

■ 熊继有 廖荣庆 陈小榆 著

SHELIU FUZHU ZUANJING

POYAN LILUN YU JISHU

射流辅助钻井 破岩理论与技术

四川出版集团 · 四川科学技术出版社

油气藏地质及开发工程国家重点实验室
(西南石油大学) 基金资助

射流辅助钻井 破岩理论与技术

□ 熊继有 廖荣庆 陈小榆 著

四川出版集团 · 四川科学技术出版社

图书在版编目(CIP)数据

射流辅助钻井破岩理论与技术/熊继有等著. - 成都:
四川科学技术出版社, 2007. 6
ISBN 978 - 7 - 5364 - 6206 - 9

I. 射… II. 熊… III. 水射流破碎
IV. TD231. 62

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 037029 号

射流辅助钻井破岩理论与技术

著 者 熊继有 廖荣庆 陈小榆
责任编辑 何 光 李 红
特邀编辑 钟水清
封面设计 李 庆
版面设计 康永光
责任出版 邓一羽
出版发行 四川出版集团·四川科学技术出版社
成都市三洞桥路 12 号 邮政编码 610031
成品尺寸 185mm × 260mm
印张 14.5 字数 350 千
印 刷 四川省农科院情报所印刷厂
版 次 2007 年 6 月成都第一版
印 次 2007 年 6 月成都第一次印刷
定 价 68.00 元
ISBN 978 - 7 - 5364 - 6206 - 9

■ 版权所有·翻印必究 ■

■ 本书如有缺页、破损、装订错误, 请寄回印刷厂调换。

■ 如需购本书, 请与本社邮购组联系。

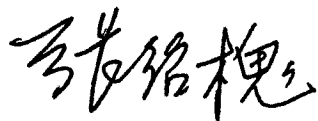
地址/成都市三洞桥路 12 号 电话/(028)87734081
邮政编码/610031

序

半个世纪以来,随着旋转钻井理论与技术的科学化、现代化,喷射钻井理论与应用技术持续发展,在提高牙轮钻头机械破岩效果的同时,越来越重视研究钻头喷嘴射流的作用机理和以钻井循环系统水力能量优化分配理论为基础的水力辅助破岩作用。并由此逐步形成了对(超)高压水射流水力破岩、清岩与机械辅助破岩相结合的破岩理论和应用技术的系列研究。它是当今和今后相当长时期内提高钻井速度、降低钻井成本的重要技术和发展方向之一。它是国内外石油钻井界特别关注的问题之一。近年,试验与研究了井下水力自激与它激振荡脉冲等新型高效射流、研制了系列化喷嘴结构、井下增压器和(超)高压射流破岩钻径向水平井及强化洗井等技术,并在探索水力射孔技术等方面不断取得突破和有效应用。国际学术界、工程界对(超)高压水射流理论在石油钻井上的应用形成了持续发展的态势,研究不断取得突破。

我国在 20 世纪 60 年代开始应用喷射钻井技术,特别是 70 年代末开展了喷射钻井、新型钻头和优质钻井液“三大技术”使钻井速度“翻番”,其中钻头喷嘴射流辅助破岩与强化清岩起了重要作用。本书全面地反映了国内外及作者们对射流辅助破岩、清岩的基本理论和方法,以及最新发展趋势;揭示了钻进过程中射流辅助机械破岩的耦合关系及其规律。对我国石油钻井射流辅助钻进破岩等应用技术的发展有着重要的理论意义、学术价值和技术导向作用。

本书在本领域具有理论性比较系统、技术实用性比较强等特点。本书的出版为从事石油钻井完井工程、石油机械与工具装备、矿业和地下挖掘等工程技术人员和大专院校相关专业师生以及相关领域科研人员提供了最新、最实用的专著和参考用书,读者定能从中获得有益的知识 and 启示,并期望借以作为与广大读者交流的载体。



2007 年 3 月

前言

随着喷射钻井技术的应用与发展,射流辅助钻井破岩技术仍将是提高钻井速度、降低钻井成本的重要技术之一。近30年来,国内外加快了对射流辅助钻井破岩技术的研究与应用,并取得了重要成果。本专著是在总结近20多年来的科研成果和培训班的新技术教材基础上撰写而成的。

本书从射流基本理论与应用特点出发,阐述了射流辅助钻井破岩的基本理论与方法,介绍了喷嘴结构特征、井底流场特性以及岩石物理力学性质与射流辅助钻井破岩的内在关系、规律和影响因素。本书全面介绍了著者最新研究成果和国内外研究与发展状况。全书共分八章。第一章、第三章、第四章、第七章、第八章由西南石油大学熊继有教授撰写。第五章和第六章由廖荣庆教授和熊继有教授合作撰写。第二章由陈小榆副教授撰写。全书由熊继有教授统稿。在撰写过程中得到了张绍槐教授的指导。在专著成果研究过程中陈德颀、孙文涛参加过研究工作,历届硕士研究生(主要有王希勇、钱声华、周鹏高等)做了不少工作,在此深表感谢。此外,还要感谢国家自然科学基金委和“油气藏地质及开发工程国家重点实验室”及西南石油大学的大力支持。

由于本书涉及多学科内容,加之作者水平有限,书中不妥之处在所难免,恳请同仁及读者批评指正。

熊继有

2007年3月于西南石油大学

内 容 提 要

本书阐述分析了喷嘴射流辅助钻井破岩的基本原理与方法,以及射流结构参数、井底流场特性、岩石物理力学性质与射流辅助钻井破岩的内在关系、规律和影响因素。介绍了室内实验研究成果和工业试验的情况,以及新型射流的研究、应用和发展。内容主要包括射流概论、射流流体力学基本理论、钻井工程岩石破碎力学基础、射流喷嘴结构、牙轮钻头喷嘴射流辅助钻井破岩理论与技术、自激振荡脉冲射流辅助破岩理论与技术、井下水力它激振荡增压理论与方法、高压射流辅助钻井破岩技术研究与发展等内容。

本书可供从事钻井工程、钻井岩石破碎力学研究的科研人员、现场工程技术人员和相关研究生、本科生、培训班等学习参考。

目 录

第一章 射流概论	1
第一节 射流技术发展简况	1
第二节 射流的分类	2
第三节 射流技术的应用	5
第二章 流体力学基础	8
第一节 流体及其主要物理性质	8
第二节 声速(C)、滞止参数、马赫数(M)和速度系数(λ)	13
第三节 黏性流体动力学基本方程	20
第四节 紊流概述	31
第五节 紊流基本方程	34
第六节 紊流封闭模式	38
第三章 钻井工程岩石破碎力学基础	42
第一节 岩石的结构和特点	42
第二节 钻井工程岩石分类及性质	45
第三节 钻井工程岩石物理力学性质	47
第四节 钻井工程岩石矿物成分	54
第五节 钻井地层岩石破碎机理	60
第六节 钻井岩石力学研究进展	64
第四章 射流喷嘴结构	66
第一节 喷嘴结构及射流特性	66
第二节 连续射流喷嘴	67
第三节 新型射流喷嘴	73
第四节 喷嘴射流结构数值模拟	77
第五章 牙轮钻头喷嘴射流辅助钻井破岩技术	83
第一节 喷射钻井概述	83
第二节 喷射钻井井底流场特性	85
第三节 钻头喷嘴射流辅助破岩机理	104
第四节 射流辅助钻井破岩门限压力	110
第五节 机械—射流破岩耦合特性	115
第六节 三牙轮钻头水力系统研究与应用	121

第六章 自激振荡脉冲射流辅助破岩技术	132
第一节 概述	132
第二节 自激振荡脉冲射流基本理论	135
第三节 自激振荡脉冲射流辅助破岩机理	148
第四节 自激振荡脉冲射流喷嘴实验评价	155
第五节 自激振荡脉冲射流喷嘴工业应用	167
第七章 井下水力它激振荡增压理论与方法	168
第一节 井下水力它激振荡增压物理模型	168
第二节 它激振荡增压腔内流体动力学数学模型	171
第三节 它激振荡水力增压实验研究	178
第四节 它激振荡腔室内流体流动特性数值模拟	193
第五节 它激振荡增压腔优化设计	204
第八章 高压射流辅助钻井破岩技术研究与发展	211
第一节 高压射流钻井系统	211
第二节 井下高压泵	213
第三节 高压射流辅助钻井破岩发展	216
参考文献	219

第一章 射流概论

射流技术是 20 世纪 70 年代初发展起来的一门新技术,已应用于清洗、切割、破碎、钻孔等作业,遍布煤炭、石油、化工、电子、冶金、铁道、交通、航空、航天、林业、纺织、城建、船舶、有色金属、农业、环保、医疗卫生、安全工程等国民经济的各个部门和领域。随着射流技术的应用与发展,更加显示出射流技术独特的优越性,已经成为一门独立的新学科,在国民经济中发挥着重要作用。

第一节 射流技术发展简况

中国古代,人们用“滴水穿石”形容持之以恒必有所获,但滴水的确可以穿石。如在大雨中飞行的飞机被雨滴侵蚀的“雨蚀”现象;大雨把田地冲出水沟,剥落山岩,甚至造成泥石流等。随着科学技术的发展,人们研究利用高压射流为人类服务。射流在工程中的应用起源于采矿业,20 世纪 50 年代初前苏联和中国就开始用水射流采煤。随着水力采煤技术的深入研究与应用,人们认识到提高射流的压力可以显著地提高水力采煤效果。于是,从开始的 10 MPa 以下的水射流压力开采中硬以下煤层,到 70 年代发展到用 20 ~ 30 MPa,后来达到了 200 MPa 射流压力的采煤机和掘进机。

自 1972 年英国组织召开了第一次国际水射流切割会议后,1981 年美国水射流技术协会成立,1983 年日本水射流协会成立。1987 年,成立了国际水射流协会,并出版了自己的正式刊物《国际水射流杂志》。我国的水射流技术研究是从 20 世纪 70 年代开始的,从最初研究与应用的煤炭部门,逐渐发展到石油、冶金等其他领域,现在已遍及整个国民经济和日常生活中。从 1979 年开始,我国每两年召开一次全国水射流技术研讨会,1987 年在北京还组织了第一届环太平洋国际水射流会议。1995 年成立了中国劳动保护科学技术学会水射流技术专业委员会,推动了我国水射流技术研究与应用的发展。

射流技术的发展大致可分为四个阶段:

第一阶段:探索性试验阶段是 20 世纪 60 年代初,以低压水射流采煤为主。

第二阶段:设备研制阶段是 20 世纪 60 年代初至 70 年代初,主要是研制高压泵、增压器及高压管件,同时推广应用水射流清洗技术。

第三阶段:工业应用阶段是 20 世纪 70 年代初至 80 年代初,主要特点是大量的水射流采煤机、切割机和清洗机相继问世,并进行工业性试验和推广应用。应用领域发展到石油工业中的高压喷射钻井的破岩技术。

第四阶段:迅速发展阶段是 20 世纪 80 年代初至 90 年代中期,主要是射流技术研究的进一步深化,磨料射流、脉冲射流和空化射流等新型射流发展加快,许多产品已达到商品化。

射流是利用泵提供的具有一定压力的流体,通过具有一定形状和尺寸的喷嘴(水喷、水孔)形成的高速射流。即由喷嘴喷出的流体并非由于重力作用而传播的现象称为射流。射流技术之所以能在国内外得到迅速发展,主要是由他本身所具有的很多特点决定的。它的主要特点有:

- (1) 工作机体较小,而效率较高。
- (2) 工作压力虽高,机构仍然轻巧、灵便。
- (3) 喷头体积小,运转灵活方便。
- (4) 可以用液体进行控制,使喷头及系统结构进一步简化。
- (5) 切割出的截槽窄而整齐,可用于任何曲线和成形加工。
- (6) 设备结构简单,用途广泛。
- (7) 用水量少,一般不发生污染。
- (8) 便于使用计算机实现自动调节和控制。

第二节 射流的分类

射流的种类较多,分类的方法也不尽相同,根据国内外的应用实际情况,介绍几种常用的分类方法。

一、按射流特征分类

按射流特征分类大致可分为5种类型射流。即连续射流、脉冲射流、空化射流、旋转射流和磨料射流等。

1. 连续射流

连续射流是最普通、最常用的射流形式,连续射流对物料(体)施载开始时有一个短时的冲击峰值压力,随即是稳定的压力值。连续射流的最大压力值 p_L 的关系式为:

$$p_L = \rho v^2 / 2 \quad (1-1)$$

式中: p_L 为射流压力值;

ρ 为射流流体密度;

v 为射流速度。

2. 脉冲射流

脉冲射流是非连续射流,或称间断(断续)射流,这种射流对物料的施载特点是一个持续极短时间的压力峰值,其峰值的持续时间取决于频率。脉冲射流的瞬时压力峰值 p_m 的关系式为:

$$p_m = \rho cv \quad (1-2)$$

式中: p_m 为射流瞬时压力峰值;

ρ 为射流流体的密度;

c 为射流流体的声速,在水中约为1 500 m/s;钻井液中为800 m/s;

v 为射流速度。

3. 空化射流

空化射流是人为地在水射流来流内产生许多空泡,利用这些空泡破裂所产生的强大冲击力来增强射流的作用效果。在等温压缩条件下,空化射流产生的冲击压力 p_k 与连续射流冲击压力之间的关系式为:

$$p_K = \frac{p_L}{6.35 \exp\left(\frac{2}{3a}\right)} \quad (1-3)$$

式中: p_K 为冲击压力值;

a 为液体中气体含量(1/6 ~ 1/12)。

4. 旋转射流

旋转射流是指在射流喷嘴不旋转的情况下产生的具有三维速度的射流质点,沿着螺旋线轨迹运动而形成的扩散状射流,它不同于喷嘴绕一固定轴旋转而导致的射流旋转。这种旋转射流是靠喷嘴腔内的导向元件,将一维纯轴向来流导引成具有轴向、切向、径向三维速度的流动而形成的。旋转射流的高速区不是处在射流中心部位,而是集中在离开射流中心一定距离的一个圆环区域内。由于射流质点上切向速度的存在,使射流旋转前进,导致中心部位的低速低压区形成。

旋转射流的结构特性通常是指射流的速度和压力分布特性。理论分析已表明旋转射流由于流体质点具有三维速度。因此,当射流脱离喷嘴后,必然在前进中形成一定的扩散,射流质点的运动轨迹基本为一空间螺旋线,形成了其独特的喇叭状外形和特殊的速度和压力分布。

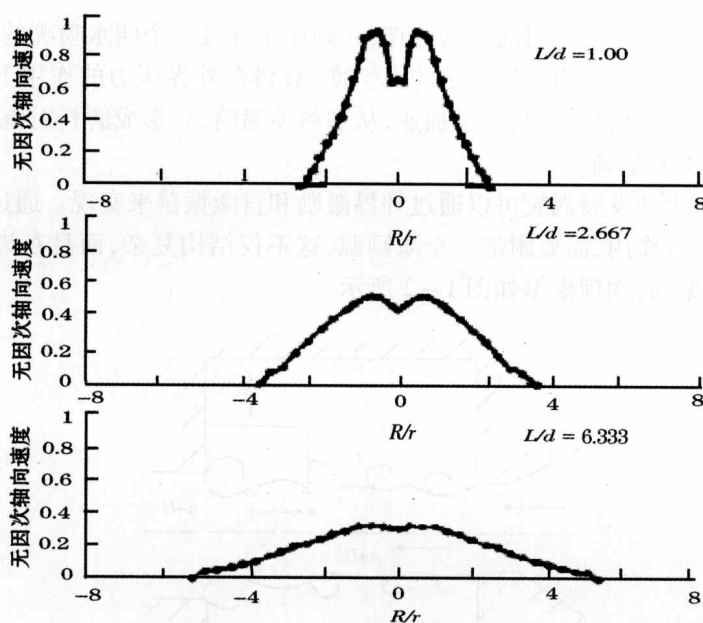


图 1-1 旋转射流横向速度分布图

图 1-1 显示了旋转射流轴向速度分布及发展规律,横坐标为无因次半径,纵坐标为无因次轴向速度,图形分别为无因次喷距 1、2.667、6.333 三个横断面的分布情况。结果表明,在近喷嘴范围的截面上,轴向速度明显存在着中心低速区,随着射流的向前喷射,中心低速区在一定范围内变得更低,而射流的高速区则向外发展。由于旋转射流的强烈卷吸作用带动了周围流体的流动,同时在其边界上进行能量交换,将自身的动能传递给周围的流体,使射流本身的

速度逐渐降低,直到较远的截面处,发展成与普通圆射流分布相类似的较平缓的速度分布,即射流轴心处速度较大。由图可知,整个射流主体段的轴向速度分布呈现“M”形分布的特点,即射流中心某一区域内其速度值较小,离开中心一定半径处存在着最大速度,而后随着径向距离的增大,来流速度逐渐降低。

5. 磨料射流

磨料射流是纯水射流的发展,是近十年来发展起来的一项具有远大前景的技术。其基本原理是在高速运动的水射流束中加入一些磨料粒子,利用其与物件的碰撞、冲蚀和刮削作用,对物件进行喷击及切割。由于磨料粒子质量集中且有锋利的棱角,在水射流中是不连续的,由磨料粒子组成的高速粒子流对物件还产生高频冲击而具有很好的工艺特性。其工作方式与等离子切割,火焰切割相似,但不会产生热应变,且加工精度高,操作简单、方便。其工作原理与传统的喷丸相似,但其能量高度集中,且采用湿式系统,不会造成环境污染。目前磨料射流已经广泛应用于清洗、除锈、切割高强度材料以及进行特种工艺和加工等行业中。形成磨料射流有几种方法:

(1) 前混合式磨料射流

前混合式磨料射流是将磨料与水充分搅拌成浆体,然后通过泥浆泵抽汲,再经过加压或直接输送给喷嘴形成磨料射流。

(2) 后混合式磨料射流

后混合式磨料射流是采用射流泵的原理,让高压水通过一个叫水喷嘴的喷嘴,在水喷嘴与磨料喷嘴之间的一个混合腔内产生一定的真空度,磨料在外界压力的作用下,进入混合腔,并与水射流发生剧烈的紊动与掺混,经过加速,从磨料喷嘴喷出,形成磨料射流。

(3) 自激振荡磨料射流

为了使射流产生和发展涡旋可以通过外界激励和自激振荡来实现。通过外界激励的方法来对射流剪切层进行作用,需要附加一个激励源,这不仅结构复杂,而且在许多场合是不能实现的,故采用自激振荡,物理模型如图 1-2 所示。

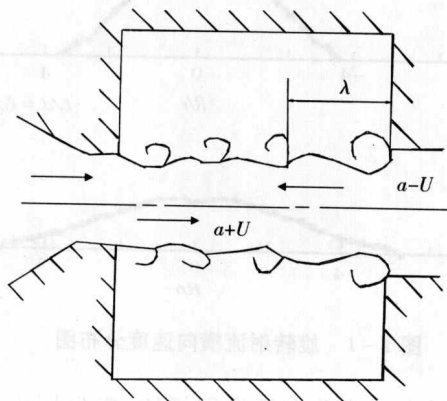


图 1-2 自激振荡磨料射流装置示意图

当射流从水喷嘴出来后,由于扰动变形,其表面局部地方与磨料喷嘴碰撞。这一碰撞一方面加剧了射流束表面的变形。同时在这里产生压力瞬变,该瞬变波沿射流束向上游反射,到达水喷嘴时又与之碰撞,反弹回来,沿射流束向下游传播,再与磨料喷嘴碰撞、反射。这样在射流

束内部就形成了一个来回振荡的瞬变波。当该瞬变波的波峰与射流束表面的形变波波峰同时到达磨料喷嘴处时,这种振荡得到加强,形成正反馈,振荡越来越强,最后稳定于一个水平。而形变波峰与振荡瞬变波峰不能同步的,则被抑制。这样就间接地进行了振荡频率的选择,使射流稳定地运行在一定的频率之上,射流束表面与之相对应形成一定波长的涡旋。当频率适中时,这些涡就足够大,当其到达磨料喷嘴时,与之碰撞挤压产生强烈的压力瞬变,一方面使来流减速,另一方面使下游流体加速,以高出常压许多倍的速度喷出,这样就形成了自激振荡。在碰撞过程中,大涡一方面把卷入其中的磨料带出去,把它下游的周围流体推出去;另一方面在其上游形成真空,使腔外的流体进入其中,由上游的与该涡相邻近的大涡卷进来推出喷嘴。这样循环不断,连续工作,就形成了自激振荡磨料射流。

二、按射流压力分类

射流压力值是应用中设计的最重要的参数,它涉及工艺技术、设备的经济性和合理性。根据有关标准分类如表 1-1 所示。

表 1-1 射流压力分类等级

压力等级	压力范围 (MPa)	压力泵类型
低压	0.5 ~ 10	离心泵、柱塞器
高压	10 ~ 100	柱塞泵、增压器
超高压	≥ 100	增压器

三、按射流环境分类

1. 淹没射流

射流的工作介质与环境介质相同时,这种射流称为淹没射流。

2. 非淹没射流

射流的工作介质与环境介质不同时,这种射流称为非淹没射流。

3. 自由射流

射流的作业环境没有固壁约束下的射流称为自由射流。

4. 非自由射流

射流的作业环境具有固壁约束下的射流称为非自由射流。

油气井钻井中的喷嘴射流属于淹没非自由射流。

第三节 射流技术的应用

射流技术的应用领域十分广泛,在国民经济的各个行业和日常生活中发挥着重要作用。主要应用在清洗、切割、破碎、除尘、灭火和造型方面。

一、清 洗

在工业中应用的各种设备接触的介质有所不同,在不同的温度、压力和介质之间的物理化

学作用下,常常会在设备的某些部件中产生高温聚合物、结焦、水垢、油垢、沉积物和腐蚀物等。这些污垢会使经济效益和技术安全下降,严重时会导致事故和停产。

1. 清洗方法

(1)人工清洗。清洗质量差、速度慢,有害人体健康和环境保护。

(2)化学清洗。化学清洗具有较大优势。但是对设备具有腐蚀作用,影响设备部件寿命;而且化学清洗液的处理和排放困难,对环境保护十分不利。

(3)射流清洗。射流作为一种十分有效的清洗技术得到广泛应用,它还包括除锈、除垢、疏通等。我国首先应用于船舶制造业,1997年天津新港已成功地应用水射流技术清洗船体。1985年,首次研制成功高压水射流清洗设备,国产增压器的压力已达到600 MPa。

2. 射流清洗主要应用范围

(1)各种管道及热交换器的清洗。

(2)各种油罐、气罐及其他金属、非金属容器的清洗。

(3)核电站及发电厂设备的清洗。

(4)船舶、钻井平台及车辆的清洗。

(5)飞机跑道的清洗。

(6)机械设备、零部件及汽车喷漆房的清洗。

(7)建筑物及古迹的清洗与维护。

(8)轮胎及橡胶模具的清洗。

清洗主要是采用高压纯水射流和磨料射流两种。

二、切 割

近20年来,射流切割技术的应用已走向商品化市场,射流切割已占据了相当的比重。射流切割的主要优点是环保、精度高和切割物料浪费少。1971年,高压水射流切割机在美国问世,成功地切割了多种非金属软材料。1985年,我国由航空工艺研究所研制成功了第一台高压水射流切割机。国产水射流切割设备压力多为20~100 MPa,国外水射流切割设备压力范围在100~270 MPa,现已高达400 MPa。

射流切割主要应用范围有:

(1)建筑材料切割。

(2)异型板材切割。

(3)塑料切割。

(4)纤维和纺织切割。

(5)食品切割。

(6)新材料切割。

(7)医用手术切割(除)。

(8)玻璃切割。

三、破 碎

我国最早应用射流技术破碎的是煤炭部门,自1956年开始试验水力采煤,获得了长足的

发展,走在世界水力采煤的前列。

1. 水力采煤

俄国在 1914 年开始尝试开采泥煤,1915 年进行了第一次水射流采煤试验。限于当时技术水平,直到 1952 年,前苏联开始进入商业化水力采煤,每班可采煤 600 t,是常规方法采煤量的两倍。现在世界上水力采煤被广泛采用。

2. 射流钻孔采矿

美国应用射流钻孔及采矿技术,属于领先地位的是高级采矿建筑公司、费勒第尔公司和费尔莫尔公司。高级采矿建筑公司研制生产的第一台产品是射流锚杆钻机。它是一种用于地下矿山安装顶板锚杆的水射流钻机,这种钻机可钻出 19 ~ 25 mm 的小口径锚杆孔,用于煤矿井下使用。费勒第尔公司为石油工业研制了水射流钻探系统,该系统主要由四个部分构成:增压器;双喷孔旋转接头;双管钻具组合;具有一个高压喷嘴和两个低压喷嘴的钻头。费尔莫尔公司为民用公司服务,研制了水射流系统。包括钻小型地下涵洞,通讯电缆,水、电、气干线,小型下水道和泄洪沟等。

3. 冻土与冰

地球的高纬度地区存在着大量的冰雪。这些地方进行施工作业时,必然会遇到冻土与冰的破碎问题。1972 年,美国陆军寒区工程研究中心采用超高压水炮技术作为工具开挖冻土,可用较少的水量得到高能量,从而提高挖掘能力。

四、除 尘

矿山开采中,井下除尘是一大难题。采用射流除尘,既有低压下的洒水作业,也有高压下的喷雾作业,后者除尘效率较高,一般可达到 90% ~ 99% 的除尘效果。其作用主要有以下几点:

- (1) 惯性碰撞作用。
- (2) 截获作用。
- (3) 凝集作用。
- (4) 扩散作用。

五、灭 火

1. 井下煤的自然灭火

井下煤的自然经常发生并需要及时处理的灾害。20 世纪 80 年代初期,在乌克兰顿巴斯矿区,出现了一种新的利用水射流的方法,提高扑灭井内困火灾的效率。目前普遍认为这种利用水射流扑灭采矿区困火灾的方法是先进合理的,具有广泛的推广应用前景。

2. 油气井井喷燃烧灭火

在油气井井喷失控燃烧后,采用高压水射流抢险灭火被认为是一种经济有效的灭火方法。目前我国研究与应用射流技术的行业超过 30 个,对安全生产的作用也日益增大,这一新技术领域将会跨入世界先进行列。

第二章 流体力学基础

流体力学的主要任务是研究流体与物体之间的相互作用以及流体在静止或运动时所遵循的基本规律。

通常流体包括液体和气体。

流体具有下列重要物理性质,如易流动性、黏性和可压缩性等。在研究流体力学问题时必须对流体的这些性质有一正确了解。

应当指出,如同在固体力学中那样,在流体力学中也要对流体作连续介质模型的假定。它是流体力学中一个最基本的假定。

第一节 流体及其主要物理性质

一、流体的概念

流体力学属于力学的研究范畴。从力学性质来看,固体具有抵抗压力、拉力和切力三种能力。当固体受到切向作用力时,在一般情形下沿切线方向将发生微小的变形,而后达到平衡状态,在它的截面上承受切线方向的应力。与此相反,流体在静止时不能承受切向应力,不管多小的切向应力,只要持续地施加,都能使流体发生任意大的变形。因此,流体就是指受任何微小切应力都会发生连续不断变形的物质,这种连续不断的变形就叫做流动。由此可见,流体只能承受压力,不能承受拉力,静止流体不能承受切力。

二、流体的连续介质模型

处于流体状态的物质,无论是液体还是气体,都是由大量不断运动着的分子所组成。从微观的角度来看,流体的物理量在空间是不连续分布的,这是因为分子之间总是存在间隙,并且分子内部的质量分布也不连续。同时,由于分子的随机运动,又导致任一空间点上的流体物理量对于时间的不连续性。这样从微观的角度看,流体物理量的分布在空间和时间上都不是连续的。

但是在流体力学中,我们所讨论的问题的特征尺寸往往远大于流体的分子平均自由程,而人们感兴趣的是流体的宏观特性,即大量分子的统计平均特性。这样,我们有理由不以分子作为研究对象,而是引进流体的连续介质模型,并以连续介质作为我们的研究对象。为了建立连续介质模型的概念,让我们首先来观察一个很有启发性的试验结果。

如图 2-1(a),取包含 $P(x, y, z)$ 点的微元体积 $\Delta \tau$, 在此体积中的流体质量为 Δm 。体积 $\Delta \tau$ 中的流体平均密度为 $\Delta m / \Delta \tau$ 。我们绕 P 点取大小不同的微元体积 $\Delta \tau$, 测出其中质量 Δm , 计算出其中平均密度 $\Delta m / \Delta \tau$ 。实测结果如图 2-1(b) 所示。

在包含 P 点的微元体积 $\Delta \tau$ 向 $\Delta \tau'$ 逐渐收缩的过程中,其平均密度逐渐趋于一个确定的

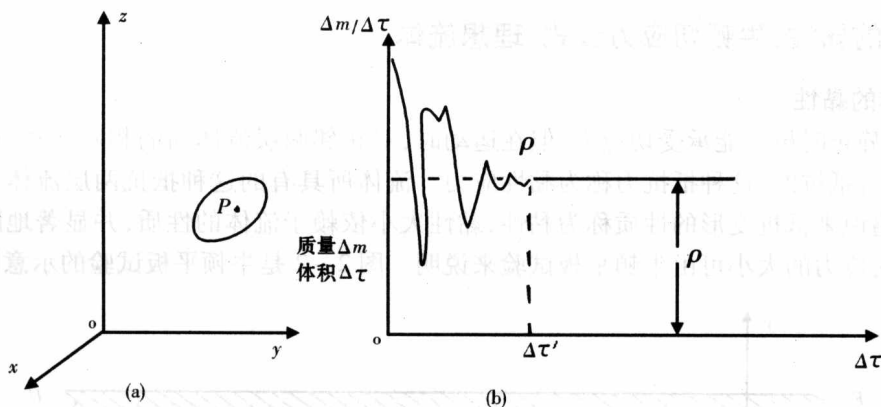


图 2-1 流体质点图

极限值,而且当体积 $\Delta\tau$ 继续收缩时其平均密度不再变化。此时分子的个性并未显示出来。只有当体积 $\Delta\tau$ 收缩到比 $\Delta\tau'$ 更小时,此时 $\Delta\tau$ 中的分子数已减少到这样的程度,随机进入和飞出此体积的分子数不能随时平衡。因此,体积 $\Delta\tau$ 中的分子数也将随机波动,从而引起体积 $\Delta\tau$ 内的流体平均密度的随机波动,这时流体表现出分子的个性,比值 $\Delta m / \Delta \tau$ 不再具有明确的肯定数值,如图 2-1(b) 中波动曲线所示。

由此可见, $\Delta\tau'$ 是一种特征体积,它是几何尺寸很小的但包含足够多的分子的体积。在此体积中,流体的宏观特性就是其中分子的统计平均特性。我们把微元体积 $\Delta\tau$ 中的所有流体分子的总体称作流体质点。由此, $\Delta\tau'$ 中的平均密度为

$$\rho = \lim_{\Delta\tau \rightarrow \Delta\tau'} \frac{\Delta m}{\Delta\tau} \quad (2-1)$$

即为流体质点的密度,并作为 $P(x, y, z)$ 点上的流体密度。利用流体质点这个概念,可以得出流体连续介质的模型的定义。

流体连续介质的模型只适用于特征尺寸远远大于流体质点特征尺寸的问题。在大多数流体力学问题中,这个条件是能够得到满足的。例如,在许多工程问题中,特征尺寸大于 1 mm,能了解到流场中 10^{-3} cm 距离上物理量的平均值就足够精确了(激波区除外)。这样我们可取质点的特征尺寸为 10^{-3} cm,即以 $\Delta\tau' = 10^{-9}$ cm³ 中的平均物理量作为当地流体质点上的物理量。在标准状态(0℃, 1 atm)^①下,这样小体积中,仍包含 2.69×10^{10} 个分子(对于液体将有更多分子数),由这么多分子足以得到与分子数无关的分子统计平均特性。

但是当我们所研究的问题的特征尺寸接近或小于质点的特征尺寸时,连续介质的模型将不再适用。例如,在高空稀薄气体中飞行的火箭,由于空气稀薄,相应的质点的特征尺寸较大,以至于它与火箭的特征尺寸具有相同的量级,在此情况下连续介质的模型将不再适用。可是,如果我们研究的是地球这样大的物体,则高空稀薄气体又可视为连续介质。可见流体的连续介质模型是一个具有相对意义的概念。

① 1 atm = 0.1 MPa。