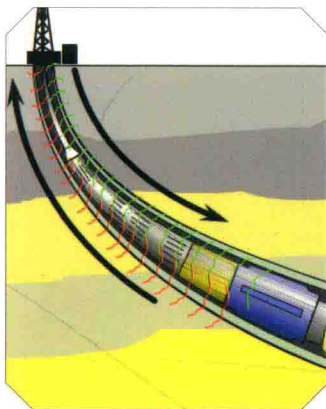
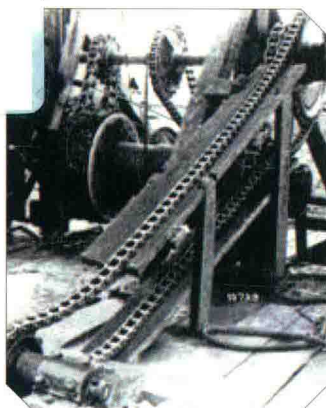
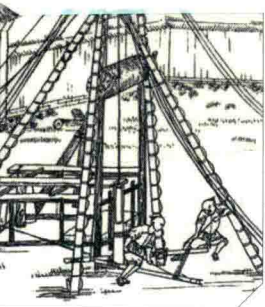


石油钻井方法与演变

◎ 张卫东 景英华 武加锋 等编著



什么叫井？古人定义为：穴地出水曰“井”。这就是说，在地上挖一个坑，坑中出了水，这就叫井。显然，最早的井是为取水而凿，因此最早出现的井是水井。为什么会想到去打井呢？

石油工业出版社

石油钻井方法与演变

张卫东 景英华 武加锋 等编著

石油工业出版社

内 容 提 要

本书从我国古代的卓筒井钻井讲起,介绍了钻井技术演变成近代顿钻而开创近代石油工业。近代顿钻技术的发展带来了旋转钻井的出现。按照旋转钻井技术发展的顺序,介绍了转盘旋转钻井、滑动导向钻井、旋转导向钻井。还介绍了石油钻井相衔接的五个阶段设备和技术的发展演变。

本书可供从事钻井方法及钻井历史研究的人员参考,也可供高等院校相关专业师生参考阅读。

图书在版编目(CIP)数据

石油钻井方法与演变 / 张卫东等编
著. —北京:石油工业出版社, 2018.10
ISBN 978-7-5183-2881-9

I. ①石… II. ①张… III. ①油气钻
井 IV. ①TE2

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2018) 第 205632 号

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

编辑部: (010) 64523561

图书营销中心: (010) 64523633

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

2018 年 10 月第 1 版 2018 年 10 月第 1 次印刷

787×1092 毫米 开本: 1/16 印张: 12.5

字数: 215 千字

定价: 68.00 元

(如出现印装质量问题, 我社图书营销中心负责调换)

版权所有, 翻印必究

前 言

我国最早的文字甲骨文中，已经出现了“井”字，说明了井与人类的文明有同样悠久的历史。在人类向地下索取资源的过程中，井起着通道的作用。从最初的淡水井到卤水井，又从卤水井到油气井，龙的传人在长期的实践中发明了顿钻钻井，被誉为古国的第五大发明，成为开启世界近代石油工业的一把金钥匙。

上天诚不易，入地更艰难。进入 20 世纪，石油工业进入了飞速发展的时期，顿钻钻井让位于旋转钻井。从最开始的转盘旋转钻井到顶驱旋转钻井，从滑动导向钻井到旋转导向钻井，钻井技术始终走在石油科技发展的前沿，成为石油工业发展的强劲动力。

长期以来，我国注重对国外先进钻井技术的引进、消化和吸收，很少对钻井方法的演变进行深入研究，使得读者对石油钻井的历史了解不够。能不能写一本书系统地介绍中国发明的顿钻钻井是怎样的技术原理？它怎样影响了以后的钻井技术？近代顿钻与我国发明的顿钻有什么联系和区别？旋转钻井是怎么发明出来的？钻井经历了一个怎样的发展历程？钻井为什么能打出任意形状轨道？高校和石油现场的专家基于同样的目的联袂，试图奉献给读者一桌石油钻井知识的盛宴。

本书共分六章。第一章由景英华高级工程师编写，第二章由张卫东教授编写，第三章由倪红坚教授、郭胜来讲师、

宋洵成副教授编写，第四章由黄根炉副教授编写，第五章和第六章由武加锋副研究员编写。本书部分内容来自美国石油学会 1961 年出版的《History of Petroleum Engineering》。全书由张卫东教授、景英华高级工程师、武加锋副研究员统稿。

邹德永教授提供了钻头发展史方面的资料，中国石油勘探开发研究院才程高级工程师提供了石油工程发展史方面的资料。中国石油大学（华东）油气井工程专业研究生付茂勇、谭雷川、关旭辉做了大量资料收集和绘图工作。在此一并表示衷心感谢！

由于内容涉及广泛、历史跨越时间较长，在编写过程中难免夹有编写人员的主观臆想，亦有内容取舍不当之处，望读者给予批评指正！

2018.1

目 录

第一章 卓筒井——中国古代第五大发明	1
第一节 中国古代钻井技术的起源与发展	2
第二节 卓筒井钻井工艺	11
第三节 卓筒井钻井设备和工具	18
第四节 卓筒井修治井技术	31
第二章 近代顿钻	42
第一节 近代顿钻钻机的发展	44
第二节 动力和起升系统的演变	51
第三节 钻井工具	58
第四节 固井的发展	62
第三章 转盘旋转钻井	65
第一节 旋转钻井方法的发明	65
第二节 钻井设备的发展	75
第三节 钻井工具和仪表的发展	88
第四节 固井的发展	102
第四章 滑动导向钻井	113
第一节 螺杆钻具	113
第二节 涡轮钻具	117
第三节 造斜工具	122
第四节 定向测量	129
第五节 随钻测量	141

第五章 旋转导向钻井	158
第一节 旋转导向技术的产生与发展	158
第二节 旋转导向系统的基本结构原理	161
第三节 典型的旋转导向钻井工具	163
第四节 旋转导向钻井系统的控制方式	183
第六章 展望	188
参考文献	191

第一章 卓筒井——中国古代第五大发明

在中华民族悠久的历史长河中，我们聪明、勤劳、勇敢的祖先创造了灿烂的华夏文明。在灿若繁星的中国古代创造发明中，除举世公认的四大发明之外，还有一项堪称第五大发明的古代科技成就——卓筒井钻井技术。同四大发明一样，钻井技术的发明促进了世界文明的进步，推动了人类历史发展的进程。井的出现，不但改变了人类的过去，左右着我们的现在，还将影响着人类的未来。

卓筒井钻井（顿钻）是利用钻具的势能来冲碎岩石，并用专用工具取出岩屑的钻井方法。顿钻钻井法的诞生是钻井史上的一场革命，它使钻凿深井成为可能。著名英国科学家李约瑟在其所著《中国科学技术史》一书中写道：今天在勘探油田时所用的这种钻探井凿洞的技术肯定是中国人的发明，并说这种技术大约在12世纪传到西方各国，它为近代大规模石油钻井奠定了基础。

美国著名的石油城——休斯敦有一家著名的休斯敦石油钻井工具公司，公司大厅有一幅中国古代钻井图（图1-1），它昭示人们，世界上发明深井钻井技术的祖先在中国。

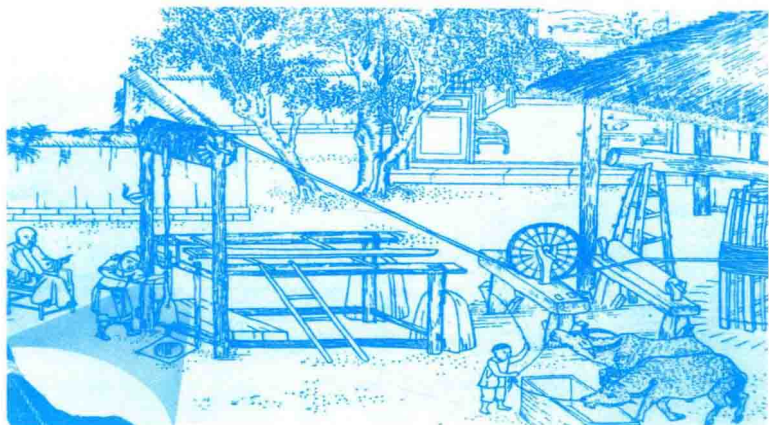


图1-1 中国古代钻井图

第一节 中国古代钻井技术的起源与发展

什么叫井？古人定义为：穴地出水曰“井”。就是说，在地上挖一个坑，坑中出了水，这就叫井（图1-2）。显然，最早的井是为取水而凿，因而最早出现的井是水井。为什么会想到去打井呢？这得从水与生命的关系说起。水是生命存在的基础，充足方便的水源是人类选择居所的先决条件之一。在未发明井以前，古人傍水而居，过着渔猎生活，生存空间有限。当人类需要摆脱江、河、湖、沼等天然水源的限制，向更广阔的生存空间发展时，井就应运而生了。

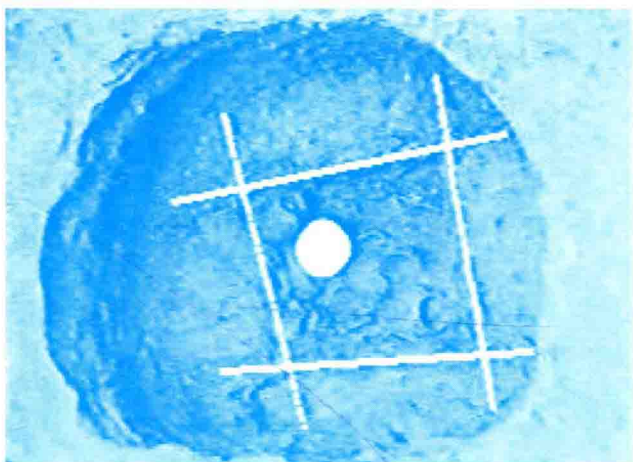


图1-2 井的象形字的由来

随着井的出现，人类的生活方式也发生了很大变化。一个“耕”字说得明白，左边的“耒”是古代的翻地工具，右边是“井”，在井旁翻地，就是农耕。井的出现使人类的生活方式从渔猎采集转向了定居农耕。“日出而作，日入而息。凿井而饮，耕田而食。帝力于我何有哉？”这首先秦的《击壤歌》正是先民们悠闲的田园农耕生活的生动写照。

定居农耕产生了行政管理的需要，在黄帝时代出现了有名的井田制。井田制就是把一平方里的土地按井字形均分成九块，分给8家人耕种。中间是公田，由8家人共同耕种，公田上凿有水井，供大家使用（图1-3）。“八家为井”“四井为邑”，最早的行政区划单位由此而产生。

定居农耕导致了社会分工，社会分工要求进行商品交换，“市乃交易之处，井乃共汲之所。因井成市，故名市井”。由此可见，城市的雏形傍井而生。人聚居一处，为了维护正常的生活秩序，需要刑法来约束人们的行为，刑法是怎样产生的呢？清代《说文解字注》中解释说，“刑古作井，井以饮人，人人井争水，陷于泉，以刀守之，割其情欲，人有畏惧，以全身命也，故从刀从井。”今天仍不时耳闻因争水而发生的械斗，这也足以验证刑法诞生于井旁的真实。井对先民生活影响之大，综上所述，足见一斑。

井由井口、井身和井底组成。井的大小叫井径，井的深度叫井深，部分井身叫井段，井身的构造叫井身结构（图1-4）。

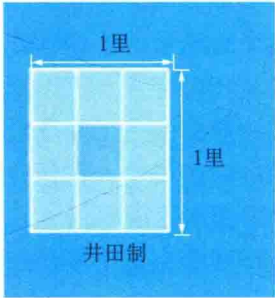


图1-3 井田制

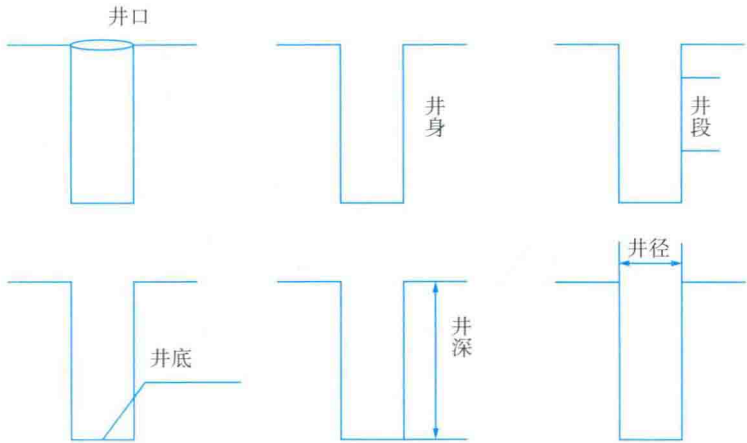


图1-4 井身结构示意图

根据井的演变历史和钻井技术的发展过程，井可分为大口浅井和小口深井两个发展阶段。

一、大口浅井时期（公元前3700年—公元1041年）

随着青铜器和铁器的使用，我国劳动人民的凿井技术也有了进一步发展。从春秋战国时期开始，人们为了挖掘和开采地下的铜铁矿石和卤水，挖掘矿井和盐井的现象十分普遍，因此，我国劳动人民挖掘大口浅井的技术也

有了明显提高。春秋战国时期，人们还发明了陶井，就是利用陶圈来防止井筒四周的泥土、砂石等塌方，创造了在井筒内装置衬套的“套管”井。

从1965年湖北大冶铜绿山发掘出来的春秋战国时期的矿井遗址上可以发现，该矿井的挖掘深度已达50余米了，在挖掘矿井时，已使用了木轱辘这种原始的卷扬滑轮。古代四川人民在认识和利用自然盐泉的过程中，也开始了凿井取卤水的活动。

1973年出土于浙江余姚的河姆渡古水井是世界上目前已知的最古老的水井，经¹⁴C测定表明它是5700多年前的产物。河姆渡古水井呈方形，边长约2米，深1.35米，用200多根木棒来建造井壁，井底还留有汲水的陶罐和生产工具。其修筑方法是：先在井内靠四壁处向下打进几十根成排的木桩，然后在排桩的内壁支撑用榫卯套接的方木框，以稳定排桩。在排桩之上，又平放16根长圆木，构成井口框梁。在井内还发现有辐射状的小长圆木构件和苇席残片，井口外围由28根木桩构成圆形的栅栏。在井的上方还建有井亭。这种施工方法今天仍用于在易塌地区挖坑或建井的工作中（图1-5）。



图1-5 河姆渡古水井复原图

地下盐卤资源的发现和利用刺激了凿井技术的发展，历史上组织大规模凿井的元勋是李冰。根据晋代常璩所著《华阳国志·蜀志》记载：“周灭后，秦孝文王以李冰为蜀守，冰能知天文地理，又识齐水脉，穿广都盐井诸陂池，蜀于是盛有养生之饶焉”。由此可知，距今2200多年前的四川行政长官李冰是一个上知天文、下晓地理、精通水利、长于钻井的蜀守。他不仅组织修建了举世闻名的都江堰水利工程，还在今天成都附近的双流一带广开盐井，促进了四川经济的发展，奠定了四川成为天府之国的基础。文坛巨匠郭

沫若先生在参观都江堰时欣然题词：“李冰掘离堆、凿盐井，不仅嘉惠蜀人，实为中国二千数百年前卓越之工程技术专家”。这段话对李冰做了公正全面的评价。

汉代出土的“盐井砖”画像形象逼真，比例适当，不仅展现了清晰的井身、井口、井架，也表示出提升、操作、运输、煮盐的过程。花牌坊出土的“盐井砖”，右下角为已经完成的盐井及其井口，呈方形断面的四角井架共分三层。若以井架和人的高度（直立高度以1.7米计算）为度量，则井口直径1.25~1.5米，井口为圆形。井架是三层结构，架高8米，第二层为工作平台，井架顶层有辘轳。提升装置属单定滑车型，每层有两人面对拉绳作业（图1-6）。

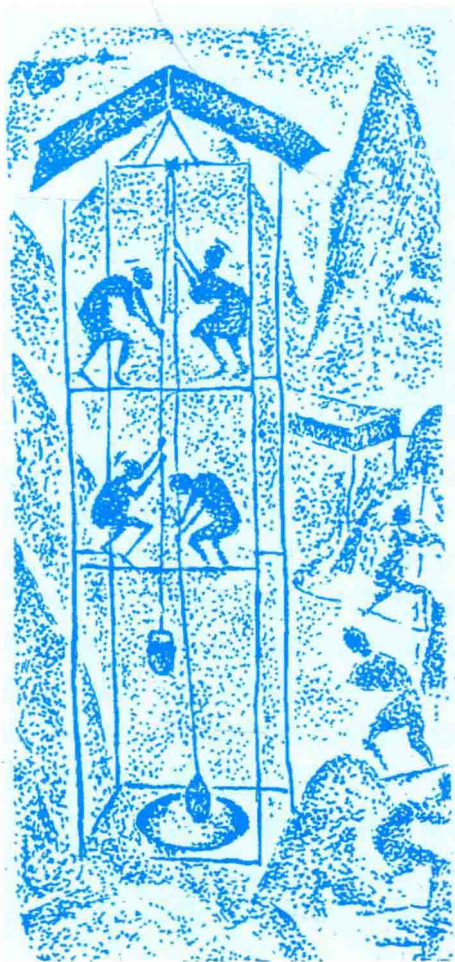


图1-6 汉井井架结构图

大口盐井的代表是陵井，陵井是后汉张道陵即张天师组织开凿的。唐《元和郡县图志》卷三三《剑南道·陵州》曰：“天师初以兹地荒梗，无人安居，山川亦贫，不可耕植，化盐井以救穷民，民聚居井旁，户口日众，遂置州统之，以天师名，故名陵井。”陵井一直使用了数百年，宋人沈括在《梦溪笔谈》中写道：“陵州盐井深五百余尺，皆石也，上下甚宽广，独中间稍狭，谓之杖鼓腰，旧自井底用柏木为干，上出井口，自木干垂绁而下，方能至水，井侧设大车绞之。”该井的井口以下到坚硬基石以

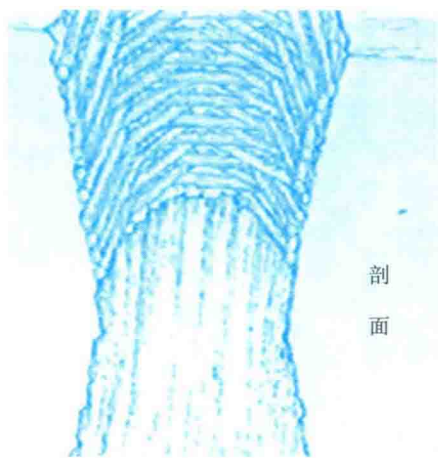


图1-7 陵井井身结构示意图

上呈倒锥形，使井的边壁具有一定坡度，并加梗楠木支护，在软弱围岩中易稳定；到达坚硬基岩后，挖掘一段垂直井段；到达盐卤层时，为扩大卤水的流出面积，增加产量，而向下逐步扩径，形成“杖鼓腰”的特殊结构（图1-7）。从井底到井口全部以木层层架设做井杆（横井）圈及竖撑。井边架设大绞车，并通过井干上的井架及辘轳垂绳系牛皮囊汲取卤水。

据《太平广记》记载：四川陵州（今四川仁寿县）的盐井“周回四丈，深五百四十尺”。可见当时的盐井是比较大的，井的深度也比较深。尤其令人注意的是，陵州的盐井当时已用楠木、柏木作井栏框架，以支撑保护井壁，防止坍塌。显然，这是比较原始的固井技术。正是这些大口较深的盐井的广泛挖掘，才使四川古代人民生活逐渐改善。也正是从此开始，四川劳动人民的凿井技术便一直走在了古代中国和世界的前列。大口盐井的孑遗在四川云阳盐场仍能看到。

大口浅井由人直接下入井底挖掘而成。这种井的特点是井径大、井身浅。最初的井仅仅是对地面水坑泉眼的扩大、加深和维护，而要建造一口像样的水井必须完成破碎土石、取出土石碎屑、加固井壁这三道工序。

二、小口深井时期（公元1041年— ）

10世纪60年代，北宋结束了五代十国的混乱局面，工农业生产和科学技术得到了很大的发展。著名的火药、指南针、活字印刷都是这一时期的光辉成就。随着社会的发展、人口的增多，对食盐的需求日益增多，大口盐井因工程浩大、施工困难而满足不了社会的需要，于是，一种新的钻井方法——

顿钻钻井法应运而生。

公元1041年，那些具有丰富钻井经验的工人（当时叫做山匠）改革了从前“纵广五尺到三十丈”的大口井，成功地钻凿了井筒口径只有碗口大小的“卓筒井”。在宋代文同所著《丹渊集》中记有“自庆历以来，始因土人凿地，植竹为之卓筒井”。北宋《志林》（卷四）也有这样的记载：四川离海较远，人们食用的盐来自井盐，陵井是最早开发的盐井，以后又陆续开发了邛州、蒲江等地的盐井，并成功地创造了卓筒井。到1129年，在四川的30个有钻凿井的州中，就有17个州推广了卓筒井。

根据宋代大文豪苏东坡在《东坡志林》一书中的记载，“自庆历（公元1041—1048年）、皇祐（公元1049—1054年）以来，蜀始创筒井，用圜刃凿如碗大，深者数十丈，以巨竹去节，牝牡相衔为井，以隔横入淡水，则咸泉自上，又以竹之差小者出入井中为桶，无底而窍其上，悬熟皮数寸，出入水中，气自呼吸而启闭之，一筒致水数斗。凡筒井皆用机械，利之所在，人无知。”

在这一时期，由于井越来越深，地下淡水不断地渗入井筒，为了阻隔淡水侵入，人们发明了“木竹”。木竹就是用木材或竹子做成的管子，下入井内以隔绝淡水，即相当于现在的套管。

为了从小口径的井筒内把岩屑清除出来，或汲取井内卤水，又创造了装有底部活门的吞泥筒，或名扇泥筒、吞筒，实际上就是带有底部单流阀的提捞筒，或捞砂筒。随着钻井、采卤业的发展，靠人力推动绞盘车的劳动强度越来越大，已不能适应生产需要。在1253年出现了用牛力作动力的绞盘车的革新，这在钻井历史上也是一个重要发展。

由于在上述几个关键环节方面进行了改革，在宋代，钻井设备与工艺已逐渐趋于完善。钻井装备已发展成为由踩架（钻台）、井架（包括天车滑轮）和用畜力作动力的绞盘车所组合而成的机械设备，这就为钻凿更深的井准备了物质条件。在明代宋应星所著《天工开物》这部记述科学技术成就的著作中，载有生动的钻井机械图，就是对这一时期钻井设备的描绘。

到明代，我国的顿钻钻井技术已经发展到相当完善的程度。在顾炎武所著《天下郡国利病书》一书中的“井法”和宋应星《天工开物》一书中“作咸”“井盐”等章的记述里，比较全面系统地总结记述了我国11世纪40年代到17世纪30年代在钻井工艺技术等方面所取得的伟大成就，见表1-1。

表1-1 我国古代四川地区钻井水平

年代	特点	深度	地点	资料依据
公元前256—251年 (战国)	挖掘井。井口直径五尺左右。钻凿井主要靠人力	—	广都 (今成都、双流一带)	《华阳国志》
公元前251—公元前206年(秦国)		二三丈	临邛(今邛崃一带)	《博物志》
公元前206—公元前220年(汉朝)		60余丈	临邛	《太平御览》
公元280年(晋朝)		300尺	江阳县 (今自流井一带)	《舆地纪胜》
公元581年(隋朝)		250尺	富世县丰荣井	《旧唐书》
公元618年—907年(唐朝)		570尺	陵州(今仁寿一带)	《道教灵验记》
公元800年前(唐朝)		80余丈	仁寿县	《元和郡县制》
公元1041年(宋朝)	顿钻钻井。井口直径如碗口大,即“卓筒井”。钻凿井用畜力代替人力	数十丈	四川	《东坡志林》
公元1088年以前(宋朝)		500余尺	陵州	《梦溪笔谈》
公元1253年(宋朝)		58丈	泸南	《元一统志》
公元1765年(清朝)		约745米	自流井气田大深井	自贡盐场井井矿历史资料调查总结报告
公元1815年(清朝)		798米	自流井气田桂成井	自贡盐场井井矿历史资料调查总结报告
公元1820年(清朝)		三四百丈	犍为、富顺	《三省边防备览》
公元1821年(清朝)		约270丈	自流井气田	《自流井记》
公元1835年(清朝)		1001.42米	自流井气田桑海井	《川鹺概略》
公元1840年(清朝)		约1200米	自流井气田磨子井	《祖国石油天然气史话》

从11世纪40年代到19世纪30年代的近800年间,中国古代首创的小口径钻井技术——卓筒井钻井技术不断发展,钻井设备、工具和工艺技术日益改进,带来了钻井深度的突破。1750年前后,四川自贡地区的井,一般深300~400米。1815年的桂成井已钻达798米。世界上第一口千米井桑海井位于自贡

市大安区阮家坝山下，井场占地面积3亩，井位海拔341.4米，处在一口叫做长堰塘的堰塘旁边。该井开钻于公元1823年，历时13年，方始凿成。井深1001.42米，既产卤，又产气。

在钻凿燊海井过程中，自贡盐场逐步形成的世界上最为完整的顿钻工具群等系列化的精湛技术，得到了充分的体现。按照当时的规矩，凿井工序分为确定井位、开井口、下石圈、凿大口、下木柱、凿小眼六个流程。单是为适应穿凿不同岩层的钻头就达20余种，如果再加上修井设备，数量达数百种之多。

从外观上看，整套钻井设备很简单，由碓架、踩板、吊环、鞭棒和扶手构成。运用杠杆原理，由数人站在碓架上，他们是固定的“碓工”，一脚一脚蹬踩冲击的木碓架，使踩板翘起，随即松开，钻具依靠重力冲击井底岩石，如此反复循环。每钻到一定进尺，起出钻头，清除井里的泥沙，继续重复着踩踏动作，直至钻到卤水或天然气为止。可以想象，燊海井钻进到1001.42米，恐怕得有上亿次的冲击方能成功。燊海井采用了石圈和木柱固井，木柱下井深度为64米，井径在距离井口125米以上段为114毫米，以下至井底均为106.7毫米。

燊海井竣工之日，发生了令人激动不已的井喷现象，场面十分壮观。在当时，该井日喷黑卤万余担，日产天然气8500立方米，大约可烧制14吨盐。按照1914年每斤盐40文制钱的平均盐价（2100文相当于银1两）燊海井每天的收入即达银533两！这就很容易理解抗日战争期间冯玉祥将军在自贡发起的爱国献金运动，竟筹措到1.3亿元轰动全国的原因了。

燊海井的成功开凿，揭开了这块三叠系嘉陵江组石灰岩地层的秘密，开启了深井钻凿的历史。自此以后，超过千米深的盐井开始逐步出现，而且由此使得盐市大兴，各地盐绅商贾纷至沓来，依据以往“在成井较多、产卤丰盛的地区开设井灶”容易成功的经验，燊海井周围“看榜样”的盐井蜂拥而起。在周围1.2平方千米的地方，就先后钻井198口，平均6060平方米就有一眼井，呈现天车林立、锅灶密布、视管纵横、云蒸雾蔚的兴盛景象。

在燊海井井口的右面是一个有16挂大车的车房，圆柱形的大车用硬木绑制，直径4.5米，高2.5米，用以提捞卤水。用牛推卤是盐场的一大传统特色。据说，定名为燊海井，是因为其天然气产量突出，意在表现天然气火苗旺盛、喷出如海浪、取之不尽，用之不竭。距今已180多年的燊海井，到后来卤水量逐渐减少，乃至枯竭，然而天然气却“取而代之”。

1840年又打出井深1200米的“磨子井”。根据流传的故事，这口位于四川自贡的井于1833年前后开钻。井主钻凿这口井，先后经历祖孙三代，历经艰难。祖父开钻，儿子完成大部分进尺，到了孙子代，已经耗尽家财，几乎倾家荡产，已无力支撑下去。最后，无奈将家中唯一能变卖的一盘石磨也卖掉，犒劳井夫一顿，准备收场。井夫们见井主已到这般光景，还款待送别自己，感于井主的艰辛，决定饭后再干一班。恰恰正是这个义务班钻井时，发生了奇迹。只听轰的一声响，井口喷火，火舌高达数十米，十公里之外也能看到烈焰火光，险些造成人员伤亡，奇迹般地钻出了卤水和天然气，成为“古今第一大火井”。这口著名的“火王井”一直燃烧了20多年。关于井主卖磨打井的故事一直流传下来，于是人们管这口井叫“磨子井”。

“磨子井”按照现代地质学分析，实际上已凿穿了三叠系嘉陵江组石灰岩的主气层，打出了高产气流，日产气数万立方米，可供400余口锅煮盐。“磨子井”至今已开采了170余年，累计产气1.3亿多立方米。目前仍在产气和盐，但已是一口低产井，产气已不是主要任务，而是按原样摆设，供游人观赏。

卓筒井的钻井技术是在继承宋代以前劳动人民挖掘大口浅井的某些经验的基础上，抛弃了某些不利于向深部地层钻进的因素而试验成功的一项新的钻井技术。卓筒井有如下工艺技术特点：

(1) 井的口径很小。

卓筒井的井径一般“如碗口大”，仅容一个竹筒，大致有5~9寸。

(2) 井的深度很深。

一些井的深度可达数十丈或百余丈。

(3) 使用了机械钻井的先进方法。

卓筒井钻井技术使用了机械钻井的先进方法——冲击式顿钻法，即用冲击钻头不断地顿击井底、捣碎井底岩石，使井身不断加深。

(4) 采用固井技术。

在打出井身胚形后，用木材或把大竹子去节，使其中空呈管状，并把其一节一节头尾相连，下到井内作套管用，以防止淡水渗入井内、防止井壁坍塌，从而延长井的寿命。

(5) 发明了扇泥和汲卤的容器。

这种汲卤的容器是用小于井径的竹筒做成的，将熟牛皮作为活塞置于竹筒的底部，利用井底的上张力和筒内水的下压力，使之入水则张，出水则闭，巧妙地将井底的碎岩屑浆或水提出至地面，一次可汲几斗。用这种方式提取井底的碎岩屑浆或水，就叫扇泥，所用的汲水容器，称扇泥筒。