

从最基本的射流研究发展起来的采用量纲分析对实验结果整理得出的经验公式、采用求解紊流边界层偏微分方程或积分射流动量方程得到解析式以及目前的

对边界层甚至紊流方程直接求数值解的方法就成为研究射流问题的主要方法，正在用来解决自然界和工程领域中的复杂射流问题。

1.1.2 固-液两相流的研究历史

物质分为固、液、气、等离子体四相，等离子体也是气体，其中后三项都是流体。但是流体中有大量固体颗粒流时，而且流体流速足够大，这些固体特性与普通流体相似，认为这些粒子为拟流体或伪流体，充满全流场。在 Euler 法表示中，拟流体性质是空间点的函数。从物理上说，两相流如不计电磁特性一般就只有气-液、气-固、液-固三种。物理多相流也是有的，采油过程中气-油-砂就是气-液-固三相流。两相流是研究两种状态物质混合物运动规律的一门学科。

两相流的现象在自然界和生产实践中随处可见。早在 1877 年 Boussinesq^[5] 就已系统研究了明渠水流中泥沙的输运和沉降这样的液固两相流问题，但是直到 1949 年的名词才开始出现在文献中^[4]，各个研究单位一般带有经验性质对特定问题进行研究，在这以前有关两相流的研究都分散在各个独立的部门，有意识地总结归纳所遇到的各种两相流现象采用统一的观点和方法进行研究是在 20 世纪 60 年代后才开始的。

Marble (1963) 是第一个用流体力学现代方法对固体与气体两相流进行研究的，但其讨论局限于固体粒子体积比小得可以忽略的情况，仅适用于固-流两相流中稀疏相的极限情况。稀疏相是指流体速度很大，固体颗粒体积占总体积之比很小，却又不可忽略（一般为 5%），属于流场中与流体完全混合的固-液两相流，相反则称稠密流两相流。每一类两相流均有各种不同的流动形态，简称流型。不同流型两相流的运动特性是有差别的。在有固体颗粒的悬浮体两相流中，按离散相即颗粒的不同浓度而区分为稀疏相和稠密相两种。在固-液两相流中经 Rudinger (1965) 的研究固体颗粒体积比对固-气两相流的流场有很大影响，因而实际的固-流两相流都不能忽略固体颗粒的作用，尽管在实际工程应用中价值较小，但却引入了一些重要概念。

Murray (1965) 是第一个用联系介质理论系统推导有限体积比固体颗粒与流体混合物两相流运动基本方程的人，得到一些有意义的结果，但是他假设固体颗粒的分压强可以忽略不计，实际上固体颗粒分压强直接正比于体积比。因而伪流体的热力学本构关系、状态方程中其分压为常数。

Soo (1967) 认识到固体颗粒尺寸分布的重要性，用流体力学现成方法推导气体与固体颗粒混合物的基本方程，但却形式地和任意地写出了对每一种尺寸的固体颗粒在该混合物中作为一种组元的多流体理论的一组基本方程。一般情况下固体颗粒尺寸大致是连续的，因此采用无限多尺寸数目来建立基本方程在实际中是没有用的。

Vasiliev (1969) 对不可压缩流体与固体颗粒两相流同样按流体力学的方法

建立基本方程,但他没有考虑温度,因而建立的能量方程可以从运动方程中推导出来,不是一个独立的关系,但还是对紊流两相流进行了一些探讨。

进入 20 世纪 70 年代,随着两相流理论研究的深入,各种概念越来越确切。在已有的研究基础上, Drew (1971)、Ishii (1975)、Delhay (1977, 1982) 等都开始采用近代流体力学中连续介质方法建立两相流基本方程,所用观点和方法基本相似。首先建立每一项瞬时的局部的守恒方程式和相界面的关系式,然后采用多种平均方法得到两相流基本方程和各种相间作用的表达式,他们之间的主要差异表现在采取平均的方式上。Drew 采用空间平均, Ishii 采用时间平均, Delhay 采用时间平均、空间平均相结合的办法,结果基本相同,只是经过平均的各量在时间和空间分布上的光滑性略有差异。关于各种相间作用,在空间表达为对控制体中所有相界面求积分,在时间平均中表达为在进行平均的时间间隔内,对经过观察点的所有间断点求和。

采用这种模型建立的两相流方程只是假设了每一项在局部范围内是连续介质,故称连续介质模型,再不必引入其他假设,因而对两相流的种类及流型并无限制,只是不同种类及流型的两相流是两相间的作用不同。

以后许多学者在讨论实际应用中,对一般形式的两相流方程根据不同类别和流型以及流动特点进行简化,对具体的两相流类别和流型采用流体力学中连续介质观点与方法建立具体的两相流方程,如 Pai (1977) 根据固体粒子与流体混合物稀疏相特点建立了两相流方程,并对其他具体两相流类别、几种流型以及两相流在若干实际问题上的应用进行了讨论。

由于两相或多相流体流动复杂,特别是对固-液、固-气两相流的相间的相互作用目前研究不够,不仅理论还难以确定,而且实验研究也存在一些困难,因此只是对于可以视为平衡流的两相和多相流体的一些流动,可以化为一个等效的单相流体流动求解外,一般的两相流体流动问题难以求解,两相流流体力学目前仍处在成长阶段。

1.2 磨料两相射流切割的研究现状

1.2.1 磨粒射流切割机理研究概述

1983 年,磨料射流在美国首先应用于切割钢化玻璃,在和水射流相同压力下获得成功^[10],从而受到了广泛的关注。在美国、英国、法国、德国、加拿大、日本等国得到了很大的发展,出现了专门的且已商业化的数控磨粒射流切割和加工设备^[2-3]。麦道和波音航空公司研制的程序控制能进行三维切割的高精度磨粒射流设备,用于加工碳素纤维及其他难以加工的材料,加工主要在空气中进行,即是从喷嘴喷出后在空气中形成射流,称非淹没射流,使用工作压力为

200MPa, 并进行了大量工艺上的研究。目前磨料射流已经推广至其他有关工业部门, 有逐渐代替电火花及激光加工的趋势^[4]。美国、日本等国家已经有磨料射流切割系统生产厂家, 我国上海也有厂家生产。

1984年, Hashish^[11]对磨粒射流切割材料过程进行了研究, 认为第一阶段是磨粒冲击产生的相对光滑表面称磨蚀切割区, 而后续穿透作用称变形切割区, 有条纹痕迹。1985年, Summers 又对包括磨粒射流在内经过实验研究得出的理论进行了综合介绍及评述。同年 Labus 对影响精度和工艺的磨粒射流参数进行了研究, 提出了10个射流系统参数包括压力、流量、磨粒材料、粒度等, 机械参数有行进速度、靶距、切割角度等8个。前10个是可以在设备确定时工艺优化的控制变量。1998年, 薛胜雄等在《高压水射流技术与应用》一书中的第十四章“切割应用”中, 收集和总结了磨粒射流的切割技术参数, 并针对压力、流速、喷嘴直径、靶距、被切割材料性能、磨粒粒径及流量等问题, 总结和参考了许多研究者的成果并进行了综合叙述。

1995年, Momber^[5]对 Tikhomirov (1987), Hashish (1989), Oweuiuah (1989), Blickwedel (1990), Matsui (1991), Kovacevic (1992), Zeng (1993) 等不同研究者的成果进行了研究, 提出了磨粒射流切割的深度模型, 认为磨粒流量与深度有密切关系, 并给出了有关图表, 但主要都是通过实验分析整理后建立的经验数学模型。

1992年, Ansari 提出了磨粒射流半消加工原理^[12], 1995年开展了磨粒射流/机械刀具混合半消技术, 1997年 Holmqvist 对磨粒铣消工艺的关键参数进行了研究; 同年 Zeng 研究了靶距、横移速度、磨粒及喷嘴形状对铣加工的影响。

1996年, Hashish 研究了磨粒射流钻孔的几种方式^[6], 1997年, 又研究了磨粒射流参数在抛光时对粗糙度的影响^[10], 同年对钻深孔几种方式及对应不同方式钻孔时的工况参数进行了研究。

采用纯水射流对岩石进行切割在相同效率下比切割金属压力要低。纯水射流一般压力在100MPa以上, 采用磨粒射流大幅度降低了射流工作压力。1992年, Galecki 对磨粒射流切割岩石过程中磨粒射流参数对切割岩石速度的影响^[12]。

目前, 采用磨粒水射流方法切割材料已相继应用于实际工程当中。磨粒水射流相对于纯水射流具有更好的切割效果, 其切割能力可以提高6~10倍。如纯水射流在200MPa下能切割0.2mm的薄钢板材, 而采用磨粒水射流只需20MPa的压力就足够了。另外, 水射流切割的优点还在于对材料的无选择性, 无论是坚硬的钢材, 还是柔软的布匹, 都能实现很好的切割效果。尽管对水射流切割机理的研究很早就开始了, 但由于材料破坏的过程和原理十分复杂, 它不仅与射流条件有关, 还与材料的性质有关, 而目前在这方面的主要成果都是通过实验来完成的, 因此很有进一步研究的必要。

1.2.2 磨粒射流切割作用下材料失效机理研究

关于水射流作用下的材料失效或破坏的机理, 1961 年 Singh 和 Harman^[13]提出了应力波说, 即由于射流打击在材料上产生的应力波造成材料的破坏, Leach 和 Waiker (1964)^[14]提出了射流切割深度与声速的公式, 认为材料的破坏是射流打击力产生的。Farmer 和 Atrewell (1965)^[15]、Daniel 和 Rowlands (1974)^[16]通过实验作了进一步验证, 经过理论推算及实验, 认为只有射流压力超过了 20 倍的材料抗拉强度才会破坏。Powell 和 Simpom (1969)^[17]、Bieniawski (1973)^[18]等根据岩石存在大量微裂隙, 因而认为岩石失效是在射流压力下裂隙扩展的结果, 提出应以普遍的 Griffith 准则作为裂纹失稳, 也即材料破坏的判据。1975 年, Cooley^[19]通过试验以抗压强度作为裂纹失稳扩展的依据, 认为切割岩石射流工作压力应为岩石抗压强度的 10 倍。而 Foreman (1973)^[11]等认为岩石在射流作用下的破坏是与渗入裂纹中产生的水作用有关的。Crow (1973)^[20]还提出了射流经过切削面由于张力产生的气穴作用造成岩石破坏, 而 Reh binder (1976)^[21]在研究射流切割机理中发现, 材料在射流作用下的破坏是在射流直径外圈开始的, 并得出在 1.81 倍射流直径处, 材料颗粒上将产生最大拉应力, 在这拉应力作用下, 材料可能失效。此外还有如 Bresee 和 Crist Dellx 和 Heilhecker 等提出了一些说法^[22-23]。但都是在试验基础上, 以一些假设作为前提提出的, 由于试验方法条件不同, 考虑问题的着重点及对试验结果的分析认证方面存在差异, 因而这些学说都有局限性。

磨料射流自 20 世纪 80 年代末就开始广泛地应用于很多工业部门, 因而很多学者分别从本部门的实际需要出发, 进行了大量的实验研究, 通过对实验数据的整理, 得到了对不同的类型材料、不同厚度进行切割允许的切割速度和需要的射流压力。A. I. Momber 等^[24-27]就收集了 1989—1999 年不同学者提出的经验公式达数十种之多, 公式中考虑的工况参数也不相同, 所有公式都是针对后混砂的磨料射流, 采用不同比例的水喷嘴直径与磨料喷嘴直径的情况得出的, 用以确定切割一定厚度的不同材料的切割速度和射流压力。薛胜雄等在其所著的《高压水射流技术与应用》一书中, 从大量的磨料射流切割的实际应用中收集了一些工况参数, 列成表供相同材料切割的参考。Ansari 等^[28-32]对于岩石也举出了一些例子。但是所有的上述公式和参数都是不同的学者根据本单位的需要, 对本部门经常切割的材料采用不同的实验途径所得到的, 而且都是在自由射流切割条件下取得的, 所用的靶距、切割速度或一次切割的深度也不相同, 因而带有很强的经验性, 没有普遍参考的意义, 只能在切割厚度相近的相同材料选择切削速度或对一定切削速度切割深度下, 选择其他射流切割参数, 有一定的参考意义, 目前切割所用参数主要通过试验决定。

此外, 还有其他大量的叙述, 但都是通过试验研究得到的定性叙述, 不能作

为材料破坏的定量依据。对于工业切割射流来说,目前普遍认为射流对材料打击作用下和在射流产生的应力波引起的应力超过材料强度而发生的破坏是主要的,但这只是对纯水或其他单一流体射流造成材料破坏的作用机理所进行的分析。对于磨料射流造成材料的破坏,目前只是对磨料射流参数对切割的影响进行了大量的实验研究^[33-34],建立了不同的磨料射流切割的深度模型^[35],在磨料射流作用于同一材料时,工作压力低于纯流体射流压力发生破坏,从这个事实出发,普遍认为磨料射流主要是射流中的固体磨料颗粒对材料的撞击,造成材料破坏,液体流束对材料的作用是次要的。而磨料射流对金属套管及岩层作用以及在磨料作用下金属套管和岩层在磨料射流作用下破坏机理的研究还相对较少。

1.3 磨料两相射流在油井增产中的应用

石油在国民经济和社会发展中占有十分重要的位置。目前还没有其他物质可以代替,但现有探明储量在现有技术水平条件下按目前消费量还只能开采三十余年。而目前在采油技术最先进国家最后采收率也仅为40%~50%,也就是说在采完后还有近半数原油残留于井下。如果尽可能提高采收率,将这部分原油尽可能的多采出一些,特别在当前世界上大部分地区均已勘探完毕,发现更多的大油田可能性不大的情况下,不仅具有重大的经济意义,而且对国民经济和社会文明可持续发展具有重要战略意义,对世界上各采油国家包括我国在内都是亟待解决的研究课题。

依靠油藏天然能量进行石油开采的所谓一次采油采收率是很低的,约在15%以下;依靠注水、注气人工补充能量的二次采油,再加上其他采油辅助措施如压裂进行开采可达到40%。因此新的开采措施的研究十分必要。根据油藏流体、岩石特性和开采过程中油藏出现的各种微观和宏观特征,有针对性研究采用在水中添加化学试剂改变水性质驱油等,在开采中采取酸洗、超声、振动等以及在井中打径向水平孔和对套筒及井周岩层割缝等,解除井周岩层堵塞,提高渗透率,减少油流阻力,提高单井日产量,尽量将井周油层原油采出,提高采收率。这些措施大部分都处于试验研究之中,同时分别进行了现场应用。

水力喷砂割缝增产技术是世界上首次将磨粒射流应用于油井同时进行套管及岩体的切割。该方法是将少量固体颗粒材料(石英砂)均匀混入流体(水)中,经加压送至井中喷头,在喷头上形成一对互成180°的径向射流,喷头沿井眼上下移动,利用射流将井中套管及管外油层切割成多对狭长深缝的技术。其技术目的是解除井周边地层由于污染造成的堵塞和钻井形成的应力集中造成的压实效应,提高地层渗透性,从而达到油井增产、水井增注、提高油田采收率的效果。

磨料射流应用于油井井下割缝,是前苏联科学院院士、全俄岩石力学及矿山测量研究院佩图霍夫教授首先提出的。前苏联岩石力学与矿山测量研究院(简称

伏尼米研究院)于20世纪80年代首次在伏尔加油田进行井下割缝增产试验,证实其可行性,因而在现场进行推广及进行包括专用工具、工艺试验等研究。因受苏联解体影响,到20世纪90年代初专用工具才基本上试验成功。该专用工具能在井下喷嘴处形成射流,同时自行沿井轴线向下移动,射流停止后自动复位以备下次切割。现在它已成为俄罗斯油田的一项常规增产技术。

1993年,我国东北内蒙古煤炭公司科技发展中心曾聘用俄罗斯专家应用俄方提供的工具在胜利油田进行了水力喷砂割缝增产试验。原准备进行4口井试验,由于开始试验的两口井产液量增加甚微,试验终止。通过研究改进,1994年新型的割缝工具改进并试制完成。1996年,我国辽宁工程技术大学与俄罗斯伏尼米研究院及大庆油田签订了科技合作协议,俄方派专人携带新研制完成的井下割缝工具在大庆油田进行了两次地面试验及两口井的现场试验,对喷头可以自行移动进行割缝的专用工具进行验证,并对中间安装有套管的水泥靶进行切割实验,将工具放在套管中,结果在35MPa压力时将套管及外包5mm铁板的直径1.5m的水泥靶穿透,取得了成功。试验的两口井日产液量和产油量均提高一倍以上^[4]。试验结束后,俄方人员带设备回国,未签订继续提供油井割缝服务的协议。在此基础上,辽宁工程技术大学开始进行磨料射流油井割缝技术的研究。

经过2年多的努力,井下割缝工具试制成功。通过地面水泥靶模拟割缝试验,结果在30MPa压力下射穿套管和1.2m水泥块及外包的5mm铁板。并先后在大庆、辽河、胜利等油田进行20余次实际割缝试验,施工后产油量及注水量为施工前的2倍以上。并通过井壁超声电视对辽河油田割缝后的油井进行了测试,测试结果证明采用自行研制的设备进行磨料射流油井割缝均达到和超过了俄方设备的技术指标^[36]。目前为止已经为大庆、胜利、河南、中原等油田提供井下割缝的专用工具,以进行油井、水井的割缝施工,包括各油田自行进行施工的井数在内,大庆、胜利、辽河、中原、河南、吉林、华北、长庆等油田施工井数至2003年为止超过300余口井,并开发了用于4吋油井施工的割缝工具。施工后产油量及注水量一般为施工前的2倍,只有个别井因其他原因增产效果不明显,稳产时间一般在两年以上。成功率高,只需借用油田的压裂设备即可施工;成本低、操作简单,不易出故障,而且已经被推广应用在极薄油层、多层套管油层代替射孔及进行油井的深穿和井下扩孔。磨料射流油(水)井割缝技术已经成为一项成熟的增产、增注,提高原油采收率的新技术。

目前这项技术已在俄罗斯、中国、美国和西欧等国开始使用。辽宁工程技术大学工程力学研究所通过与辽河油田合作,应用此项技术在井中进行扩孔及在大庆应用于薄油层油井代替射孔及套损井修复后双重套管的射孔。

根据俄罗斯及我国现场应用的统计结果,施工总数中的75%以上油井经割缝后日产量提高一倍以上,有的达到数倍,甚至十余倍。其中有些油井施工后不需要另外投入,稳产期在两年以上。而施工期仅一天左右。使用的专用工具简

单, 不易损坏, 可重复使用, 只需更换易损件就可延长使用寿命。工作压力约 30MPa, 安全可靠, 可以利用油田水泥车或压裂车作动力源, 所需费用低。可以在各种不同驱油方式下及与其他增产措施同时使用, 分层处理能力强。还可以割缝代替射孔, 特别是在套损井修复后割开双层套管和对薄油层、薄夹层进行切割, 配以旋转喷头可以用于井中扩孔。不仅是一项油井增产、提高采收率的采油新技术, 而且是在石油开采中有广泛用途的新技术。

总之, 本项技术可以清除油井周围的污染, 大幅度提高油井的产量或注水量, 经改进的设备还可以代替射孔, 清洗套管, 维修破损井及油井扩孔等多方面的应用。对于该项技术的机理进行进一步的理论和应用研究, 不仅具有理论意义, 而且在油田开采方面具有广阔的应用领域。