

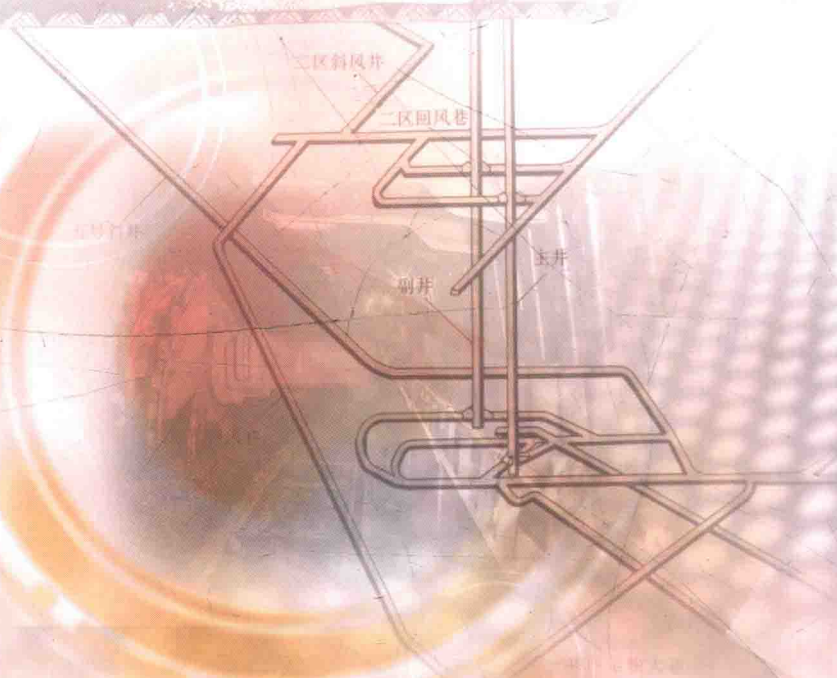
高等教育“十二五”规划教材

井巷特殊施工技术

Jinghang Teshu Shigong Jishu

主 编 林登阁 乔卫国 孟庆彬

中国矿业大学出版社



高等教育“十二五”规划教材

井巷特殊施工技术

主 编 林登阁 乔卫国 孟庆彬

中国矿业大学出版社

内 容 提 要

本书是高等教育“十二五”土木工程(矿井建设)专业规划教材,是根据普通高等学校土木工程(矿井建设)专业教学大纲编写而成的。本书共分6章,包括冻结法施工、注浆法施工、钻井法施工、帷幕法施工、沉井法施工、浅表土特殊施工技术等内容,系统介绍了井巷特殊工程的基本理论、施工技术等方面的基本知识。全书内容丰富,实用性及可操作性强。

本书可供土木工程(矿井建设)专业、城市地下空间工程专业、土木工程专业岩土与地下工程方向的本科生、硕士教材及供科研、设计人员和现场工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

井巷特殊施工技术/林登阁,乔卫国,孟庆彬主编.

徐州:中国矿业大学出版社,2015.8

ISBN 978-7-5646-2786-7

I. ①井… II. ①林… ②乔… ③孟… III. ①巷道施工—高等学校—教材 IV. ①TD263

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 191023 号

书 名 井巷特殊施工技术

主 编 林登阁 乔卫国 孟庆彬

责任编辑 杨 洋

出版发行 中国矿业大学出版社有限责任公司
(江苏省徐州市解放南路 邮编 221008)

营销热线 (0516)83885307 83884995

出版服务 (0516)83885767 83884920

网 址 <http://www.cumtp.com> E-mail: cumtpvip@cumtp.com

印 刷 江苏淮阴新华印刷厂

开 本 787×1092 1/16 印张 13.5 字数 330 千字

版次印次 2015 年 8 月第 1 版 2015 年 8 月第 1 次印刷

定 价 20.00 元

(图书出现印装质量问题,本社负责调换)

前 言

本书是高等教育“十二五”土木工程(矿井建设)专业规划教材,是根据普通高等学校土木工程(矿井建设)专业教学大纲编写而成的。

井巷特殊施工技术是一门实践性很强的应用学科,要通过课堂教学、实习、课程设计三个教学环节紧密配合,才能使学生较好地掌握其内容。

本书共分6章,包括冻结法施工、注浆法施工、钻井法施工、帷幕法施工、沉井法施工、浅表土特殊施工技术等内容,系统介绍了井巷特殊工程的基本理论、施工技术等方面的基本知识。全书内容丰富,实用性及可操作性强。本书由林登阁、乔卫国、孟庆彬任主编。具体分工如下:第1章由林登阁(山东科技大学)执笔;第2章2.1~2.5由乔卫国(山东科技大学)执笔,第2.6由李伟(山东科技大学)执笔;第2章2.7~2.8由宋伟杰(山东科技大学)执笔;第3章由张绍琦(山东科技大学)执笔;第4章由曹帅(山东科技大学)执笔;第5章由张胜利(山东科技大学)执笔;第6章由孟庆彬(中国矿业大学)执笔。全书由山东科技大学林登阁、乔卫国统稿。

在编写过程中参考和引用了有关学术著作、教材、手册,未能在书中一一注明出处,在此一并向有关文献的作者表示衷心的感谢!

鉴于作者的水平所限,书中难免存在缺点和错误,殷切希望读者批评指正。

作 者

2015年6月

目 录

1	冻结法施工	1
1.1	概述	1
1.2	压缩制冷原理	6
1.3	冻土的物理力学性质	22
1.4	冻结温度场	30
1.5	矿山冻结法施工设计	35
1.6	冻结井筒掘进	45
1.7	冻结法施工监测技术	50
2	注浆法施工	54
2.1	概述	54
2.2	注浆理论	56
2.3	注浆材料	74
2.4	注浆设备	90
2.5	立井地面预注浆	94
2.6	立井工作面预注浆	99
2.7	巷道工作面注浆	108
2.8	井巷工程后注浆	114
3	钻井法施工	118
3.1	概述	118
3.2	钻井破岩原理	120
3.3	钻井设备	122
3.4	钻井准备工作	129
3.5	钻井施工	130
3.6	钻井泥浆	134
3.7	钻井井筒永久支护	137
4	沉井法施工	142
4.1	概述	142
4.2	沉井的结构	144
4.3	沉井下沉前的准备工作	146
4.4	沉井井筒的掘进与排渣	148

4.5	沉井减少侧面阻力的方法	152
4.6	沉井下沉的防偏与纠偏	154
4.7	沉井井筒封底与固井	157
5	混凝土帷幕法施工	158
5.1	概述	158
5.2	立井井筒混凝土帷幕设计	159
5.3	混凝土帷幕槽孔的施工	162
5.4	泥浆下灌注混凝土	166
5.5	井筒掘砌	168
6	浅表土特殊施工技术	171
6.1	人工降低水位法施工	171
6.2	盾构法施工	176
6.3	顶管法施工	193
	附录	200
	附录表 I 氨饱和液体及饱和蒸汽热力性质表	200
	附录表 II 高斯误差函数	203
	附录图 I 氨的 $h-\lg P$ 图	204
	参考文献	206

1 冻结法施工

1.1 概 述

1.1.1 冻结法凿井原理及适用条件

1.1.1.1 冻结法凿井原理

冻结法凿井是在井筒开挖前,采用人工制冷技术,将井筒周围的不稳定地层和含水层冻结形成封闭的冻结壁,以抵抗地压,隔绝地下水与井筒的联系,暂时改变井筒周围的地质条件,然后在冻结壁的保护下进行掘砌工作的一种特殊凿井方法,如图 1-1-1 所示。

为了形成冻结壁,首先在井筒周围打一定数量的冻结孔,孔内安装冻结管,以便输送冷媒介质吸收热量,使之降温,随着冻结工作的延续,各冻结孔周围的冻结壁不断扩展,逐渐相互连接而形成不透水且能抗地压、水压的冻结壁。

1.1.1.2 冻结法凿井适用条件

冻结法凿井技术适用于松散不稳定的冲积层、裂隙含水层、松软泥岩层以及含水量和水压特大的岩层。

冻结施工技术既可作为地质条件复杂的井巷工程施工,又可作为工程抢险和事故处理的手段,故被广泛应用于矿山井巷工程中,并在城市地铁、港口、桥涵、大容积地下硐室以及高层建筑物的深基坑基础工程中。

1.1.2 我国冻结法凿井技术简况

1.1.2.1 2000 年之前国内冻结凿井技术简况

我国于 1955 年首次应用地层冻结技术建成了开滦煤矿林西风井,至 20 世纪末共施工 430 个立井井筒,累计冻结深度达 750 000 m,使冻结法成为安全通过冲积层的主要施工方法。45 年中,我国的冻结法凿井经历了引进推广、探索改进、完善提高的发展过程,冻结深度由浅而深(表 1-1-1),冻结地层由第四系逐渐延伸到第三系,地质条件由简单型向复杂型转变。

(1) 引进推广阶段(1955~1959 年)

冻结 18 个立井井筒,冻结总长度为 1 628.5 m,最大冻结深度 162 m(荆各庄主井),穿过冲积层最大厚度 154.8 m。该阶段主要引进波兰和前苏联的冻结法凿井经验;采用秦巴列维奇公式计算地压,拉麦公式计算“两壁”(冻结壁和井壁)厚度,单层混凝土或单层钢筋混凝土井壁,未发生冻结管断裂和井壁压坏现象;存在的主要技术难题是单层井壁的接茬裂缝漏水严重。

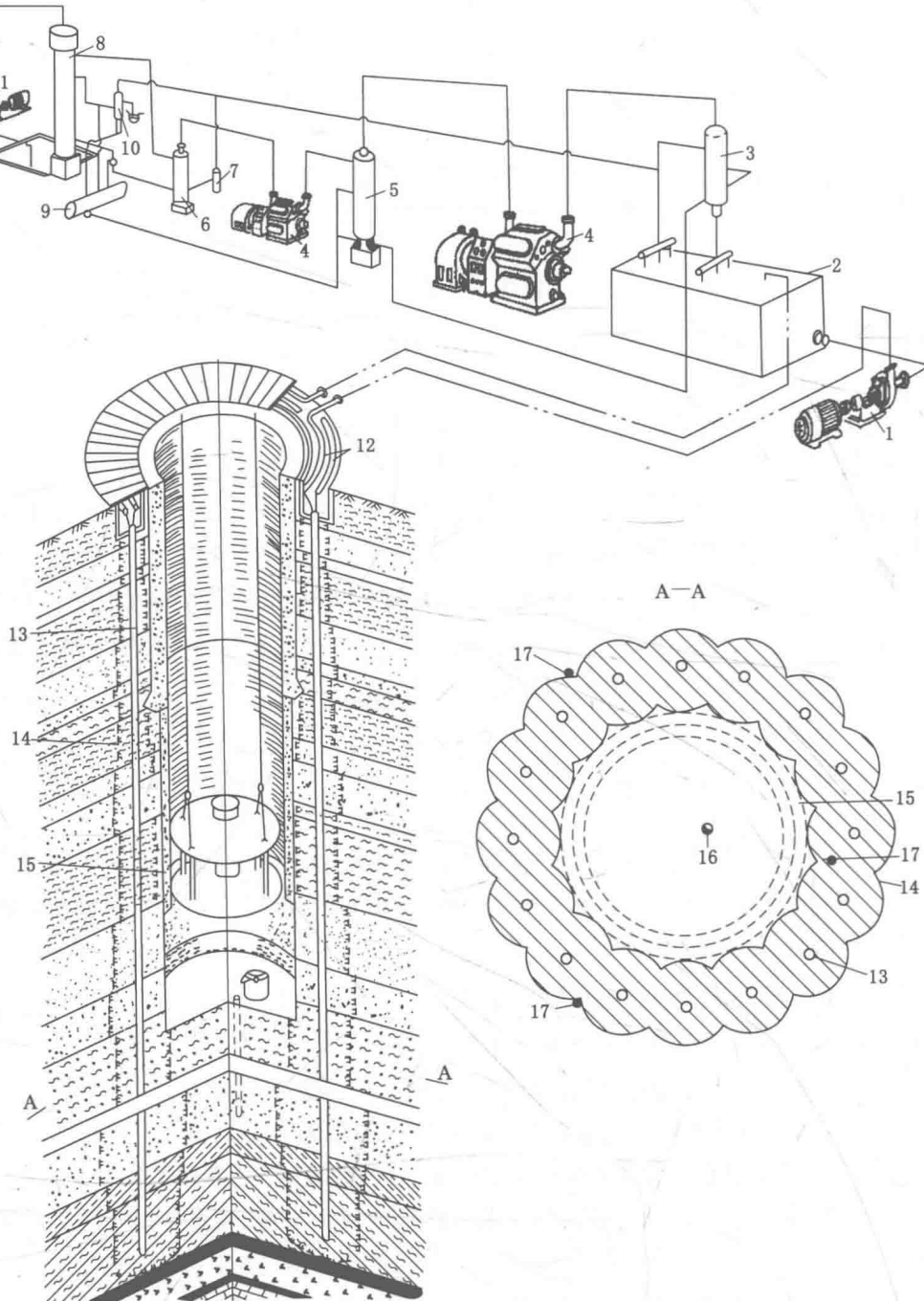


图 1-1-1 冻结法凿井示意图

- 1——盐水泵;2——蒸发器;3——氨液分离器;4——氨压缩机;5——中间冷却器;6——油氨分离器;
7——集油器;8——冷凝器;9——氨贮液器;10——空气分离器;11——冷却水泵;12——配、集液圈;
13——冻结管;14——冻结壁;15——井壁;16——水文观测孔;17——测温孔

表 1-1-1 1955~1999 年国内立井冻结工程量及最深冻结井施工简况

施工年限	冻结井 /个	冻结总 长度/m	最深冻结井筒简况							备 注	
			井筒名称	井筒净 直径/m	冲积层 厚度/m	冻结深 度/m	井壁最大 厚度/m	混凝土 强度等级	冻结壁 厚度/m		开钻 年份
1955~1959	18	1 628.5	荆各庄主井	5.5	154.8	162	0.60	C17	3.35	1958	单层井壁,接茬缝漏水量大
1960~1964	26	23 516	邢台主井	5.0	248.3	260	0.90	C25	3.07	1963	国内首次试验应用钢筋混凝土双层井壁;外壁短段掘砌,深部黏土层出现冻结管断裂现象; 内层分两段套壁,套壁引起壁后冻土大面积融化和井壁下沉,环向裂缝 27 条,竖向裂缝 11 条,井壁基本不漏水
1965~1969	19	2 592	平八东风井	5.0	324.4	330	0.85	C30	4.05	1968	差异冻结(330 m/210 m),井深 259 m 往下冻结管断裂 18 根,外层井壁压坏较严重
1970~1974	75	9 776	潘一东风井	6.5	292.5	3 230	1.20	C40	5.65	1974	施工过程中未发现冻结管断裂。套壁 14 个月因冻结段两层井壁破裂透水涌造成淹井
1975~1979	60	12 978	潘三东风井	6.5	358.5	415	2.00	C45	5.50	1979	双圈孔冻结,防偏孔深 110 m;井深 250 m 往下外层井壁压坏较为严重,冻结管断裂 22 根
1980~1984	53	9 230	谢桥副井	8.0	298.7	380	1.40	C45	5.31	1983	双圈孔冻结;施工到 239 m 水平时,因冻结管(5 根)导致冻结壁透水淹井,淹井后检查发现冻结管已全部断裂
1985~1989	74	12 990	陈四楼副井	6.5	374.5	435	1.60	C50	6.30	1989	未发现冻结管断裂和外层井壁压坏现象
1990~1994	74	15 023.5	元氏北风井	6.0	360.7	410	1.40	C45	5.80	1992	未发现冻结管断裂和外层井壁压坏现象
1995~1999	>31	>8 264	金桥副井	5.0	383.0	412		C50		1999	掘进过程未发生冻结管断裂和外层井壁压坏现象,成井后因井壁漏水导致井壁断裂透水淹井
小计	>430	>74 998									

(2) 探索改进阶段(1960~1988 年)

冻结 291 个立井井筒,冻结总长度为 47 047 m,最大冻结深度 415 m(潘三东风井),穿过冲积层最大厚度 358.5 m。由于该阶段的冲积层厚度和冻结深度成倍增长,采用秦巴列维奇公式计算地压,拉麦公式计算“两壁”厚度,单层井壁结构、小功率制冷设备以及浅井的检测手段、冻结设计、施工规范均不能满足冲积层厚度和冻结深度不断增长的需要。为此,国内大力开展冻结壁温度场、冻结压力、井壁温度及壁后冻土融化回冻特性、冻结壁径向位移等实测试验研究,井壁结构、低温早强高强混凝土、冻土物理力学性能等室内试验,打钻、制冷、冻土挖掘设备与施工工艺及检测手段等进行探索改进,取得了不少可喜的成绩,基本满足了冻结工程的需要。但在实践过程中也遇到了不少技术难题,如冻结管断裂、外层井壁压坏、井壁开裂、井壁漏水及永久井壁透水淹井等事故。

(3) 完善提高阶段(1989~1999 年)

冻结 121 个立井井筒,冻结总长度为 26 322.5 m,最大冻结深度 435 m(陈四楼副井),穿过冲积层最大厚度 374.5 m,为 20 世纪国内最深冻结井,涌水量大(3 212 m³/h)和水压大(3.2 MPa),且深部含有多层难冻的厚黏土层和 24.6 m 半固结次生灰岩,蠕变特性显著,容易引发冻结管断裂、井壁压坏和漏水。通过井壁和冻结壁的设计优化、深部黏性土层物理力学特性和外层井壁不同结构的整体受力性能试验、深井冻结专用管材开发研究、冻结器盐水流量的检测与调控、冻结壁形成特性实测与工程预测、冻结壁和外层井壁的径向位移实测、C55 低温早强高强混凝土的试验应用研究等技术攻关,基本解决了小于 400 m 厚的冲积层和小于 450 m 冻结深度的“两壁”设计和打钻、冻结、掘砌等主要技术难题,使陈四楼副井安全顺利地通过 374.5 m 冲积层和 435 m 冻结段,取得了冻结管无断裂、井壁无压坏和无漏水的良好效果,标志着我国深厚冲积层冻结凿井综合技术达到国际先进水平。

1.1.2.2 2000 年以来国内冻结凿井技术简况

(1) 施工简况

进入 21 世纪以来,我国煤炭基本建设迎来了一个新高潮,不少老矿区向纵深发展,许多地质条件较为复杂的新矿区也得到了大力开发,采用冻结法施工的井筒数量和冻结深度大幅度增长,不少冻结井穿过冲积层超过 500 m(表 1-1-2)。据初步统计:2000~2006 年建成的冻结立井 164 个,冻结总长度达 6×10^4 m 以上。2013 年 5 月,由煤科天地科技建井研究院承担的甘肃庆阳市宁正矿区核桃峪煤矿副井冻结深度达 950 m,创造了世界冻结最深的世界纪录。

(2) 技术简况

进入 21 世纪以来,立井冻结深度和穿过冲积层厚度大幅增长,地压、水压相应增大,地质复杂性增加,井壁厚度和冻结壁的厚度急剧增大,冻结管断裂、外层井壁压坏、内层井壁开裂和漏水现象增多,施工难度大,安全性降低。特别是深部黏土层的含水量小、冻土的扩展速度小、抗压强度低、冻土蠕变位移大,成为掘砌过程冻结管断裂和外层井壁压坏的主要原因。井壁厚度大、混凝土强度等级高,成为内层井壁开裂的主要原因。所以,冲积层厚度在一定程度上标志着冻结法凿井的难度和水平,迄今人们普遍认为 >500 m 冲积层的冻结法凿井技术尚处在探索阶段,“两壁”设计参数和施工措施正处于摸索和完善的过程中。

2000~2006年国内>500 m 冲积层冻结施工的主要技术指标

表 1-1-2

序号	井筒名称	井筒净直径/m	冲积层厚度/m	冻结深度/m	冻结段井壁		冻结盐水温度/℃	冻结壁厚度/m	外圈孔布置直径/m	冻结孔布置圈数/圈	施工工艺		开钻年限	备注
					结构类型	最大厚度/m					外壁	内壁		
1	龙固副井	7.0	567.7	650	钢筋混凝土 塑料夹层井壁	2.20	-35	11.5	27.0	3	短段掘砌	二次套壁	2003	冻结方案委托中国矿业大学杨维好等人设计
2	丁集	主井	7.5	530.45	钢筋混凝土 塑料夹层井壁	2.00	-34	11.7	29.2	3	短段掘砌		2003	冻结方案委托安徽理工大学程桦等人设计
3		副井	8.0	525.25			-34	12.3	31.0	3			2003	
4		风井	7.5	528.65			-34	11.7	27.7	3			2003	
5	赵固一矿	主井	5.0	518.0	钢筋混凝土 塑料夹层井壁	1.70	-33	8.0	19.0	3	短段掘砌	一次套壁	2004	冻结方案委托煤科院北京建井研究院陈文豹等人设计
6		副井	6.8	519.7		2.00	-33	9.5	25.0	3		一次套壁	2004	
7		风井	5.2	526.5		1.70	-33	8.0	19.0	3		一次套壁	2004	
8	郭屯	主井	5.0	587.4	钢筋混凝土 塑料夹层井壁	2.25	-34	10.0	27.0	4	短段掘砌	一次套壁	2004	冻结方案委托中国矿业大学杨维好等人设计
9		副井	6.5	583.1		2.50	-34	11.0	27.5	4		二次套壁	2004	
10		风井	5.5	577.1		2.30	-34	10.5	27.5	4		一次套壁	2004	
11	口孜东	主井	7.5	568.4	钢筋混凝土 塑料夹层井壁	2.10	-36	11.5	30.8	4	短段掘砌		2005	冻结方案由中煤特殊凿井工程公司设计
12		副井	8.0	571.9		2.40	-36	>11.5	33.5	4			2005	
13		风井	7.0	573.2		2.30	-36	>11.0	31.4	4				
14	赵固二矿	主井	5.0	530.6	钢筋混凝土 塑料夹层井壁	1.50	-32	7.2	17.5	3	短段掘砌	一次套壁	2006	冻结方案委托煤科院北京建井研究院陈文豹等人设计
15		副井	6.9	527.3		2.00	-32	9.4	24.6	3		一次套壁	2006	
16		风井	5.2	524.5		1.60	-32	7.5	18.5	3		一次套壁	2006	
17	郭城	主井	7.0	534.2	钢筋混凝土 塑料夹层井壁	2.15	-34	10.5	27.2	4	短段掘砌	二次套壁	2006	冻结方案由冻结承包单位自行设计
18		副井	7.2	536.6		2.25	-34	>10.0		4		一次套壁	2006	

(3) 技术攻关阶段性成果

据初步统计,2000~2006年采用冻结法设计施工了20多个400~500 m冲积层的深冻结井和19个大于500 m冲积层的深冻结井,成功率达100%,但在施工中也遇到了不少技术难题,普遍认为大于500 m的冻结法凿井技术尚不完善,有些问题认识尚不统一,有些技术措施尚在探索阶段,这类井筒一般均由建设单位组织科研、高校、施工单位开展技术攻关,并取得阶段性成效。

① 井壁设计方面试验推广高强高性能混凝土,使混凝土强度等级由C55逐步提高到C60、C70、C80,使井壁厚度控制在2 m以内。

② 初步摸索和建立大于500 m冲积层的冻结壁厚度和安全掘进段高设计计算体系,将冻结壁厚度控制在10 m和冻结孔数量控制在100个左右。

③ 逐步明确冻结信息化的核心内容,将开展冻结信息化施工作为深厚冲积层冻结法凿井的重要措施,动态分析冻结壁的形成特性,较为科学地确定冻结段开挖时间。

④ 大于500 m冲积层冻结段坚持开展冻结壁形成特性的工程预报,及时调整冻结盐水的温度和流量,较好地解决了深厚冲积层冻结与掘进的矛盾,有效地控制井帮温度,部分大于500 m冲积层的深井已基本实现浅部不片帮和深部少挖冻土的目标。

⑤ 坚持外层井壁短段掘砌和混凝土早强增强措施,确保冻结壁的强度稳定性和不同龄期的混凝土强度增长率超过冻结压力的最大增长速度,不少深井已实现不压坏井壁和不发生冻结管断裂的目标。

⑥ 制定内层井壁一次套壁作为深厚冲积层冻结段掘砌正规施工工艺,而将分次套壁工艺作为掘砌工程的应急措施,不少于500 m冲积层的深冻结井实现一次套壁,既保证了井壁质量,又促进了安全快速施工。

⑦ 钢筋混凝土塑料夹层井壁在套壁结束后随即进行夹层注浆防水,而在冻结壁解冻后针对井壁漏水情况进行壁后注浆堵水,取得了较好效果。

⑧ 井筒开挖前做好组织技术培训,根据凿井队伍自身素质制定通过深厚冲积层冻结段安全快速施工措施,2009年5月陈庄压风井创造出外壁掘砌241 m/月的全国纪录。

1.2 压缩制冷原理

1.2.1 一级压缩制冷

1.2.1.1 焓、熵及压焓图

(1) 焓

在实际制冷循环中,常涉及工质的流动,在分析流动过程中,根据能量守恒定律可以证明,流体的能量除内能 U 以外,总有一项流动能 PV 使工质进入或离开系统所需的能量。 U 和 PV 都是由状态单值决定的,在统一单位下把两者加起来,得到一个新的综合量,这就是焓,用 H 表示。单位质量的焓称为比焓,单位为 kJ/kg 。

$$h = u + p\nu \quad (1-2-1)$$

式中 u ——比内能, kJ/kg ;

p ——压力, Pa ;

ν ——比容, m^3/kg 。

焓的物理意义是在开口系统中,工质某状态的焓等于该状态的内能与流动功之和。它是温度的单值函数,两点的焓差可表述为:

$$\Delta h = C_{pm}(T_2 - T_1) \quad (1-2-2)$$

式中 C_{pm} ——定压平均比热。

(2) 熵

熵是热工学中又一个重要参数,是一个与分子热运动特性有关的状态参数。熵代表一个热平衡系统在一定的压力和温度下内部分子热运动的无序程度,通常以符号“S”表示。熵是在研究卡诺循环热效率计算中发现的,如图 1-2-1 所示。曲线 1—2 为加热可逆过程,取其中的 AB 段,工质吸热量为 dq ,当 dq 被当时工质温度 T 除时,AB 两点的微熵为:

$$ds = \frac{dq}{T} \quad (1-2-3)$$

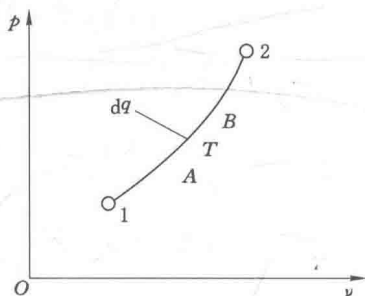


图 1-2-1 熵的定义

式中 ds ——微熵, $\text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$;

dq ——工质在 AB 段的吸热量, kJ/kg ;

T ——工质温度, K 。

状态 1 至 2 点的熵差为:

$$\Delta s = s_1 - s_2 = \int_1^2 \frac{dq}{T} = C_{vm} \ln \frac{T_2}{T_1} + R \ln \frac{\nu_1}{\nu_2} \quad (1-2-4)$$

式中 Δs ——熵差, $\text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$;

C_{vm} ——工质温度在 T_1 、 T_2 变化范围内的定容平均比热, $\text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$;

ν_1, ν_2 ——工质在 T_1 、 T_2 时的比容, m^3/kg ;

R ——气体常数。

熵和比热的量纲相同,均为 $\text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$,但含义不同。比热的定义是工质吸热(或放热)量 dq 与温差 dT 之比;而微熵的定义是工质吸热(或放热)量 dq 与当时工质的温度 T 之比。因此,熵只是工质的状态参数,熵值增加是吸热过程,反之为放热过程,等熵过程则是绝热过程,熵表示工质与外界热交换的方向性。

(3) 压焓图

在制冷装置中,制冷工质的热力状态变化可用其热力性质图来表示。用图进行研究整个制冷循环,不仅可以简便确定制冷工质的状态参数,而且还能直观地看到循环各状态的变化过程及其特点。

制冷工质的热力性质图主要有温熵图和压焓图两种。在工程上多利用制冷工质的压焓图来进行制冷循环的热力计算。

压焓图的结构如图 1-2-2 所示。图中以压力为纵坐标(为了缩小图面,常取对数坐标,但是从图面查得的数值仍然是绝对压力,而不是压力的对数值),以焓为横坐标,图中反映了一点、两线、三区、五态。 k 点为临界点, k 点右边为干饱和和蒸汽线(称为上界线),干度 $x=1$; k 点左边为饱和液体线(称为下界线),干度 $x=0$;两条饱和线将图分成三个区域:下界线以

左为过冷液体区,上界线以右为过热蒸气区,两者之间为湿蒸汽区。图中包括一系列等参数线,如等压线 p ,等焓线 h ,等温线 t ,等熵线 s ,等容线 v ,等干度线 x 。

在湿蒸汽区内等压线与等温线重合。对于制冷工质的任一状态的有关参数,一般只要知道任何两个参数,即可在压焓图($\lg p-h$ 图)中找出代表这个状态的一个点,在这个点上可以读出其他参数值。

图中符号意义如下:

P ——绝对压力,为了缩短纵坐标的长度,采用对数坐标,MPa。

h ——焓, kJ/kg。

x ——干度,表示 1 kg 湿蒸汽中饱和蒸汽的含量,在图中等干度线用粗实线表示(等干度线是指从临界点 k 出发,把湿蒸汽区各相同的干度点连接而成的线), $x=0$ 表示饱和液体线; $x=1$ 表示干饱和蒸汽线; $0 \leq x \leq 1$ 的区域称为湿蒸汽区; $x < 0$ 的区域称为过冷液体区; $x > 1$ 的区域称为过热蒸气区。

t ——温度, $^{\circ}\text{C}$;图中等温线用点画线表示,等温线在湿蒸汽区是一组平行于 h 轴的直线,在过热蒸气区是一组向图的右下方倾斜的曲线。

v ——比容,向图的右上方倾斜, m^3/kg 。

S ——熵,向图的右上方倾斜,斜率大于等容线, $\text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ 。

(4) 单级蒸汽压缩式制冷理论循环在压焓图上的表示

为了进一步了解单级蒸汽压缩式制冷装置中制冷工质状态的变化过程,将制冷理论循环过程表示在压焓图上,如图 1-2-3 所示。

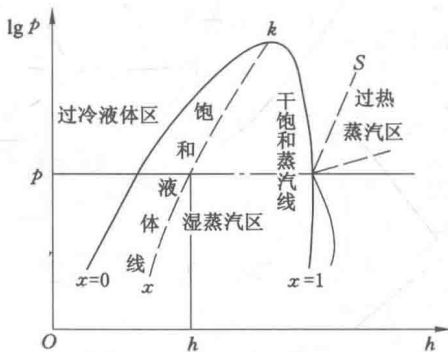


图 1-2-2 $\lg p-h$ 的结构

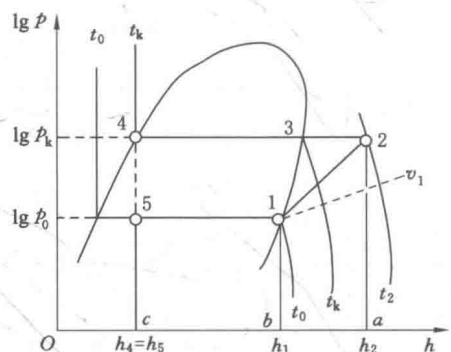


图 1-2-3 制冷理论循环在 $\lg p-h$ 图上的表示

点 1:为制冷工质进入压缩机的状态。如果不考虑过热,进入压缩机的制冷工质为干饱和蒸汽。它是根据已知的 t_0 找到对应的 p_0 ,然后根据 p_0 的等压线与 $x=1$ 的饱和蒸气线相交来确定的。

点 2:高压制冷工质气体从压缩机排出进入冷凝器的状态。绝热压缩过程熵不变,即 $s_1=s_2$,因此,由点 1 沿等熵线向上与 p_k 的等压线相交便可求得点 2。

1—2 过程为制冷工质在压缩机中的绝热压缩过程。该过程要消耗机械功。

点 4:为制冷工质在冷凝器内凝结成饱和和液体的状态,也就是离开冷凝器时的状态。它是由 p_k 的等压线与液体线($x=0$)相交求得。

2—3—4 过程为制冷工质蒸气在冷凝器内进行等压冷却过程。该过程制冷工质向冷却水放出热量。

点 5: 为制冷工质出膨胀阀进入蒸发器的状态。

4—5 为制冷工质在膨胀阀中的节流过程。节流前后焓值不变($h_4 = h_5$), 压力由 p_k 降到 p_0 , 温度由 t_k 降到 t_0 , 由饱和液体进入湿蒸气区, 这说明制冷工质液体经节流后产生少量的闪发气体。由于节流过程是不可逆过程, 因此在图上用一虚线表示。点 5 由点 4 沿等焓线与 p_0 等压线相交求得。

5—1 过程为制冷工质在蒸发器内等压蒸发吸热过程。在这一过程中 p_0 和 t_0 保持不变, 低压低温的制冷工质液体吸收被冷却物体的热量使其温度降低而达到制冷的目的。

制冷工质经过 1—2—3—4—5—1 过程后, 就完成了—个制冷理论基本循环。

1.2.1.2 一级压缩制冷原理

一级压缩制冷是由三大循环系统构成, 即氨循环系统、盐水循环系统和冷却水循环系统。

(1) 氨循环系统

氨循环制冷过程实际上是卡诺的热功能转换过程。氨循环在制冷过程中起主导作用, 为了使地热传递给冷却水再释放给大气, 必须将蒸发器中的饱和蒸汽氨压缩成为高温高压的过热蒸气, 使与冷却水产生温差, 在冷凝器中将热量传递给冷却水, 同时过热蒸气冷凝成液态氨, 实现气态到液态的转化。液态氨经节流阀降压流入蒸发器中蒸发, 再吸收其周围盐水中的热量变为饱和蒸汽氨, 周而复始, 构成氨循环系统[图 1-2-4(a)]。氨循环系统设备由氨压缩机、冷凝器、蒸发器和节流阀构成。从图 1-2-4(a)、(b)可知, 1 点表示氨处于饱和蒸汽状态, 经氨压缩机等熵压缩变成高温高压过热蒸气 2, 再经冷凝器等压冷却, 冷凝为高压常温的液态氨 3, 再经节流阀, 高压液态氨变为低压液态氨 4, 进入蒸发器中蒸发, 吸收其周围盐水的热量变为饱和蒸汽氨, 周而复始, 构成氨循环系统。

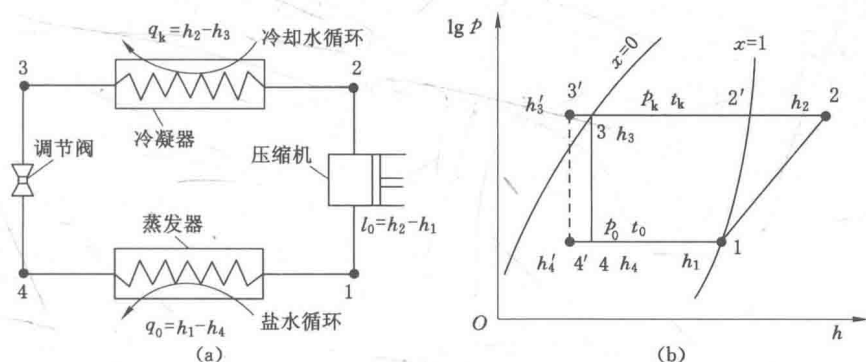


图 1-2-4 一级压缩制冷原理

(a) 系统图; (b) $\lg p$ - h 图

图 1-2-4(b) 中 1—2 为等熵压缩过程, 压缩机单位压缩理论功为:

$$l_0 = h_2 - h_1 \quad (1-2-5)$$

式中 l_0 ——压缩机单位压缩功, kJ/kg ;

h_1, h_2 ——压缩机进出口处氨的焓值, kJ/kg 。

图 1-2-4(b) 中 2—3 为等压冷却过程, 冷凝器单位冷凝热负荷为:

$$q_k = h_2 - h_3 \quad (1-2-6)$$

式中 q_k ——冷凝器单位了负荷, kJ/kg ;

h_2, h_3 ——冷凝器进出口处氨的焓值, kJ/kg。

图 1-2-4(b) 中 4—1 为等压蒸发过程, 其蒸发器单位热负荷(单位理论制冷量)为:

$$q_0 = h_1 - h_4 \quad (1-2-7)$$

式中 q_0 ——单位理论制冷量, kJ/kg;

h_1, h_4 ——蒸发器进出口处氨的焓值, kJ/kg。

氨循环系统的制冷效率为:

$$\epsilon_0 = \frac{h_1 - h_4}{h_2 - h_3} \quad (1-2-8)$$

式(1-2-7)表示单位压缩理论功所能制取的冷量, 称制冷系数。

(2) 盐水循环系统

盐水循环系统以盐水泵为动力驱动盐水进行循环, 其作用为冷量传递。盐水循环系统由盐水箱、盐水泵、去回路盐水干管、配液圈、冻结器、集液圈组成。冻结器是低温盐水与地层进行热交换的换热器, 盐水流速越快, 换热强度就越大。冻结器由冻结管、供液管和回液管组成。根据工程需要可采用正、反两种盐水循环系统(图 1-2-5), 多用正循环供液。积极冻结期间, 冻结器进出口温度差一般为 $3 \sim 7^\circ\text{C}$, 消极冻结期间, 其进出口温度差为 $1 \sim 3^\circ\text{C}$, 蒸发器中氨的蒸发温度与其周围的盐水温度相差 $5 \sim 7^\circ\text{C}$ 。上述盐水循环称为闭路盐水循环(集中回液)。

(3) 冷却水循环系统

冷却水循环由水泵驱动, 通过冷凝器进行热交换, 然后流入冷却塔再入冷却水池, 冷却后的循环水应随时由地下水补充。冷却循环在制冷过程中的作用是将压缩机排出的过热蒸气氨冷却成液态氨, 以便进入蒸发器中重新蒸发。冷却水温度越低, 制冷系数就越高, 冷却水水温一般较氨的冷凝温度低 $5 \sim 10^\circ\text{C}$ 。

(4) 实际制冷能力计算

在氨循环中, 压缩并非等熵过程。冷凝和蒸发过程与环境之间有温差, 非等压且是不可逆过程。节流过程也非可逆过程。同时, 由于气缸余隙, 制冷工质存在着流量和压头损失。因此, 实际压缩功大于理论功, 实际输气量小于气缸理论容积。

① 吸气系数。

由于气缸存在余隙, 实际输气量小于气缸理论吸气量, 实际吸气量为:

$$V = \lambda V_h \quad (1-2-9)$$

式中 V ——实际吸气量, m^3/h ;

λ ——吸气系数, 为小于 1 的数;

V_h ——气缸理论吸气量, 即理论容积, m^3/h , 其值为:

$$V_h = nms \frac{\pi D^2}{4 \times 60} \quad (1-2-10)$$

式中 n ——曲轴转速, r/min ;

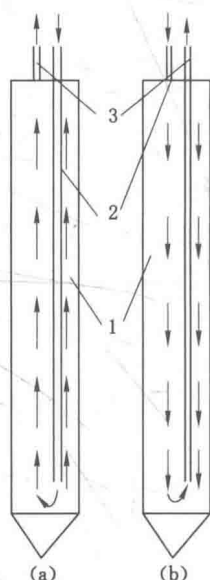


图 1-2-5 正反盐水循环

(a) 正循环; (b) 反循环

1——冻结管; 2——供液管;

3——回液管

m ——气缸数量,个;

D ——气缸直径,m;

s ——活塞行程,m。

吸气系数通常按 N. N. 列非公式计算:

$$\lambda = \left[1 - c \left(\frac{p_k}{p_0} - 1 \right) \right] \frac{T_0}{T_k} \quad (1-2-11)$$

式中 c ——气缸的余隙系数,即余隙体积与理论体积之比,卧式 $c=1.5\% \sim 3\%$,立式 $c=1\%$;

P_k, P_0 ——冷凝压力和蒸发压力,MPa;

T_k, T_0 ——冷凝温度和蒸发温度,K。

系统实际质量流量 G 为:

$$G = \frac{V}{\nu_1} \quad (1-2-12)$$

式中 G ——系统实际质量流量,kg;

V ——实际吸气量, m^3/h ;

ν_1 ——气缸入口处工质比容, m^3/kg 。

② 实际制冷量。

实际制冷量可按下式计算:

$$Q_0 = Gq_0 \quad (1-2-13)$$

式中 Q_0 ——实际制冷量,kJ/h;

q_0 ——单位理论制冷量(蒸发器的单位热负荷),kJ/kg。

③ 实际压缩功。

实际压缩功可按下式计算:

$$L_0 = Gl_0 \quad (1-2-14)$$

式中 L_0 ——实际压缩功,kJ/h;

l_0 ——单位理论压缩功,kJ/kg。

④ 实际冷凝热量。

实际冷凝热量可按下式计算:

$$Q_k = Gq_k \quad (1-2-15)$$

式中 Q_k ——实际冷凝热量,kJ/h;

q_k ——单位冷凝热量(冷凝器的单位热负荷),kJ/kg。

⑤ 电动机总功率。

电动机总功率包括电动机的有效功率和摩擦功率两部分。

电动机有效功率为:

$$N_i = \frac{Gl_0}{\eta_i} \quad (1-2-16)$$

式中 N_i ——电动机有效功率,kW;

η_i ——效率系数,按下式计算:

$$\eta_i = \frac{T_0}{T_k} + at_0 \quad (1-2-17)$$