

热熔岩与热融冰技术

陈 晨 编著



科学出版社

热熔岩与热融冰技术

陈 晨 编著



科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书全面总结了世界各国在特殊的岩土破碎技术——热熔岩与热融冰技术方面的研究进展。全书分上、下两篇,上篇为热熔岩技术,包括热熔法理论、热熔钻具、热熔法设备和热熔工艺等,重点介绍热熔法理论、工具、工艺等方面的研究成果;下篇为热融冰技术,重点介绍冰层的热融冰原理、热融冰钻具结构、试验系统、钻井液及热融冰钻进工艺。

本书可供石油、冶金、煤炭、地质、市政、建筑、交通、水利、铁道、海洋、农业、国防等部门从事勘探和采掘新技术研究的人员及相关大专院校师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

热熔岩与热融冰技术/陈晨编著. —北京: 科学出版社, 2012

ISBN 978-7-03-034898-2

I. ①热… II. ①陈… III. ①钻进-方法 IV. ①P634.5

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 131045 号

责任编辑:周 炜 唐保军 / 责任校对:林青梅

责任印制:张 倩 / 封面设计:陈 敬

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

北京市安泰印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2012 年 6 月第 一 版 开本:B5(720×1000)

2012 年 6 月第一次印刷 印张:10 3/4

字数:206 000

定价:60.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

岩石(土)破碎技术是人类应用很早的工程技术之一,随着经济建设的发展,该技术已经在石油、煤炭、冶金、地质、市政、建筑、交通、水利、铁道、海洋、农业、国防等行业得到应用。由于岩石(土)的破碎工作量极大,所以,研发新式碎岩技术、提高岩石(土)破碎效率有重要意义。

热熔岩技术是目前非常具有潜力的新式碎岩方法之一,它的优势体现在碎岩过程中综合效益的大幅度提高。美国、俄罗斯等国开展热熔岩技术研究已有四十多年的历史,在热熔岩技术的试验及使用过程中获得了大量的第一手资料,在热熔理论、热熔钻具结构研究等方面取得了很大的成就,尤其是俄罗斯在针对低熔点地层(冰层)的热熔钻具研究方面取得了巨大的成功。

20世纪90年代初,世界著名的钻探专家、俄罗斯圣彼得堡矿业学院的Кудряшов教授应笔者导师张祖培教授邀请访问我国,在原长春地质学院图书馆报告厅举行大型学术报告,介绍热熔岩与热融冰技术,引起极大轰动。以此为契机,我国开始了热熔岩技术的研究。笔者于1995年被国家外国专家局派往俄罗斯进修,师从Кудряшов教授和Литвиненко教授(后者现任圣彼得堡矿业学院的校长),学习热熔岩与热融冰技术。在俄罗斯经过整整1年的艰苦学习,才有了笔者的博士论文。2004年,我们重访圣彼得堡时,Кудряшов教授已经仙逝,站在他的墓前,注视着墓碑上雕刻的南极企鹅及其操纵着的冰钻取样器,万语千言也不能表达这位大师为南极冰钻取样工作所做的巨大贡献。编写此书也是为了向这些热熔岩技术研究的先驱们致敬。

本书分上、下两篇,分别介绍热熔岩技术与热融冰技术。上篇为热熔岩技术,包括热熔法理论、热熔钻具、热熔法设备和热熔工艺等,重点介绍内容为:热熔体的流动数学模型;热熔体的速度场、压力场及对周围介质的阻力分布;热熔体流动(蠕动)参数与热熔器表面的互动影响规律;热熔岩土过程中,热能在岩土中传递的数学模型,并根据实测结果对该模型进行修正,评价在其温度场内高温对岩土的主要影响尺寸范围、热能的传递速度、达到热熔效果所需的最小热能;热熔器壳体设计参数、实用的热熔器内部结构;确定接触热熔法钻进松散地层的工艺参数及影响因素。下篇为热融冰技术,重点介绍冰层的热融理论、热融钻具结构、试验系统、钻井液及热融冰钻进工艺。

本书介绍了热熔岩技术研究的两大创新性成果:①构建了更符合实际情况的热熔体流动数学模型,这在国内外以往的研究成果中是没有的,是在热熔法理论研

究上的重大创新;②在热熔岩技术实施工具——热熔器的研究中,创造性地采用了一种不同于俄罗斯和美国的新式热熔器结构,拓宽了热熔器材料选择范围,是在热熔装置研究上的重大创新。

本书所有图件、部分文献整理及文字校对由博士研究生王维、温继伟及硕士研究生韩冰、房治强、赵贵杰、钱方来完成。

衷心感谢我的中国和俄罗斯的导师,是他们将我引入岩石破碎技术这个新的研究方向,并在这个领域开始了充满挑战的工作。感谢我的博士后合作导师、哈尔滨工业大学张克绪教授,对于本书他给出了关键性的建议。衷心感谢吉林大学以孙友宏教授为首的钻采技术研究团队对本书编写给予的各种帮助。衷心感谢中国地质大学(北京)以刘宝林教授为首的研究团队对试验工作给予的指导和大力帮助。作者的同事、校友、朋友和学生也先后给予作者许多建议和支持,在此表示深深的谢意。

感谢科技部中俄国际合作项目专项资金对本书出版的资助。

由于作者水平所限,书中难免有疏漏和不妥之处,敬请读者批评指正。

作 者

2012年1月

目 录

前言	
绪论	1
0.1 引言	1
0.2 热熔岩技术发展现状	1
0.2.1 美国的热熔岩技术	3
0.2.2 日本的热熔岩技术	7
0.2.3 俄罗斯的热熔岩技术	7
0.2.4 热熔岩技术研究的工程意义和价值	7
0.3 热融冰技术发展现状	8
0.3.1 背景	8
0.3.2 美国的热融冰技术	10
0.3.3 苏联的热融冰技术	12
0.3.4 法国的热融冰技术	15
0.3.5 澳大利亚和日本的热融冰技术	18
0.3.6 热融冰技术评价	19
上篇 热熔岩技术	
第1章 概述	23
第2章 热熔体流动方程和流动问题解法	27
2.1 热熔体流动的基本方程	27
2.1.1 问题的分类及数学表达	27
2.1.2 适定性问题和求解条件	28
2.1.3 正交曲线坐标系中的基本量	28
2.1.4 正交曲线坐标系下的方程	30
2.2 热熔体流动问题的解法	32
2.2.1 基本假定和平衡方程	32
2.2.2 热熔体流动问题的解法	34
2.3 本章小结	39
第3章 热能在岩土中的传递问题	40
3.1 热量传递过程的基本概念	40
3.1.1 导热	40

3.1.2	对流	40
3.1.3	热辐射	40
3.1.4	温度场	41
3.1.5	等温面、温度梯度	41
3.1.6	热流密度、热流、总热量	41
3.2	热传导过程的分析	41
3.2.1	热熔器表面温度变化时周围土体中的温度分布	42
3.2.2	热熔器表面温度稳定时土体中的温度分布	46
3.2.3	热熔过程中的热平衡	47
3.2.4	热熔体的平均厚度和流动阻力	49
3.2.5	全面钻进的热熔速度方程	51
3.3	热熔器外土体中温度的实测结果及分析	52
3.3.1	土体中各测点温度随时间的变化	52
3.3.2	土体中各测点温度径向的变化	59
3.3.3	各测点温度径向变化的数值模拟	60
3.4	本章小结	61
第4章	热熔器的结构研究	62
4.1	热熔器的设计原则	62
4.2	热熔器的结构材料	63
4.2.1	热熔器的壳体材料	63
4.2.2	加热电阻	66
4.2.3	隔热材料	67
4.3	热熔器的外形	67
4.3.1	热熔器的横截面	67
4.3.2	热熔器的纵向截面形状	68
4.3.3	热熔区的高度	70
4.3.4	热熔器热熔区形状及参数的确定	70
4.4	热熔器热熔区内部结构的研究	71
4.5	新式热熔器的结构设计	72
4.5.1	热熔器外形的主要尺寸	72
4.5.2	热熔器的内部结构	72
4.5.3	热熔器内部加热电阻设计	74
4.6	本章小结	75
第5章	热熔钻进工艺的研究	77
5.1	热熔钻进试验台	77

5.2 热功率对钻进速度的影响	78
5.3 钻压对钻进速度的影响	79
5.4 其他因素对钻进速度的影响	80
5.4.1 热熔器的高度对钻进速度的影响	81
5.4.2 岩土体的导热性能对钻进速度的影响	81
5.5 美国的热熔钻进野外试验	81
5.6 俄罗斯的热熔钻进野外试验	83
5.7 热熔钻进时的附属工具及配套设备	84
5.7.1 设备	84
5.7.2 机具	84
5.7.3 实际操作注意事项	84
5.8 本章小结	86
第6章 热熔岩过程中的孔壁挤密和硬壳的形成	87
6.1 热熔岩过程中的孔壁挤密	87
6.2 热熔岩过程中的孔壁硬壳形成机制	90
6.2.1 渐进阶段	90
6.2.2 衰退阶段	92
第7章 热熔岩技术应用前景与展望	96
7.1 热熔岩技术施工冻土层勘探孔和天然气水合物勘探孔	96
7.2 热熔岩技术施工地热井	96
7.2.1 地热井施工的复杂性	96
7.2.2 热熔法施工地热井时的优势	97
7.3 热熔岩技术在资源开采中的应用前景	98
7.3.1 在水井工程中的应用	98
7.3.2 开采盐井	98
7.3.3 石油勘探、开采井中的应用	98
7.4 热熔岩技术在超深科学钻井中的应用前景	99
7.5 热熔岩技术在土木工程中的应用	100
7.5.1 地基改良和降水	100
7.5.2 滑坡、露天矿和采石场边坡加固	100
7.5.3 托换工程	100
7.5.4 钻进桩基孔	100
7.5.5 在非开挖施工中应用	101

下篇 热融冰技术

第 8 章 概述	105
8.1 冰层钻进地层特点	105
8.2 冰层取样研究内容及取样技术面临的主要问题	106
第 9 章 热融冰原理	109
9.1 孔底接触热传导过程	109
9.2 孔底流体热传导过程	118
第 10 章 热融冰钻具结构	124
10.1 概述	124
10.2 电加热钻具结构	125
10.3 热水、蒸汽热融钻具	128
第 11 章 冰层钻进用钻井液	131
11.1 冰层和冰雪覆盖层钻进用钻井液配方	131
11.2 冰层钻进用钻井液相关参数	136
第 12 章 热融冰钻进工艺研究	139
12.1 热融冰钻进工艺的室内研究	139
12.1.1 试验台及试验方法	139
12.1.2 试验研究结果	141
12.2 热融冰钻进工艺的野外试验研究	149
12.3 钻井液护壁条件下热融钻进工艺的完善方法	158
参考文献	163

绪 论

0.1 引 言

石油钻井、矿山工程、海洋资源开发、建筑、交通、港口、地质钻探等领域的岩石破碎工作一般可由机械破碎(力学)过程、水力学过程、热力学过程、质量交换和物理化学等过程组成,破碎岩石多采用机械式。受碎岩方式本身及相应的碎岩材料、设备的限制,进一步提高现有的岩石破碎效率,降低成本已很困难。

近 30 年,美国、俄罗斯、中国、日本等都在积极地研究新式碎岩技术,如热熔岩技术(图 0.1)、热机碎岩技术、脉冲放电碎岩技术、激光碎岩技术等。这些新式碎岩技术的共同点在于加强碎岩过程中的热力学过程。除研究碎岩中的热力学过程以提高碎岩效率外,还要考虑碎岩用途。例如,在冻土层工作及采取天然气水合物样品,就必须考虑温度影响,即所谓的温度规程。

为了解决人类面临的资源、环境、灾害等问题,许多国家十分重视地球科学中的极地研究,我国也把极地研究列入科技创新长期发展战略规划。冰心正是极地研究最重要、最有效的实证,在几十年的极地开发研究中,各国专家尝试了多种冰心的采取方法。其中,根据热熔岩理论研究成果研制了冰心热融取心钻具。冰作为一种特殊的岩石,容易融化,从固态到液态的相变过程中所需的能量较少,这是采用热融冰技术进行冰层取心的重要原因。在南极的勘探过程中,该方法不断完善,尤其在中深地层取心中,显示出了较大的优越性。

本书旨在对热熔岩技术和热融冰技术的研究理论、装备设计、工艺方法等进行较为深入的论述,以期对从事这方面研究工作的技术人员能有重要帮助。

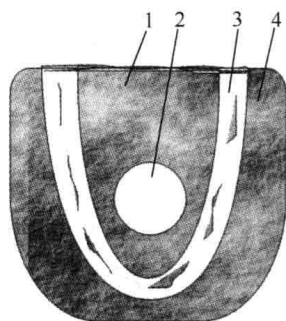


图 0.1 热熔过程示意图

1-热熔器;2-热源;3-热熔体;4-岩土

0.2 热熔岩技术发展现状

按热熔岩技术的可钻性可以将岩石分为低温的(冰、硫和岩盐)和高温的(花岗岩、黏土)、致密的和多孔隙的、胶结的和松散的。也可以根据加热时岩石分解为气态和难熔固态的情况将岩石分为适于热熔岩技术的与不适合热熔岩技术的。

根据热熔体从热熔器底部排出的方式不同,所有的热熔器分为两类:挤密型——在多孔隙岩石中使用;压出型——在致密岩石中使用(图 0.2)。

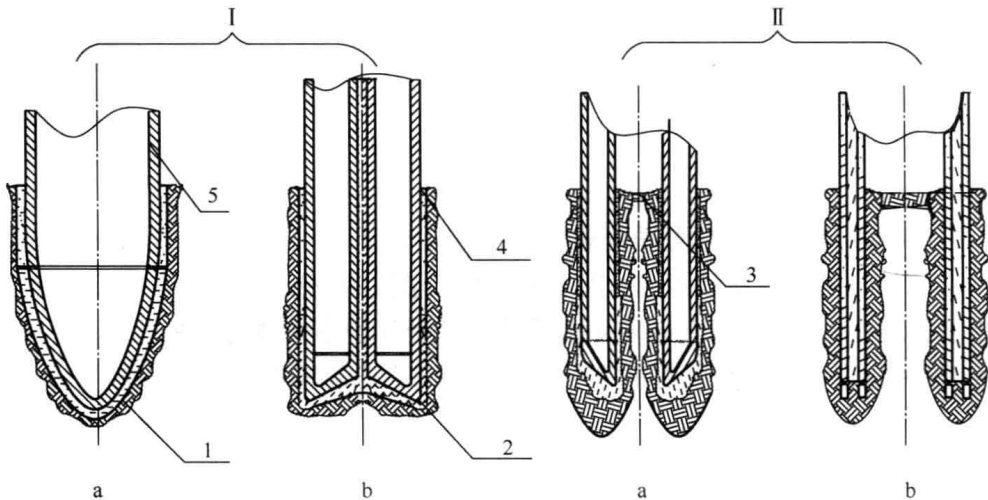


图 0.2 热熔器类型

I-不取心热熔器; II-取心热熔器; a-挤密型; b-压出型

1-热熔体; 2-高温加热元件; 3-岩心; 4-冷凝体; 5-外管

挤密型热熔器使多孔隙岩石或各种土熔化,并进一步保证热熔体冷凝后(冷凝体)被挤密,在孔壁(岩心)处形成玻璃状固体。

对于热熔取心,无论是利用挤密型还是压出型,都要采用专门的取心钻具结构——环状加热元件、岩心管和保证热熔体在孔壁、岩心处冷凝的冷却系统。

热熔过程将产生许多反应。形成的热熔体在外力作用下沿热熔器表面或岩心表面移动(图 0.1)。这种热熔现象虽然在很多的工业过程中都存在,如机械加工、热处理、焊接等,但对其复杂的过程仍有待进一步深入研究。试验研究和数值模拟将是进一步完善该技术的重要手段。

热熔岩技术是复杂地层地质勘探孔施工中一项非常有前景的非常规施工方法。钻进破碎岩石的物理过程实质是孔底热应力强烈变化造成岩土物态改变。热熔过程主要取决于温度、岩石的热物理性质和岩石一定的力学性质。大部分岩石在一个大气压^①下的熔化温度为 1200~1700K。随着地层深度增加,地温提高,热熔器效率也可进一步提高,这种方法可以加固孔壁。因为热熔过程没有钻具的回转和振动,能量在孔底的损失降低,钻孔轴线将保持更高的精度。

热熔岩技术的最大特点是能量在孔底高度集中,保证了热熔速度,将热熔体从孔底挤出,在孔壁形成完整坚硬的玻璃层,将剩余的热熔体用循环液输送到地表或专门的岩心管中。

① 1 个大气压=1.01×10⁵Pa,下同。

孔底热能的传递一般用辐射、对流和热传导来实现。但是由于钻孔过程还要考虑清孔和护壁等要求,采用前两种热传递方式非常困难,所以现在的设计都采用热传导方式,将热能从热熔器表面通过热熔体传递到地层中。

热熔岩技术,具有以下潜在优势:

(1) 实施无钻杆钻进。利用铠装电缆代替钻杆,避免了繁重、长时间的升降作业,不需要钻塔或桅杆,能量的 90%集中于孔底,改善了钻进技术经济指标,对钻进的主要工序和辅助工序易于实现机械化。

(2) 钻进和护壁同时进行。在弱胶结性和不稳定地层施工,利用高强度、不透水的冷凝体形成的玻璃化层护壁,能够简化钻孔结构,大大降低套管和护壁材料消耗,减少用于护壁作业的大量时间。

(3) 岩土体的渗透性得到保持,能够提高试验质量,在复杂矿山地质条件下能有效保证钻进过程的安全,提高矿产勘探质量。

(4) 没有套管的干扰作用,提高孔内测井工作的质量。

美国洛斯阿拉莫斯国家实验室(Los Alamos National Laboratory, LANL)于 1960~1962 年开始热熔岩技术研究。工作中断后又于 1970 年开始重新研究取心热熔技术。从 1971 年开始,研究计划包括以下 4 个主要方面:

(1) 研制热熔器,并进行试验。

(2) 研究热熔体性质及热熔体冷凝形成玻璃化硬层的工艺。

(3) 室内和野外热熔钻进工艺研究。

(4) 热熔岩技术的理论分析和经济评价。

在研究期间,对一些研究目标作了调整和修正,暂停了大直径孔热熔岩技术研究,转向开发地热的深孔钻进技术。组织进行了浅层勘探孔装备研究,建立了孔壁高强玻璃化硬壳的形成工艺,同时还研究了孔底直接加热装置,评价了各种高电阻加热元件及抗高温管材等。

1975 年,日本的资源利用和环保研究所实施一项“阳光”计划,也开始热熔岩技术的研究。

与日本大约同期,在苏联列宁格勒矿业学院钻进工艺教研室的实验室,专家也开始了热熔岩技术的研究。最初的试验研究是在冻土层上进行的,过了大约 10 年,才在专门的试验台上开始进行完整岩石和松散地层的热熔试验。

国家外国专家局于 1995 年专门派笔者到俄罗斯圣彼得堡矿业学院(原列宁格勒矿业学院)学习热熔岩技术。随后于 1998 年和 2000 年分别在吉林省科技厅和国家科学钻探实验室开始立项研究。

0.2.1 美国的热熔岩技术

到目前为止,无论是在岩石中,还是在松散地层中,美国的热熔岩技术研究仍

分为两种类型(图 0.2),即挤密型和压出型,也可分为全截面型和环状取心型。

1. 热熔器

1) 挤密型热熔器

挤密型热熔器用于多孔隙岩层和松散地层(土层)中。热熔体冷凝后形成的薄壳孔隙小,密度比原位岩土大,占有的体积小。如果热熔区域的直径(D_h)大于挤密型热熔器直径(D_p)一个确定的值,就可以将热熔体全部挤密形成冷凝体硬壳。这个关系可表示为

$$\frac{D_h}{D_p} = \sqrt{\frac{\rho_r}{\rho_w}} \quad (0.1)$$

式中, D_h 为热熔区域的直径; D_p 为挤密型热熔器直径; ρ_r 为岩土密度; ρ_w 为玻璃化硬壳密度。

在美国 LANL 实验室进行了各类结构热熔器的试验研究,对所有加热元件都采用了石墨,选用的石墨在惰性气体中温度可达 $2500 \sim 3000^\circ\text{C}$ 。石墨做成圆柱状。对热熔体和热熔器外壳之间在 $1700 \sim 2100\text{K}$ 的高温下可能产生侵蚀、熔解、化学反应等进行了深入研究。由这些成果得出,应采用钼及其合金作为热熔器壳体材料,因为这种材料的高温稳定性和耐熔化能力都好于同样温度范围内的钨及其合金。

在试验研究中,研制了直径 $50 \sim 76\text{mm}$ 几种不同规格的热熔器样机,其中包括保径环(在孔壁形成冷凝体硬壳)。在多孔隙岩层,如凝灰岩、非致密的沉积岩、冲积地层、玄武岩碎块和卵砾石中成功完成了室内及野外试验。所有地层中都形成了连续的玻璃化硬壳。试验结果还证实了热熔速度与岩石密度之间的关系。在岩石密度为 $1700 \sim 1800\text{kg/m}^3$ 时,热熔器的贯入速度急剧下降。岩石密度进一步提高,热熔速度实际降到了零。

2) 压出型热熔器

为了使热熔器能够在致密的岩层中热熔成孔,设计了连续排出热熔体的热熔器结构(图 0.2b),在热熔器端面中心设计了中心排渣孔。挤入排渣孔内的热熔体被冷却液冷凝成碎块、短柱或矿物与冷却液一起输送到地表。

在 LANL 实验室试验人员研究、制造和试验了三种钼合金压出型热熔器,热熔器直径为 $84 \sim 89\text{mm}$ 。这些热熔器在环形加热元件的材料上都选用了热解石墨。环形加热元件保证了热流沿热熔器内外表面圆周均匀分布、吸热的内壁,提高石墨的热幕作用。热熔器内腔充满氮气,以保证加热元件在高温下长时间工作,同时也提高了窄小空间的热传递效率。钼合金的热熔器壳体可以用于厚壁的硬壳施工。为了减少温度梯度,热熔器壳体厚度只有 5mm 。多余的热熔体进入吸渣口,被冷却液带出。

这种结构的热熔器样机被称为“高速型”，直径是 89mm，在实验室条件下最大功率达 24kW，在形成冷凝体硬壳和排出多余热熔体条件下的钻速达 0.28mm/s (1m/h)。利用长保径环成功完成了密度为 2100kg/m^3 的冲积地层中的热熔施工，冷凝体硬壳厚度达到 12mm。

此外还试验了一种直径为 84mm，结构带扩展表面的热熔器(图 0.3)，其内部有三组加热元件，扩展型热熔器表面有若干轴向沟槽，便于热熔体从孔底向上挤出流动。这种设计结构保证了大体积热流的传导，减少了高钻压条件下硬壳的厚度。采用高钻压时，这种热熔器热熔岩速度高于第一种。

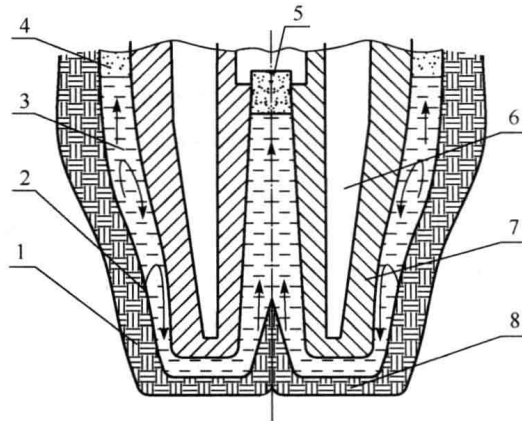


图 0.3 带吸渣口和轴向通孔热熔器

1-岩石;2-热熔边界;3-热熔体;4-冷凝体形成硬壳层;5-热熔体上返吸渣口;
6-环状加热元件;7-热熔器外壳;8-孔底

电源采用三相电。在热熔器内部通过给石墨通电，发热辐射传到热熔器壳体中。热熔体沿热熔器轴向和径向沟槽进入吸渣口，被快速冷却并和冲洗介质(空气或水)一起进入内管。部分循环介质在内管到达吸渣口上部，通过孔壁的热交换降低热熔体的温度。此外，还使用热熔器在温度达 650K 的玄武岩岩样上完成堵塞小孔的热熔研究。为了进行对比，在温度 290K 的玄武岩岩样上完成了同样的试验。试验结果表明，热熔器在干热岩中能够有效工作，而且热熔的速度也能有一定的提高。

3) 取心型热熔器

为研究岩土体的组成、结构、物理力学性质，LANL 实验室研制了环状取心型热熔器。取心热熔器的直径为 114mm，采用水冷系统，功率 13kW。热熔器外壳为钼合金，在真空烧结炉中制成整体。分别在凝灰岩、冲积层和页岩等岩样中，采用低钻压和 9kW 功率进行热熔试验，贯入速度 0.05~0.15mm/s，取心直径 64mm。尽管得到的岩心表面遭到热熔影响，但影响深度较浅，采取适当的规程，岩心内部大部分仍保持原来的组分和结构。冷凝的外壳很好地保护了内部样品，这对于弱

胶结、破碎等地层的取样是非常有利的。

2. 冷凝体硬壳护壁技术的研究

在凝灰岩和冲积层岩样上首批采用挤密型热熔器完成热熔岩试验时,在孔壁处形成了致密的玻璃化硬壳,硬壳的形成依靠热熔器上部石墨材质的保径器。选择石墨是因为它有好的导热性、高温下较高的强度及表面与冷凝体较低的粘接性。硬壳的大部分成分是石英颗粒,还有一些高熔点材料。形成的硬壳很致密,非常完整。随着轴压的提高,硬壳层的质量也明显变好,气泡、气孔和裂隙大量减少。

采用挤出型热熔器时,硬壳层的质量明显得到改善,因为硬壳处的热熔体受挤后更均质、冷凝更均匀,容易形成致密、高强度的硬壳。

但是在岩石中以这种方式形成的硬壳有以下两个问题:

第一,热熔器从孔内拔出时石墨很容易被粗糙的硬壳表面磨损,钻深部地热孔时,这个问题将非常突出。

第二,遇到含碳酸盐或水的岩石熔化时会出现气体,气体将进入硬壳层,形成蜂窝。大量的热熔体将进入吸渣口,造成循环系统超载,堵塞热熔器的排渣管。

为此在吸渣口前需设置较长的排渣管以提高流动阻力,针对热熔体中的气泡形成高压,减少蜂窝量,然后热熔体再进入吸渣口排出。

在凝灰岩岩样上进行了硬壳和原岩样物理力学性质的对比试验。制成了两种尺寸硬壳,第一种长 500mm,内径 51mm,壁厚 20mm;第二种内径 76mm,壁厚 25mm。对选出的硬壳分别进行了轴向、径向、圆周切向的试验,在凝灰岩上也完成了同样的试验。两种材料的密度和孔隙度检测结果见表 0.1。检测到的被冲洗介质携带的冷凝体的密度比原岩密度高 50%。提高轴压可获得更致密的冷凝体。

表 0.1 原岩和热熔体硬壳密度、孔隙度检测结果

材料	密度/(kg/m ³)	干容重/(kg/m ³)	孔隙度
凝灰岩	2540	1500	41
凝灰岩硬壳	2400	2230	7

分别对两组样品进行了抗压、抗拉和渗透性试验,结论如下:

- (1) 形成热熔体硬壳的横截面材料各向同性,径向强度小于轴向和切向强度。
- (2) 热熔体硬壳材料的抗压强度达 50MPa,凝灰岩只有 4MPa。轴压提高,硬壳的强度也随之增加。
- (3) 两种样品的抗拉强度都只有 1MPa。
- (4) 在压力较小时,硬壳的渗透系数约为 $0.01 \times 10^{-6} \text{ m/d}$,同样条件下的凝灰岩为 $300 \times 10^{-6} \text{ m/d}$,当压力升高时,两种样品的指标都急剧降低。

总之,热熔体硬壳的强度要好于原岩,所以可以采用硬壳做孔壁来防止渗漏。

0.2.2 日本的热熔岩技术

日本的资源利用和环境保护研究所为在岩石中进行热熔岩技术研究,设计研制了专门的试验台,采用的液压系统能提供 30kN 的压力,可控电源功率 16kW,岩样夹持和检测仪表齐备,设计最大加热温度 1100℃。

采用两种结构热熔器样机,分别为挤密型和环状压出型。热熔器结构与 LANL 的相似,加热元件用热解石墨,热熔器壳体用钼。采用铝合金双管钻具输送电流,内管和外管环状间隙输送冷却介质,以排除部分热熔体。在内管下部加热元件处设置钼电极。

在玄武岩和花岗岩上平均热熔速度约为 2m/h,热熔器平均功率为 3.5kW,直径为 79mm,形成的冷凝体硬壳厚度为 10~20mm。

日本的研究人员分析了试验结果,认为在复杂、不稳定弱胶结、构造破坏地层,以及常规机械方法难以采用的条件下,高温热熔岩技术是有效的。推广这门技术的主要障碍是热熔器的材料,对其有一些特殊的要求,主要是较高的力学强度、耐磨性和高温耐热熔体侵蚀性,当然还有经济方面等问题。

0.2.3 俄罗斯的热熔岩技术

俄罗斯圣彼得堡矿业学院从 20 世纪 70 年代中期开始热熔岩理论及其应用的研究,至 1995 年在南极成功地用热融法钻进冰层,创造了孔深达 3350m 的世界纪录,随后采用热融法和机械法联合钻进了 3623m 深的钻孔,这个纪录到 2012 年初才被打破。其中,机械法主要是为了穿过含有砾石的冰层。1995 年,圣彼得堡矿业学院提出了一个进一步研究接触热熔法的庞大计划,并列入“俄罗斯矿业国家科技发展规划”,俄罗斯政府将资助 10 亿卢布。目前,俄罗斯热熔岩技术研究已经处于世界领先水平。

0.2.4 热熔岩技术研究的工程意义和价值

1. 研究一种新型“广谱式”的碎岩方法,克服机械式碎岩方法多、设备多、工艺复杂的缺点,简化碎岩过程

目前常用的机械式碎岩方法需配备较多的附属设备,当岩石性质变化时又需要采取不同的钻进工艺,配备不同的碎岩工具,破碎岩石的直接费用较高;众多机械式碎岩方法所必须使用的材料对环境造成污染,某些方法使用时又影响钻孔中后续工作的质量。受碎岩方式本身及相应的碎岩材料的限制,进一步完善机械式方法,降低工程成本已很困难。解决的途径之一是研究新的岩石破碎方法。随着材料科学的发展,可以制作耐 2800℃ 高温的合成材料,在此温度下所有的岩土均会熔化。如果利用这种材料研制成能够熔化岩土的热熔器,作为钻孔工具,其破碎

(熔化)岩土的效果主要取决于热熔器的温度,碎岩过程即是岩石在高温下熔化、形成热熔体移动、冷却形成硬壳的过程。钻进时只要将炮弹状的热熔器下入孔底就能加深钻孔。这种热熔岩技术工艺简单,附属设备、机具少,很少受岩土性质变化的限制,所以这是一种“广谱式”的碎岩方法,是一种全新的碎岩技术。

2. 岩土热熔时的一些辅助影响将极大提高岩土破碎时的综合效益

常规机械方法(回转法、冲击法、冲击回转法、振动法等)破碎岩石时,直接用于破碎的能量只有全部能量的百分之几,而热熔法的能量利用率可达到 70%~80%。

熔化的岩土在外界条件压迫下冷却凝固后在孔壁上形成一薄层强度较大的玻璃状管状冷凝体(硬壳),可作为护壁套管使用。这能节省大量的护壁材料,节约大量的资金。热熔法较机械法可节约钻孔材料费 75%。

无论哪一种机械式碎岩方法在破碎岩石时都要摩擦生热,为保护碎岩工具需冷却介质(水、空气、泥浆等),热熔钻具无需冷却介质。热熔法破碎岩石时对环境无任何污染。

3. 为研究岩石土的破碎方法提供新思路、探索新途径,完善岩石破碎理论

在众多的岩石破碎技术文献中,大多集中于机械式碎岩理论的研究及其应用。在机械力作用下岩石的破碎机理研究得比较透彻,模型较多。但在高温下岩土由固态变为液态甚至某些组分变成气体这个复杂的过程研究得相对较少。所以对热熔法钻进过程研究,可以丰富岩石破碎学理论,提供新的研究领域,寻找更有效、更经济的碎岩方法。

0.3 热融冰技术发展现状

0.3.1 背景

冰川在地球两极和两极至赤道带的高山均有分布,地球上陆地面积的 11% 被冰川所覆盖,而 4/5 的淡水资源就储存于冰川(冰盖)之中。现代冰川在世界各地几乎所有纬度上都有分布。地球上的冰川大约有 2900 万 km^2 。现代冰川面积的 97%、冰量的 99% 为南极大陆和格陵兰两大冰盖所占有,特别是南极大陆冰盖面积达到 1398 万 km^2 (包括冰架),最大冰厚度超过 4000m,冰从冰盖中央向四周流动,最后流到海洋中崩解。

南极(图 0.4)是地球上最后一个被发现的大陆,总面积为 1390 万 km^2 ,相当于中国和印巴次大陆面积的总和,居世界各洲第五位。整个南极大陆被一个巨大的冰盖所覆盖,平均海拔为 2350m。

目前已有 26 个国家在南极设立了科学考察站,在南极建立了约 150 个科学考