

# 土体气压劈裂原理 与工程应用

章定文 刘松玉 韩文君 著 ●



科学出版社

# 土体气压劈裂原理与工程应用

章定文 刘松玉 韩文君 著

科学出版社

北京

TU431/03

## 内 容 简 介

本书论述土体中气压劈裂的基本原理及其在特殊地基处理中的应用,是对土体中气压劈裂进行系统总结和介绍的工程专业书籍。主要内容包括:土体中气压劈裂的劈裂机理、劈裂判别准则、裂隙扩展模型;排水粉喷桩复合地基加固软基的加固机理、现场工程实测研究、沉降与固结计算模型、实用设计方法;劈裂真空法加固软基的加固原理、现场试验研究、固结理论与设计计算方法。

本书可供从事岩土工程及其相关专业的科技人员、高等院校师生参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

土体气压劈裂原理与工程应用/章定文,刘松玉,韩文君著. —北京:科学出版社, 2014. 12

ISBN 978-7-03-042859-2

I. ①土… II. ①章…②刘…③韩… III. ①土体承载力-研究  
IV. ①TU431

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 304353 号

责任编辑:惠 雪 程心珂 杨 琪/责任校对:胡小洁

责任印制:李 利/封面设计:许 瑞

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>

文林印务有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

2014 年 12 月第 一 版 开本: 720×1000 1/16

2014 年 12 月第一次印刷 印张: 17 1/2

字数: 346 000

定价: 89.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

## 前言

气压劈裂、水力劈裂和爆破劈裂是岩土工程界常见的三种劈裂现象。国内外学者与工程技术人员对水力劈裂进行了深入系统的研究,已经形成了较为成熟的水力劈裂理论,并将其成功应用于岩土工程的大坝设计、石油开采、地应力测试、地下污染物运移、地下干热岩体热能开发和环境修复工程等方面。国内外学者也已经开始注意到工程实践中的气压劈裂现象,但对气压劈裂尚缺乏深入系统的研究,未形成相应的理论,对其工程应用的研究几乎为空白。

在国家自然科学基金委员会、江苏省交通科技基金和中央高校基本科研业务费专项资金等的资助下,课题组对气压劈裂的机理、气压劈裂裂隙的扩展模型以及气压劈裂对土体的力学效应等方面的基础理论进行长期深入系统的研究。基于气压劈裂原理,自主研发了粉喷桩联合排水板加固地基新技术、气压劈裂联合真空预压法加固地基新技术,在工程实践中证实了新技术的先进性,并推广应用,达到了经济高效加固深厚软土地基之目的。本书是在两篇博士学位论文研究的基础上,结合工程实践成果总结撰写而成。

本书共分三篇:第一篇为理论篇——土体气压劈裂理论,包括第一章至第三章。第一章主要介绍本书的研究背景,总结土体中气压劈裂的研究进展;第二章论述土体中气压劈裂的劈裂机理及其影响因素、劈裂判别准则,并采用室内模型试验验证了气压劈裂原理;第三章叙述气压劈裂裂隙扩展模型,明确了该模型关键参数对裂隙扩展特性的影响规律。第二篇为应用篇Ⅰ,介绍了排水粉喷桩复合地基新技术,包括第四章和第五章。第四章介绍了基于气压劈裂原理的排水粉喷桩复合地基新技术加固软土地基的加固机理,依托两个现场试验工程论证排水粉喷桩复合地基的技术先进性;第五章介绍路堤荷载下排水粉喷桩复合地基沉降与固结计算模型、实用设计方法。第三篇为应用篇Ⅱ,介绍了劈裂真空法加固软基新技术,包括第六章和第七章。第六章介绍劈裂真空法加固软基的加固原理,通过现场试验论证劈裂真空法的技术先进性;第七章研究了劈裂真空法加固软土地基的固结理论、简化计算方法与设计计算方法。

在开展土体气压劈裂原理与工程应用的研究过程中,得到了国家自然科学基金项目(编号:50808046,51078083)、江苏省交通科技基金项目(编号:08Y33,2012T05)、中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(编号:2242014R30020)、江苏省“青蓝工程”优秀青年骨干教师培养对象项目等资助。参考并引用了多位业内学者的研究成果,在此深表谢意。同时现场试验中还得到

了东南大学杜广印博士、江苏盐城二建集团有限公司软基分公司杨泳高工、山东科技大学吴燕开博士等的大力支持和帮助，在此一并表示感谢。

本书有幸出版，还得到了江苏省优势学科建设和东南大学出版基金资助，还要感谢东南大学交通学院青年教师发展委员会给予青年教师专著出版的支持与帮助。

限于著者水平，有些问题研究尚浅，本书中存在一些疏漏在所难免，诚恳希望读者不吝赐教，以便著者及时更正和继续研究。

章定文 刘松玉 韩文君

2014年10月

# 目 录

## 第一篇 土体气压劈裂理论

|                          |    |
|--------------------------|----|
| 第一章 绪论                   | 3  |
| 1.1 气压劈裂技术简介             | 3  |
| 1.2 气压劈裂与水力劈裂的比较         | 10 |
| 参考文献                     | 12 |
| 第二章 土体气压劈裂机理与劈裂压力        | 13 |
| 2.1 土体气压劈裂机理理论分析         | 13 |
| 2.2 土体气压劈裂的室内模型试验        | 22 |
| 参考文献                     | 41 |
| 第三章 土体气压劈裂裂隙扩展特性及其理论模型   | 43 |
| 3.1 压力控制圆孔扩张理论模拟气压劈裂初始阶段 | 43 |
| 3.2 土体中气压劈裂裂隙扩展理论分析模型    | 54 |
| 参考文献                     | 66 |

## 第二篇 排水粉喷桩复合地基新技术

|                              |     |
|------------------------------|-----|
| 第四章 排水粉喷桩复合地基技术与现场试验         | 71  |
| 4.1 排水粉喷桩复合地基技术              | 71  |
| 4.2 排水粉喷桩复合地基加固软基现场试验 1      | 77  |
| 4.3 排水粉喷桩复合地基加固软基现场试验 2      | 93  |
| 参考文献                         | 101 |
| 第五章 排水粉喷桩复合地基变形特性与设计方法       | 103 |
| 5.1 基于桩土非等应变的排水粉喷桩复合地基沉降计算方法 | 103 |
| 5.2 路堤荷载下排水粉喷桩复合地基固结机理与计算方法  | 116 |
| 5.3 排水粉喷桩复合地基设计方法            | 131 |
| 参考文献                         | 142 |

## 第三篇 劈裂真空法加固软基新技术

|                       |     |
|-----------------------|-----|
| 第六章 劈裂真空法加固技术原理与试验研究  | 149 |
| 6.1 劈裂真空法加固软土室内模型试验研究 | 149 |

|                                     |            |
|-------------------------------------|------------|
| 6.2 劈裂真空法加固软土地基现场试验研究 .....         | 200        |
| 6.3 劈裂真空法加固软基的加固机理 .....            | 218        |
| 6.4 劈裂真空法加固软基施工工艺 .....             | 221        |
| 参考文献 .....                          | 221        |
| <b>第七章 劈裂真空法加固软基固结理论与设计方法 .....</b> | <b>223</b> |
| 7.1 考虑裂隙作用的劈裂真空法固结模型 .....          | 223        |
| 7.2 劈裂真空法加固软基固结度简化计算方法 .....        | 254        |
| 7.3 基于变形控制的劈裂真空法设计方法 .....          | 260        |
| 参考文献 .....                          | 271        |

# 第一篇 土体气压劈裂理论



# 第一章 绪 论

## 1.1 气压劈裂技术简介

气压劈裂是由美国 NJIT (New Jersey Institute of Technology) 的 HSMRC (Hazardous Substance Management Research Center) 于 1988 年提出, 其目的是通过向岩土体中注入高压气体形成裂隙, 增加流体的流动通道, 提高低渗透性土体的渗透系数, 进而联合其他的污染物处置方法 (如蒸汽浸提法、生物修复法、热处理法等), 以提高污染物的清除效率<sup>[1]</sup>。目前气压劈裂的应用范围主要集中在环境岩土工程方面, 其他方面的应用研究甚少。气压劈裂技术自 1988 年提出以后, 在室内试验、现场试验、理论模型及数值模拟等方面都得到一定研究。

### 1.1.1 气压劈裂的试验研究

#### 1. 气压劈裂的压力-时间曲线分析<sup>[2]</sup>

典型的气压劈裂压力-时间曲线如图 1-1 所示, 气压劈裂和水力劈裂的压力-时间曲线相似, 可以分为如下阶段: 开始劈裂、裂隙扩展、裂隙维持、残余裂隙和重新劈裂。

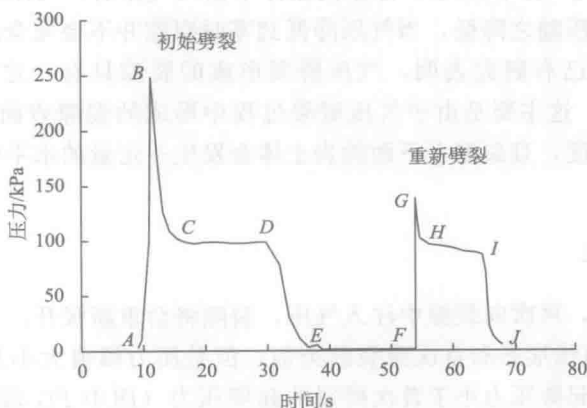


图 1-1 气压劈裂的压力-时间曲线 (图片来源: 文献 [2])

### 1) 开始劈裂

如图 1-1 中曲线 AB 阶段所示, 由于土体的低渗透性, 气体压力快速增加, 其持续时间一般为  $2\sim 3\text{s}$ , 当其压力值超过土体的起劈压力就在土体内形成裂隙。岩土体的起劈压力与劈裂点的应力状态及土体的抗拉强度有关, 土体的起劈压力值一般为  $150\sim 350\text{kPa}$ , 岩体的起劈压力值一般为  $650\sim 1100\text{kPa}$ , 岩体的高张拉强度是岩体起劈压力高于土体起劈压力的主要原因。

### 2) 裂隙扩展

如图 1-1 中曲线 BC 阶段所示, 土体开始劈裂以后, 裂隙迅速扩展, 压力也随之迅速衰减, 当注入的气体体积等于气体向土中的渗漏量且气体压力等于土体的起劈压力时, 裂隙停止扩展, 裂隙的扩展时间较短, 一般仅有  $3\sim 6\text{s}$ 。

### 3) 裂隙维持

如图 1-1 中的 CD 段所示, 裂隙停止扩展以后一段时间内, 注入的气体体积等于气体向土中的渗漏量且气体压力等于土体起劈压力, 此时裂隙处于维持阶段。裂隙上覆土体悬覆于气体之上, 尽管裂隙并不继续扩展, 但是维持一段时间是有益的; 在裂隙的维持阶段, 注入的气体可以清除裂隙内的残余物质, 从而有效地增加裂隙宽度, 显著地提高裂隙内流体的运移速率 (流体的流速与裂隙宽度的立方成比例)。

### 4) 残余裂隙

如图 1-1 中的 DE 段所示, 停止向土体中注入气体后, 气体继续向周围土体中渗漏, 因此气压随之降低, 当气压降低到零时裂隙并不会完全闭合, 仍存在一定的残余裂隙。已有研究表明, 气压劈裂形成的裂隙具有一定的“自支撑型”(self-propping), 这主要是由于气压劈裂过程中形成的裂隙表面并非完全光滑, 具有一定的粗糙度, 且裂隙上下面的岩土体会发生一定量的水平位移, 因此裂隙不能完全闭合。

### 5) 重新劈裂

裂隙闭合后, 再次向裂隙中注入气压, 裂隙将会重新张开。裂隙重新劈裂过程的压力-时间曲线形态和首次劈裂的类似, 但是压力幅值大小具有以下几点特征: 重新劈裂的起劈压力小于首次劈裂的起劈压力 (图中 FG 段); 重新劈裂的维持压力小于重新劈裂的起劈压力; 随着重新劈裂次数的增加, 维持压力也随之降低。

首次劈裂和重新劈裂的起劈压力差异主要是由于土体的张拉强度（初始黏聚力）影响的缘故，土体首次劈裂以后，其张拉强度（黏聚力）随之降低，后续的劈裂过程中，需要克服的残余张拉强度（黏聚力）也随之降低，因此起劈压力也随劈裂次数的增加而降低。

重新劈裂的维持压力小于重新劈裂的起劈压力的可能原因是土体劈裂后，其残余张拉强度（黏聚力）不能完全消失，另外，气体的可压缩性及土体的惯性（劈裂过程很快）也可能是重新劈裂的维持压力大于重新劈裂的起劈压力的缘故。

随着重新劈裂次数的增加，维持压力也随之降低的可能原因是重复的劈裂过程会进一步弱化和扰动土体，重新劈裂也可以清除裂隙内的松散沉积物质。在后续重新劈裂过程中监测的土体上抬量逐渐减少现象可以在一定程度上验证这一点。

## 2. 气压劈裂裂隙扩展方向

土体的应力历史、应力状态及土层成层性均会影响裂隙的扩展方向。现有的研究成果对裂隙扩展方向的认识是一致的，裂隙的扩展方向垂直于最小主应力方向（图 1-2），当最小主应力为水平向时，裂隙为竖向裂隙；当最小主应力为竖向时，裂隙为水平裂隙<sup>[2]</sup>。

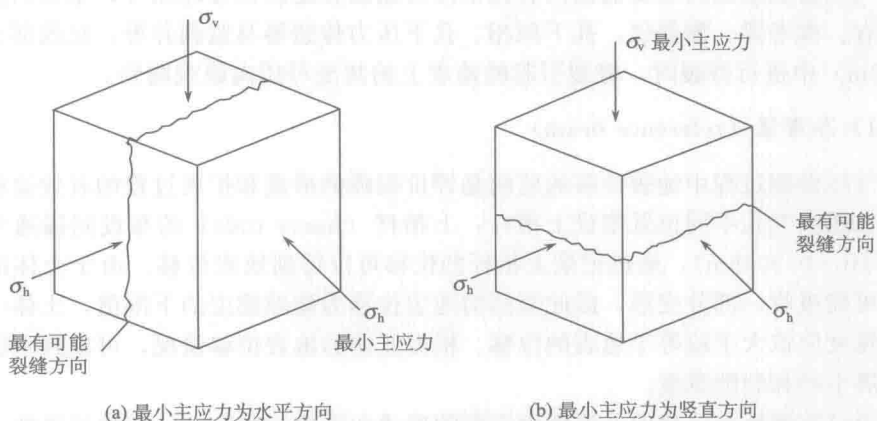


图 1-2 土体的应力状态对裂隙扩展方向的影响（图片来源：文献 [2]）

气压劈裂前后土层的渗透试验结果对比可以在一定程度上反映气压劈裂裂隙扩展方向。试验结果见表 1-1<sup>[2]</sup>，由表 1-1 可见，劈裂后，在气压劈裂段土层的渗透系数增加显著，在气压劈裂段上面的土层的渗透系数也有一定程度的增加，但是在气压劈裂段下面的土层的渗透系数增加程度可以很小，这表明气压劈裂的裂隙在劈裂段深度主要为水平状，但是也会发生一定的向上倾斜，因此增大了劈裂段深度以上土层的渗透系数。

表 1-1 不同深度段监测的气压劈裂对渗透系数的影响

| 劈裂深度    |     | 20ft 水柱真空压力下的空气流速 (acfm) |        |         |         |         |
|---------|-----|--------------------------|--------|---------|---------|---------|
|         |     | 7~9ft                    | 9~11ft | 11~13ft | 13~15ft | 15~17ft |
| 9~11ft  | 劈裂前 | 0.45                     | 2.1    | 4.4     | 4.6     | —       |
|         | 劈裂后 | 2.6                      | 10.5+  | 5.0     | 5.0     | —       |
| 15~17ft | 劈裂前 | 2.75                     | 11.0+  | 7.3     | 5.3     | 0.5     |
|         | 劈裂后 | 2.5                      | 11.0+  | 10.5    | 9.5+    | 7.25    |

注: 1ft=0.3048m

大多数情况下, 现场浅层土为超固结土, 最小主应力为竖向方向, 因此浅层的气压劈裂多产生水平的裂状裂隙, 随着深度的增加, 发生竖向裂隙的可能性也随之增加, 在预劈裂深度处开槽的方法可以在范围内形成水平裂隙。土体现场的应力状态是控制裂隙传播方向的最主要因素, 因此可以通过改变现场应力场的方法在一定程度上控制裂隙的扩展方向, 例如, Suthersan<sup>[3]</sup>报道了采用人为施加的地表荷载 (如车辆等) 成功地控制裂隙传播方向的实例。

### 3. 气压劈裂的监测方法<sup>[2]</sup>

气压劈裂过程的主要监测内容包括压力监测和地表位移监测等, 主要的监测方法有: 参考梁、测斜仪、孔下照相、孔下压力传感器及监测井等。在浅部土层 (< 3m) 中进行劈裂时, 劈裂引起的地表上抬甚至可用肉眼观测到。

#### 1) 参考梁 (reference beam)

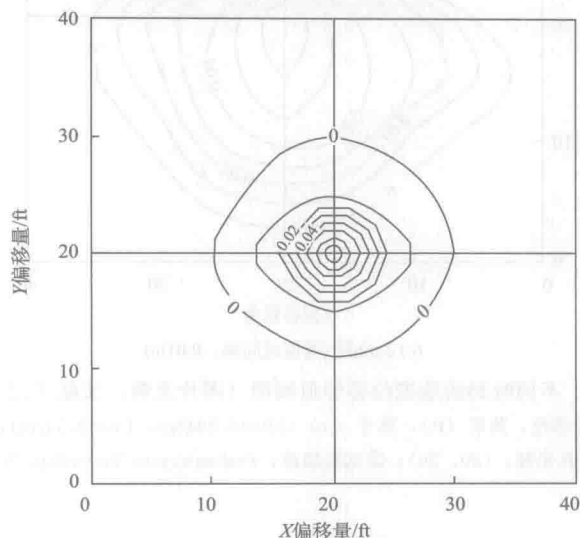
气压劈裂过程中地表位移的监测是评价裂隙的形成和扩展过程的有效途径之一。在距喷气孔不同位置架设上抬杆, 上抬杆 (heave rods) 的布设间隔通常为 1ft (1ft=0.3048m), 通过记录上抬杆的位移可以得到地表位移。由于土体的压缩性可能吸收一部分变形, 因此监测的地表位移为裂隙宽度的下限值, 土体中裂隙的宽度应该大于或等于地表的位移。根据监测的地表位移情况, 可以判断裂隙的扩展半径和裂隙宽度。

通过监测地表位移的方法评价裂隙的形成和扩展过程存在一定的局限性, 这是因为气压劈裂点埋深增加时, 监测到的地表位移随之减少, 裂隙引起的上抬被土体的弹性应变吸收, 因此监测的地表上抬量不能完全反映裂隙宽度; 另外, 参考梁法记录的地表上抬量仅为其最大值, 不能记录裂隙的扩展历时过程, 因此不能完全反映评价裂隙的扩展过程。因此, 在其后的工程实践中发展了可以完全记录裂隙扩展历时过程的地表倾斜度测量仪。

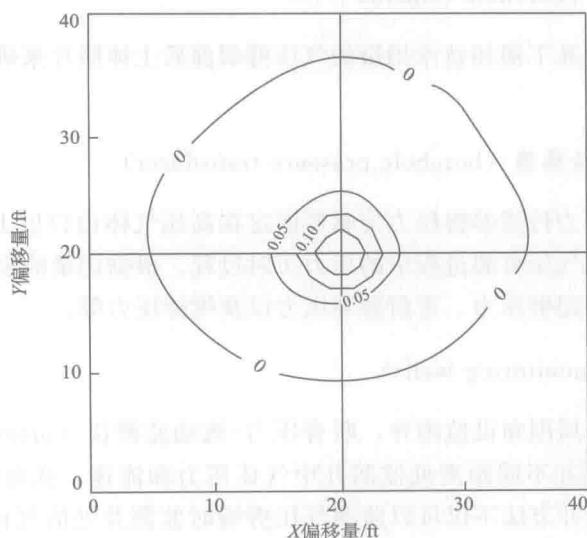
#### 2) 地表倾斜度测量仪 (tiltmeters)

地表倾斜度测量仪 (测斜仪) 可以监测裂隙引起的地表上抬历时发展过程,

因而可以监测裂隙的动态扩展过程,通过地表上抬量历时记录,可以得到裂隙的扩展过程及其裂隙半径和最终的残余半径。典型监测方案是在地表过劈裂孔的两条垂线( $X$ 和 $Y$ 方向)上布置多个地表倾斜度测量仪。地表倾斜度测量仪可以监测地表 $X$ 和 $Y$ 两个方向的偏移量历时过程,联合自动数据采集技术,可以监测时间间隔为 $0.5\text{s}$ 的地表变形过程。图1-3中显示了某现场气压劈裂试验开始注入高压空气 $2\text{s}$ 、 $16\text{s}$ 和 $2\text{min}$ 时的地表上抬量<sup>[1]</sup>。



(a) 2s时(等值线间距: 0.01in)



(b) 16s时(等值线间距: 0.05in)

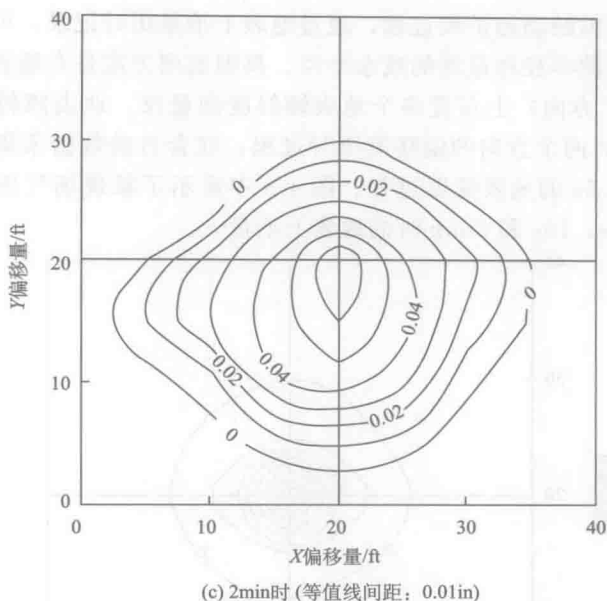


图 1-3 不同时刻的地表位移等值线图 (图片来源: 文献 [1])

注: ①单位: 英尺 (ft), 英寸 (in) (1ft=0.3048m, 1in=2.54cm);

②劈裂孔坐标: (20, 20); ③试验场地: Frelinghuysen Township, NJ

### 3) 孔下照相 (borehole camera)

可以通过对比孔下照相技术拍摄的气压劈裂前后土体照片来研究气压劈裂对土性的影响。

### 4) 孔下压力传感器 (borehole pressure transducer)

典型的孔下压力传感器将压力传感器固定在高压气体出口以上 10cm 处, 压力传感器可以测试气压劈裂过程中的压力历时过程。根据记录的压力历时曲线可以分析气压劈裂的起劈压力、重新劈裂压力以及维持压力等。

### 5) 监测井 (monitoring wells)

在气压劈裂井周围布设监测井, 联合压力-流动监测仪 (pressure-flow indicator) 监测距劈裂井不同距离处监测井中气体压力和流速, 从而得到气压劈裂的影响范围。监测井方法不仅可以监测气压劈裂时监测井处的气体压力和流量, 还可以监测后续的蒸汽浸提过程中监测井处的真空度和气体流速。通过对比气压劈裂前后监测井处的气体压力和流速, 可以判断气压劈裂的影响范围。

### 1.1.2 气压劈裂的力学效应

岩土体对气压劈裂的响应及气压劈裂的作用与岩土体的性质相关。对细粒土而言,气压劈裂形成的裂隙提供了排水或排气通道,缩短排水或排气距离,流体的运移模式从劈裂前的扩散模式转化为劈裂后的扩散+对流模式,从而提高土体的渗透性;对粗粒土而言(如砂和砂砾),其原有的渗透性较高,气压劈裂对其渗透性的提高幅度有限,但是气压劈裂能够改善粗粒土层的通气条件,这对采用生物法等修复污染场地很有益;对于岩体而言,气压劈裂可以进一步扩展原有裂隙或形成新的裂隙,并清理原有裂隙中的填充物,从而提供良好的排水排气通道,提高其渗透性<sup>[1]</sup>。

为了评价气压劈裂法提高细粒土渗透性的可行性,Papanicolaou 和 Shah 进行了气压劈裂的室内模拟试验<sup>[2]</sup>。室内模拟试验对比了有无气压劈裂情况下,蒸汽浸提技术(soil vapor extraction)清除污染物的清除效率差异,试验结果表明,采用气压劈裂后,污染物的清除效率较无劈裂条件下的清除效率提高了170%~360%;Ng 通过室内模拟试验研究了已知尺寸的裂隙内流体的流动特征,试验结果表明,裂隙内流体的流速与裂隙宽度的立方成比例<sup>[2]</sup>;Alfaro 等<sup>[3]</sup>利用改进的固结仪进行了圆柱土样的气压劈裂和水力劈裂试验,试验表明两者的起劈压力并没有本质差异。

令人鼓舞的室内模拟试验成果加速了现场试验的实施,现场试验主要是分析气压劈裂的试验参数(如劈裂注气压力、注气速率和不同的地层条件等)对裂隙特征(如长度、宽度等)及污染物清除效率的影响。一系列的现场试验进一步完善了气压劈裂装置、操作流程及施工参数的优化,并促进气压劈裂技术于1993年4月开始进入商业运作阶段。

现场气压劈裂的示意图见图1-4,首先采用钻机在预定位置钻孔至预定位置,将气压劈裂的主要装置HQ注入器(HQ injection)插入到预定位置,然后向HQ注入器两端的两个封隔器(Packers)中充入氮气形成密封端,这样在两个封隔器之间形成长度约为2ft的气压劈裂试验区域。通常情况下,封隔器中的氮气压力值为预期的注气压力的2倍。

1993年,美国环保署(EPA)对一现场采用气压劈裂法清除污染物的工程进行评价,现场试验结果表明,实施气压劈裂后,土体中的空气流速和污染物运移速率提高了600%。到1993年为止,现场气压劈裂试验的深度为1.0~6.5m,现场试验统计表明,一般土体中的劈裂压力小于690kPa,岩体中的劈裂压力小于1380kPa。

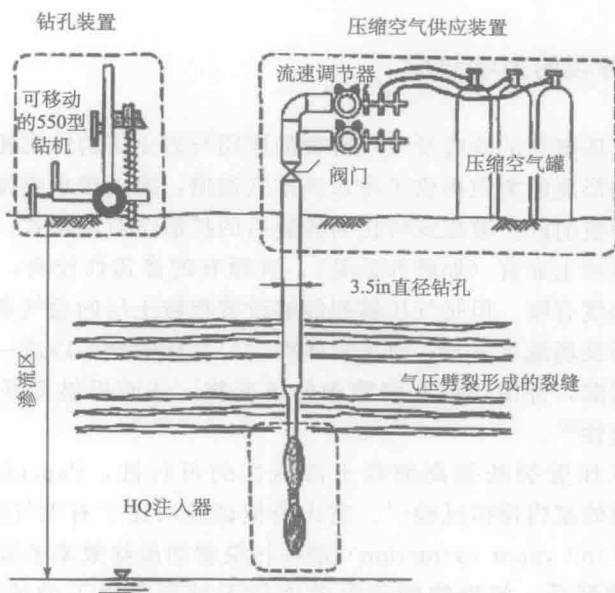


图 1-4 现场气压劈裂试验的示意图 (图片来源: 文献 [2])

### 1.1.3 气压劈裂的理论模型

自气压劈裂的现场试验开展以来, 对气压劈裂的理论模型研究也随之开始。King<sup>[2]</sup>分析了岩体和土体中的气压劈裂机理, 根据压力-时间曲线将气压劈裂过程分为开始劈裂、裂隙扩展、裂隙维持和残余裂隙等几个阶段, 并在现场试验数据统计分析的基础上提出了气压劈裂起劈压力和维持压力的预测公式; Nautiyal<sup>[6]</sup>提出了离散裂隙内可压缩流体的运移模式; Ding<sup>[7]</sup>采用双重介质模型分析了污染物在裂隙土体内的运移模型, 模型中假定裂隙宽度为常数, 裂隙上下面的气体运移速率对称, Ding<sup>[8]</sup>还分析了计算模型中几个关键参数 (如黏滞系数、扩散系数以及裂隙尺寸等) 的确定方法, 最后通过可靠度理论分析了上述参数对气压劈裂提高污染物清除效率的影响程度; 吴燕开<sup>[9]</sup>认为土体的气压劈裂为张拉破坏和剪切破坏共同作用, 并认为当最小主应力增量小于土体的抗剪强度时土体裂隙停止扩展, 据此分析了土体劈裂的影响范围; McGonigal 研究了含裂隙的粗粒土内粒状介质的运移模式; Puppala 在此基础上, 探讨了液体和粒状介质在离散裂隙内的运移模式<sup>[10]</sup>。

## 1.2 气压劈裂与水力劈裂的比较

图 1-5 列出了工程上采用的三种劈裂技术的特点和工程应用范围, 从图中可