
冻土爆破性与可钻性 试验及其应用

马芹永 著



科学出版社
www.sciencep.com

冻土爆破性与可钻性 试验及其应用

马芹永 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书详细总结了作者十几年在冻土爆破性和可钻性方面的试验研究及冻土爆破技术等,介绍了冻土爆破性和可钻性研究现状及发展趋势、冻土爆破作用分析、冻土爆破漏斗系列试验研究、冻土爆破性的分级与评价及冻土爆破技术,给出了冻土可钻性的理论分析、冻土可钻性试验、冻土冲击韧性试验、冻土可钻性的分级等。

本书既可从事人工冻结工程、寒区工程的高等学校教师、科研院所科研人员及施工企业技术人员使用,也可作为高等学校岩土工程、爆破工程、矿山建设工程、交通土建工程及地下工程等相关学科专业的研究生和高年级大学生的教学用书。

图书在版编目(CIP)数据

冻土爆破性与可钻性试验及其应用/马芹永著. —北京:科学出版社, 2007

ISBN 978-7-03-019470-1

I. 冻… II. 马… III. ①冻土-爆破-研究 ②冻土-可钻性-研究
IV. P642.14

中国版本图书馆CIP数据核字(2007)第114103号

责任编辑:耿建业/责任校对:陈玉凤

责任印制:刘士平/封面设计:陈 静

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>

源海印刷有限责任公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2007年8月第 一 版 开本:B5 (720×1000)

2007年8月第一次印刷 印张:14 1/2

印数:1—2 500 字数:276 000

定价:38.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换<明辉>)

马芹永教授简介

马芹永，男，安徽人，岩土工程博士，教授，博士研究生导师。现任安徽理工大学土木工程系副主任，兼任国际冻土学会会员，国际岩石力学学会会员，中国科学院冻土工程国家重点实验室客座研究员，中国煤炭学会爆破专业委员会副秘书长、委员，中国岩石力学与工程学会理事，岩石动力学专业委员会委员，安徽省工程爆破协会常务理事。2001年10月获“中国科学技术发展基金会孙越崎优秀青年科技奖”，2003年10月获淮南市“十大杰出青年”，2003年11月获安徽省第四届“优秀青年科技创新奖”，2004年10月获中国岩石力学与工程学会青年科技奖（银奖），2005年9月入选“安徽省高等学校‘十五’优秀人才计划”学科拔尖人才，2006年4月获第七届安徽青年科技奖，2007年4月被安徽省人民政府授予“安徽省先进工作者”称号。



近年来，负责完成的课题获国家经济贸易委员会安全科技进步三等奖、安徽省自然科学三等奖、安徽省自然科学优秀学术成果二等奖、安徽省高校省级科学技术进步一等奖等6项。申请国家发明专利、实用新型专利4项。主持安徽省优秀青年科技基金及安徽省教育厅重点科研项目等省部级课题6项。在《岩石力学与工程学报》、《岩土工程学报》、《岩土力学》、《土木工程学报》、《煤炭学报》及国外刊物 *Combustion, Explosion and Shock Waves* 等发表第一作者学术论文60余篇，论文被SCI、EI、ISTP收录16篇。出版教材、专著8部。

前 言

具有负温或零温并含有冰的土类和岩石称为冻土。我国的多年冻土面积占国土面积的 22.3%，居世界第三位，其中高海拔多年冻土的面积则居世界之最，季节冻土更遍布大部分国土。根据国家政策，我国建设重点向西部转移，在甘、青、新、藏、宁等广大地区的季节冻土和多年冻土将逐步成为建设的重点。在多年冻土地区，许多工程如房屋和道路地建设、金矿煤矿的开发、油田油管的铺设、水利水电建设以及军事工程等都需要对冻土进行开挖。由于缺乏可以利用的有关冻土可钻性和爆破性方面的试验资料和有关理论指导，工程设计者不能有效地在保护环境的前提下进行冻土施工作业。另外，在富水的表土层中进行矿山建设、城市地下工程及桥梁工程采用冻结法施工等都遇到冻土的开挖问题。

寒区工程、人工冻结工程的开挖，提高钻眼速度和采取合理的爆破参数是提高施工速度的有效方法，所以选择合理的钻眼设备及爆破参数是非常重要的。正确地确定冻土的可钻性，可以用来预估钻眼生产率，制定生产定额，也可以指导选取适宜的钻眼设备及有关参数。冻土可钻性是表示在钻进过程中冻土对钻具的抵抗程度，反映了冻土钻进的难易程度。冻土的爆破性是表征冻土爆破难易程度的指标，或是冻土抵抗爆破能力大小的指标，是爆破参数选择的基本依据。所以，冻土可钻性和爆破性是重要的关键应用基础研究，对改进寒区工程和人工冻结工程设计和施工方法具有一定的指导意义。基于上述，作者的写作意图为总结研究成果，以期对冻土开挖的设计与施工具有指导作用。

本书详细总结了作者十几年来在冻土爆破性和可钻性方面的理论研究、试验研究和工程应用等内容，介绍了冻土爆破性和可钻性研究现状与发展趋势、冻土力学特性试验、冻土波速测定、爆破相似理论、冻土爆破性试验、冻土可钻性试验、冻土掏槽爆破与光面爆破模型试验、冻土爆破技术等。

本书的出版得到安徽省优秀青年科技基金、安徽省高校学科拔尖人才基金、中国科学院冻土工程国家重点实验室开放基金、安徽省教育厅自然科学重点项目和安徽理工大学的资助，特表谢意。

由于作者水平所限，书中难免存在缺点错误，恳切希望广大同行专家与读者不吝赐教。

作 者

2007 年 5 月

目 录

前言

第 1 章 冻土爆破性和可钻性研究现状与发展趋势	1
1.1 概述	1
1.2 国内外冻土爆破性研究现状与发展趋势	3
1.2.1 冻土力学特性	3
1.2.2 冻土爆破性	4
1.2.3 岩石爆破性	6
1.3 国内外岩石可钻性研究现状与发展趋势	12
1.3.1 我国岩石可钻性的研究	12
1.3.2 国外岩石可钻性的研究	16
1.3.3 岩石可钻性的分析	19
第 2 章 冻土的特性	20
2.1 冻土的形成过程	20
2.2 地下水对冻土形成的影响	21
2.2.1 冻结时土粒与水的相互作用	21
2.2.2 地下水的水质与流速对岩土冻结的影响	22
2.3 土的颗粒组成和含水率	25
2.3.1 土的颗粒组成测定	25
2.3.2 含水率的测定	26
2.4 冻土的热物理性质	27
2.4.1 比热	28
2.4.2 导热系数	29
2.4.3 导温系数	29
2.4.4 结冰温度	30
2.4.5 冻土热容量	30
2.5 冻土的力学性质	31
2.5.1 冻土的抗压强度	31
2.5.2 冻土的抗拉强度	35
2.5.3 冻土的抗剪强度	37
2.5.4 冻土的抗切削强度	38
2.6 冻土的流变性	38
2.6.1 冻土的本构关系	38

2.6.2 冻土的蠕变性	39
2.7 冻土的动应力应变关系及动强度	41
2.7.1 冻土的动应力应变关系	41
2.7.2 冻土的动强度	42
2.8 冻土的冻胀与融沉	43
2.8.1 冻土的冻胀分类	43
2.8.2 冻土的融沉分类	45
2.8.3 冻土冻胀与融沉的工程问题	46
2.9 加荷速度对冻结强度的影响	49
2.10 冻结钙质黏土特性的试验及分析	51
2.10.1 冻结钙质黏土土样化学成分测定	51
2.10.2 融土物理性能试验	53
2.10.3 冻结钙质黏土力学性能试验	55
2.10.4 冻结钙质黏土层井帮位移随段高变化	55
第3章 冻土的波速测定原理与方法	57
3.1 理论分析	57
3.2 波速测试原理	58
3.3 声波测试仪	59
3.3.1 SYC-2C 型非金属超声测试仪	59
3.3.2 CTS-25 型非金属超声波检测仪	60
3.3.3 UVM-2 型声波仪	61
3.4 波速的工程应用	61
3.4.1 通过波速测定预测冻土的动弹性模量和动泊松比	61
3.4.2 预测冻土的强度	63
3.4.3 预测冻土的可钻性	64
第4章 爆破相似理论	66
4.1 相似基本理论	66
4.1.1 量纲	66
4.1.2 相似	67
4.1.3 相似基本定理	67
4.1.4 相似准则的推导方法	68
4.2 爆破相似理论	72
4.2.1 量纲分析	72
4.2.2 爆炸相似律	73
4.3 爆破工程中的无量纲参量和经验公式	75
4.3.1 比例距离	75
4.3.2 爆破地震效应的有关经验公式	75

4.4 爆破模型试验	76
4.4.1 独立物理量	76
4.4.2 相似参数和模型材料	76
第5章 冻土的爆破性	78
5.1 研究内容	78
5.2 研究方法	79
5.3 冻土爆破作用的理论分析	79
5.3.1 概述	79
5.3.2 冻土的内部爆破作用	80
5.4 冻土爆破漏斗理论	81
5.5 冻土爆破漏斗试验	82
5.5.1 方案设计	82
5.5.2 试验方法	85
5.6 冻土爆破漏斗的特性分析	87
5.6.1 爆破漏斗参数的回归方程形式及确定	87
5.6.2 爆破漏斗参数的回归分析	90
5.6.3 爆破漏斗爆破块度的回归分析	92
5.6.4 爆破漏斗的形式	95
5.6.5 冻土爆破的扩腔作用	95
5.7 最佳药量与最佳深度的计算	96
5.8 冻土爆破性评价函数的建立	97
5.8.1 概述	97
5.8.2 冻土爆破性影响因素	97
5.8.3 层次分析法	98
5.8.4 冻土爆破性的评价	101
5.9 利用灰色理论评价冻土的爆破性	104
5.9.1 影响因素的关联分析	104
5.9.2 冻土爆破性的评价	104
5.10 结论	104
第6章 冻土的可钻性	106
6.1 研究内容	106
6.2 冻土可钻性的理论分析	106
6.2.1 冲击载荷下的弹性波理论分析	107
6.2.2 冻土切削破碎过程的理论分析	109
6.2.3 冲击凿碎冻土破碎原理	112
6.3 冻土可钻性的影响因素	114

6.4	冻土的冲击韧度试验	115
6.4.1	冲击韧度试验原理	116
6.4.2	冲击韧度试验	117
6.4.3	试验结果及数据分析	118
6.4.4	结论	120
6.5	冻土可钻性试验	121
6.5.1	试验目的	121
6.5.2	试验设计	121
6.5.3	试验方法	122
6.5.4	试验结果及数据分析	124
6.6	冻土可钻性与波速、冲击韧性的关系	128
6.6.1	波速与可钻性的回归分析	128
6.6.2	冲击韧性与可钻性的回归分析	130
6.6.3	波速、冲击韧性与可钻性的回归分析	131
6.7	冻土可钻性分级	132
6.7.1	人工神经网络原理	133
6.7.2	冻土可钻性分级神经网络系统	134
6.7.3	微机程序的编制	137
6.8	结论与展望	139
6.8.1	结论	139
6.8.2	展望	140
第7章	冻土掏槽爆破与光面爆破模型试验	141
7.1	冻土孔内微差爆破漏斗理论分析与模型试验	141
7.1.1	冻土孔内微差爆破理论分析	141
7.1.2	试验材料及炸药选择	141
7.1.3	冻土孔内微差爆破漏斗试验	142
7.1.4	数据处理	144
7.1.5	结论	149
7.2	冻土掏槽爆破模型试验	150
7.2.1	模型材料和相似炸药	150
7.2.2	模型掏槽爆破参数与试验结果	150
7.3	冻土光面爆破模型试验	151
7.3.1	试验规划	151
7.3.2	装药不耦合系数	151
7.3.3	装药结构	152

7.3.4	光爆层厚度	152
7.3.5	小模型光面爆破试验	153
7.3.6	中模型光面爆破试验	155
7.3.7	结论	157
第8章	冻土爆破技术	158
8.1	人工冻结法原理	158
8.1.1	冻结法的实质与适用条件	158
8.1.2	冻结法凿井原理	158
8.2	冻土爆破的可行性	160
8.3	冻土爆破施工冻结管的破坏准则	162
8.3.1	冻土爆破冻结管受力的强度准则	162
8.3.2	冻土爆破对设施的震动破坏准则	168
8.3.3	冻结管变形破坏准则	170
8.3.4	结论	171
8.4	人工冻土爆破参数设计	171
8.4.1	掏槽眼布置及装药量计算	171
8.4.2	光面爆破参数	172
8.5	冻土爆破器材的选择	176
8.5.1	雷管的选用	176
8.5.2	炸药的选择	180
8.6	冻土的钻眼方法	182
8.6.1	钻削冻土	182
8.6.2	冲击破碎冻土	182
8.6.3	合理冻土钎具的提出	183
8.7	立井冻土爆破技术实例	185
8.7.1	冻结黏土层爆破技术	185
8.7.2	冻结砾石层爆破技术	187
8.7.3	冻结基岩段爆破技术	191
8.7.4	冻土钻眼爆破的施工技术要点	192
8.8	冻土爆破振动测试	193
8.8.1	概述	193
8.8.2	爆破振动现场测试	195
8.8.3	回归计算	201
8.8.4	频谱分析	203
8.8.5	结论	205

8.9 矿山井筒冻土掘进相关问题	206
8.9.1 准备工作	206
8.9.2 井筒掘进施工特点	206
8.9.3 掘进段高	206
8.9.4 压风除湿设备	207
8.9.5 冻土的挖掘	207
8.9.6 冻结管断裂	208
8.9.7 工作面底鼓	209
8.9.8 加快掘砌速度的措施	210
8.10 多年冻土与季节冻土爆破方法	210
8.10.1 冻土层下爆破	210
8.10.2 深层冻土爆破	210
8.10.3 青藏铁路冻土爆破开挖技术	211
参考文献	214

第 1 章 冻土爆破性和可钻性研究 现状与发展趋势

1.1 概 述

我国的多年冻土面积占国土面积的 22.3%，在世界上占第三位，其中高海拔多年冻土的面积则居世界之最，季节冻土更遍布大部分国土。按照冻土工程地质勘察规范（GB50324—2001），根据冻土冻结状态持续时间的长短，将其分为多年冻土、隔年冻土和季节冻土。多年冻土按形成和存在的自然条件，分为高纬度多年冻土和高海拔多年冻土，它们主要分布在大小兴安岭、青藏高原和东西部高山地区。季节冻土主要分布在长江流域以北、东北多年冻土南界以南和高海拔多年冻土下界以下的广大地区。根据国家政策，我国建设重点正逐步向西部转移，在甘、青、新、藏、宁等广大地区的季节冻土和多年冻土将逐步成为建设的重点。在多年冻土地区，许多工程如房屋和道路地建设、金矿煤矿的开发、油田油管的铺设、水利水电建设以及军事工程等都会扰动和破坏冻土环境，由于缺乏可以利用的有关冻土爆破性和可钻性方面的试验资料和有关理论指导，工程设计者不能有效地在保护环境的前提下进行冻土工程设计。为开发冻土区，保证冻土工程建筑的稳定，加快冻土工程的施工，研究冻土爆破性和可钻性有着重要的意义。

另外，我国是煤炭生产大国，我国生产和消费的一次商品能源中煤炭约占 74%，煤炭提供了 78% 的发电能源、70% 的化工原料、60% 的民用商品能源。当前煤矿建设的特点是埋深大、地质条件复杂、表土层厚、井型大等。据统计，国有重点煤矿平均采深年增加 9m，最深的矿井已超过 1000m，预计煤炭资源总量的 53% 埋深大于 1000m。例如，安徽省明确了建设能源基地、实施“皖电东送”的近期目标和远期的规划和目标，到 2010 年，新建设大型、特大型煤矿 15 座，设计年生产能力 5000 万吨，将两淮矿区建设成为亿吨级超大型现代化矿区；至 2020 年，新建煤矿矿井 16 座，设计年生产能力 6420 万吨，全省原煤年产量达到 1.7 亿吨。山东巨野等煤田也将建设一大批新矿井。这些矿井穿越的表土层厚达 400~600m，人工冻结法是穿过深厚松软表土层的主要方法。人工冻结法是利用人工制冷技术，使地层中的水结冰，把天然岩土变成冻土，增加其强度和稳定性，隔绝地下水与井筒或地下工程的联系，以便在冻土壁的保护下进行井筒或地下工程掘砌施工的特殊施工技术。其实质是利用人工制冷临时改变岩土性

质以固结地层。冻结法在矿井建设中多用于立井的开凿,也用于其他地下工程的不稳定地层或含水极其丰富的裂隙岩层施工。通常,当地下水含盐量不大,且地下水流速较小时(流速 $v \leq 17 \times 10^{-3} \text{m/s}$),均可使用冻结法,并且井筒直径大小和深度基本上不受限制。冻结法已成为我国矿山建设通过不稳定冲积层和裂隙含水层的主要施工方法。1955年,我国用冻结法开凿了开滦林西风井,井筒净直径5m,冻结深度105m,此后我国科技人员开始了冻结法凿井技术的研究。50年来,取得了丰硕的研究成果,总共建了500余项冻结工程,包括80年代最大冻深415m的淮南潘三东风井和90年代最大冻深435m的河南永夏矿区陈四楼副井。采用冻结法施工的井筒冻结深度超过450m的井筒有程村主井485m,梁宝寺主副井分别为453m、461m,泉店矿主井455.3m,淮南张集矿北区风井479m,顾北矿主井500m,丁集矿风井558m,涡北矿副井476m,薛湖矿主井460m等。目前冻结法凿井所建成的井筒最大冻结深度为山东龙固煤矿副井,井筒穿过的表土层厚度达567.7m,冻结深度650m,在建的最大冻结深度为山东巨野煤田郭屯煤矿主井,冻结深度为702m。我国冻结法凿井技术已跨入世界先进行列。国外在煤矿中冻结深度最深的是波兰的卢布林1号井副井,直径6.0m,冻结深度725m;冻结不稳定的第三系和第四系地层,具有代表性的是德国的Sophia Jacba 8号井,冻结深度558m;冻结基岩与砂层、黏土互层,具有代表性的是前苏联的雅科夫铁矿2号井,冻结深度620m,英国的博尔比钾盐矿,地层冻结深度达930m。近十几年来,我国冻结凿井技术发展很快,不仅打钻、冻结、掘砌设备和施工过程监测技术有较大的发展,基础理论也得到了不断地提高和完善。为了提高施工速度,减轻劳动强度,井筒冻结段采用了钻眼爆破法。由于冻土爆破是在负温条件下,同时井筒周围存在着冻结管,所以冻土爆破不同于普通基岩段爆破。为了在冻结段采用钻眼爆破法既能提高施工速度,又能安全施工,进行了大量的试验研究和现场试验,为《矿山井巷工程施工及验收规范》和《煤矿安全规程》的进一步完善提供了依据。从1961年版《煤矿安全规程》未出现冻结法这一名词,到1980年版、1986年版的冻土层不得放炮,如放炮必须制定安全技术措施报局总工程师批准,至2001年、2005年版的表土层冻结段可以采用爆破作业,但必须制定安全技术措施。《矿山井巷工程施工及验收规范》从GBJ3—1964、GBJ213—1979到GBJ213—1990对炮孔与井筒荒径和冻结管距离规定的减小和炮孔深度的增加,说明了冻土钻眼爆破法的可行性。最近十多年来,冻结管的材质接头质量以及爆破技术有了较大的提高和发展,为在冻结井筒内进行爆破施工提供了条件。

城市地下工程采用冻结法施工等也都遇到冻土的开挖问题,所以冻土爆破性和可钻性试验研究有着广泛的应用前景。

1.2 国内外冻土爆破性研究现状与发展趋势

1.2.1 冻土力学特性

目前冻土力学的研究已取得丰硕的成果。中国科学院寒区旱区环境与工程研究所冻土工程国家重点实验室积极开展有关冻土方面的重大冻土建设工程项目的研究工作,取得了一批在冻土学科具有开创性、突破性或有明显应用前景的研究成果,使我国冻土学研究在冻土力学、冻土动力学及未冻水动力学等许多方面已处于国际领先地位。在土冻融过程研究方面,主要针对水分迁移、盐分迁移、成冰作用和土体冻胀、盐胀等进行了深入研究;在冻土力学研究方面,主要针对冻土的静力学特性、动力学特性和冻土受力过程中微结构的变化进行了深入研究。从20世纪80年代开始,中国科学院冻土工程国家重点实验室、煤炭科学研究总院北京建井所、中煤特殊凿井公司、中国矿业大学和安徽理工大学等单位,系统地进行了冻土壁基本物理力学性质、冻土壁温度场和应力场研究,近期又对立井冻结法凿井和深基坑开挖支护工程进行了热工计算。安徽理工大学对冻土壁强度及其参数、冻结壁融沉作用于井壁上的负摩擦力、冻土爆破性、人工冻土爆破方法等作了大量的研究工作。中国科学院冻土工程国家重点实验室吴紫汪、朱元林、徐学祖、马巍、何平等研究了冻土的静力学特性,得出有重要价值的成果,大连理工大学李洪升等研究了冻土断裂力学行为。在动力学方面主要研究了冻土在循环荷载作用下的动力学性质,朱元林、马巍等进行了围压作用下的动蠕变试验,提出了冻土的动蠕变模型,发现冻结粉土在振动荷载作用下的破坏荷载与围压无关,并发现颗粒发生了明显的定向排列。何平进行了冻土在循环荷载作用下的蠕变试验研究,发现冻土动弹模随动应变增加而降低,随频率的增加而增加,随温度的降低而增加。徐学燕等对青海高原风火山地区亚黏土进行了振动蠕变试验,提出了双曲线型动弹模表达式。沈忠言等对冻结兰州黄土进行了恒应变率等幅动应变振动试验,提出了动强度预测模型,张健明对在循环荷载作用下桩与冻结兰州黄土之间的冻结强度进行了研究,试验表明冻结强度随振动频率增加而减小。俞祁浩等对冻土的冲击韧度进行了试验研究,表明试样尺寸及缺口深度对冲击韧度具有明显影响。王书文等进行了冻土冲击贯入试验,得出了冲击次数与冻土温度、含水量、干密度间的经验公式,余群、张招祥等进行冻土切削力学特性的研究。朱元林等根据土质、含水量、应变率及温度的不同给出9种冻土的单轴压缩本构关系。蔡中民等通过蠕变实验,提出了冻土的黏弹塑性本构方程。何平等通过理论分析和推导提出冻土黏弹塑损伤耦合本构理论。国外,崔托维奇及维亚洛夫对冻土力学特性进行开创性的研究以来,研究了冻土蠕变特性、松弛特性以及在低应变率下冻土变形和强度特性,并研究了加载速度从 $0.16\sim 52.10\text{kPa/s}$

的冻土强度的变化,表明荷载增长速度对冻结黏土的抗剪强度影响最大,加荷速度越低,冻土的各种强度也越小,得出了单轴压缩时冻结黏土和冻结砂土的流变曲线。Charest 等专家进行了冻土动态贯入试验,得到了最大贯入深度的经验表达式。

1.2.2 冻土爆破性

前苏联爆破设计联合公司对冻土的爆破性进行了分级,见表 1.1。

表 1.1 冻土爆破性分级

爆破性 分级	名称和土型	土温/℃	冻冰 等级	单位炸药消耗量/(kg/m ³)	
				松动爆破	抛掷爆破
I 易爆	水饱和度低于 0.5 及高于 0.9 的冻砂土	低于 0.5℃	强冻冰	0.4~0.6	1.3~1.8
II 中等易爆	水饱和度为 0.5~0.9 的冻砂土、冰碛碎屑和砂质充填的砾石冻土、冻黏土、冰碛碎屑冻土	低于 0.5℃	强冻冰	0.6~0.8	1.6~2.2
		低于-5℃	冻冰	0.6~0.8	1.6~2.2
III 难爆	冻黏土、冰碛土有充填料的碎屑砾石冻土	0~-5℃	弱冻冰	0.8~1.1	1.8~2.5

注:强冻冰土指冰的含量高于 50%;冻冰土指冰的含量为 25%~50%;弱冻冰土指冰的含量为 25%以下;冻冰植物层土和冻结泥煤属于 I 级。

另外,冻结法凿井已有一百多年的历史,英国 1862 年在土木基础工程中采用了冻结法施工技术,1883 年德国首先在矿井建设中应用冻结法凿井。从此以后,冻结法凿井技术得到推广使用。随着地质条件日益复杂,表土层厚度增大,特殊凿井比重逐渐增大,如苏联 1975~1980 年期间,特殊凿井比重由 9.9%增到 19.6%,波兰的采矿业 90%以上井筒采用冻结法施工,德国采用冻结法施工的煤矿也占相当大的比例。近年来,随着我国煤炭工业的迅速发展,新区煤炭基地开发日益增多,其特点是煤层埋藏深、井型大、表土层厚,一般多采用冻结凿井法通过表土。冻结法过表土到目前为止,国外最大冻结深度已达 930m(英国),最高月成井达 194m。在建的最大冻结深度为郭屯煤矿立井,冻结深度为 702m,最高月成井达 167.54m(山东兖州鲍店北风井)。随着冻结凿井法的应用和推广,也暴露出一些新的亟待解决的技术课题:冻结管断裂、冻结段施工过程中透水淹井等。我国自 1955 年应用冻结法凿井以来,共建成五百多个井筒,有三十多个井筒发生不同程度的冻结管断裂现象,造成施工困难,个别深井的冻结管几乎全部断裂,严重危及施工安全。冻结管断裂的主要原因是冻结壁变形大,冻结壁厚度和强度不够。冻结段施工过程的透水淹井的原因主要是冻结壁存在着未冻窗口,冻结段局部破裂以及冻结壁局部存在融化窗口等。解决这些问题的措

施，一是增加冻结壁的厚度；二是加强冻结，增强冻结壁的强度。加强冻结，并筒内冻土增多，需要挖掘的冻土量大大增加，给施工带来了很大的困难。人工挖掘冻土劳动强度大、施工速度慢、效率低。有些井筒已基本冻实，根本挖不动，目前不少单位积极采用了钻眼爆破法，提高了施工速度。

另一方面，随着冻结深度的不断加深，需要挖掘的冻土体增加，人们不得不考虑爆破施工问题。我国首次采用冻结法施工的林西风井在掘进中曾采用爆破方法。以后，有的井筒在冻结段放炮时发生了崩坏冻结管的事故，后来《煤矿安全规程》和《矿山井巷工程施工与验收规范》对此作了严格的规定，见表1.2。最近十多年来，冻结管的材质接头质量以及爆破技术有了较大的提高和发展，为在冻结井筒内进行爆破施工提供了条件。沈阳矿务局的红阳三井是设计年产量为150万吨的大型矿井，为了提高掘进速度采用了钻眼爆破法，在一87m位置爆破后出矸开帮发现了17号冻结管，距荒径为200mm，说明此处周边眼距17号冻结管仅为300~400mm，没有发生盐水泄露现象。以后周边眼布置在荒径上，减少了开帮量，相继暴露出三根冻结管，均未发生冻结管破裂现象。红阳三井采用眼深1.7m，装药量为49kg，进尺1.5m，月进尺为52m，创沈阳矿务局冻结井筒施工记录。河南陈四楼矿井主井冻结次生灰岩和冻结基岩采用全断面一次控制爆破，爆破效果良好，没有损坏一根冻结管，开创了我国冻深425m不断管的先例。刘桥副井冻结基岩段采用全断面一次爆破施工，每茬炮平均装药量为93kg，最大装药量为120kg，周边眼装药量为24~30kg，冻结管安全无恙，炮眼利用率在80%以上。德国的哈尔德一号井采用钻眼爆破法，掏槽眼的装药量每茬炮不超过60kg，外围区不超过90kg，外围炮眼距离荒径的距离在200mm以上，爆破中对冻结管和冻结壁进行了监视观测，测得的结果说明冻结管和冻结壁没有

表 1.2 《矿山井巷工程施工及验收规范》有关冻土爆破规定

序号	国家标准编号	内 容
1	GBJ3—1964	第370条规定，在冻结地层中进行爆破作业时，应使用硝胺炸药，每次爆破药量不应超过10kg，炮眼距冻结管距离不得小于1.5m，帮眼必须垂直
2	GBJ213—1979	第138条规定，冻结地层如采用钻眼爆破法掘进时，应有爆破作业安全措施，并经上级有关部门批准；爆破时应使用硝胺炸药和段发雷管，炮眼应打直眼，其深度应小于1.2m，眼距宜为0.8~1.0m，边眼距并筒荒径：在冲积层中不得小于0.6m，在风化带及含水基岩中不得小于0.3m；距冻结管：在冲积层中不得小于1.5m，在基岩中不得小于1.2m
3	GBJ213—1990	第4.2.28条规定，冻结地层采用钻眼爆破法施工，应采用硝胺炸药、防冻安全炸药，炮孔距冻结管的距离不得小于1.2m，冲积层中炮孔深度不宜大于1.6m，基岩层中的炮孔深度不宜大于1.8m；全断面爆破时，应采用段发雷管，光面爆破，周边炮孔装药的药卷长度不应超过孔深的1/2

受到损伤。现在国内外采用爆破施工冻结的井筒越来越多,东庞主井、淮南潘二、姚桥矿主副井、榆树林子主斜井、东滩西风井和德国的莱茵堡冻结井等都是成功的实例。只要加强安全管理,精心施工,无疑能加快冻结段的施工速度,提高成井速度,缩短建井工期。实践证明,采用钻眼爆破法比风镐挖掘提高4~6倍的施工速度。上述冻土爆破施工中,爆破参数的选择均是根据规范和经验确定,具有一定的盲目性。为正确制定爆破材料消耗定额提供科学的依据,为爆破设计与施工优化提供基本参数,研究冻土的爆破性是非常必要的。

1.2.3 岩石爆破性

岩石的爆破性是岩石对爆破破碎的抵抗能力的大小,表示爆破破碎破岩的难易程度。岩石的爆破性取决于岩石的物理力学性质、岩体结构(如层理、节理等)特征,同时也受炸药性质、爆破参数和爆破工艺的影响。岩石爆破性是选取某些反映爆破难易程度的指标来表示,并以此对岩石进行爆破性分级,分级可用作选用炸药、确定爆破参数、编制爆破工程定额以及预测爆破效果的依据。

1984年东北大学应用数理统计对矿山实际试验所得爆破漏斗体积、爆破块度分布和岩体波阻抗与岩石爆破性指数 N 之间的关系进行多元回归分析,建立各指标与 N 的关系,按照岩石爆破性指数大小将岩石爆破性分为五级。20世纪80年代长沙矿冶研究院提出了以岩石波阻抗和抗压强度为判据的露天矿深孔控制爆破岩石爆破性分级,共分三级。1989年,长沙矿山研究院采用岩石强度、岩体纵波速度、岩石纵波速度、岩石横波速度作为评判指标,用模糊数学方法从整体上将岩石爆破性分为五个等级。北京矿冶研究总院葛树高在哈氏方法的基础上加以改进,采用天然裂隙平均间距、矿岩单轴抗压强度、容重及声阻抗指标来评价矿岩爆破性。所以,分级方法有以实际生产指标、岩石的力学性质指标为标准 and 以标准条件下爆破试验的某一指标为标准等方法。

1. 以实际生产指标进行爆破性分级

代表性的分级方法是前苏联苏哈诺夫(A. Ф. Суханов)博士在现场试验的基础上于1940年提出的岩石分级法,爆破性分级见表1.3。它是以爆破单位岩石体积的炸药量或所需炮眼长度为分级指标。这些指标不仅取决于岩石性质,还取决于炸药性质、爆破方法、爆破参数等因素。指标是在下列条件下取得的:①爆破在断面为 $4\sim 6\text{m}^2$ 的水平巷道工作面进行;②采用作功能力为 280m^3 的硝酸类炸药;③炮眼深度1m,炮眼利用率不低于0.8;④采用直径 $30\sim 32\text{mm}$ 药卷连续装药,炮泥填塞为眼深的 $1/3$ 以上;⑤炮眼排列合理并考虑层面和裂缝;⑥掏槽眼同时起爆。当直接采用该分级指标确定单位炸药消耗量时,应与标准条件相一致,否则应对指标给予修正。由于目前装备和技术条件已与当时的标准条