

YANGAOCENGZUANJI
LILUNYUSHIJIAN

盐膏层钻井 理论与实践

唐继平 王书琪 陈 勉◎著

石油工业出版社

盐膏层钻井理论与实践

唐继平 王书琪 陈 勉 著

石油工业出版社

内 容 提 要

本书对国内盐膏层钻井理论、工艺技术、钻井液技术及固井技术进行了详细论述,对我国各油田盐膏层钻井技术进行了系统的分析和总结,并列举了盐膏层钻井实例。本书不仅详尽地介绍了盐膏层钻井技术的现状与发展趋势,而且系统地总结了我国各油田的成功经验。

本书可供钻井工程技术人员及有关院校师生学习参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

盐膏层钻井理论与实践/唐继平等著.

北京:石油工业出版社,2004.5

ISBN 7-5021-4613-X

I. 盐…

II. 唐…

III. 油气钻井-技术

IV. TE242

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2004) 第 025038 号

出版发行:石油工业出版社

(北京安定门外安华里 2 区 1 号 100011)

网 址: www.petropub.cn

总 机: (010) 64262233 发行部: (010) 64210392

经 销: 全国新华书店

印 刷: 石油工业出版社印刷厂印刷

2004 年 5 月第 1 版 2004 年 5 月第 1 次印刷

850×1168 毫米 开本: 1/32 印张: 9.75

字数: 260 千字 印数: 1—2000 册

书号: ISBN 7-5021-4613-X/TE·3236

定价: 25.00 元

(如出现印装质量问题,我社发行部负责调换)

版权所有,翻印必究

序

盐膏层是石油天然气钻井过程中经常钻遇的地层，由其引起的井下复杂情况或由它诱发的其他各种井下恶性事故，对钻井、完钻工程危害性极大，一直是国内外石油工程界特别关注的问题。但由于其原因复杂，制约因素多，使之成为国内外钻井、完井工程至今未能完全解决的重大技术难题。

我国陆上石油钻井工业发展几十年来，钻遇了世界上各类可能遇到的盐膏层，经历了可能发生的各种类型的复杂情况，从中积累了丰富的盐膏层钻井经验。特别是 20 世纪 80 年代以来，我国的钻井、泥浆工作者对盐膏层钻井技术开展了大量的研究工作，取得了较大进展。研究了盐膏层井眼变形机理，确定了盐膏层钻井安全钻井液密度的方法，开发了多种类型的钻井液体系和固井水泥浆体系，形成了对付盐膏层的钻井液、钻井工艺与工具、井身结构和固井等多套相关技术，比较好地防止和解决了盐膏层钻井难题，在盐膏层钻井理论和实践上取得了重要的进展。

此书对国内盐膏层钻井技术，从理论到实践进行了系统总结，特别突出了各油田成功的经验和先进的技术，并尽力使之系统化、理论化。书中不仅详尽地介绍了盐膏层钻井技术的现状与发展趋势，而且系统地总结了我国各油田的成功经验。同时，此书资料来源几乎覆盖了我国的主要油田，因此此书所总结的盐膏层钻井技术具有较强的适用性与可操作性。

《盐膏层钻井理论与实践》的出版是我国石油工业界对盐膏

层钻井的第一次系统论述。唐继平、王书琪、陈勉等同志全面地总结了我国盐膏层钻井技术的研究成果，对进一步推动我国盐膏层钻井技术的发展有着重要的意义。读者必将从中吸取许多有益的知识，获得重要的启示。

A handwritten signature in black ink, consisting of two characters: '刘' (Liu) and '星' (Xing), written in a cursive style.

2003年6月

前 言

盐膏层是石油天然气钻井过程中经常钻遇的地层,极易产生井下复杂情况,其危害性极大。我国陆上石油钻井工业发展40多年来,钻井、泥浆研究人员对盐膏层钻井技术开展了大量的研究工作,取得了较大进展。发展了盐膏层井眼变形机理,确定了盐膏层钻井安全钻井液密度的方法,开发了多种类型的钻井液体系、固井水泥浆体系,形成了对付盐膏层的钻井液、钻井工艺与工具、井身结构和固井等多套相关技术。

全书共分六章,第一章系统阐述盐膏层的成因、特征、危害性及钻井技术相关概况;第二章则在系统阐述盐膏岩的理化性能的基础上,描述了相应的实验技术与分析方法;通过蠕变规律的实验研究,建立了盐膏层蠕变的本构关系,探讨了盐膏层蠕变机理;第三章以工程实例为背景,着重讨论了复合盐层与纯盐层的钻井技术;第四章讨论了欠饱和盐水钻井液、饱和盐水钻井液、油基钻井液及抗盐和抗钙钻井液材料;第五章则总结了盐膏层的固井技术;第六章列举了盐膏层钻井实例。

本书在编写与出版过程中,得到了中国石油天然气股份有限公司塔里木油田分公司、塔里木石油勘探开发指挥部、石油大学(北京)、石油大学(华东)、中原油田、新星公司西北石油局等单位的大力支持;刘希圣、樊世忠、张克勤、董杰、刘雨晴等知名专家对本书进行了认真的审阅并提出了宝贵意见;在撰稿过程中,鄢捷年、金衍等参与了部分内容的编写。在此一并表示感谢。

由于本书涉及内容较多,加之作者的水平有限,缺少经验,不妥之处在所难免,恳请专家、同行批评指正。

作者

2003.7.1

目 录

第一章 绪论	(1)
第一节 盐膏层成因、分布及特征	(1)
第二节 盐膏层对钻井工程的危害	(10)
第三节 盐膏层钻井技术概况	(15)
第二章 盐膏层钻井的基本理论	(19)
第一节 盐膏层岩石物理特性及理化性能	(19)
第二节 盐膏岩蠕变的研究现状	(29)
第三节 盐膏层蠕变的本构关系及模型	(35)
第四节 软泥岩的流变特性	(42)
第三章 盐膏层钻井工艺技术	(48)
第一节 盐膏层井眼失稳原因及特征	(48)
第二节 盐膏层合理钻井液密度和体系的确定	(61)
第三节 复合盐层合理井身结构设计	(76)
第四节 盐膏层钻井工艺措施	(86)
第四章 盐膏层钻井液技术	(96)
第一节 欠饱和盐水钻井液技术	(96)
第二节 饱和盐水钻井液技术	(119)
第三节 油基钻井液	(151)
第四节 抗盐、抗钙钻井液材料	(192)
第五章 盐膏层固井技术	(211)
第一节 复合盐层套管设计方法	(211)
第二节 盐膏层固井水泥浆	(220)
第三节 隔离液技术	(225)
第四节 盐膏层固井技术细则	(238)
第六章 盐膏层钻井实例	(240)

第一节 盐膏层钻井工艺技术应用实例	(240)
第二节 盐膏层固井实例	(267)
第三节 盐膏层钻井技术应用实例 (以秋参 1 井为例)	(278)
附录 盐膏层钻井监督工作要点	(294)
参考文献	(299)

第一章 绪 论

第一节 盐膏层成因、分布及特征

盐膏层指的是以盐或石膏为主要成分的地层。中国大陆钻探发现的盐膏层分布范围广泛,塔里木、江汉、四川、胜利、中原、华北、新疆、青海、长庆等油田都曾有钻遇盐膏层时发生卡钻、套管挤毁,甚至油井报废的恶性事故报道。从目前资料统计来看,盐膏层主要分布在第三系、石炭系和寒武系,分属潟湖陆相沉积和滨海相沉积。中原油田东濮凹陷北部的文留、濮城和卫城地区的下第三系沙河街组为潟湖陆相沉积,其整个北部遍及四套复合盐膏层 Es_1 、 Es_3^2 、 Es_3^3 和 Es_3^4 ,埋深 2 000~6 000m,层厚度少则 10m,多则 1 000m,累计厚度 1 000~1 800m,已探明的盐膏层面积达 1 779km²。江汉油田潜江凹陷第三系潜江组也属潟湖陆相沉积,盐层分布面积达 2 000km²,累计厚度 1 800m 以上,埋深 700~5 400m,地质储量 7 900 多亿吨。华北油田荆丘地区第三系 2 750~3 000m 有大段盐膏层。青海油田狮子沟构造上下干柴沟组从 2 400~4 200m 富含盐膏、芒硝。从地层分布看,塔里木油田盐膏层的类型最全,有潟湖陆相沉积的第三系盐膏层,也有滨海相沉积的石炭系和寒武系盐膏层;深度不一,从盆地边缘局部地区出露地表到深至 6 000m 都有分布。因此,本节以塔里木油田为例,说明盐膏层的成因、分布及特征。

一、塔里木盆地第三系复合盐层的成因及特征

塔里木盆地第三系是喜马拉雅期盆地快速沉降沉积下来的一套地层,分布遍及全盆地,埋深一般为 50~300m,局部可达 1 000~3 000m (叶城—和田凹陷),盆地边缘局部地区出露地

表。根据沉积特征，塔里木盆地的第三系下部的沉积环境属于河流—盐湖体系的沉积，可大致划分为：

冲积扇：主要发育于库车坳陷北部背斜带及提尔根地区。沉积物主要为快速堆积的砂砾、砂岩。

湖泊相：可进一步细分为几个亚相。沙泥坪亚相：主要发育于牙哈—东河塘—英买力1号构造带，沉积物以泥质为主，夹少量粉砂、泥质粉砂沉积。盐泥坪亚相：英买力7号构造带较发育，沉积物以泥质为主，有少量盐、盐泥、膏、膏泥的沉积。盐盘亚相：在羊塔克—英买力—南喀一带发育，主要是盐和石膏沉积交互的韵律层。另外，受喜马拉雅期造山运动的影响，使盐层段受到强烈的挤压，大小断层多，构造应力大，盐膏层厚薄和倾角多变，形成水平、倾斜及破碎的盐、膏、泥混杂体。

复合盐层是盐湖沉积的产物，基本物质多数是碎屑颗粒、晶块及化学沉淀的晶体。盐岩和石膏通过化学和机械的作用改变碎屑岩或团块的结构并充填在碎屑或团块之中，形成盐膏泥的混合物。

复合盐层段主要分布在塔里木盆地西部和塔北隆起的库车凹陷，分布范围广，埋藏深，其埋藏深度一般在2440~5570m。根据表1-1统计，复合盐层比较集中的地区主要是南喀—羊塔克—英买力构造带以及山前构造带。从图1-1可知，其下部的盐岩、膏泥及石膏段地层向西南方向（南喀1井）增厚，向东南方向（英买9井）超覆。

对塔里木盆地第三系复合盐层的认识是从库喀1井、东秋4井和南喀1井开始的，以后又相继在9个构造11口井中钻遇这套盐层。塔里木盆地的第三系复合盐层，在不同构造上具有不同的性质，根据岩性特征可分为三种主要类型。

第一种类型复合盐层，以石膏、膏泥岩、泥膏岩为主，中间夹泥岩、泥质粉砂岩，形成不等厚互层，主要分布在英买力构造和买盖提斜坡构造。石膏主要分布在该段的上部及下部，中部主要为膏质泥岩。泥岩层厚一般3.5~11.5m，石膏层厚—

表 1-1 第三系复合盐层井段简表

井 号	牙哈 1	东秋 5	南喀 1	齐满 1	英买 901	英买 12	玛参 1	群 5	英买 8	亚肯 3	羊 1
顶界, m	3 846	2 440	3 990	4 390	3 968	4 017	2 042	4 000	3 560	5 279	4 805. 5
底界, m	5 452	4 280	4 940	5 442	4 703	4 719	2 148	4 195	5 012	5 574	5 227
段长, m	1 606	1 840	950	1 052	735	702	106	195	1 452	295	421. 5
井 号	大宛 1	玉东 201	克拉 2	克拉 201	克拉 203	克拉 204	羊 4	羊 2	羊 5	羊 101	英买 30
顶界, m	2 570	4 490	3 090	2 808	3 151	3 107	4 820	4 831	5 099	5 095	4 275
底界, m	4 245	4 576	3 502	3 701	3 701	3 763	5 227	5 225	5 240	5 295	5 067
段长, m	1 675	86	412	893	550	656	407	412	141	200	(未完)
井 号	秋参 1	迪那 22	却勒 1	迪那 202	迪那 2						
顶界, m	2 633. 5	3 603	5 145	3 713	3 524						
底界, m	2 940	4 236	5 678	4 388. 5	4 391						
段长, m	306. 5	633	533	675. 5	867						

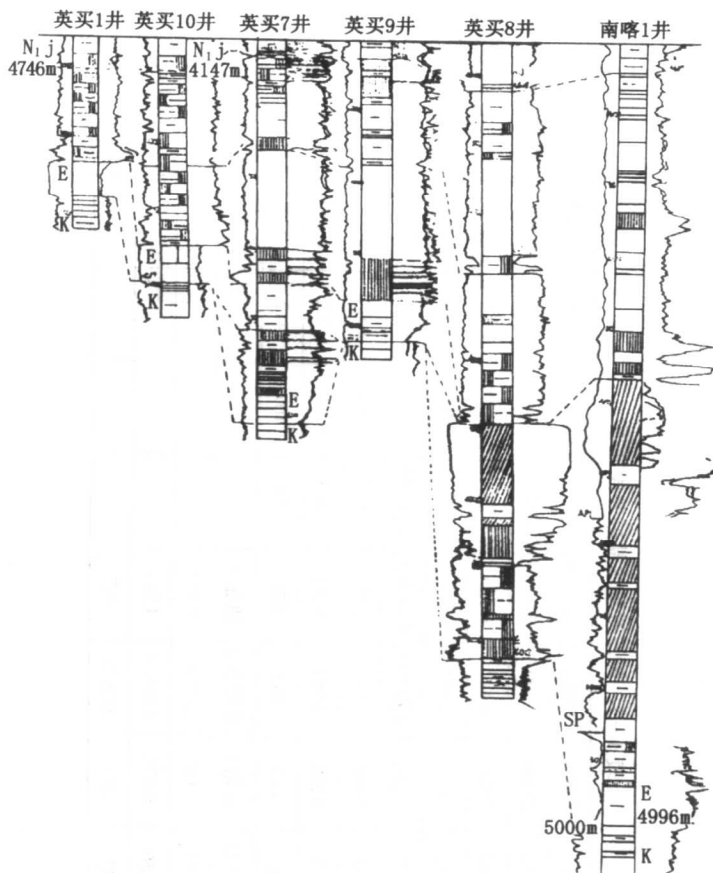


图 1-1 英买 1 井、英买 7 井、英买 8 井、英买 9 井、
英买 10 井和南喀 1 井下第三系地层对比图

般 2~4m，石膏为灰白色，质较纯，纤维状，具丝绸光泽。膏质泥岩为棕色、棕红色，石膏呈斑点、斑块状不均匀分布，裂缝、微缝较发育。石膏在沉积过程中受高温、高压的作用，发生脱水反应，并眼钻开前具有硬石膏的性质。并眼钻开后，硬石膏吸水膨胀，导致并眼缩径。而充填在泥页岩裂缝中的硬石膏吸水膨胀后，则导致井壁剥落、掉块或垮塌。钻遇这类盐层

比较典型的井有两口：英买 12 井和英买 901 井。

第二种类型复合盐层，以盐岩、石膏、膏泥岩、泥膏岩为主，中间夹薄层泥岩、泥质粉砂岩。这类盐层主要分布在英买力构造西部和亚肯断裂带。盐岩存在于该段的上、中部，石膏、膏泥岩、泥膏岩交互沉积于全井段。在砂泥岩的孔洞、裂隙中充填白色盐和石膏。盐岩为白色或灰白色结晶盐，具玻璃光泽，个别染有泥色，含少量石膏和泥质成分，厚度一般在 1~4m，最厚可达 35m（英买 8 井）。石膏、膏泥岩、泥膏岩岩性与第一种类型复合盐岩层相同。这种类型的盐层除了具有第一种类型盐岩层的特点外，还具有盐岩层蠕变缩径、盐溶后井壁垮塌等特征，特别是在深井、高温条件下盐岩层的蠕变速率可高到立即闭合卡死钻头的程度（亚肯 3 井）。钻遇此类型盐层的井有英买 8 井、亚肯 3 井、齐满 1 井、牙哈 1 井、迪那 22 井等。

第三种类型复合盐层，以盐岩、含盐膏软泥岩、石膏岩、膏泥岩为主，中间夹薄层泥岩、泥质粉砂岩。这类盐层主要分布在羊塔克构造带、南喀拉玉尔滚构造、东秋立塔克构造、克拉苏构造和却勒塔克构造带。盐层呈厚薄不等层分布于全井段，单层最大厚度 70m（南喀 1 井）。软泥岩存在于盐层、膏层或膏泥岩层中间，厚 2~6m，单层最大厚度为 31m，其主成分为褐色泥岩，具含盐膏、欠压实、含水量大、强度低、可钻性好和易塑性流动等特点。当钻井液液柱压力不能平衡其蠕变时极易造成缩径卡钻。盐岩、石膏岩和膏泥岩的特征与第一种类型、第二种类型复合盐层相同。这类复合盐层还普遍受构造应力不断的影响，其钻井难度很大。目前这种类型的复合盐层已在 22 口井中钻遇，比较典型的有东秋 5 井、吐北 2 井（见图 1-2、图 1-3）、南喀 1 井、羊塔克 1 井、克拉 2 井、却勒 1 井、秋参 1 井。而群 5 井的下第三系钻遇的复合盐层以石膏岩、膏泥岩为主，中间夹薄层软泥岩。

二、塔里木盆地石炭系盐膏层的成因及特征

塔里木盆地石炭系属于滨海相沉积。在早石炭世，海侵开

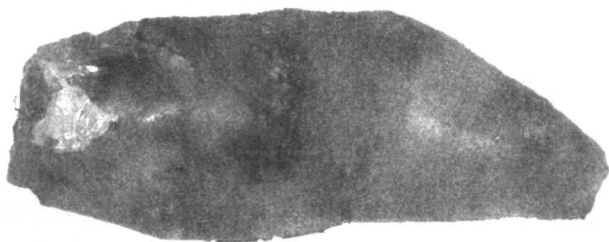


图 1-2 塔里木油田吐北 2 井下第三系盐岩之一



图 1-3 塔里木油田吐北 2 井下第三系盐岩之二

始，因陆源碎屑供给充足，延时甚长，沉积了一套堤坝砂岩（陆地边缘坝相），即东河砂岩段；尔后，海水继续侵入，但深度较浅，有的生物生长繁衍，形成生物碎屑灰岩和白云岩，生物以瓣鳃类、腕足类和藻类为主，在满参 1 井取出的岩心中局部见生物堆积层，保存完好；继后，地壳抬升，海水退出，由于陆源物质供应较少，沉积了下泥岩段下部的棕褐、紫红色泥质粉砂岩和粉砂质泥岩。在局部地区，海退后，台地中的水体交换不畅，局部形成封闭型湖泊，由于气候炎热干旱，海水蒸发量大于供给量，形成了盐膏湖，而后沉积形成了一套纯净的石膏与盐岩。

石炭系盐膏层主要分布在塔北隆起和塔东北的满加尔凹陷的北部，具有分布范围广、埋藏深的特点，其埋藏深度在 5 000m 以上。各井区盐膏层厚度差别较大，其中以沙 10 井区最厚，为蒸发台地相沉积中心带，其次是塔河 1 井区。

塔里木盆地石炭系盐膏层的岩性主要为盐岩、膏岩、泥岩等,从表 1-2 可以看出,各井的纯盐岩段较厚,其中最厚的塔河 1 井纯盐段达 142m,最薄的哈 2 井纯盐段也达 25m,其次是泥岩段和膏泥岩段,说明塔里木盆地石炭系盐膏层基本上以纯盐岩为主,夹有不等厚的泥岩及膏岩夹层。如乡 1 井,位于塔北隆起中部三叠系一下奥陶统背斜,由于受海西早期运动影响,该背斜缺志留系、泥盆系。石炭系“东河砂岩”直接不整合于奥陶系之上;而且中上奥陶统也遭不同程度剥蚀。乡 1 井的主要复杂段集中在石炭系的盐膏层段,井深 5 151~5 331.38m,其岩性特征为顶部厚层状石膏及中层状泥岩,中下部为厚层、巨厚状盐岩夹薄层泥岩,底部厚层状粉砂质泥岩及泥岩。

表 1-2 塔里木盆地石炭系盐膏层岩性描述

井 号	井段, m	厚度, m	岩 性 描 述
塔河 1	5 166~5 355	189	以厚层灰白色盐岩为主夹棕色泥岩、灰色膏泥岩。膏盐岩:石膏为白色粉末状,盐被溶解。泥岩:质较纯,性软一中,局部见少量石膏
吉南 1	5 258~5 375	117	灰白色盐膏层夹棕红及灰色膏泥岩和泥岩,盐膏层致密性软,易溶,可钻性好,钻时一般 5~10min/m
哈 2	5 706~5 784	78	巨厚层状白色盐岩,其中夹灰色薄层泥岩,盐岩为白色晶体,易溶于水
满参 1	4 495~4 614	119	大段灰白色膏盐层夹紫红色泥岩及浅灰色膏质泥岩,顶部为两层紫红色泥岩夹一层灰白色石膏,底部为灰白色石膏
轮南 45	5 263~5 388	125	大段灰白色盐岩、盐膏岩、泥膏岩夹灰、暗棕色泥岩、膏泥岩及砂质泥岩

续表

井 号	井段, m	厚度, m	岩 性 描 述
轮南 46	5 209~5 350	141	厚层白色盐岩及石膏夹薄层棕红色含泥膏岩及灰色、浅棕色泥岩, 盐岩质较纯, 玻璃光泽, 易溶于水, 石膏质较纯、性软, 易成粉末状, 泥岩含灰质及少量粉砂质, 且分布不均, 吸水性差, 成岩性好

石膏: 灰白色, 质纯, 多呈粉状, 少许纤维状, 部分微含泥质呈灰色。

盐岩: 白色, 浅棕红色, 少许无色透明, 质纯, 味咸纯正, 玻璃光泽, 结晶粒大, 晶形完整, 局部见泥质条纹镶嵌在晶粒中。

泥岩: 灰绿及绿灰色为主, 次为棕褐色, 性脆, 上部含膏质, 底部含粉砂质泥岩。

羊屋构造位于塔里木盆地北部凹陷满加尔凹陷北缘, 羊屋地层不整合圈闭带内, 羊屋 1 井的复杂层段主要集中在石炭系的盐膏层段, 井深 5 061~5 122.5m, 其主要岩性为: 顶部为中厚层状棕褐色泥岩、深灰绿色盐质泥岩; 中、下部为厚—巨厚状灰白色石膏岩和无色透明盐岩夹薄层深灰、深灰绿色膏盐质泥岩。

泥岩: 棕褐, 局部深灰绿色, 含粉砂质、钙质不均, 含钙高者可达 24%, 普遍见棕、白色石膏晶体及褐灰盐晶, 部分岩心孔洞发育, 洞径一般 2~3mm, 最大 4~5mm, 每平方厘米可见孔洞 1~3 个, 为膏盐晶体溶蚀及脱落所致。偶见宽 1~3mm 未充填之垂直缝。性硬、脆, 不水化。可钻性极差, 钻时高达 200min/m。

盐质泥岩: 深灰绿色, 含盐质不均, 部分为棕褐色、深灰、浅灰色。岩心似角砾状泥砾堆积, 具蜂窝状构造, 孔内部分充填

棕红、白色石膏晶体或灰褐色盐岩晶体，部分为空洞。孔径一般3~5mm，最大达到30mm。性较软，遇水膨胀，呈碎块脱落。

盐岩：无色透明，局部含杂质，可见灰绿、棕褐色色斑。透明度较差。盐晶多边形，晶体1cm×1cm×1cm，最大5cm×5cm×5cm。

膏岩：浅灰、灰白色，部分含泥岩，岩心见粗—粉粒结晶粒状结构，块状构造，局部具纹层状构造，多数膏岩无晶形，致密块状，岩屑呈豆状、片状。

三、塔里木盆地寒武系盐膏层的成因及特征

寒武系盐层在巴楚隆起、塔中地区都有分布，它们都是碳酸盐台地内彼此分割的潟湖相沉积。寒武系盐层在和4井、方1井、康2井钻遇（见图1-4、图1-5及表1-3），岩性为灰白色盐岩与棕红色泥岩、褐灰色泥岩、灰白色膏岩不等厚分布，属中寒武统，复合盐层中石膏的含量丰富。

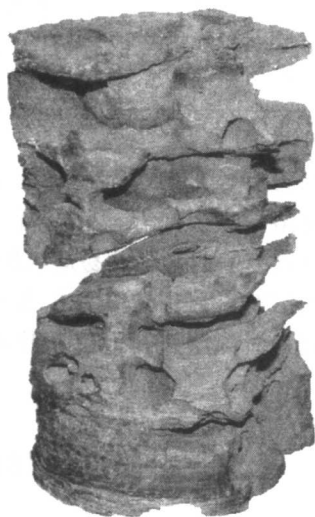


图1-4 塔里木油田康2井寒武系盐岩被溶解掉的白云岩

注：骨架为灰岩，裂缝、孔洞中充满盐垢及盐的团块，充填的盐已被溶解