

国外油气勘探开发新进展丛书

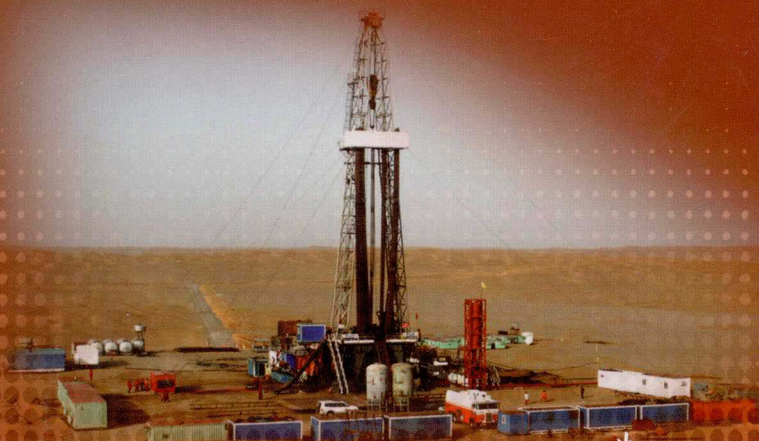
GUOWAIYOUQIKANTANKAIFAXINJINZHANCONGSHU



空气与气体钻井手册 (第三版)

AIR AND GAS DRILLING MANUAL (Third Edition)

[美] 威廉 C. 莱昂斯 等著
杨 虎 等译



石油工业出版社

内 容 提 要

本手册从气体与钻井液钻井的对比入手,介绍了地面专用设备、井下设备、压缩机与氮气发生器、专用井下钻井设备等,重点讲解了空气钻井、气体钻井、不稳定泡沫钻井、稳定泡沫钻井、充气钻井液钻井、欠平衡钻井等内容。并且总结了大量公式、图表和计算实例以方便读者阅读。

本手册适合从事钻井工作的现场技术人员、研究人员及高校相关专业师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

空气与气体钻井手册(第三版)/[美]莱昂斯等著,杨虎等译.
北京:石油工业出版社,2012.3

(国外油气勘探开发新进展丛书:第9辑)

书名原文:Air and Gas Drilling Manual

ISBN 978-7-5021-8899-3

I.空…II.①莱…②杨…III.气体钻井-技术手册IV.TE242.6-62

中国版本图书馆CIP数据核字(2011)第002875号

Air and Gas Drilling Manual, Third Edition. William C. Lyons ISBN: 978-0-12-370895-3 (ISBN of original edition) Copyright © 2009 by Elsevier. All rights reserved. Authorized Simplified Chinese translation edition published by the Proprietor. Copyright © 2012 by Elsevier (Singapore) Pte Ltd. All rights reserved.

Published in China by Petroleum Industry Press under special arrangement with Elsevier (Singapore) Pte Ltd. This edition is authorized for sale in China only, excluding Hong Kong SAR and Taiwan. Unauthorized export of this edition is a violation of the Copyright Act. Violation of this Law is subject to Civil and Criminal Penalties.

本书简体中文版由 Elsevier (Singapore) Pte Ltd. 授予石油工业出版社在中国大陆地区(不包括香港、澳门特别行政区以及台湾地区)出版与发行。未经许可之出口,视为违反著作权法,将受法律之制裁。

本书封底贴有 Elsevier 防伪标签,无标签者不得销售。著作权合同登记号图字:01-2009-6032

出版发行:石油工业出版社

(北京安定门外安华里2区1号 100011)

网 址:www.petropub.com.cn

编辑部:(010) 64523562 发行部:(010) 64523620

经 销:全国新华书店

印 刷:北京中石油彩色印刷有限责任公司

2012年3月第1版 2012年3月第1次印刷

787×1092毫米 开本:1/16 印张:34.25

字数:832千字

定价:150.00元

(如出现印装质量问题,我社发行部负责调换)

版权所有,翻印必究

《国外油气勘探开发新进展丛书（九）》

编 委 会

主 任：赵政璋

副 主 任：赵文智 张卫国

编 委：（按姓氏笔画排序）

马 纪 侯玉芳 詹盛云 刘德来

张 磊 杨 虎 张仲宏 周家尧

姬忠礼 周思柱 章卫兵

序

为了及时学习国外油气勘探开发新理论、新技术和新工艺，推动中国石油上游业务技术进步，本着先进、实用、有效的原则，中国石油勘探与生产分公司和石油工业出版社组织多方力量，对国外著名出版社和知名学者最新出版的、代表最先进理论和技术水平的著作进行了引进，并翻译和出版。

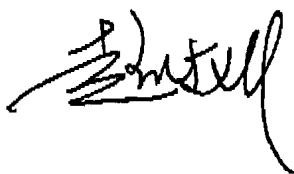
从 2001 年起，在跟踪国外油气勘探、开发最新理论新技术发展和最新出版动态基础上，从生产需求出发，通过优中选优已经翻译出版了 8 辑近 50 本专著。在这套系列丛书中，有些代表了某一专业的最先进理论和技术水平，有些非常具有实用性，也是生产中所亟需。这些译著发行后，得到了企业和科研院校广大生产管理、科技人员的欢迎，并在实用中发挥了重要作用，达到了促进生产、更新知识、提高业务水平的目的。部分石油单位统一购买并配发到了相关的技术人员手中。同时中国石油总部也筛选了部分适合基层员工学习参考的图书，列入“千万图书送基层，百万员工品书香”活动的书目，配发到中国石油所属的 4 万个基层队站。该套系列丛书也获得了我国出版界的认可，三次获得了中国出版工作者协会的“引进版科技类优秀图书奖”，形成了规模品牌，产生了很好的社会效益。

2011 年在前 8 辑出版的基础上，经过多次调研、筛选，又推选出了国外最新出版的 6 本专著，即《油藏工程手册》、《现代油藏工程》、《钻井工程手册》、《空气与气体钻井手册（第三版）》、《燃气轮机工程手册》、《阀门选用手册（第五版）》，以飨读者。

在本套丛书的引进、翻译和出版过程中，中国石油勘探与生产分公司和石油工业出版社组织了一批著名专家、教授和有丰富实践经验的工程技术人员担任翻译和审校人员，使得该套丛书能以较高的质量和效率翻译出版，并和广大读者见面。

希望该套丛书在相关企业、科研单位、院校的生产和科研中发挥应有的作用。

中国石油天然气股份有限公司副总裁



原 书 前 言

第三版的《空气与气体钻井手册》适用于石油、天然气和地热流体开发，对于从事气体钻井设计和施工的工程师、地球科学家来说是一本工程实践教材。本书包括空气（气体）钻井、充气钻井和泡沫钻井。在机械破岩方面，本书涵盖了传统的旋转钻井、井下动力钻具钻井、井下空气锤冲击钻井。

本书的第一版是在 1984 年由休斯敦的 Gulf 公司出版。主要是为了油气钻井工业而作，并获得了一定的成功，第一次印刷后在 20 世纪 80 年代末就售完了。第二版是在 2001 年由 McGraw- Hill 公司出版，增加了很重要的关于浅层钻井技术的章节（例如，水井、环境监测井、双壁钻杆和空气锤技术）。

新编第三版的独特之处在于全部公式计算均由英制和国际单位制表示，包括空气（气体）钻井、充气钻井和泡沫钻井的重要方程。方程的求解以 MathCad™ 为基础，采用英制和国际单位，将这些复杂流体问题的求解过程清晰地展示给读者，MathCad™ 的求解过程详见附录。

作者要感谢 Elsevier Science 和 Technology Books 的编辑和全体工作人员，尤其是高级编辑 Ken McCombs 和开发项目经理 Anne McGee 在手册准备阶段的大力支持和帮助。

作者也要感谢威德福国际公司欠平衡钻井全体技术人员对手册出版工作的大力支持。我们还要特别感谢 Jim Stanley 的不断鼓励。

作者希望钻井界的工程师和科学家们对本书进行指导批评，也对本书中存在的一些疏漏表示歉意。我们知道这本书并不是完美无缺的，但我们也相信这个版本内容是完整的。

William C. Lyons

Boyun Guo

Reuben L. Graham

Greg D. Kawley

目 录

1 绪言	(1)
1.1 宗旨和术语	(1)
1.2 工程计算和单位制	(1)
1.2.1 物理机理	(2)
1.2.2 基本单位和用法	(2)
参考文献	(4)
2 气体与钻井液钻井的对比	(5)
2.1 旋转钻井	(5)
2.2 循环系统	(9)
2.2.1 正循环	(9)
2.2.2 反循环	(10)
2.3 钻井液钻井和空气钻井的对比	(11)
2.3.1 优点和缺点	(11)
2.3.2 流动特征	(13)
参考文献	(17)
3 地面专用设备	(19)
3.1 井场	(19)
3.2 注气管汇	(21)
3.2.1 泄压管线	(21)
3.2.2 涤气器	(21)
3.2.3 注液泵	(21)
3.2.4 固体颗粒注入装置	(22)
3.2.5 阀门	(22)
3.2.6 压力表	(22)
3.2.7 体积流量计	(22)
3.3 井口装置	(23)
3.3.1 旋转控制头	(24)
3.3.2 防喷器组	(26)
3.4 排屑管线	(28)
3.4.1 排屑管线	(29)
3.4.2 燃烧池	(29)
3.4.3 主、次喷管	(30)
3.4.4 岩屑取样器	(30)
3.4.5 除尘器	(31)
3.4.6 天然气检测器	(31)

3.4.7 点火装置	(31)
参考文献	(32)
4 井下设备	(33)
4.1 旋转钻柱	(33)
4.1.1 标准钻柱	(33)
4.1.2 双壁钻柱	(34)
4.2 钻头	(35)
4.2.1 刮刀钻头	(35)
4.2.2 牙轮钻头	(36)
4.2.3 空气锤钻头	(38)
4.2.4 钻头分类	(40)
4.3 井下钻具组合	(42)
4.3.1 钻铤	(42)
4.3.2 稳定器和护眼器	(42)
4.3.3 井下测量设备	(44)
4.4 钻杆	(45)
4.4.1 标准 API 钻杆	(45)
4.4.2 加重钻杆	(45)
4.5 安全设备	(47)
4.5.1 浮阀	(47)
4.5.2 方钻杆旋塞阀	(48)
4.6 钻柱设计	(48)
参考文献	(50)
5 压缩机与氮气发生器	(51)
5.1 压缩机的分类	(51)
5.2 不同标准气体单位	(52)
5.3 连续流（动力型）压缩机	(53)
5.3.1 离心式压缩机	(53)
5.3.2 轴流式压缩机	(54)
5.4 容积式压缩机	(55)
5.4.1 往复式压缩机	(55)
5.4.2 旋转式压缩机	(56)
5.4.3 容积式压缩机优点	(59)
5.5 压缩机轴功率要求	(59)
5.5.1 基本的单级轴功率要求	(59)
5.5.2 多级轴功率要求	(63)
5.6 原动机输入功率要求	(64)
5.6.1 压缩机系统组成	(65)
5.6.2 往复式压缩机系统组成	(65)
5.6.3 旋转压缩机系统组成	(69)

5.6.4	燃料消耗	(73)
5.6.5	小结	(77)
5.7	压缩机系统示例	(77)
5.7.1	小型往复式初级和增压压缩机系统	(78)
5.7.2	四级往复式压缩机系统	(79)
5.7.3	旋转初级压缩机和往复压缩机系统	(79)
5.8	现场膜制氮气发生器	(81)
5.8.1	氧气浓度极限	(81)
5.8.2	膜分离设备效率	(83)
	参考文献	(83)
6	正循环钻井模型	(85)
6.1	基本假设	(85)
6.2	模型推导	(86)
6.2.1	气体重量流量	(86)
6.2.2	环空三相流	(88)
6.2.3	钻头两相流	(92)
6.2.4	钻柱两相流	(93)
6.3	充气液钻井模型	(95)
6.4	稳定泡沫钻井模型	(95)
6.5	空气和气体钻井模型	(97)
	参考文献	(101)
7	反循环钻井模型	(103)
7.1	基本假设	(103)
7.2	模型推导	(104)
7.2.1	气体的重量流量	(104)
7.2.2	钻柱内三相流	(106)
7.2.3	钻头三相流	(109)
7.2.4	环空两相流	(110)
7.3	充气液钻井模型	(112)
7.4	稳定泡沫钻井模型	(112)
7.5	空气和气体钻井模型	(113)
	参考文献	(116)
8	空气、气体及不稳定泡沫钻井	(117)
8.1	深井钻井设计流程	(117)
8.2	最小体积流量和压缩机配置	(119)
8.2.1	理论研究	(119)
8.2.2	工程实践	(120)
8.2.3	工程设计图表	(121)
8.3	井底压力和注入压力	(128)
8.4	注水与地层出水	(130)

8.4.1	井底状态下气体的饱和	(131)
8.4.2	消除黏性	(132)
8.4.3	防止烃类爆燃	(132)
8.5	原动机燃油消耗	(134)
8.6	小结	(134)
	参考文献	(134)
9	充气液钻井	(136)
9.1	深井钻井设计	(136)
9.2	充气液钻井作业	(137)
9.2.1	钻杆注入方式	(137)
9.2.2	环空注入方式	(139)
9.2.3	优点和缺点	(139)
9.3	最小体积流量	(140)
9.3.1	理论研究	(140)
9.3.2	工程实践	(142)
9.4	无摩阻和有摩阻的计算实例	(147)
9.4.1	无摩阻近似值	(147)
9.4.2	均相多相流的主要和次要摩阻损耗	(151)
9.4.3	主要、次要摩阻损耗和流体阻滞作用	(152)
9.5	小结	(157)
	参考文献	(157)
10	稳定泡沫钻井	(159)
10.1	稳定泡沫的流变性	(160)
10.1.1	稳定泡沫的实验筛选	(161)
10.1.2	实验筛选的经验算法	(162)
10.2	深井钻井设计	(162)
10.3	稳定泡沫钻井作业	(163)
10.4	最小体积流量	(164)
10.5	无摩阻和摩阻计算实例	(166)
10.5.1	无摩阻近似解	(167)
10.5.2	主要和次要摩阻损耗	(168)
10.6	小结	(170)
	参考文献	(171)
11	专用井下钻井设备	(173)
11.1	井下空气锤	(173)
11.2	容积式液压马达	(177)
11.3	小结	(181)
	参考文献	(182)
12	欠平衡钻井	(183)
12.1	引言	(183)

12.2 垂直井	(184)
12.2.1 欠平衡钻井实例	(184)
12.2.2 空气、气体和不稳定泡沫	(186)
12.2.3 充气液	(187)
12.2.4 稳定泡沫	(188)
12.2.5 气体型流体	(188)
12.3 定向井	(189)
12.3.1 定向控制与测量	(190)
12.3.2 膜制氮气钻水平井	(192)
12.3.3 斜井（或者水平井）钻井方程	(195)
12.4 小结	(198)
参考文献	(198)
附录 A 单位和量纲，转换系数	(199)
附录 B 大气的年平均状态参数	(204)
附录 C 第 8 章计算实例的 MathCad™解法	(206)
附录 D 第 9 章计算实例的 MathCad™解法	(277)
附录 E 第 10 章计算实例的 MathCad™解法	(383)
附录 F 第 11 章计算实例的 MathCad™解法	(469)
附录 G 正循环钻井所需最小体积流量	(519)

1 绪 言

空气与气体钻井技术约占世界陆上油气钻井的 30%。该项技术适用于成熟的沉积盆地。因为成熟的沉积盆地年代更久，含水少，地层胶结良好。尽管现代空气与气体钻井技术始于 20 世纪 30 年代的美国，但现在该技术已经广泛应用于世界范围内油气生产区。在该项技术大力发展的今天，以手册的形式向钻井技术人员介绍该技术的基本理论是非常重要的。

工程师和钻井管理人员为了使钻井操作更为经济有效，需要做事先的计算分析。空气与气体钻井的计算非常复杂且需要编制计算机程序，已经有比较成熟的商业化计算软件。尽管如此，按照大多数工程领域的传统，一旦程序的基本框架确定，我们的研究部门就要不断完善和丰富计算模型。作者选择 MathCad™ 作为工具让读者清楚地了解空气与气体钻井计算过程。MathCad™ 求解非常迅速，我们可以手工连续地编写程序。

在每一章中都有详细的 MathCad™ 求解过程和结果总结，求解用了英制和国际制单位。学习该技术的读者可以自由选择利用已有的商业化软件或者自己发展本公司的程序。

1.1 宗旨和术语

本书的宗旨就是希望读者能够掌握新型的空气与气体钻井技术的基本概念和作业流程。该项技术局限于陆上钻井作业，包括 3 个具体技术分类：(1) 空气与气体钻井；(2) 充气钻井液钻井；(3) 稳定泡沫流体钻井。该项技术在石油钻井工业中应用的两个特殊目的为快速钻井和欠平衡钻井。

快速钻井：此类型钻井充分利用了该项技术特有的环空井底压力低的特点。通常，环空井底压力较低会导致机械钻速增大。该类型的钻井作业主要针对储层之上的非目的层钻井，其特殊目的是在储层以上的非目的层实现快速钻进，最终实现缩减钻井作业成本的目的。

欠平衡钻井：此类型钻井也利用了该项技术特有的环空井底压力低的特点。欠平衡钻井采用各种不同密度的流体（空气与气体、充气钻井液、稳定泡沫）以产生不同的井底压力，在钻井过程中环空井底压力低于储层孔隙压力。随着钻头在储层中的钻进，储层流体渗入井筒。欠平衡钻井的目的是避免储层伤害，提高储层高效生产。

1.2 工程计算和单位制

现代工程实践可追溯到公元 8 世纪的“master buider”传统。那是一个创造测量方法的时期，包括著名的 Charlemagne 脚步法。从公元 8 世纪到 17 世纪，全世界使用多种重量和长度计量单位，直到 1824 年发生的重量和长度计量运动（Weights and measures Act），英格兰群岛、英格兰联邦国家和部分英格兰早期殖民地的计量单位统一为英格兰度量衡法定标准体系（BIS），美国实际上并未完全采纳该计量体系，仅借鉴了部分主要的单位和 1824

年之前殖民时期部分旧的单位。美国的这种演化最终形成了美国惯用单位体系 (USCS), 该计量体系目前仍通用。

现今通用的国际计量单位体系的某些基本单位或许源自法兰西路易十四时期。该计量体系就是现在通用的 SI 单位制 (或国际单位)。该计量单位体系在 1875 年的法国公约中统一整理。现今大部分单位体系, 包括: 英格兰度量衡法定标准体系 (BIS) 和美国惯用单位体系 (USCS), 均参考了现今的重量 (质量) 和长度计量 SI 单位。这些重量和长度计量在法国、英国等国家都在使用, 自 1875 年国际单位体系迅速并广泛地在全球开始使用。该单位体系的特点是相容性好, 使用简单, 且基于十进制计量。国际单位制中的所有计量单位均以十进制递增, 例如, 10, 100, 1000 等。现今, 全球用于国际商业和贸易的所有其他单位体系在确定其国际商业贸易的合法性之前, 必须参考国际标准单位体系。

1.2.1 物理机理

本文给出了主要计量单位的基本概念, 这些单位可用于定义其他计量单位。

力是两个物体间的相互作用, 可导致另一个物体加速运动, 或在原物体上产生相等大小的反作用。

时间是事件连续性的测量方式, 在牛顿力学中, 时间是一个绝对值; 在相对论中, 时间在所观察事件的参照系统中是一个相对值。时间的统一单位为秒。

惯性是指一个物体阻止其本体改变运动状态的特性。

质量是指物体惯性的量。

本书在牛顿力学和牛顿万有引力定律适用条件下, 3 个定律分别是:

定律 I: 任何物体都保持静止或匀速直线运动的状态, 直至受到其他物体的作用力迫使它改变这种状态为止。

定律 II: 物体受到合外力的作用会产生加速度, 加速度的方向和合外力的方向相同, 加速度的大小正比于合外力的大小, 与物体的质量呈反比。

定律 III: 两个物体之间的作用力和反作用力, 在同一条直线上, 大小相等, 方向相反。

需要注意: 上述牛顿力学 3 个定律的定义被视为力的概念。

1.2.2 基本单位和用法

USCS 单位制是一个万有引力体系, 其中的长度、力和时间 (例如, 分别为 L , F 和 T) 为该单位体系的基本量, 其他单位, 包括质量, 均为推导量。SI 国际单位制是一个绝对体系, 其中的长度、质量和时间 (例如, 分别为 L , M 和 T) 为该单位体系的基本量, 其他单位, 包括力, 均为推导量。

万有引力体系与绝对体系间差别的原因在于希望对一个物体质量的定义和量度保持一致, 除非其他物体通过万有引力对其产生影响。因此, SI 国际单位体系需要与牛顿万有引力定律一致。牛顿万有引力的数学表达式为:

$$F_{\text{gravity}} = G \frac{m_1 m_2}{d^2} \quad (1.1)$$

式中 F_{gravity} ——万有引力, lbf (N) ;

G ——比例系数, $3.437 \times 10^{-8} \text{lbf} \cdot \text{ft}^2/\text{slug}^2$ ($6.673 \times 10^{-11} \text{N} \cdot \text{m}^2/\text{kg}^2$) ;

m_1 ——物体 1 的质量, slug (kg) ;

m_2 ——物体 2 的质量, slug (kg) ;

d ——两物体间的距离, ft (m)。

牛顿第二定律可表示为 :

$$F = ma \quad (1.2)$$

式中 F ——近地表物体所受的力, lbf (N) ;

m ——任何物体的质量, slug (kg) ;

a ——受力物体的加速度, ft/s^2 (m/s^2)。

如果一个物体位于或接近地表, 地球对该物体的作用力被称为重力 (假设该物体不存在其他力的作用), 此时加速度 a 就变为 g , 即物体朝地球中心自由下落时的加速度。将 g 代入式 (1.2), 并与式 (1.1) 联立, 则 g 可表示为 :

$$g = \frac{Gm_{\text{earth}}}{d^2} \quad (1.3)$$

大多数实际工程力学问题采用的重力加速度是将各个单位体系的数值代入上式计算而得, 其中 : 质量为物体在地球中纬度的平均值, 距离为地表附加物体距地球中心的距离。表 1.1 列出了 USCS 和 SI 单位体系的重力加速度 g , 其中包括精确值和工程值。

表 1.1 USCS 和 SI 单位体系的重力加速度

单位制	g (精确)	g (工程)
USCS (ft/s^2)	32.1740	32.2
SI (m/s^2)	9.8067	9.81

值得注意的是地球并非一个理想的球体。因此, 在极地和赤道地区物体自由下落的重力加速度存在差别。地球的椭圆形说明赤道附近的重力加速度略高于极地。对于地球表面的多数工程的计算应用均采用重力加速度的平均值。

本著作第三版的目标就是让钻井工程师和其他技术人员采用 USCS 和 SI 两种单位体系进行空气和气体钻井的相关计算, 尤其是多数的工程师和技术人员更喜欢采用国际单位制。本书中讨论的多数计算实例均为稳态流动问题。为实现此目的, 本书的计算内容多数采用两种单位制, 并且将两种单位制间操作透明化。

本书中几乎所有方程式的推导过程均采用了统一的单位体系。该版书中的大多数方程式表征为稳态流动, 方程式中有一些质量和重力加速度的关系。因此, 对于国际单位制一次转换, 涵盖质量单位 (kg) 的变量在转换为力 (N) 时, 均需乘以 9.8m/s^2 。例如, 功率的国际单位首选 $\text{N} \cdot \text{m/s}$ (W), 而不是功率单位的原形式 $\text{kg} \cdot \text{m}^2/\text{s}^3$ (W)。对传统国际单位制的二次单位转换后, 例如流体流动压力的单位为 N/cm^2 , 而不是其原形式 N/m^2 。针对单位制的最后转换, 不论是采用 USCS 单位制还是 SI 单位制, 其操作人员很难想象通径为 2in (50.8mm) 的管流面积承受的压力有多大, 此时此受力面积的压力或应力值是流道面积

或受力面积的许多倍。因此，在应用 USCS 单位制时，压力和应力的单位 lb/ft^2 可转换为 lb/in^2 ， N/m^2 可转换为 N/cm^2 。

本质上，作者推荐分析 SI 单位制和 USCS 单位制时，可将其视为 L ， F 和 T 体系，而不是 L ， M 和 T 体系。尽管此处理方法忽视了 SI 单位制的纯粹性，但利用 SI 单位制的质量概念（USCS 单位制的力的概念）远远胜于组合单位的转换和附加的相关系数^[1]。

研究化学和物理学的工程师及教师们对这类易产生误导的单位转换表示怀疑，他们希望以力为基础单位的热传递方程式应该转换为以质量为基础单位的方程式^[2]。由于比热容的 SI 单位为 $\text{kcal}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ ，USCS 单位为 $\text{Btu}/(\text{lb} \cdot ^\circ\text{R})$ ，所以 SI 单位制的热传递方程式以质量流量 $\dot{m}$ 为基础，而 USCS 单位制的热传递方程式以重量流量 $\dot{w}$ 为基础。对于首选单位制不是国际单位的读者，这些单位转换令人担心。如果两种单位体系采用相同的方式转换，那么工程师很容易采用任何单位制进行计算。表 1.2 列出了“kg”应用时的单位转换。

表 1.2 定义质量的单位^[1]

单位制	质量的单位	量纲
USCS	slug	$FT^2/L=\text{lb} \cdot \text{s}^2/\text{ft}$
SI	kg	$FT^2/L=\text{N} \cdot \text{s}^2/\text{m}$

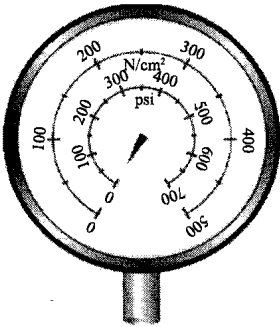


图 1.1 压力表（包括 psi 和 N/cm^2 两种单位刻度）

本书中另一项重要的变化就是将 SI 国际单位制应用于钻井计算过程中，没有采用 N/m^2 和 Pa 作为压力的单位。多数工程师认为将这些数值与很小的横截面积（例如，通径为 2in 管路）相关联是件麻烦事。此时，我们希望采用的压力单位是 N/cm^2 。实际上，将该单位的数值乘以 10^4 就可得出以 Pa 为单位的压力值，乘以 0.6897 就可得出以 psi 为单位的压力值。这种压力单位转换的便利性可由图 1.1 所证实，该图中同一个表盘上标明了两种刻度，很容易读取压力值（同时可参考另一个数值）。

参 考 文 献

[1] Daugherty, R. L., Franzini, J. B., and Finnemore, E. J., Fluid Mechanics with Engineering Applications, Eighth Edition, McGraw-Hill, 1985.

[2] SPE Alphabetical List of Units, SPE Publication, 2006.

2 气体与钻井液钻井的对比

本工程操作手册是为那些从事现代旋转钻井作业的工程师、地球科学家以及技术人员们准备的。本书推导并举例说明了与空气和气体钻井技术有关的工程计算方法，本书的各章节中使用一致的单位，方程式尽量最简化。第 1 章和附录 A 说明了单位制的重要性，给出了英制和国际制两种单位制的转化关系。

空气与气体钻井技术利用可压缩的空气和其他气体作为钻井循环流体，把井底随钻头的钻进而产生的岩屑携带到地面。被压缩的空气或其他气体（如氮气、天然气）可以单独使用，也可以与不可压缩流体（如淡水、地层水或地层油）混合注入井内使用。该技术包括三种不同的应用方式：空气与气体钻井作业（只用压缩空气或其他气体作为循环流体）、充气钻井作业（把空气或其他气体与不可压缩的液体混合）和稳定泡沫钻井作业（把压缩的空气或其他气体与不可压缩的液体混合，产生一种连续的泡沫循环流体）。

在过去，空气与气体钻井作业是油气开发钻井工业的一小部分。目前，采用压缩空气（或其他气体）、充气液或泡沫作为循环流体的气基钻井占有所有钻井总数的 20% ~ 30%。现代油气储层开发采用气体钻井作业主要存在两个方面的缘由。

快速钻井：采用气基流体钻井钻潜在储层以上的非储层段，利用低压流体的特点提高机械钻速。

欠平衡钻井：采用气基流体钻井钻潜在储层，利用环空井底压力低于地层孔隙压力的特点，减少或消除钻井过程中的储层伤害，避免影响随后的油井生产。

气动传输首先应用于借助空气的流动来运移物体。气流是由蒸汽作为动力，带动扇叶旋转产生的，它是 16 世纪早期工业革命的产物。到 19 世纪 60 年代末，气动传输已成规模，对高压力的空气和其他气体的需求^[1]，导致了 19 世纪 70 年代末期的空气压缩机的诞生，这些早期的压缩机，都是靠蒸汽来产生动力的^[2]。自内燃机出现以后，出现便携式的往复式压缩机和旋转式压缩机也成为可能。在 19 世纪 80 年代末期，人们首次在采矿业使用了便携式压缩机进行钻井作业。

2.1 旋转钻井

旋转钻井是在地壳岩层中钻探井眼的一种方法。该方法是一种比较新型的钻井方式，是法国土木工程师 Rudolf Leschot 在 1863 年最先发明的钻井方式^[3]。首次使用淡水作为循环流体钻探水井。到目前为止，这种方法是唯一钻超过 3000ft（或 900m）井深的钻孔技术。当首次把空气压缩机应用于钻水井时，人们对这种方法还是一知半解，但是，在 20 世纪 20 年代，便携式压缩机开始应用在钻探石油和天然气井时，这种方法才被人们所认知^[4]。1935 年，在得克萨斯州采用管道里的天然气成功进行天然气井的气体钻井，并且采用了反循环钻井方式^[5]。

现在，旋转钻井被用于钻各种各样的井眼，大多数水井和环境监测井都采用旋转钻井。

在采矿业中, 旋转钻井可用于钻岩矿井和试验井, 这样, 有助于钻进较深的大尺寸垂直井。为了铺设那些从河流、公路和其他天然或人工障碍下通过的水、油、气和其他的液体管道, 曾用旋转钻井技术来钻此类的孔洞。尤其是, 最近, 旋转钻井被用来在城镇或工业区等人口与建筑密集的地区铺设光学纤维和通信管线而钻孔。旋转钻井最复杂的应用是钻深井, 其主要目的是为了发现原油、天然气和地热蒸汽、地热水等自然资源。要发现这些流体资源, 钻井深度至少需要 3000ft (900m), 甚至高达 20000ft (6000m)。

旋转钻井具有很强的适用性, 旋转钻井适用于火成岩、变质岩和沉积岩的钻探。然而, 为发现原油和天然气, 深井钻探的地层大部分为沉积岩。若寻找地热蒸汽和地热水, 钻探的地层则包括上述三种岩性。旋转钻井需要采用切削岩石或破碎岩石的钻头。图 2.1 所示为典型的碳化钨硬质合金齿的三牙轮钻头, 此类钻头主要以压碎的方式破岩 (详见第 4 章), 并且主要用于中等硬度的沉积岩钻进。

为保证钻头在岩石中的顺利钻进, 需要运用钻头的轴向力和扭矩, 并且要让循环流体及时地清理钻头在钻岩石的过程中产生的岩屑 (图 2.2)。如果钻头不施加轴向载荷而其他两个方面正常工作, 则钻头不会向前推进。同样, 如果钻头不施加扭矩而其他两个方面正常工作, 则钻头不会向前推进。然而, 如果停止流体循环而其他两个方面正常工作, 则钻具容易损坏。上述简短的论述是为了说明钻井整个循环系统的重要性。

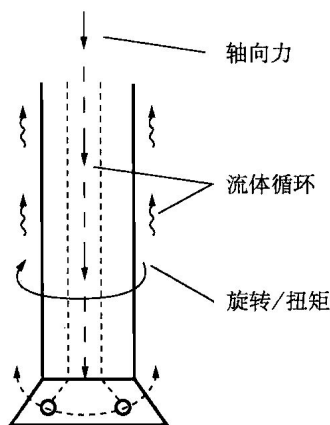
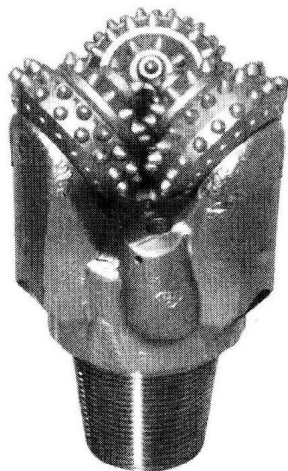


图 2.1 IADC 代码为 627 碳化钨硬质合金齿的 $7\frac{7}{8}$ in (200.1mm) 三牙轮钻头

图 2.2 旋转钻进的 3 个必要的组成示意图

各种钻机均可用于旋转钻井, 可以是小型的单钻杆钻机, 也可以是较大型的双钻杆或三钻杆钻机。现在大多数的陆地钻机都是具有折叠井架的可移动式钻机。一台单钻杆钻机的纵向空间仅仅能排放单根钻杆, 双钻杆钻机的纵向空间可排放两单根连起来的钻柱, 三钻杆钻机的纵向空间可排放 3 个单根连起来的钻柱。表 2.1 给出了钻铤和钻杆 API 长度范围 [6]。

图 2.3 所示为 Gardner Denver SD 55 型自动推进单钻杆钻机。这种小型的单钻杆钻机具有很好的可移动性, 主要用来钻进小于 3000ft (900m) 的浅井, 例如, 煤层气井和地热井。该特殊钻机使用的钻铤和钻杆尺寸范围见表 2.1 的范围 2。

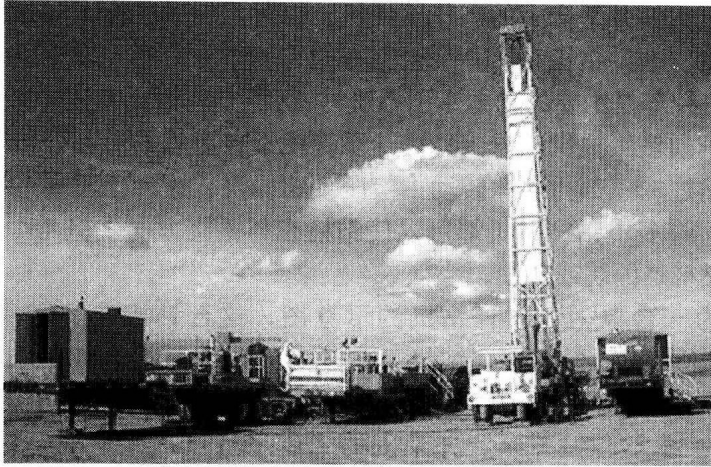


图 2.3 典型的自动推进单钻杆钻机（由 George E. Failing 公司提供）

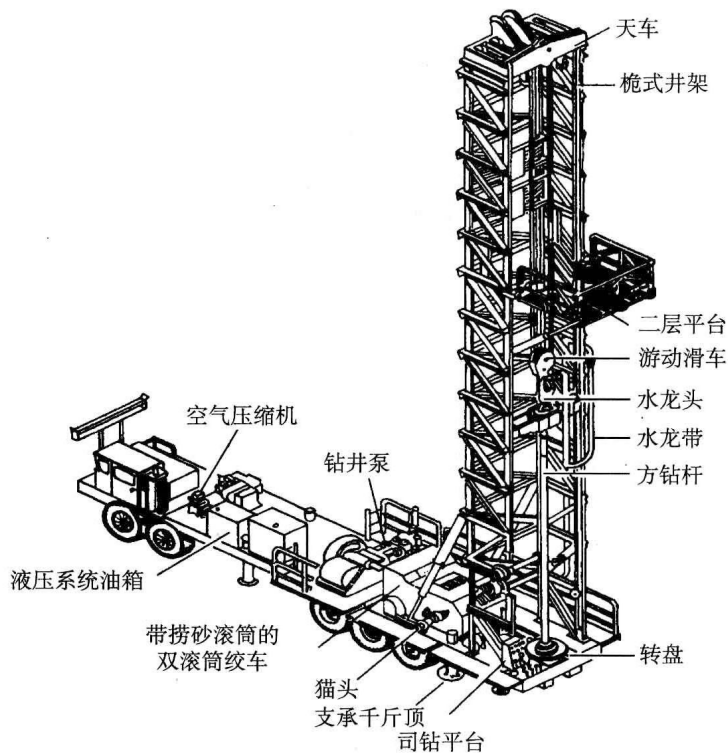


图 2.4 典型双钻杆钻机的示意图

表 2.1 API 钻杆和钻铤的长度范围

范围	最小长度, ft (m)	最大长度, ft (m)
1	18 (5.5)	22 (6.7)
2	27 (8.7)	30 (9.1)
3	38 (11.6)	45 (13.7)