

普通高等教育
岩土工程类教材

岩土钻掘工程新技术

YANTU ZUANJUE GONGCHENG XIN JISHU



张祖培 殷 琨
蒋荣庆 孙友宏 等编著

地 质 出 版 社

普通高等教育岩土工程类教材

岩土钻掘工程新技术

张祖培 殷 琨
蒋荣庆 孙友宏 等编著

地 质 出 版 社

· 北 京 ·

内 容 提 要

本书介绍了近代岩土钻掘工程中若干新技术,是吉林大学建设工程学院勘察工程系全体教师多年来承担地矿系统科研项目的教学、科研成果。其中绝大部分转化为生产力,并对地矿系统的钻掘工程产生巨大作用。全书共分二十一章,从岩石破碎新工艺直至科学钻探,每章作为一项新技术,从基本原理直到应用效果进行陈述、回顾、总结和展望。全书内容新颖、资料丰富、可靠,科技含量高。它的出版有利于推动21世纪我国探矿、采掘、基建、国防工程事业的进一步繁荣和发展。

本书可作为地质、矿业、石油、交通、建筑、水电等院校有关专业的研究生和本科生的教材;特别对从事岩土钻掘工程的科技人员具有重要参考价值。

图书在版编目(CIP)数据

岩土钻掘工程新技术/张祖培等编著, -北京:地质出版社, 2003.10

普通高等教育岩土工程类教材

ISBN 7-116-03886-8

I. 岩… II. 张… III. 岩土工程-地质勘探-新技术应用-高等学校-教材 IV. TU412-39

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2003) 第 067516 号

责任编辑:陈 磊 李源明

责任校对:关风云

出版发行:地质出版社

社址邮编:北京海淀区学院路 31 号, 100083

电 话:(010) 82324508 (邮购部); (010) 82324565 (编辑部)

网 址:<http://www.gph.com.cn>

电子邮箱:zbs@ gph.com.cn

传 真:(010) 82310759

印 刷:北京朝阳区小红门印刷厂

开 本:787 mm × 1092 mm $1/16$

印 张:15.75

字 数:380 千字

印 数:1—2000 册

版 次:2003 年 10 月北京第一版·第一次印刷

定 价:20.00 元

ISBN 7-116-03886-8/P·2396



(凡购买地质出版社的图书,如有缺页、倒页、脱页者,本社发行处负责调换)

序 言

近年来,随着我国国民经济的迅猛发展,许多专业学科都在不断扩大应用领域。以勘探(勘察)工程学科而言,若仅涵盖钻探、掘进、探矿机械、安全技术四项科技,已远不能适应发展的需要。为了迎接这种新的挑战,必须以科学技术为基础,及早研发(R&D)新技术、新方法,学科才能不断焕发青春,不断前进。

目前,勘察工程学科除了执行和完成原有任务外,实际已广泛地用于市政、基础、交通建设、环境治理,地质灾害防治,水利水电,掘进穿越大江河的输气、输水、输电隧道工程,以及非开挖工程铺设管缆等工程。因此,学科的转轨、变型,势在必行。

吉林大学建设工程学院(原长春地质学院)勘察工程系在她建系 20 年的历程中,遵循以“科学技术兴系”、“研发促学科进步”的方针,始终如一,不断前进。

《岩土钻掘工程新技术》一书的问世,就是她们坚持不渝这一方针的重要成果。

全书共分 21 章,约 40 万字,是勘工系教师遵循上述方针,既教书育人又做专题科学研究,通过孜孜不倦的努力奋斗而完成的硕果。这些专题研究项目包含“六五”至“九五”期间国家和主管部下达的专题项目和根据发展需要而研发设立的新技术项目。其中大部分项目都转化为生产力,并取得了巨大的经济、社会效益,有的还具有自主开发的知识产权,并获得专利。

科研成果概括起来有以下几个方面:

1. 国利用机械能碎岩,由来已久,研发新的碎岩机理是大势所趋,首选的新方法是“热能机械能碎岩”与“热熔法碎岩”,它可以大幅度地提高碎岩效率,简化操作工艺。在隧道掘进和采石等工程中,有广泛应用前景。

2. 探矿工程研究所、河北地质矿产局与长春地质学院几乎同时开展了多种液动冲击器的研究与开发,但射流式冲击器是该院的研究强项,已经有约近 30 年的历史,从建立微机测试实验室着手,把各种新型液动冲击器的研究,都作为高科技产品来设计、改进、定型。从而成为长院勘工系研究的一大特色。此外:

- (1) 最重要的贡献是解决了诸如:变质岩、糜棱岩、花岗岩等坚硬研磨性极强的古老岩层的钻进与取岩心的难题;并将碎岩方式从点破碎改变为体积破碎,从而提高钻进效率,更重要的是延长了金刚石钻头的寿命;

- (2) 射流冲击器已成为钻进陡斜硬岩层防止钻孔弯曲的有利武器,在 CCSD 大陆科学钻探钻的纠斜工作中立了新功;

- (3) 在开发使用中不断开发、研制新品种:小口径液动冲击器形成:54、75、89、150 mm 系列,并成为“多工艺钻探”的重要器具和方法之一;

- (4) 冲击器从小口径发展成大口径:如 ZC-800 型和贯通式 FGC-1500 型(前者为液动,后者为气动),贯通取心式冲击器也形成 GQ-89/30-200/60 七个品种的系列,可从不取心到绳索取心和反循环取心;

(5) 气动与液动潜孔冲击器, 在全国广泛推广钻进已超过 100 万 m, 成为具有我国特色的一类新型的孔底动力机;

(6) 我国冲击器的研制与应用 (含探矿工程研究所、河北地质矿产局) 居世界领先, 引起诸多国家如德国和欧共体, 美国等钻探界的注意。

3. 在支援大西北开发地下水又立新功。

为支援大西北宁夏特别缺水的同心县, 师生们敢于迎着困难上。他们采取老、中、青三结合的办法研讨如何取出淡水的钻探理论、设备与工艺, 一改常规钻进方法, 初步锁定试用泡沫钻进法钻探。这是老一辈勘探工作者梦寐以求达 50 年的一项新工艺。他们知难而上, 强攻技术难关的精神令人佩服。

研制了新型泡沫剂、流变学、性能测定、泡沫泵增压装置等成套设备与工艺, 克服与预防地层中水的严重漏失, 预防压跑水层等可能发生的病害, 创造性地使用了超欠平衡钻进大口径低压水井钻探成功。成功地开辟了我国超平衡泡沫钻探工艺的先河, 丰富了压力平衡钻探方法的内涵, 为地质钻探、石油钻井、水井钻探等开辟了一条新路。长了全国勘工界的志气。

他们已钻成 600、700、1000 m 大口径深基岩水井 5 口, 具体支援了西北干旱缺水地区的人民。出水量为设计的 10 倍, 创经济效益达 200 余万元。BWZ 型泡沫泵增压器已形成系列产品。

综观全书, 涵盖了勘工系全体师生的最新科研成果, 科技含量高, 技术先进, 题材新颖, 内容丰富。本书的出版发行, 是我国勘探 (察) 工程界的一件大喜事, 必将激励广大勘工技术人员向更高目标攀登, 在 21 世纪为祖国创造更辉煌成就。

作为一个老的勘探工作者, 我衷心地向师生们, 特别是祖培、荣庆、殷琨、友宏等同行们和新老院领导表示深切地感谢!

中国工程院院士

刘广志



2003 年 5 月 8 日

编者的话

本书由张祖培教授担任主编，中国工程院院士刘广志教授撰写了序言。

全书共分廿一章，其中张祖培教授编写了第一章、第二章、第十六章、第十八章、第廿一章；蒋荣庆教授编写第三章、第七章、第八章；殷琨教授编写第四章、第五章、第六章；徐会文教授编写第九章、第十二章；孙友宏教授编写第十章、第十三章、第十七章、第廿章；陈晨副教授编写第十一章；薛军教授编写第十四章；卢文阁副教授编写第十五章；陈迹高级工程师编写第十九章。

本书由于大量引用最新科研成果，所以许多内容的资料是参考吉林大学建设工程学院探工研究所（1990~2003年）蒋荣庆，殷琨等数十篇研究报告。

在本书编写过程中，责任编辑李源明高级工程师以及研究生刘冬生、肖荣、肖西卫、张德龙、谭凡教、于基宁、高科、李伟涛等都付出了不少心血，在此向他们谨表谢意。

本书实为教学、科研成果的总结，在实践过程中也得到许多生产单位的支持和协助，在此一并致谢。

由于是教学、科研、生产实践的成果，因此就必然带有阶段性。随着探矿事业的发展，某些成果或论断尚需不断提高和完善，书中所介绍的内容，难免会有不足之处，恳请读者批评指正。

编者谨识

目 录

序 言

编者的话

第一章 热机碎岩工艺·····	(1)
第二章 热熔钻进新工艺·····	(9)
第三章 潜孔锤多工艺钻探技术·····	(17)
第四章 潜孔锤设计基础理论及模拟仿真电算·····	(34)
第五章 贯通式潜孔锤及反循环连续取心钻探·····	(42)
第六章 大直径潜孔锤钻进技术·····	(57)
第七章 大直径硬质基岩井钻进·····	(67)
第八章 大直径空心桥梁桩施工技术·····	(77)
第九章 泡沫钻进技术·····	(82)
第十章 泡沫水泵增压技术·····	(100)
第十一章 地基处理新技术·····	(111)
第十二章 注浆技术·····	(139)
第十三章 全塑料供水井技术·····	(166)
第十四章 液压式压桩机施工技术·····	(172)
第十五章 岩土锚固技术·····	(180)
第十六章 超硬复合体·····	(190)
第十七章 地源热泵技术·····	(197)
第十八章 煤炭地下气化技术·····	(206)
第十九章 天然气水合物·····	(214)
第二十章 非开挖导向钻进铺管施工技术·····	(222)
第二十一章 科学钻探·····	(237)

第一章 热机碎岩工艺

第一节 概 述

一、热机碎岩工艺的国内外发展概况

1. 国外发展概况

热能用于辅助机械碎岩技术, 大约在 20 世纪 50 年代就有人开始研究。但是当时大多数都是在原有的纯热力碎岩工艺(即利用各种现代化的热源生热弱化岩石)基础上辅之于机械切削碎岩, 比较有代表性的有以下几例:

(1) 美国的松铜矿公司在 1972 年曾利用热力削弱和热力剥落, 配合机器进行过破碎岩石实验等;

(2) Cark 等人在 1972 年用氧柴油火焰、电阻加热器、电弧等方法对岩石加热, 而后利用风镐进行机械破碎的碎岩实验;

(3) Thirumalait 等人在 1975 年为了二次破碎坚硬岩石, 在现场实验了一种由混合燃烧加热、机械破碎的热力机械装置。

所有这些碎岩实验, 取得了一定的成果。有的碎岩方法其钻进速度较常规碎岩方法提高了几十倍。但是, 大多由于热源的过度昂贵、设备工艺的繁杂, 以及工作条件的恶劣等原因, 限制了它们的进一步推广应用。

80 年代初期, 俄罗斯圣彼得堡全俄勘探技术研究所的勃拉托夫(Бродов)教授研究: 在热机碎岩过程中, 先利用钻头在与岩石接触表面摩擦时所产生的摩擦热能来弱化岩石, 降低岩石强度, 然后再进行机械切削破碎岩石。为此, 钻头摩擦元件与切削元件设计成分体式结构, 而且两者之间的加压方式相互独立。摩擦元件由钻杆直接加压, 而切削具的压力来自于钻具堵头上所建立起来的水泵压力, 具体由泥浆泵上的压力表读数来控制。

俄罗斯至今已经成功设计出 TM-59、76、92、112、132、152 等多种口径的复合式硬质合金取心式热机钻头和全面破碎热机钻头。已进行了大量的钻进实验, 并取得了令人满意的效果。在科拉半岛的霞石、磷灰石及波罗的海花岗石(可钻性 IX 级)中进行钻进, 进尺 325 m, 平均机械钻速达 1.7 m/h, 最高钻速达 3 m/h。尤其值得注意的是, 该钻头在混凝土块中进行实验时, 获得了很高的钻速和钻头寿命, 机械钻速可达 20 m/h, 而其成本仅为金刚石钻进的 20% ~ 70%, 显示出较金刚石钻进更优越的综合性能。

2. 国内发展现状

近年来, 我国在热机碎岩工艺方面, 也进行了一些有益的探索。中国有色矿产地质研究院的张科及中南工业大学的高森教授等, 曾于 20 世纪 80 年代进行“金刚石钻进中热机载荷碎岩机理及其应用”的研究。该课题就孕镶金刚石钻头热机碎岩及其温度与他们设计的一种复合式(包括摩擦块与切削块)热机碎岩孕镶金刚石钻头, 一并进行了室内实验,

实验取得了一定的效果。但他们所设计的钻头孕镶块是通过碟形弹簧单独加压，结构较复杂，工作寿命较低。有关他们在热机碎岩工艺方面更深入的研究，嗣后未见报道。

90年代后期，长春科技大学勘工系从俄罗斯引进了热机碎岩工艺技术。尽管目前在俄罗斯此项技术已初步应用于实际生产，但仍需继续完善。

二、热机碎岩工艺的机理及提高钻速的原因

热机碎岩工艺人为有意识地制造摩擦热能来弱化岩石，为碎岩提供良好的条件。显然，这项技术的关键在于钻进中摩擦热能所产生的温度场对岩石的弱化作用能否实现，一旦岩石的弱化得以实现，即可与机械碎岩相结合，进而提高碎岩效率。因此，在分析热机碎岩工艺之所以能提高碎岩效率的时候，应该从分析摩擦热能所产生的温度场，对岩石的弱化机理入手，进而揭示热机碎岩工艺的机理及其提高钻进效率的原因。

前人通过在热机碎岩工艺方面的研究，得出了结论：岩石受热后强度下降的主要原因是由于高温作用所造成的岩石内部组成矿物的不均匀膨胀，或成分的化学分解，或气体、水的膨胀，或矿物组成成分的熔解，或者矿物的相变等，由此引发了热应力。此外，岩石在受到骤热急冷作用时，会在其内部产生很大的热冲击应力。在双重应力的联合作用下，引起岩石内部新裂纹的生成与原有裂纹的扩展而导致岩石强度的降低。

三、热机碎岩工艺的应用范围

热机碎岩可以大幅度提高硬质合金或金刚石切削具的碎岩速度，降低碎岩成本，并扩大硬质合金的使用范围，能钻进Ⅶ—Ⅺ级致密岩石以及钢筋混凝土，并可部分代替昂贵的金刚石钻进；可以广泛用于地质钻探、油气井钻探、各种工程孔的硬岩钻进，以及坑道、隧道掘进等领域的碎岩，从而为人们提供一种高效、低能耗的新式碎岩工具。

第二节 热机碎岩钻具及钻头

一、取心式热机钻具

由俄罗斯全俄勘探技术研究所勃拉托夫教授发明的 TM-59 型复合式硬质合金钻头及钻具的结构如图 1-1 所示。

钻具由钻头（切削元件和摩擦元件）支撑环、外管、内管、普通堵头等组成。

内管插接在支撑环上，支撑环下部支撑在钻头切削元件上，冲洗液的压力作用在普通堵头，然后通过内管、支撑环面作用在切削元件上进行碎岩。外管上部通过异径钻头与钻杆相接，下部与钻头体（带摩擦元件）相连，轴压即通过钻杆柱、外管而传至钻头摩擦元件，通过钻具回转摩擦产生高温热力场。普通堵头承受冲洗液的压力，并藉助它与外管之间很小的环状间隙（仅 0.1 mm）来调节水泵的压力和堵头上的压力。由于环状间隙太小，不易调节，而且往往被冲洗液中所携带的砂粒（岩屑）堵死而引起憋泵，所以改用滑阀式堵头（图 1-2）。当水泵压力作用于堵头柱塞，柱塞压缩阀簧逐渐下行（此时作用在滑阀上的水泵压力即为切削具上的切削压力，此压力较易调节），使得滑阀的四个通孔打开，冲洗液由此进入内外管间隙，进而经支撑环的径向孔进入孔底，达到清洗孔底的目的。

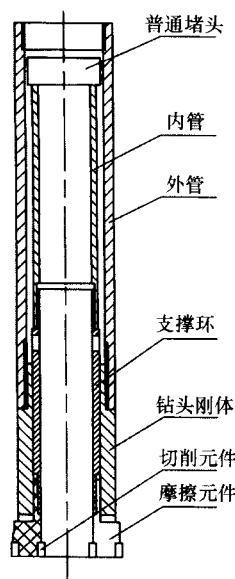


图 1-1 TM-59 型热机钻具结构图

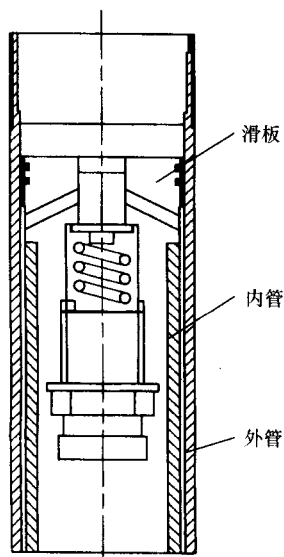


图 1-2 滑阀式堵头

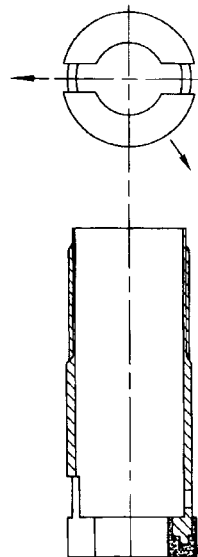


图 1-3 热机钻头及钻头体结构

二、取心式热机钻头

热机钻头由带摩擦元件的钻头体和切削元件两部分组成，前者见图 1-3，类似金刚石钻头，其底唇部分有胎体（即摩擦元件）和安装切削元件的缺口（起水口作用，又称水口）。胎体被缺口分隔成扇形块。

现以 $\phi 59$ mm 为例说明取心式热机钻头的结构参数：

(1) 为增加摩擦面积，胎体壁厚一般为 8 ~ 11 mm；

(2) 考虑到目前所选用的耐摩擦材料的耐磨性（钻进 1 m，磨损 0.2 mm 高度），如钻头寿命为 20 m，胎体耐摩擦层高度一般设计为 4 ~ 5 cm；

(3) 胎体扇形块的长度，即摩擦元件环状长度的大小，直接关系到碎岩效率和切削具的寿命。勃拉托夫教授通过实验，获得了摩擦元件环状长度与摩擦产生温度的关系曲线（图 1-4）。

由图 1-4 可以看出；当摩擦元件环状长度达 80 mm 左右时，其摩擦产生的温度最高，岩石的弱化程度最好，最有利于岩石的破碎。当其长度超过 80 mm 以后，产生的温度反有下降趋势。

考虑到最优摩擦块弧长约 70 mm，对于 $\phi 59$ mm 钻头，水口为 2 个；对于 $\phi 75$ mm 钻头，水口为 3 个。

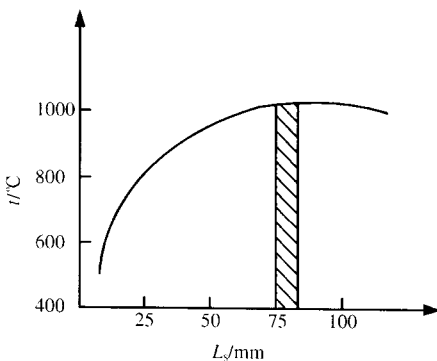


图 1-4 摩擦元件环状长度 L_s /mm 与摩擦产生温度的关系图

(4) 摩擦元件配方：摩擦元件（即钻头胎体）包括：硬质相与浸渍相，硬质相要保证钻头胎体的耐磨性、硬度及耐高温性能。该钻头选用常规的硬质合金，足以抵抗与岩石表面摩擦时所产生的磨损。浸渍相成分主要以过渡元素 Cu、Ni 为主，Cu 在其中起主要作用。由于 Cu 的熔点只有 980 ℃，当孔底的温度超过该温度时，Cu 首先熔化，保护钻头的硬质相免受热损伤。当 Cu 全部熔化完毕，该钻头即报废。所以钻头胎体的成分，应保证与硬质相有足够好的浸润性、粘接性以及良好的耐高温性能。

俄罗斯采用的胎体配方：硬质相为铸造碳化钨（莱立特）；浸渍相为 Cu、Ni、Co、Fe、Ti 合金，胎体硬度为 34°~36°。国内采用 YG8、碳化钨、镍、锰、663 青铜等金属粉末设计了一个配方，即 YG：15%；WC：36%；Ni：5%；Mn：4%；663 青铜：40%。胎体硬度达 HRC38。胎体内外径采用针状合金进行补强；胎体底唇面用硬质合金补强。

(5) 钻头烧结工艺：钻头摩擦元件的制造工艺采用热压法，加热设备为中频炉。

烧结温度高于浸渍相熔点，如采用铜或青铜，一般为 980 ℃；烧结压力一般为 13~15 MPa；烧结时间 10 min 左右。

(6) 切削元件：水口数即为所配切削元件数，一副切削元件的寿命（钻进硬岩）约为 4 m，当切削元件上的硬质合金切削具磨损至不能用时，需要换切削元件。

切削元件长度 12~14 mm，切削元件宽度 8~11 mm，水流通宽 1 mm。切削元件上切削具的选择：软岩采用小方柱状、片状合金；硬岩采用圆柱状、八角柱状、条带状。数量为 2~4 个，分布排列注意切削覆盖系数。切削具的镶焊：采用铜焊，焊接温度不超过 900 ℃，镶焊时注意内外出刃量（0.5~1.0 mm）。

底唇面上切削元件的位置见图 1-5a、切削齿的布置形式见图 1-5b。加工的钻头切削元件如图 1-5c。

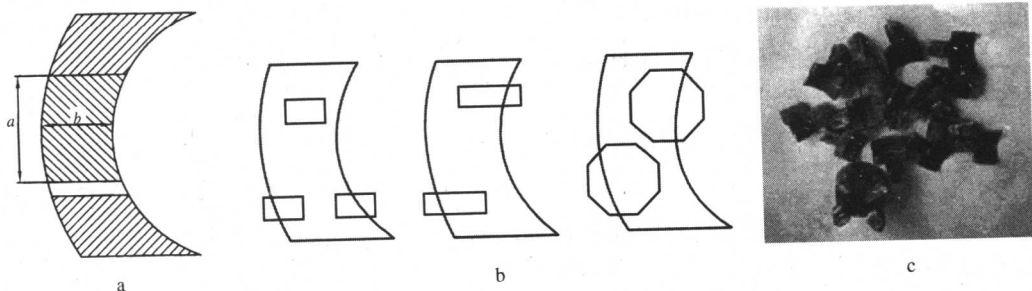


图 1-5 切削元件示意图
a—切削元件的长度；b—宽度

TM-59 热机钻头的技术特性，如表 1-1 所列。

表 1-1 TM-59 热机钻头的技术特性

钻头外径/mm	59	硬质相	硬质合金
摩擦元件外径/mm	59	浸渍相	Cu、Ni、Co、Fe、Ti 合金
切削具组数/个	2	摩擦元件上的压力/kN	15~25
切削具类型	片状	切削元件上的压力/kN	2~3
摩擦元件类型	钻头胎体扇形块	转速 $n/(r \cdot \min^{-1})$	300~500
胎体硬度	HRC38	机械钻速 v (花岗岩) / $(m \cdot h^{-1})$	3

三、全面破碎热机钻具

全面破碎热机钻具的工作原理，与取心式热机钻具基本相同，即摩擦元件与切削元件分别独立加压。摩擦元件通过钻头钢体与钻杆连接，通过钻杆加压；切削元件的压力来自于堵头上建立起来的泵压。全面破碎热机钻具，设有内管，切削元件是通过阀堵头的上下端固定的。在钻进过程中，冲洗液经水龙头、钻杆进入热机钻具上接头，然后冲开阀堵头的球阀沿阀的中心通道直到孔底。全面破碎热机钻具的结构如图 1-6 所示。

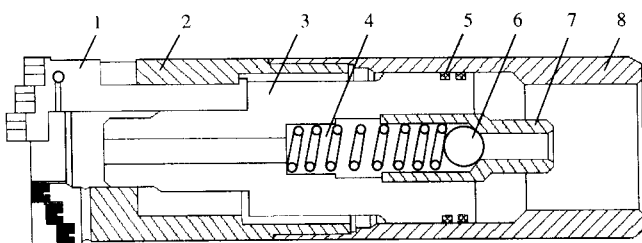


图 1-6 TM-全面破碎热机钻具结构示意图

1—切削元件；2—钻头体；3—阀体；4—阀簧；5—密封圈；
6—球阀；7—阀帽；8—上接头

第三节 高温下岩石的强度特性

一、经过大量的实验研究后发现

大部分岩石在高温下强度降低，并具有急剧冷却效应（即岩石加热到很高温后，将其迅速放入常温水中冷却，而后干燥测其强度，发现其强度下降很明显）。

七种岩石高温抗压强度的实验数据如表 1-2 所列。由表可知：

- (1) 花岗岩、石灰岩类结晶质岩石随加热温度的提高，其抗压强度下降，且 600℃ 以后下降较快；
- (2) 砂岩类非结晶类岩石，随加热温度的升高，其抗压强度变化不大；
- (3) 凝灰岩类岩石随温度的升高，其抗压强度升高；

表 1-2 岩石单轴抗压强度实验记录

岩石名称	单轴抗压强度									
	常温	200℃		400℃		600℃		800℃		1000℃
		自冷	水冷	自冷	水冷	自冷	水冷	自冷	水冷	
凝灰岩	75.36	84.30	75.76	92.69	73.88	107.54	85.67	64.64	52.01	
石灰岩	73.26	63.54	61.98	53.20	46.39	38.74	24.15	23.46	15.04	
砂岩	102.74	97.02		98.92		97.25		88.44		89.88
含钾斜长花岗岩	112.44	101.51	94.29	89.40	71.02	65.57	52.61	64.78	13.90 [#]	
二长花岗岩	125.37	110.74	88.05	110.86	68.97	82.65	38.97 [#]	76.87	46.99 [#]	
花岗闪长岩	131.28	117.01	74.87	92.91	75.72	61.88	37.17 [#]	62.36	※※	
花岗闪长岩	152.34	149.22	87.14	134.15	79.08	88.99	41.79	69.08	20.02	
备 注	1. 自冷表示经加热的岩样，在空气中自然冷却；水冷表示加热后岩样置于常温水中冷却； 2. [#] 表示岩样经加热后有明显的裂纹或裂隙； 3. ※※表示岩样经加热后完全破碎，无法测试其抗压强度									

(4) 各类岩石加热后都具有急剧冷却效应，即加热后岩石置于空气中自然冷却后所测得的强度值，较置于常温水中急剧冷却后测得的强度值要大，而且各类岩石急剧冷却后，其强度都呈现出下降趋势。

二、岩石受高温后其单轴抗压强度下降的原因

花岗岩中的石英在低温情况下一般为石英，当将花岗岩加热到 573 ℃ 时， α -石英转变为 β -石英，体积质量由 2.65 下降到 2.53，体积增加 1%。当温度增加到 870 ℃ 时， β -石英转变为 β -磷石英，体积质量降为 2.22，体积增加 6%。这是花岗岩温度在 573 ℃ 和 870 ℃ 时强度急剧下降的主要原因。

石灰石在达到 800 ℃ 后，放在空气中自然冷却，完全被粉碎，其原因是石灰石的主要成分碳酸钙 (CaCO_3) 超过 800 ℃ 时产生分解，而生成氧化钙 CaO ，而 CaO 遇水后变为一种强度极低的粉状物质 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 之故。

安山岩、凝灰岩等岩石的抗压强度随温度升高而增加，砂岩的抗压强度随温度的升高变化不大，究其原因可能与烧结作用有关。由于这类岩石内部含有较多的粘土质物质和胶结物，烧结后这些物质的粒子结合变得更加紧密，强度增加，且由于脱水作用使岩石粒子不容易滑动。此外，这类物质孔隙率较大，随着温度的升高，组成岩石的矿物产生热膨胀，使孔隙减少，岩石变得更加紧密，这也就有可能使强度增加。

由此可得出结论：岩石受热后强度下降的原因主要是由于高温作用而造成岩石组成矿物的不均匀膨胀；或成分的化学分解；或气体、水的膨胀；或者矿物的相变，由此引发热应力；急剧冷却效应是由于岩石受到骤冷、骤热作用而引发的热冲击应力的作用。这两种应力作用引起新裂隙的生成，与原有裂隙的扩展，由此共同导致岩石强度的降低。这就是热能有利于岩石破碎的基本机理。

第四节 岩石内部温度场的测定

岩石是热的不良导体，其导热性能差，导热系数小。因此，在热机碎岩过程中，摩擦热能只对切削具与岩石接触面以下很小一薄层（仅 4 mm 深度）内的强度有影响。通过实验，得出如图 1-7 所示的规律：

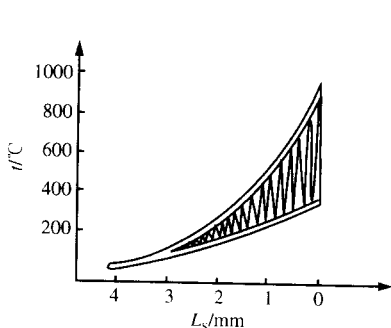


图 1-7 摩擦热能对岩石强度的影响（深度范围）示意图

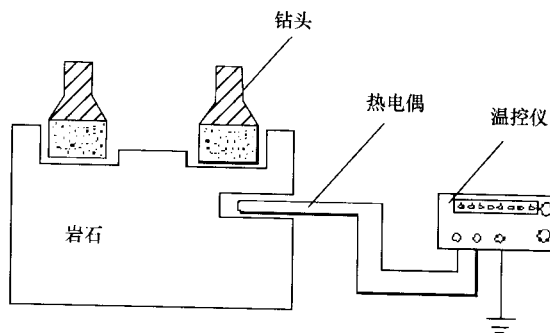


图 1-8 测试岩石表面及内部温度的装置示意图

从图 1-7 可以看出, 钻头与岩石接触面上的温度可达 1000 ℃; 而远离接触面 4 mm 深处的温度就接近室温。

岩石表面及内部温度的测试装置见图 1-8 所示。测试时采用了 $\phi 3$ 镍铬-镍硅铠装热电偶、TDW-2001 型温控仪和 EU 型补偿导线。

第五节 热机碎岩工艺钻进实验

1. 实验设备

钻机: XY-4 型; 泥浆泵: SNB-90 型钻具: TM-59 热机钻具, 硬质合金切削齿。

2. 实验数据

实验数据见表 1-3。

表 1-3 实验数据

岩样	轴压/kg	转速/($r \cdot \min^{-1}$)	泵量/($L \cdot \min^{-1}$)	进尺/mm	机械钻速/($m \cdot h^{-1}$)
花岗岩 (Ⅶ级)	1200	308	43	20	0.46
	1500	308	28	20	0.95
	1500	308	43	40	0.83
	2000	308	28	30	1.74
	2000	308	43	70	1.44
	2000	585	43	30	1.89
	2000	585	28	20	2.68
灰 岩 (Ⅵ级)	1000	308	28	30	0.92
	1000	585	28	30	1.46
	1500	308	28	30	1.68
	1500	585	28	30	2.43
	1800	308	28	43	2.20
	2000	308	28	60	2.49
	2000	585	28	30	2.58
钢筋混凝土	1500	308	28	25	1.54
	1500	308	43	40	1.38
	1500	585	28	40	2.66
	1800	308	28	30	2.76
	1800	308	43	30	2.54
	1800	585	28	30	3.04
	2000	308	28	60	3.03
	2000	308	43	60	2.93
	2000	585	28	60	3.84

3. TM-59 型热机钻头的实验结论

- (1) 随着钻压的增加, 热机碎岩钻进的机械钻速呈增大趋势, 2000 kg 为最优;
- (2) 随着转速的增加, 机械钻速也成增大趋势, 以 650 r/min 为宜。

第六节 结论与展望

1. 结论

- (1) 热机碎岩工艺先进, 提高钻进效率 (高出普通硬质合金钻进一倍; 与金刚石钻进

相等);降低了钻进成本(热机钻头成本为金刚石钻头的一半)提高了能量利用率;

(2) 用于热机碎岩的复合式钻具设计精巧,结构简单;

(3) 滑阀式堵头调节钻头切削压力比较方便、灵活;

(4) 热机碎岩工艺设备简单,操作较为方便,利用热机碎岩钻具,再借助原有的机械回转钻进设备,就可以实现热机碎岩工艺。此外,热机碎岩工艺需要高轴压、高转速和满足切削具压力及排屑要求的较小泵量与之相配套,因而操作时便于掌握;

(5) 热机钻进的热规程是靠调整轴压 P 、转速 n 和耗水量 Q 实现的;为了使岩心保持组合状态,在摩擦元件上的压力不能超过 14 MPa;转速与水量具较小的调节范围,当线速度小于 1.0 m/s 时热效应不够,而当 1.6 m/s 时,岩石就进入熔融状态,所以线速度在 1.0~1.4 m/s 范围内调整;水量一般控制在 0.5~0.9 L/min·cm² 孔底面积(比水耗量)。最低的比水耗量为 0.35 L/min·cm²,若再降低将恶化排屑,热规程就不能控制;

(6) 热机碎岩工艺对岩石的适应性强。例如,采用硬质合金热机碎岩工艺,可合理地应用于 3 级到 11 级岩石的破碎,这极大地拓宽了硬质合金的应用范围。此外,热机碎岩工艺特别适合于钻进混凝土质的结构物,而且钻进效率比较高,钻进成本也大大降低,可部分替代金刚石钻进硬岩。

2. 完善热机碎岩工艺的措施

(1) 继续寻找热机钻头摩擦元件的配方,比较引人注目的是“西阿朗”(Si-Al-O-N)和 Si₃N₄、AlN、Y₂O₃、SiC、BN 等化合物;

(2) 继续完善钻头结构(钻头结构参数);

(3) 继续完善钻具结构——使钻具带有防岩心脱落装置和防岩心堵塞装置;要设计一种新型钻头结构,以实现不提钻换切削元件等;

(4) 继续探索不同岩石热机碎岩工艺的最优钻进规程;

(5) 继续完善和研究热机碎岩理论、热能传递规律,建立热机碎岩工艺的数学模型。

参 考 文 献

[1] 沈显杰等. 岩石热物理性质及测试. 北京: 北京科学出版社, 1988

[2] W·C·毛勒, 吴光琳译. 新式钻岩技术. 北京: 地质出版社, 1986

第二章 热熔钻进新工艺

热熔钻进是一种新式钻进方法。美国的加利福尼亚大学 LASA 实验室在 20 世纪 60、70 年代就已开始研究热熔钻进工艺。其后,在日本、俄罗斯等国家也投入了研究,特别是俄罗斯,目前其热熔钻研究水平处于世界领先地位。我国在热熔钻领域才刚刚起步,几乎属于空白。但由于热熔钻特有的优点和广泛的应用前景,目前正加大研究力度。

第一节 热熔钻进原理、优越性及其应用领域

1. 热熔钻进原理

热熔钻进的实质是通过电加热器产生的高温(大于 1300°C),使井底岩土处于熔融状态,经过挤密或取心,使钻孔延伸。

产生高温的钻具为接触式加热器如图 2-1 所示。电极 1 与外壳 3 形成一个回路;当通电后,石墨元件 6 便发红产生高温,高温热能集中于孔底使孔底岩土熔融成热熔体;热熔体从孔底挤出,经成孔环 5 刮平修正,冷却后便在孔壁形成致密高强度的玻璃层。加热器的中心通入的氦气是防止石墨元件氧化。绝缘体 4 是起隔热、隔电作用。

目前经过实验和分析认为:在第四纪松散地层钻进时,加热器熔融岩石的机理可作如下阐述:

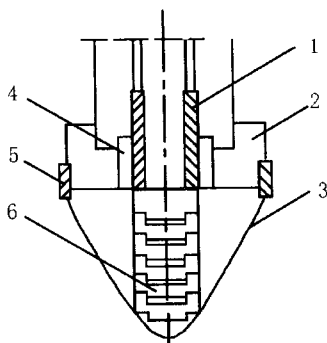


图 2-1 接触式加热器示意图

1—电极; 2—锁紧螺母; 3—外壳; 4—绝缘体; 5—成孔环; 6—石墨元件

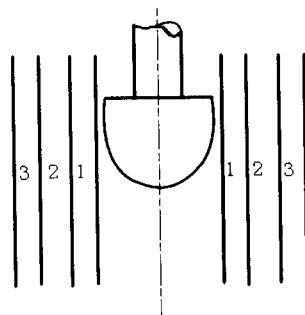


图 2-2 加热器熔融岩石的机理

1—液相层; 2—硬化层; 3—软化层

如图 2-2 所示,加热器在钻进过程中,孔壁由于温度的不同可分为三层:①液相层——在温度高于 1200°C 时,岩石中某些成分被熔化成液相,熔化后密度降低。液相层在冷却凝固后就变成一层坚硬致密的外壳;②硬化层——硬化层温度较高,岩石经过焙烧作用,吸附水被烧掉,在 750°C 左右时,碳酸盐岩发生分解, CO_2 气体逸出。 950°C 时,粉砂岩全部分解,岩石强度降低;③软化层——热量在传递到软化层后,产生的温度已不是很高,地层里的水分发生汽化蒸发,有机物在 $100\sim 150^{\circ}\text{C}$ 时被烧掉。

2. 热熔钻进优越性

热熔钻进方法是区别于一般的机械能碎岩钻进方法，因而也就具有其特殊的优点：①可利用承重电缆或软管电缆实现无钻杆钻进，从而节省了庞大的钻进设备；孔底能量传递效率大大提高，减少了材料消耗，简化了钻进工艺，提高了成孔速度，降低了劳动强度；②在松软、弱胶结和不稳定地层钻进时，依靠形成高强的不透水玻璃状硬外壳，可代替套管加固孔壁，简化了钻孔结构，大幅度降低套管及堵漏材料的消耗。

3. 热熔钻应用领域

热熔钻由于其独特的碎岩方法和所具有的优点，可适用于多种地层：

- (1) 用于开采孔和勘探孔钻进。简化了钻孔结构，可不用套管和止水材料。
- (2) 水井钻进。热熔钻进行水井钻进时，会自然形成井壁管，在钻进含水层时，钻具外部形成一个蒸汽层为绝热层，此蒸汽层可防止地层中水进入孔内。成井时，可对含水层井壁加热使之熔化，或由其他方法穿透含水层，这已有可行的技术实施。
- (3) 钻进冻土层，冰层等。
- (4) 用于工程施工钻进。利用热熔法进行边坡、基础的加固和桩基施工时，无噪音，无震动，并可利用挤密作用提高地基土的承载力；铺设管道可节约大量材料。
- (5) 用于深井破碎漏失层的加固和止水，可大幅度节约套管。

在浅水井钻进和浅工程施工钻领域，热熔钻也有所突破，前景也是被看好的。

第二节 热熔器的结构设计、材料及制造工艺

一、热熔器的结构和设计

热熔器的结构研究应包括两部分内容：一是热熔器的外形轮廓和尺寸、电极和绝缘部分结构；二是热熔器各部件所用的材料。

自从 20 世纪 60 年代，美国 Los Alamos 开始从事热熔钻具研究以来，一直关注着热熔器的结构及其材料两大问题；由于材料学科的迅速发展，就有可能研制出更合理、更经济的热熔器。

热熔器的设计原则可归纳总结如下：

- (1) 热熔器壳体为耐高温材料，高温的具体数值取决于热熔器工作对象（岩石、土体、冰层）的熔点，如岩石为 1600~1700℃；土体 1300℃；冰层 100℃左右，即热熔器壳体材料在此温度下应能保持正常的性能；
- (2) 要求热熔器具有良好的导热性能，即热熔器壳体应能迅速将壳体内部的热量传到外面的岩土中去；
- (3) 外壳材料应能够在高温下不与熔融的介质（土中的各种成分）产生化学反应，高温下不易氧化；
- (4) 外壳应与上面的钻杆部分有隔热部件，减少热量往钻杆上部传递，提高热功的利用率；
- (5) 热熔器应有流线型的外形，能够保证形成平整、光滑的孔壁，在热熔器结构上应有扩孔器，以保证热熔器升降通畅；