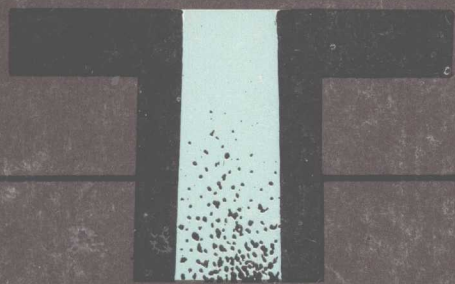


洗井工艺

中国地质大学出版社

刘建刚 何庆余

李世忠 李洁 编著



洗 井 工 艺

刘建刚 何庆余 李世忠

李 洁 编著

中国地质大学出版社

内 容 简 介

本书介绍了国内外多种洗井方法,既有传统的空压机、活塞洗井方法,又有作者及国内许多单位研究成功,并在国内外处于领先地位的液态二氧化碳、多磷酸盐洗井方法。

本书叙述简练,通俗易懂,实用性强,既可供广大的水文、水井钻探工作人员学习参考,也可作为水文地质专业、探矿工程专业师生教学参考书。

洗 井 工 艺

刘建刚 何庆余 编著
李世忠 李 洁

责任编辑:邓祥明

*

中国地质大学出版社出版发行

(武汉市 喻家山)

中国地质大学出版社印刷厂印刷

*

开本787×1092 1/16 印张 8 字数 204千字

1990年5月第1版 1990年5月第1次印刷

印数 1-2000册

ISBN 7-5625-0428-8/P·134

定价:2.70元

前 言

在工农业和城市供水工作中,水井工程是重要的供水工程之一。水井出水量的大小、寿命长短与成井工艺有关。洗井质量的好坏直接影响着水井出水量的大小和水井寿命的长短。洗井的目的在于尽可能消除天然因素和人为因素的影响,正确反映含水层的富水程度,最大限度地恢复滤水管周围含水层的渗透能力,充分发挥水井的最大效益。

洗井工艺是水文地质钻探和水井钻探中的重要组成部分。但到目前为止,尚未见到对各类洗井方法的专门论著。为了系统地、全面地从理论上、实践上完善各种洗井方法,我们在总结自己多年对水井施工和旧井修复工作经验的基础上,汇集了国内外有关部门的先进技术、先进经验以及先进的方法,编写了《洗井工艺》这本书。

《洗井工艺》一书,介绍了国内外多种洗井方法,既有传统的空气压缩机、活塞洗井方法,又有我们以及国内其它单位研究成功,并在国内外处于领先地位的液态二氧化碳压酸洗井工艺,以及多磷酸盐洗井、酸化洗井和联合洗井等新工艺。

液态二氧化碳压酸洗井是洗井工艺中最有成效的方法之一。它是指二氧化碳与盐酸、二氧化碳与多磷酸盐组成的物理与化学联合洗井的新方法。二者有机的结合能使洗井方法更加完善,效果更加理想。这种方法通过地质、水利、电力、城建、煤碳、冶金、农牧、农垦等系统的有关单位在第四纪地层、基岩裂隙、岩溶等地层的不同口径、不同管材、不同深度的1000余眼钻孔和水井中试用,均收到了良好的效果,创造了明显的经济效益。目前洗井的最大深度达2600m,平均出水量增加3—5倍,既缩短了洗井时间,又增加了水井出水量,延长了水井的寿命。

本书侧重于洗井工艺的基本理论、洗井方法和推广应用实例方面的论述。在内容上力求讲清原理,通俗易懂,既适用于从事水文地质钻探、水井钻探、水井修复等实际工作的工程技术人员及工人阅读,又可作为水文地质专业、供水工程专业、探矿工程专业的教师、学生的参考书。

本书在编写过程中,参阅了地质矿产部水文地质工程地质技术方法队钻探技术室以及北京地质矿产局水文地质工程地质公司、广东省地质矿产局第一水文地质工程地质队等单位研究的有关资材。在初稿完成后,经城乡建设环境保护部综合勘察院水资源环境研究所所长王秉忱研究员、地质矿产部水文地质工程地质司副司长农开清高级工程师、地质矿产部王亚明工程师审阅。在修改过程中,中国地质大学(武汉)物理教研室张国雄教授、探工系刘昭明副教授审核了第一章一、二两节;中国地质大学(武汉)数学教研室主任彭文能副教授审核了部分数学公式。全书最后由中国地质大学(北京)探矿工程系杨学涵教授审定。他们对书稿提出了许多修改意见,使本书结构更加合理、条理更清楚、理论更加完善,在此一并表示谢意。

限于时间和水平,本书错漏在所难免,恳望读者批评指正。

作 者

1989年7月

绪 论

洗井是成井工艺过程中的重要一环。它是通过物理作用和化学作用使钻进过程中堵塞的含水层得到部分或完全恢复,增加井周围含水层的空隙度,在井壁周围形成高渗透层,获得最大的水量的过程。

在水文地质钻探和水井钻进过程中,不论采取任何的钻进方法,岩粉总会随着冲洗液渗入含水层的空隙中,泥浆钻进更是如此。冲洗液所用的泥浆除渗入含水层外,同时在孔壁形成泥皮,改变了地下水运动的原始状态,阻碍含水层中的地下水流向井孔。洗井的作用就是通过物理作用和化学作用,破坏泥皮,增加井孔周围含水层的渗透性,减少井损,使含水层中的水能畅通地流入井中。因此,洗井工艺是成井工艺中最关键、最重要的工序之一。洗井方法较多,但最常见的洗井方法有活塞洗井、空压机洗井、多磷酸洗井、酸化洗井、二氧化碳洗井等等。这些洗井方法各具有自己的特点和适应性(详见表1)。

据不完全统计洗井方法有上100种,表1所列常用洗井方法26种,有些方法与表1所列方法相似,但未列出,选用时可查阅有关书籍。

洗井方法选择的正确与否关系到洗井质量的好坏,直接影响着钻孔涌水量的大小和水井寿命的长短。选择洗井方法时,应考虑井孔的岩石类型、空隙类型、井孔深度、井孔结构、施工方式、岩心采取率、冲洗液的类型、稠度以及钻进过程冲洗液消耗量等因素。此外,还应了解是新井、旧井还是废井,水量少或水量减少的原因。在此基础上,对于各类洗井方法的适应性和优缺点要充分分析研究,这样才能做到根据不同深度、不同孔径、不同含水层和不同井型结构与管材,选择不同的洗井方法,做到对症下药。

近年来,在世界各国,工农业用水和生活用水大幅度的增加,尤其是地下水的用量日益剧增,导致某些区域地下水位下降,水井深度加大,使水文地质钻探、水井钻探以及成井工艺等方面的工作量和难度也相应的增加。为了提高井孔质量,保证含水层的渗透性能和给水能力,提高洗井效率是一件刻不容缓的工作。国内外在洗井工艺方面作了大量的试验和研究工作,创造了不少洗井的新技术、新方法和新工艺,从而大大地提高了洗井质量,并在生产实践中获得了良好的效果。

一、洗井的目的

钻孔或水井在下管和填砾后应及时洗井,如果停放时间过久,泥浆皮便会发生硬化,给洗井带来困难。洗井的最终目的就是清除含水层孔隙、裂隙中岩粉及堵塞物,疏通含水层,清除泥皮,恢复滤水管的渗透性和孔隙率,消除井阻,获得钻孔的最大涌水量。具体要求如下:

- (1) 彻底破坏钻进过程中在孔壁上形成的泥皮,消除渗入含水层中的岩粉与泥浆。
- (2) 增加水井周围岩层的空隙性,增加含水层的渗透性。
- (3) 消除含水层和滤料中的泥土以及靠滤料部位含水层中的细小颗粒和杂质,使滤料和靠近滤料的含水层中颗粒重新按其大小排列组合,以形成良好的人工过滤层。
- (4) 彻底清除钻进过程中在孔内积蓄的泥砂、岩屑等。

表1 各种洗井方法对比表

洗 井 方 法	适 用 条 件	特 点
活 塞 洗 井	适用于井管强度高的金属井管及中砂以上的粗颗粒地层	1. 与其它方法联合使用效益显著 2. 迅速有效而简便 3. 成本低
空压机洗井	适用于各种深度不同涌水量的管井, 井管弯曲时也可应用, 但钻孔中要有一定的水层厚度	1. 洗井能力强 2. 能清除孔底沉淀物 3. 安装方便 4. 功率较低
液态二氧化碳洗井	适用于井壁稳定的各种类型井(基岩井、松散岩层的井), 不同深度(浅井、深井)的井、新井、旧井以及废井修复等	1. 产生直接水击, 洗井效能高 2. 节省时间, 节省能源 3. 设备简单, 投资少
酸 化 洗 井	适用于碳酸盐类地层的裸眼基岩孔; 部分砂岩、砂质、粘土质的岩层, 少数下了金属管的水井	1. 适应性强 2. 节省能源 3. 设备简单投资少
多磷酸盐洗井	适用于泥浆钻进基岩, 第四纪含水层井壁不稳定的水井, 滤水管具有砾料结构的水井	1. 对泥浆具有分散作用 2. 井壁泥皮溶蚀、剥离能力强 3. 含水层疏导能力差
封闭反压洗井法	适用于泥浆钻进的基岩第四纪孔, 井壁管坚固可进行分段止水的水井	1. 洗井时间短、效果好 2. 设备简单操作方便 3. 成本低廉
孔内爆破洗井法	适用于坚硬基岩深孔, 对泥岩泥质灰岩或泥质页岩不宜采用, 消灭孔内障碍或起拔套管常用	1. 扩大原有裂隙, 疏通或产生新裂隙 2. 清除孔内泥沙, 障碍物 3. 注意安全
活塞空压机洗井	适用于各种类型不同深度的新井、孔	具备活塞与空压机洗井的特点, 可以相互弥补缺点
活塞泥浆泵洗井	适宜新井, 对维护旧井也能发挥作用	1. 省掉了空压机洗井的工序 2. 成本低廉
空压机泥浆泵联合洗井	主要用于清淤, 利用空压机使孔内泥沙排除	1. 水泵送清水利用空压机清除井内沉淀物 2. 洗井效果好
空压机水泵联合洗井	适用于深井, 井内泥浆稠、含水层埋藏深的井	1. 设备简单, 操作方便 2. 效果好, 成本低
空压机爆破洗井	适用于基岩含水层	具备孔内爆破洗井与空压机洗井的优点
洗井刷水泵联合洗井	适用于不下管的基岩含水层	边冲刷, 注水使其岩屑排除, 效果好
盐酸二氧化碳联合洗井法	适应于含水层岩石成分为 CaCO_3 MgCO_3 灰岩白云岩地层, 深、浅井皆可, 旧井堵塞也适用	具有二氧化碳及酸化洗井的特点, 扬长补短
多磷酸二氧化碳联合洗井	适用于泥皮过厚或钻进过程泥浆浓度大的水井, 旧井的处理	效果较好
射 流 洗 井	适用于基岩、第四纪松散岩层、深浅井孔, 可进行分段洗井, 采用泥浆或其它冲洗液钻进的孔都适用	1. 洗井时间短且安装简便操作简单 2. 分段洗井时针对性强 3. 洗井质量好

(续表1)

洗井方法	适用条件	特点
泵压反洗法	适宜于浅、深井、泥浆及其它冲洗液钻进的孔(井)	1. 设备简单,操作简便 2. 成本低
抽水洗井法	适宜于基岩裸眼井	1. 设备简单,易操作,效果较好 2. 成本低廉、方便
冲孔器洗井	适宜于松散岩层不填滤料小口径勘探孔或强度低的非金属管井	1. 设备简单,操作方便 2. 效果较好 3. 成本低
干冰洗井	适宜于井壁稳定的各种类型不同深度的水井与钻孔	1. 节省时间,操作方便 2. 成本高
水泵洗井	适宜于基岩、松散层不同深度的水井	1. 设备简单,体积小 2. 成本低廉
水压力洗井法	适宜于泥浆及其它冲洗液钻进的井、孔	1. 设备简单操作方便 2. 成本低
气囊封闭洗井法	适宜于基岩及松散层中钻进的井、孔	1. 设备简单,效果好 2. 成本低
掏筒洗井	适宜于提取井中泥浆和淤砂,不适宜井壁泥皮的清除	1. 简单易行,操作容易 2. 时间长,不易到底
超声波洗井法	目前还处于实验室研究阶段	对滤水管及其附近泥皮有破坏作用
双活塞空压机联合洗井	适应于各种水井(基岩井、松散岩层井、深井、浅井等)	1. 能彻底破坏泥皮 2. 设备简单,造价低廉 3. 操作方便、安全

(5) 初步了解含水层的涌水量,确定正式抽水试验时的落程数和每一落程的水位降深。

此外,管井在使用过程中,由于腐蚀、结垢和堵塞,使管井出水量逐渐减少,甚至废弃。要使这种“病井”复活,也必须通过洗井来解决,尤其是液态二氧化碳洗井、酸化洗井是最理想的办法。大量资料说明,这些洗井方法对旧井复活都有良好的效果。

井管被腐蚀的原因很多,其中常见的有溶解氧的腐蚀、电化学的腐蚀和细菌腐蚀等。

溶解氧的腐蚀是在酸性、中性及弱碱性水中溶解氧含量较高时,它与金属管材起化合作用,造成井管腐蚀。电化学腐蚀是金属井管或滤水管和作为电解质的地下水间发生电化学反应而产生的腐蚀。氧的腐蚀作用与电化学腐蚀作用相结合,则危害最大。它能使地下水中处于离子状态或胶体状态的铁形成氢氧化物,并沉淀在滤网和滤水管骨架之间,钙离子也同样会产生沉淀,致使管井逐渐被堵塞,进水量减少。

细菌的腐蚀主要是指铁细菌和硫酸盐还原菌等微生物对井管和滤水管的腐蚀和结垢。多数井管电化学腐蚀作用,都使地下水中铁离子浓度增加,为细菌生殖和繁殖创造了条件,造成井管和滤水管的腐蚀,形成一层铁细菌硬壳。

滤水管堵塞和结垢的原因,主要是腐蚀产物附着在滤水管和滤网上,逐渐结垢以至将其完全堵塞;其次是水中某些化学成分,象钙、镁、铝、硫、铁等化合物,由于长期抽水而改变了原有的化学平衡条件,在滤水管外围或含水层中沉淀形成胶结物;第三种是由于成井时,洗井不彻底,残留的泥浆也可使填砾胶结或形成次生井壁壳而堵塞滤水管。

处理井管、滤水管及含水层腐蚀、堵塞和结垢的方法是常采用二氧化碳与酸化联合洗

井。如当滤水管被化学作用物堵塞时，采用酸化处理和二氧化碳洗井；如细菌堵塞时，洗井时输送氯气灭菌，或与酸化处理相结合。总之，这些洗井方法不仅对于新井适用，而且对于旧井、废井的复活也是很有有效的。因此，在研究洗井工艺时，还需重视对旧井、废井防治的研究。

综上所述，洗井的目的在于消除影响水井出水量的天然因素和人为因素，恢复和改善含水层的天然特征，最大限度地恢复含水层的渗透性能，充分发挥水井的最大效益和延长水井的使用寿命。

二、洗井的要求

洗井是成井工艺中重要的一道工序。一口井能否发挥作用，取决于洗井的质量。洗井的主要任务是清除停留在孔内和渗入含水层中的泥浆与孔壁的泥皮，疏通含水层，并在孔周围形成反滤层。

洗井工作的第一步是了解含水层的特征、管井结构和钻探工艺，在此基础上选择洗井方法；第二步是确定洗井时间及抽水强度；第三步检查洗井质量。

对洗井工作的具体要求，有以下几点：

(1) 洗井工作必须在止水填围之后立即进行，以防井壁泥皮硬化，造成洗井困难，影响水量。

(2) 洗井时要经常观察井口返水的水质变化，如水中虽有些浑浊，但不是泥浆、岩屑和细小砂粒等，而是含水层中固有的成分，则可认为洗井已达到要求。

(3) 用化学、物理的方法洗废井和旧井时，一定要因地制宜，“对症下药”。

(4) 洗井时应定时测量出水量，在连续测量2—3次，基本达到设计取水量的要求和动水位在8—24小时内基本稳定时，洗井工作即可结束。

目 录

结论	(I)
第一章 液态二氧化碳洗井	(1)
第一节 液态二氧化碳洗井概述	(1)
第二节 液态二氧化碳洗井设备	(7)
第三节 液态二氧化碳洗井工艺	(11)
第四节 液态二氧化碳洗井效果及其优点	(17)
第二章 酸化洗井	(20)
第一节 盐酸与碳酸盐岩的化学反应	(20)
第二节 酸与铁锈的化学反应	(20)
第三节 影响酸化洗井的因素	(21)
第四节 酸化洗井中的添加剂	(23)
第五节 酸化洗井工艺	(25)
第三章 多磷酸盐洗井	(31)
第一节 多磷酸盐的物理化学性质	(31)
第二节 多磷酸盐洗井原理	(33)
第三节 焦磷酸钠洗井室内试验	(35)
第四节 焦磷酸钠洗井室外试验	(37)
第五节 影响洗井效果的主要因素	(43)
第六节 多磷酸盐洗井工艺	(44)
第四章 空压机洗井	(49)
第一节 空压机洗井原理及空压机的选择	(49)
第二节 空压机洗井时参数的确定	(51)
第三节 空压机洗井井内管路的安装	(54)
第四节 空压机的洗井方法	(57)
第五节 空压机洗井的优缺点	(64)
第五章 活塞洗井	(65)
第一节 活塞洗井原理及活塞的结构	(65)
第二节 活塞洗井的方法	(67)
第三节 活塞洗井的特点及注意事项	(70)
第六章 联合洗井	(71)
第一节 物理化学联合洗井	(71)
第二节 其它方法联合洗井	(77)
第七章 其它洗井方法	(81)
第一节 封闭反压洗井法	(81)
第二节 孔内爆破洗井法	(84)

第三节	射流洗井.....	(89)
第四节	其它洗井方法简介.....	(90)
第五节	国外洗井方法简介.....	(96)
第八章	洗井质量标准.....	(98)
第一节	洗井延续时间.....	(98)
第二节	洗井质量标准的确定.....	(98)
第九章	抽水试验.....	(101)
第一节	抽水试验的目的与分类.....	(101)
第二节	抽水试验的技术要求.....	(103)
第三节	抽水试验现场工作.....	(111)
第四节	抽水试验资料的整理.....	(116)
主要参考文献	.....	(118)
(10)	.....	第一版
(20)	.....	第二版
(31)	.....	第三版
(42)	.....	第四版
(52)	.....	第五版
(61)	.....	第三版
(71)	.....	第一版
(82)	.....	第二版
(92)	.....	第三版
(102)	.....	第四版
(112)	.....	第五版
(121)	.....	第六版
(131)	.....	第四版
(142)	.....	第一版
(152)	.....	第二版
(162)	.....	第三版
(172)	.....	第四版
(182)	.....	第五版
(192)	.....	第五版
(202)	.....	第一版
(212)	.....	第二版
(222)	.....	第三版
(232)	.....	第四版
(242)	.....	第五版
(252)	.....	第六版
(262)	.....	第一版
(272)	.....	第二版
(282)	.....	第三版
(292)	.....	第四版
(302)	.....	第五版

第一章 液态二氧化碳洗井

为了改变我国水文地质钻探及水井钻探中长期沿用空压机和活塞洗井的落后状况，改进洗井工艺、提高洗井质量，增加水井出水量，延长水井寿命，1976年原北京地质局水文地质工程地质大队开始研究液态二氧化碳洗井新工艺，并于1977年在第一眼井中试验成功。此后，他们又进行了多次试验，并在地质、水利、农业等部门推广应用，收到了较好效果。经过10多年的试验和研究，液态二氧化碳洗井的工艺得到进一步完善。

第一节 液态二氧化碳洗井概述

液态二氧化碳洗井到底是属于物理洗井方法，还是属于化学洗井方法？要回答这个问题，需要我们研究二氧化碳的物理性质和化学性质。

一、二氧化碳的物理性质

世界是由物质构成的，一切物质都在不停地运动着。如水加热到 100°C 时变成水蒸气，冷却到 0°C 时凝结成冰，这是水的一种运动形式。但水、水蒸气和冰都是同一物质，只是状态（液态、气态、固态）不同罢了。我们研究的对象二氧化碳，同样也存在着三态，即固态二氧化碳（俗称干冰）、液态二氧化碳和气态二氧化碳。二氧化碳不同状态的转变，如图1-1所示。其三态转化的物理指标，如表1-1所示。

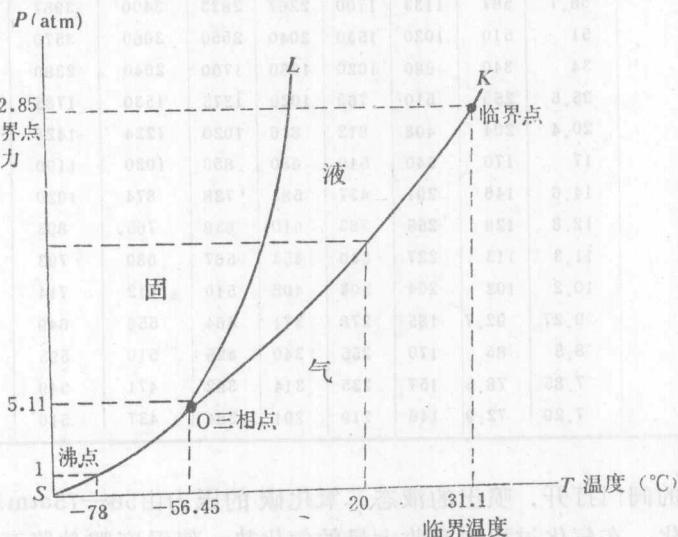


图1-1 二氧化碳三态转化图

在二氧化碳三态转化图中，纵坐标表示压力 P ，横坐标表示温度 T 。由图可见，随着压力和温度的变化，二氧化碳的气态、固态和液态三态就发生变化。 OK 是液态和气态两态的分界线，其右方表示气态存在的区域，其左方表示液态存在区域。曲线的终点 K ，称为临界

点。曲线 OK 上每一点都是两态平衡共存。 K 点以上不存在气态和液态平衡共存状态。曲线 OS 称为升华或凝华曲线，它是固气两态的分界线。 OL 为固态和液态的分界线，称为熔解或凝固曲线。在 OL 与 OS 曲线之左侧是固态存在的区域， OL 和 OK 曲线之间是液态存在的区域。这三条曲线的交点 O ，称为共存点，是固、液、气三态相平衡共存的唯一点。由图 1-1 得知，二氧化碳三态共存点的温度 -56.45°C ，压力 5.11atm 。这时，固态二氧化碳的密度 $1512.4\text{kg}/\text{m}^3$ ，液态二氧化碳的密度 $1178\text{kg}/\text{m}^3$ ，气态二氧化碳的密度为 $13.1\text{kg}/\text{m}^3$ 。

我们可用图 1-1 分析在某一压力和温度的条件下二氧化碳的状态。在室温为 20°C 的条件下，二氧化碳贮存在高压钢瓶内，这时它处在液、气两态平衡共存状态，钢瓶内二氧化碳所受的壓力为 56atm 。因此制造液态二氧化碳过程中，在室温条件下，要把二氧化碳压缩到 65atm 时，液化才算完全。通常钢瓶内的液态二氧化碳受到的压力为 $56-75\text{atm}$ （视温度而变）。

表 1-1 二氧化碳质量、压力与体积关系表

CO ₂ 质量(kg) CO 体积(l) 压力(atm)											
	1	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
1	510	5100	10200	15300	20400	25500	30600	35700	40800	45900	51000
2	255	2550	5100	7650	10200	12750	15300	17850	20400	22950	25500
3	170	1700	3400	5100	6800	8500	10200	11900	13600	15300	17000
4	127.5	1275	2550	3825	5100	6375	7650	8925	10200	11475	12750
5	102	1020	2040	3060	4080	5100	6120	7140	8160	9180	10200
6	85	850	1700	2550	3400	4250	5100	5950	6800	7650	8500
7	72.9	729	1457	2186	2914	3643	4371	5100	5829	6557	7286
8	63.8	638	1275	1913	2550	3188	3825	4463	5100	5738	6375
9	56.7	567	1133	1700	2267	2833	3400	3967	4533	5100	5667
10	51	510	1020	1530	2040	2550	3060	3570	4080	4590	5100
15	34	340	680	1020	1360	1700	2040	2380	2720	3060	3400
20	25.5	255	510	765	1020	1275	1530	1785	2040	2295	2550
25	20.4	204	408	612	816	1020	1224	1428	1632	1836	2040
30	17	170	340	510	680	850	1020	1190	1360	1530	1700
35	14.6	146	291	437	583	728	874	1020	1166	1311	1457
40	12.8	128	255	383	510	638	765	893	1020	1148	1275
45	11.3	113	227	340	453	567	680	793	907	1020	1133
50	10.2	102	204	306	408	510	612	714	816	918	1020
55	9.27	92.7	185	278	371	464	556	649	742	835	927
60	8.5	85	170	255	340	425	510	595	680	745	850
65	7.85	78.5	157	235	314	392	471	549	628	706	785
70	7.29	72.9	146	219	291	364	437	510	583	656	729

使用时，把钢瓶的阀门打开，喷出的液态二氧化碳的压力由 $56-75\text{atm}$ 骤然减至 1atm 。液态二氧化碳迅速气化，在气化过程中吸收大量的气化热，使温度骤然降至 $T = -78^{\circ}\text{C}$ 左右，使周围水汽凝结成冰。为了详细了解二氧化碳的主要物理特性，下面就二氧化碳的三态特征分别描述如下：

1. 气态二氧化碳

纯净的气态二氧化碳是一种无色、无臭、无毒的气体。它能溶于水，部分生成碳酸，稍

有酸味，在水中的溶解度远比氧气、氮气和氢气大得多。二氧化碳气体的溶解度与温度和压力有着密切关系，如表1-2所示。由表可以看出，溶解度是随着温度的升高或压力的降低而减少。

表1-2 二氧化碳气体在水中的溶解度 (单位 $\text{m}^3\text{CO}_2/\text{m}^3\text{H}_2\text{O}$)

压 力 (atm)	温 度 ($^{\circ}\text{C}$)			
	0°C	10°C	20°C	30°C
1	1.84	1.19	0.88	0.66
5	8.65	5.34	3.93	3.56
10	15.78	10.20	7.28	6.61
15	21.67	15.14	11.52	9.63
20	26.35	18.91	14.83	12.62
25	30.25	23.07	18.13	14.51
30	33.65	25.51	20.63	17.22

二氧化碳气体的密度在温度为 0°C 及压力为1atm时为 $1.977\text{kg}/\text{m}^3$ ，是空气密度的1.53倍。在压力为5.2atm时，当温度降到零下 37°C 时液化，同时也能在温度升高到 31.19°C 并加压至72.85atm时凝结成密度为 $468\text{kg}/\text{m}^3$ 的无色液体。其分子量为44.01，熔点为 -56.6°C ，气体常数 $R_{\text{CO}_2}=189\text{J}/\text{kg}\cdot\text{K}$ 。工程上将比热视为定值，其定压比热 $C_p=0.845\text{kJ}/\text{kg}\cdot\text{K}$ ，定容比热 $C_v=0.656\text{kJ}/\text{kg}\cdot\text{K}$ ，两者的比例常数 $K=\frac{C_p}{C_v}=1.3$ 。

2. 液态二氧化碳

液态二氧化碳可溶于水，并能生成碳酸，密度为 $924.8\text{kg}/\text{m}^3$ 。液态二氧化碳通过改变压力后装入钢瓶中，在室温 (20°C) 时，钢瓶内的压力为56atm。在钢瓶内二氧化碳的压力与温度变化实测值参见图1-2。

由图1-2可以看出，当温度在 -10°C — 40°C 之间时，压力变化呈较平稳的斜线上升，当温度大于 45°C 时，其变化趋势很大。

一般来讲，一标准瓶液态二氧化碳质量为25kg，容积为40l左右。1kg二氧化碳在标准状态下为509l，每瓶液态二氧化碳在常温常压下可生成气体12.6—15.27 m^3 ，体积扩大300余倍。一瓶25kg液态二氧化碳在常温下其压力与体积的关系如图1-3所示。

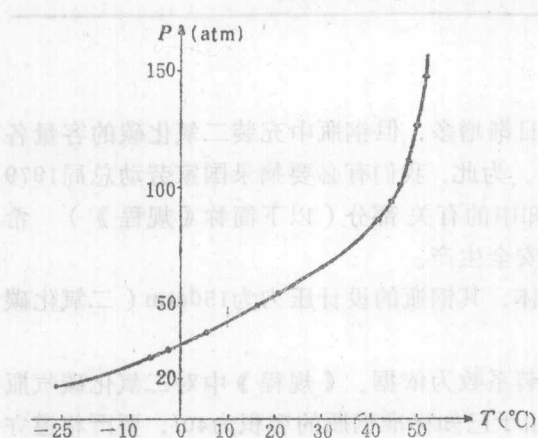


图1-2 钢瓶内 CO_2 压力与温度实测曲线

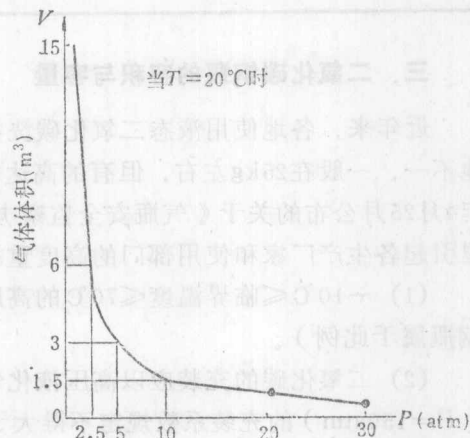


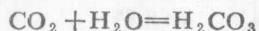
图1-3 一瓶液态 CO_2 的压力与体积曲线

3. 固态二氧化碳

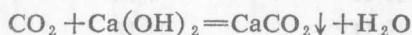
二氧化碳在温度为 -78°C ，压力为 1atm 时呈白色的冰晶，俗称为干冰，吸热后，可直接升华为气态二氧化碳。固体二氧化碳洗井就是利用这一特性进行的。固体二氧化碳在压力为 1atm 时沸点为 -78.5°C ，密度为 $16\text{--}20\text{g}/\text{cm}^3$ 。

二、二氧化碳的化学性质

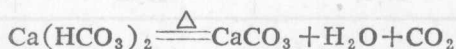
二氧化碳可溶于水，与水作用可生成碳酸，其反应式为：



二氧化碳可与氢氧化钙反应生成碳酸钙，其反应式为：



碳酸钙、水、二氧化碳三者反应又生成碳酸盐，其反应式为：



二氧化碳有关物理、化学性质常数，详见表1-3。

表1-3 二氧化碳有关物理、化学性质常数表

分 子 量		44.009	定容比热 C_r (kJ/kgK)		0.663
密度(0°C、1atm)		1.977	绝热指数 $K=\frac{C_p}{C_r}$		1.295
相对密度(空气=1)		1.529	导热系数(0°C、1atm)kg/mK		0.0126
气体常数(J/kgK)		189	克分子体积(0°C、1atm)m ³		22.26×10 ⁻³
定压比热 C_p (kJ/kgK)		0.858	1m ³ 气体(15°C、1atm) 生成液体体积(m ³)		1.56×10 ⁻³
临 界 点	温度 T_c (K)	304.19	沸 点 (1atm 时)	温度 T_b (K)	194.75 (升华)
	压力 P_c (atm)	72.85		汽化热 r (kJ/kg)	573.6 (升华)
	密度 ρ_c (kg/m ³)	468		密 度	气体(kg/m ³)	2.74
熔 点	温度(绝对)(K)	215.55	动力粘度(0°C、1atm) $\mu_0 \times 10^6(p)$		138
	熔化热(kJ/kg)	180.9	固体时为1512.4；液体时为1178		
共 存 点	温度(K)	216.55			
	压力(atm)	5.112			
密度(kg/m ³)					

三、二氧化碳钢瓶的容积与容量

近年来，各地使用液态二氧化碳洗井的单位日渐增多，但钢瓶中充装二氧化碳的容量各地不一，一般在 25kg 左右，但有的高达 30kg 以上。为此，我们有必要摘录国家劳动总局1979年4月25日公布的关于《气瓶安全监察规程》通知中的有关部分（以下简称《规程》）希望引起各生产厂家和使用部门的高度重视，以保安全生产。

(1) $-10^{\circ}\text{C} \leq \text{临界温度} \leq 70^{\circ}\text{C}$ 的高压液化气体，其钢瓶的设计压力为 150atm （二氧化碳钢瓶属于此例）。

(2) 二氧化碳的充装应以高压液化气体的充装系数为依据。《规程》中对二氧化碳气瓶（ $P=150\text{atm}$ ）的充装系数规定不得大于 0.60 。由于已知标准钢瓶的容积为 40l ，要严格遵守安全规程，其充装量不得大于 24kg 。

由前述二氧化碳的物理特性可以看出,温度是影响洗井效果的一个重要参数。这是因为一定质量的气体里,当温度升高时,气体分子运动的平均速度增大,即单位时间内分子对单位面积器壁的碰撞次数增多,所以气体的压力也随之增大。根据查理定律:一定质量的气体,在体积不变的条件下,它的压力和热力学温度成正比。其数学表达式为:

$$\frac{P_1}{P_2} = \frac{T_1}{T_2}$$

式中 P_1 、 T_1 ——分别为第一状态的绝对压力与绝对温度;

P_2 、 T_2 ——分别为第二状态的绝对压力与绝对温度。

有关部门曾对二氧化碳这个特性进行了实测,在体积不变的条件下,实测的温度与压力值如表1-4所示。由表看出,第一状态时温度为20℃时,表压力值为58atm,当由第一状态改变为第二状态时,温度为30℃时,表压力值为75atm。

表1-4 二氧化碳充装系数
与温度、压力的关系

温度 (°C)	CO ₂ 充装系 数为0.625时 压 力 (atm)	CO ₂ 充装系 数为0.72时 压 力 (atm)
20	58	58
30	75	82
40	100	125
50	130	160

表1-4中的充装系数为0.625时,表示钢瓶内每升充0.625kg的液态二氧化碳的量。同理充装系数为0.72时,表示钢瓶内每升充0.72kg的液态二氧化碳的量。

表1-4中列举了两种充装系数,在室温的条件下(20℃),瓶内的压力值相同。但温度不断上升时,充装系数越大,其压力值也越大。如当温度为30℃时,充装系数为0.625时,压力值为75atm,在同一温度条件下,充装系数为0.72时,其压力值为82atm。随着温度的升高,充装系数大的比充装系数小的压力值增加的快,甚至超过了钢瓶设计所规定的安全极限。

四、液态二氧化碳洗井的作用过程

从前面论述可知,液态二氧化碳洗井是属于物理洗井方法。其主要理由是,二氧化碳可溶于水,饱和时,虽然可使水的酸度增加,部分形成了碳酸,但属于弱酸。更重要的原因是,在利用液态二氧化碳洗井过程中,将液态二氧化碳送入井内,仅十几秒、最多几分钟的时间,就形成井喷。随着井喷,送入井内的大部分二氧化碳喷出地表,仅有少量的二氧化碳进行酸化,对岩石裂隙或泥皮中的钙化物质有破坏作用,但这种作用是极微弱的。所以,无论从时间上讲或从数量上讲,二氧化碳的酸化作用可以忽略不计。下面简叙液态二氧化碳洗井的作用过程。

当液态二氧化碳通过高压管道送入井(孔)内时,在封闭状态下,由于液态的二氧化碳,迅速气化,体积急剧膨胀,在井内迅速产生高压气流,向含水层各个方面传递。由于压力波在水中传递,向井内四周发生作用,冲击井壁,破坏孔壁泥皮,疏通堵塞物,使井内的水向含水层中推移,疏通了含水层,这种水流作用称为内向流。当开启井口时,又由于气态二氧化碳与井水混合,形成气液两相流,降低了孔内液体的相对密度引起井喷,这种作用称为气举。由于气举作用推动井内水柱上升,喷出井口(即发生井喷)。由于井喷,瞬间井内的压力降低,使含水层中的水压大于井内水压,形成了巨大的压力差,加大了含水层中的水流流速,使含水层中的水流冲破岩粉堵塞、冲破井壁的泥皮流向井内,达到破坏泥皮、疏通堵塞物的作用,这种水流作用称为外向流。内向流和外向流都起着冲击井壁的泥皮、疏通含水层中的充填物的作用。这种作用统称为水冲击作用。

水冲击作用和气举作用是相互依存相互作用的。水冲击作用是破坏井壁泥皮、疏通含水层及其堵塞物。而气举作用引起井喷，将井内残留岩粉、破坏的泥皮及含水层的堵塞物携带喷出井口。这两种作用反复进行，最终使含水层最大限度地恢复和增大渗透性，增加水并出水量，达到了洗井的目的。

关于液态二氧化碳洗井的机理问题，目前尚无成熟的解说。由于液态二氧化碳注入到井内到产生井喷，间隔时间一般仅20—30秒或几分钟，在这瞬间的洗井过程中，其作用过程相当复杂。对这种作用过程尚无详细的实验研究，现仅能对液态二氧化碳洗井过程中发生的气举作用做简要的分析。

液态二氧化碳洗井的气举作用与空压机洗井的气举作用有相似之处。利用液态二氧化碳洗井时，将液态二氧化碳通过管道输送入井内。当二氧化碳恰好充满稳定水位上部的输入管道时（若洗井系统是在密闭的条件下，这与空压机洗井的初始工作条件相似），这时是静水压强传递过程，满足静水压强基本方程：

$$P \geq p_0 + \gamma H$$

式中 P ——二氧化碳压强；

p_0 ——大气压强；

γ ——洗井液的相对密度；

H ——稳定水位至输送二氧化碳下端管口距离。

压强传递过程参见图1-4所示。当液态二氧化碳流出管口，送入井中，由于压力下降（相对于瓶压）而气化，体积大增，此后压力又上升，地表输入端表压持续上升，当达到一定压力值后开始井喷。

从以上分析，液态二氧化碳洗井主要特征有：

(1) 喷出井口的液流是由液态二氧化碳气化膨胀所做的功，它往往使井液喷射出孔口相当的高度，有时可达10—20m。

(2) 液态二氧化碳通过输送管道时，除去节流、膨胀效应以及管道泄漏耗损的压力降外，还应包括液态二氧化碳与稳定水位以上管道内空气混合耗损的压力降。

(3) 井喷的液流速度是相当大的。根据观测资料（如图1-5所示）推断，井喷点滞后最高表压值的时间为5—10s，液柱的流速一般都在22.8—11.4m/s之间。众所周知，地下水在岩石中的渗透速度一般为0.05—0.1m/s。二者比较流速如此悬殊，在瞬时井喷过程中，含水

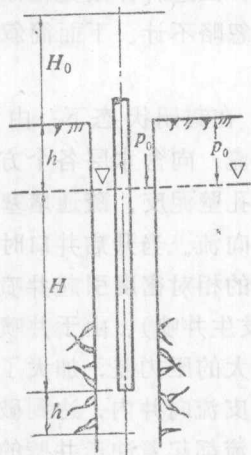


图1-4 CO₂洗井静水压强过程示意图

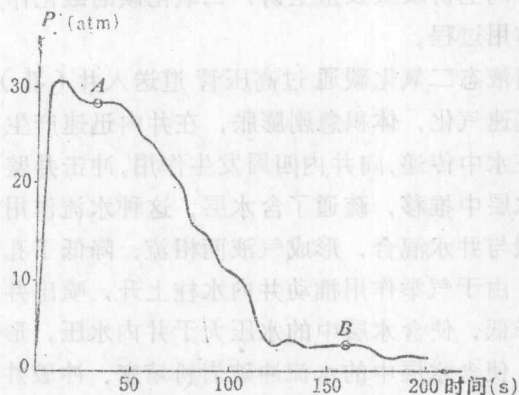


图1-5 CO₂洗井压力历时曲线图

层中的水难以弥补井喷时腾出的水体积，因而在输送液态二氧化碳管道下端，形成压力降。

根据上述分析和我们近几年来应用液态二氧化碳洗井的实践经验，提出计算液态二氧化碳洗井启动气压的经验公式：

$$P = \gamma K (H + h + H_0) + P_0$$

式中 P ——液态二氧化碳洗井启动气压；

γ ——井液平均相对密度；

H ——稳定水位至输送二氧化碳下端管口距离；

h ——稳定水位埋深；

H_0 ——井喷高度；

P_0 ——以水柱高度表示的大气压；

K ——经验系数（基岩水井取 $K=1.2-1.6$ ；松散岩类水井取 $K=2.0-2.4$ ）。

洗井时被清除的堵塞物、泥皮、岩粉及其它异物主要依靠井喷喷出地表，故洗井系统所做的功应等于或大于将井内洗井深度以上的液柱排除地表所需做的功。所以洗井时（考虑到井液上升沿程的压力降和将井内液柱抛射出井口的流速动力水头），瓶内压力应大于由经验公式计算出的启动工作压力。

第二节 液态二氧化碳洗井设备

采用液态二氧化碳洗井时，其设备由装有液态二氧化碳的钢瓶、高压管汇以及输送的高压管线三部分组成（其装置如图1-6所示）。装有液态二氧化碳的钢瓶与高压管汇用高压胶管连接，而高压管汇以直通活接头与高压管线连接；地表高压管线与井下高压管线之间以直角接头或三通连结。若单独用液态二氧化碳洗井时，用直接接头；若采用物化联合洗井时，则需由三通接头连接，便于水泵或酸罐输入洗井管线。

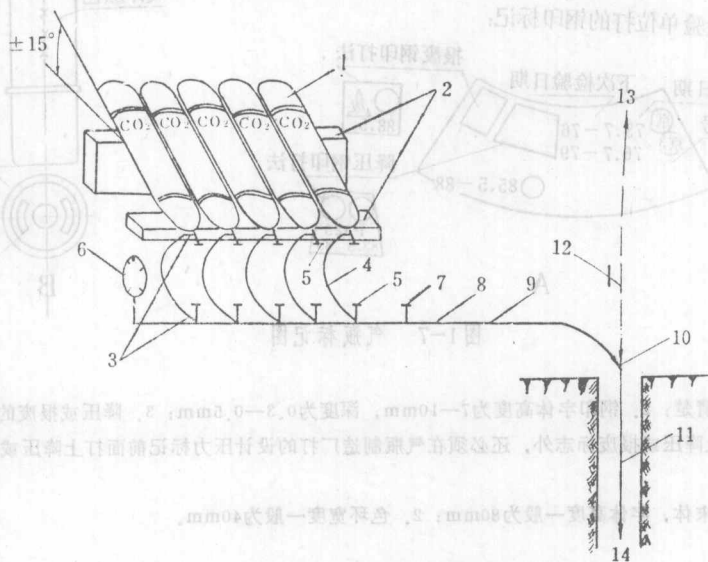


图1-6 液态二氧化碳洗井设备装置示意图

1. 液态二氧化碳；2. 枕木；3. 高压软管接头；4. 高压胶管；5. QF2阀门；6. 压力表；7. 总阀门；8. 直接活接头；9. 地表高压管线；10. 直角接头；11. 瓶下高压管线；12. 水泵或酸罐截止阀；13. 通水泵或酸罐；14. 洗井井段