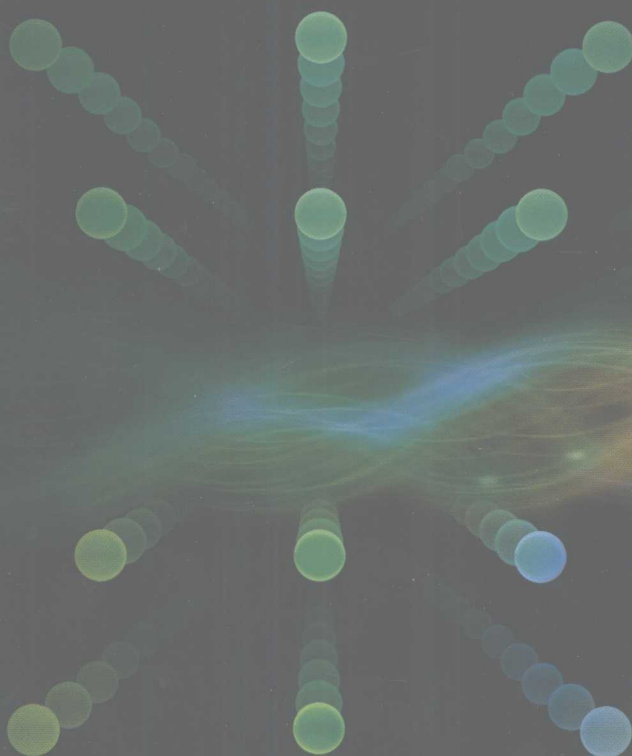


【现代工程爆破前沿技术丛书】

塑料导爆管起爆系统 理论与实践

张正宇 等 编著

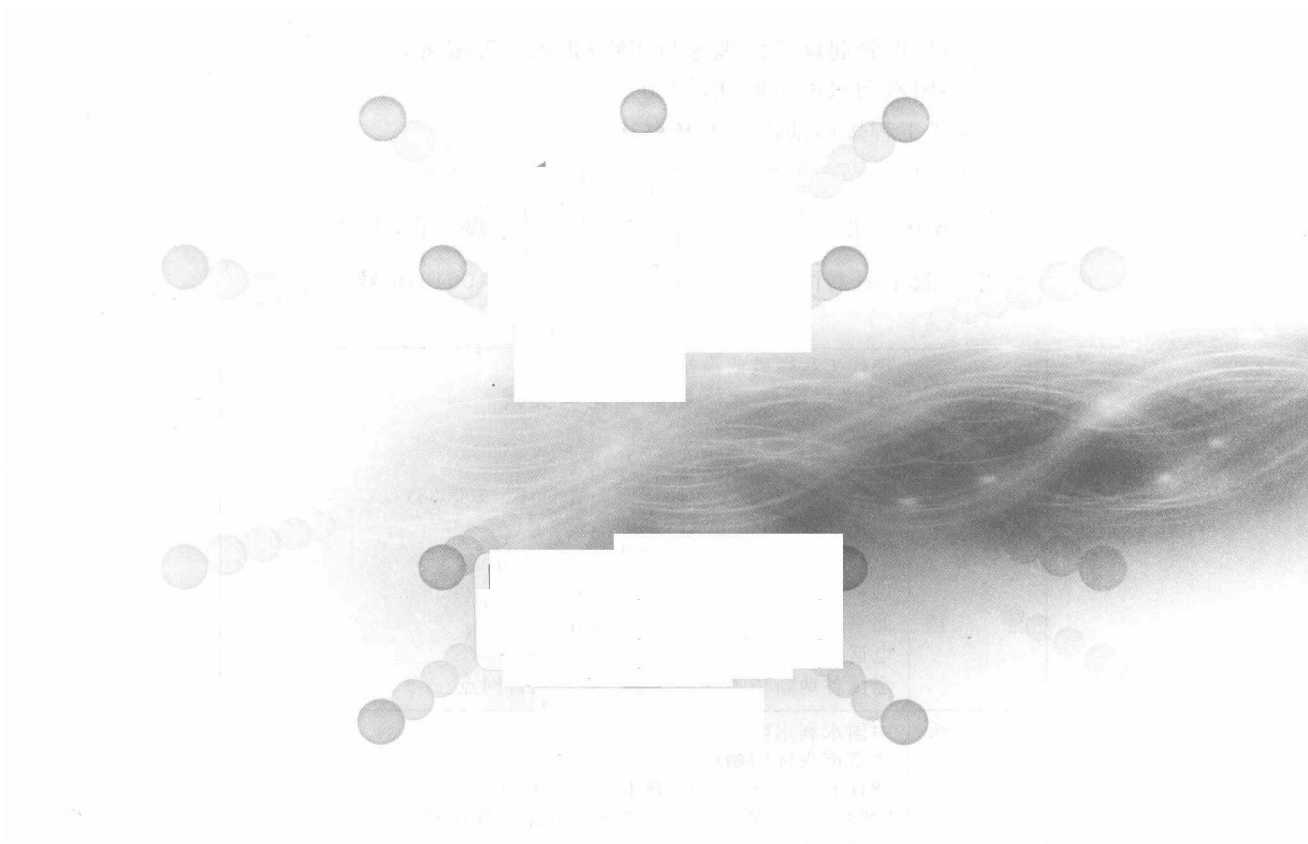


中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

【现代工程爆破前沿技术丛书】

塑料导爆管起爆系统 理论与实践

张正宇 赵 根 张文煊 占学军 编著



内 容 提 要

本书是对塑料导爆管起爆系统的理论与实践的总结。主要内容包括：绪论，导爆管及其传爆机理，导爆管雷管，导爆管起爆系统和起爆网路形式，导爆管起爆系统理论，导爆管起爆系统设计与施工，导爆管起爆系统在深孔台阶爆破、硐室爆破、围堰拆除爆破、城市拆除爆破中的应用等。

本书可供水利水电工程爆破的科研、设计、施工、监理技术人员及管理人员使用，也可供其他工程爆破领域的专业人士及高等院校相关专业师生参考阅读。

图书在版编目 (CIP) 数据

塑料导爆管起爆系统理论与实践/张正宇等编著. —北京：中国水利水电出版社，2009

(现代工程爆破前沿技术丛书)

ISBN 978 - 7 - 5084 - 6496 - 1

I. 塑… II. 张… III. 塑料-导爆管-起爆 IV. TB41

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2009) 第 064545 号

书 名	现代工程爆破前沿技术丛书 塑料导爆管起爆系统理论与实践
作 者	张正宇 等 编著
出版发行	中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路 1 号 D 座 100038) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn 电话: (010) 68367658 (营销中心)
经 售	北京科水图书销售中心 (零售) 电话: (010) 88383994、63202643 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
印 刷	北京市兴怀印刷厂
规 格	184mm×260mm 16 开本 11.5 印张 273 千字
版 次	2009 年 1 月第 1 版 2009 年 1 月第 1 次印刷
印 数	0001—2000 册
定 价	38.00 元

凡购买我社图书，如有缺页、倒页、脱页的，本社营销中心负责调换

版权所有·侵权必究

前 言

自从塑料导爆管起爆系统在我国于1979年研制生产以来，已在冶金矿山、水利水电、铁道、煤炭和交通等行业的各种爆破工程中得到广泛应用。

经过30年的发展，塑料导爆管及导爆管起爆系统的理论研究已更加深入，导爆管起爆系统呈现延期时间精确化、网路连接便捷化、网路形式多样化的发展趋势。延期时间精确的逐孔（逐段）起爆技术在工程爆破中得到了全面推广应用，大大降低了爆破振动等有害效应，已成为各种开挖爆破、城市拆除爆破等的主要起爆技术。

几十年来，我和我的同事们一直致力于塑料导爆管接力起爆系统的研究、开发与推广工作，并使该起爆系统成为水利水电行业工程爆破的主要方法。曾在三峡工程、小湾、溪洛渡等数十个大、中型水利水电工程进行过爆破科研、设计、咨询与施工工作，积累了较多的工程爆破经验，尤其是在塑料导爆管起爆系统方面，具有丰富的实践经验。曾编写了这方面的培训材料，并将其毫无保留地传授给爆破技术人员。

数年前即开始本书的策划工作，收集整理了资料，结合本人承担及参与的工程爆破实践经验，与其他几位作者一起，完成了本书的编写工作。

在本书的撰写过程中，引用和参考了有关专著、论文的相关内容，书中未能一一注明，但均已列入参考文献中，在此，谨向文献资料的作者表示诚挚的谢意。

限于时间和水平，书中难免有疏漏之处，敬请读者斧正。

张正宇

2009年1月

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 导爆管起爆系统发展简况	1
1.1.1 导爆管雷管孔外接力起爆网路	1
1.1.2 导爆索孔外传爆网路	3
1.1.3 导爆管反射四通网路	4
1.2 导爆管起爆系统理论研究目的	4
1.3 导爆管起爆系统发展趋势	4
1.3.1 延期时间精确化	4
1.3.2 网路连接便捷化	5
1.3.3 网路形式多样化	5
第 2 章 导爆管及其传爆机理	7
2.1 导爆管结构和分类	7
2.1.1 导爆管结构	7
2.1.2 导爆管分类	11
2.2 导爆管性能	13
2.2.1 起爆感度	13
2.2.2 传爆速度	14
2.2.3 传爆性能	15
2.2.4 抗冲击性能	15
2.2.5 耐火性能	16
2.2.6 抗水性能	16
2.2.7 抗电性能	16
2.2.8 破坏性能	17
2.2.9 强度性能	17
2.2.10 抗老化性能	19
2.3 爆轰波及管道效应	19
2.3.1 爆轰波	19
2.3.2 管道效应	23
2.3.3 内管道效应与导爆管	24

2.4	导爆管起爆机理及起爆特性	25
2.4.1	导爆管起爆机理	25
2.4.2	导爆管的起爆特性	29
2.5	导爆管传爆机理及传爆特性	37
2.5.1	导爆管传爆机理	37
2.5.2	导爆管传爆特性	45
第3章	导爆管雷管	51
3.1	导爆管雷管结构	51
3.1.1	引火部件	51
3.1.2	延期部件	52
3.1.3	起爆部件	53
3.2	导爆管雷管分类	55
3.3	普通型导爆管雷管	57
3.4	高精度型导爆管雷管	58
3.4.1	Exel® 系列高精度导爆管雷管	58
3.4.2	通用的高精度导爆管延期雷管	60
3.5	高强度型导爆管雷管	61
3.6	导爆管雷管的技术要求	64
第4章	导爆管起爆系统和起爆网路形式	66
4.1	导爆管起爆系统的击发元件	66
4.2	导爆管起爆系统的传爆元件	66
4.3	导爆管起爆网路的基本形式	67
4.4	导爆管接力起爆网路	69
4.5	导爆管格式闭合网路	71
4.6	导爆索/电雷管—导爆管起爆网路	73
第5章	导爆管起爆系统理论	75
5.1	网路延时特性及处理	75
5.1.1	导爆管接力网路各传爆点的延时特性	75
5.1.2	多排多孔起爆网路各传爆点的延时分析	78
5.1.3	多排接力网路避免串、重段的处理措施	79
5.2	导爆管传爆的可靠度分析	80
5.2.1	导爆管线路内管道效应可靠度	80
5.2.2	导爆管接点外激发效应可靠度	81
5.2.3	导爆管线路受超前爆炸断路的可靠性分析	81
5.3	导爆管起爆网路可靠度计算方法	83
5.3.1	起爆器材的可靠度 (R_i)	83
5.3.2	非电起爆网路设计的可靠度 (R_d)	85

5.3.3	非电起爆网路施工工艺对设计可靠度的影响	105
5.3.4	其他因素对设计可靠度的影响	106
第6章	导爆管起爆系统设计与施工	107
6.1	导爆管起爆系统设计原则	107
6.2	导爆管起爆网路形式的确定	109
6.2.1	一般原则	109
6.2.2	深孔台阶爆破起爆网路形式及作用原理	109
6.3	导爆管起爆网路雷管段别选择	113
6.3.1	深孔台阶爆破合理间隔时间	113
6.3.2	深孔台阶爆破起爆网路雷管段别选择	114
6.4	导爆管起爆网路施工	115
第7章	导爆管起爆系统在钻孔爆破中的应用	117
7.1	导爆管起爆系统在露天深孔台阶爆破中的应用	117
7.1.1	简述	117
7.1.2	起爆技术	117
7.1.3	湖北省兴山县新县城珠包山深孔大爆破	118
7.1.4	重庆市开县开州大道路槽深孔控制爆破	121
7.1.5	溪洛渡水电站坝肩槽开挖爆破	126
7.2	导爆管起爆系统在地下岩硐开挖爆破中的应用	131
7.2.1	小浪底地下工程隧洞开挖爆破	131
7.2.2	拉西瓦水电站地下厂房开挖爆破	133
第8章	导爆管起爆系统在硐室爆破中的应用	136
8.1	硐室爆破简述	136
8.2	硐室爆破起爆网路设计	137
8.2.1	硐室延时爆破的起爆顺序	137
8.2.2	硐室爆破延时间隔时间	137
8.2.3	硐室延时爆破起爆网路形式选择	137
8.3	导爆管起爆系统在硐室爆破中的应用	138
8.3.1	盘石头水库上坝料场硐室爆破	138
8.3.2	紫坪铺料场主堆石料硐室爆破	141
第9章	导爆管起爆系统在围堰拆除爆破中的应用	145
9.1	围堰拆除爆破	145
9.1.1	围堰及岩坎爆破的设计原则	145
9.1.2	爆破安全设计	146
9.2	导爆管起爆系统在围堰拆除爆破中的应用	146
9.2.1	沙溪口水电站混凝土围堰爆破拆除	146
9.2.2	岩滩水电站碾压混凝土围堰爆破拆除	151

9.2.3	“2458”工程岩坎爆破拆除	156
9.2.4	东风水电站导流洞围堰拆除爆破	158
9.2.5	溪洛渡导流洞进出口围堰爆破拆除	161
第 10 章	导爆管起爆系统在城市拆除爆破中的应用	167
10.1	城市拆除爆破	167
10.2	导爆管起爆网路的形式与应用	167
10.2.1	孔内延期导爆管雷管—电雷管起爆网路	167
10.2.2	导爆管—导爆索起爆网路	168
10.2.3	导爆管接力式起爆网路	168
10.2.4	导爆管—四通起爆网路	169
参考文献		172

第 1 章 绪 论

塑料导爆管（以下简称导爆管）起爆系统是利用导爆管传爆、起爆特性，通过孔外不同的连接方式，实现孔内导爆管雷管按一定的顺序进行起爆的起爆网路。它源于瑞典诺贝尔炸药公司（Nitro Nobel Company）于 1973 年提出的非电起爆系统（Nonelectric Initiating System）。“非电”的含义包括如下内容：起爆导爆管不需用电；起爆系统不受电场干扰；导爆管传爆不是靠电流而是靠爆轰波等。我国于 1978 年研制导爆管成功，1979 年开始生产，很快便在冶金矿山、水利水电、铁道和交通等行业的各种爆破工程中得到广泛应用。为满足实际工程对雷管延期时间、精度、强度、耐高低温等使用条件的需要，各种品种、规格的导爆管也相继研制成功。为便于爆后检查，1991 年研制成功了起爆后具有变色特点的变色导爆管。为适应现场混装炸药车装药温度较高（一般为 72℃ 左右）、高寒地区温度低以及导爆管接触乳化炸药时间长的要求，在 20 世纪 90 年代，瑞典、加拿大相继研制成功了可耐 65℃ 高温的导爆管；1990 年英国 ICI 公司推出了“EXEL”单层导爆管，能在 -40~70℃ 的炮孔内使用；我国在 1991 年左右也研制成功了内层耐低温，外层耐高温、抗腐蚀的复合结构的耐高温高强度导爆管，试验资料表明，在 -42~85℃ 均能可靠起爆。与世界先进水平相比，我国生产的导爆管雷管在段间隔时间、延期时间精度等方面还存在一定的差距，如瑞典诺贝尔炸药公司在 20 世纪 80 年代生产了 30 个段别的等间隔毫秒导爆管雷管，其中 1~18 段的延时间隔为 25ms，19~24 段的延时间隔为 100ms，25~30 段的延时间隔为 150ms，且延期时间精度高、误差小；而当时我国生产的导爆管雷管段别少、延期精度低、误差大。但近 10 年来，我国加大了高精度导爆管雷管的研制力度，取得了可喜成果，等间隔、高精度雷管相继问世并投入生产。与导爆管雷管相适应的网路连接、起爆方法、起爆技术等也取得了长足的进步，导爆管起爆系统现已在各类爆破工程中得到广泛应用，并取得了丰硕成果。

1.1

导爆管起爆系统发展简况

根据引爆孔内导爆管雷管的孔外传爆方式，导爆管起爆网路可分为：导爆管雷管孔外接力起爆网路、导爆索孔外传爆网路、导爆管反射四通网路等。

1.1.1 导爆管雷管孔外接力起爆网路

导爆管雷管孔外接力起爆网路是通过不同间隔时间的孔外传爆雷管的连接，使每个炮孔能按爆破设计的延期时间顺序起爆，是一种准爆可靠性高、连接简捷、分段数不受雷管



段别限制、毫秒延时时间可以灵活选取的新型起爆网路。

20 世纪 60 年代以来,在我国水利水电工程快速开挖作业中,为满足开挖强度高,爆破对保留岩体影响小的要求,已经采用了毫秒延时爆破技术。从 1979 年开始,先后在葛洲坝水利枢纽、引滦工程、西洱河水电站、岩滩水电站、沙溪口水电站和东风水电站等诸多岩土开挖爆破工程中,成功地将导爆管雷管孔外接力起爆网路应用于露天梯段孔间、孔内毫秒延时爆破,大规模药室群毫秒延时控制爆破,隧洞掘进爆破,大型构筑物定向倾倒控制爆破等作业中,其发展过程可概括为:“点→线→面→立体”模式。

1. “点”模式

主要是在炮孔内装入不同段别的非电导爆管雷管进行毫秒延时爆破,或将其连接在相应的电雷管网路上,或者在孔内非电导爆管雷管与电雷管上串联另外的非电导爆管雷管组成“电—非电混合起爆网路”,以实施多段毫秒延时爆破。由于多个孔内的非电导爆管雷管之间采用串并联呈塔形汇集在电雷管上,故称其为“点”模式。

“点”模式反映在下列各实现的水利水电工程中。

(1) 1979 年后,在葛洲坝水利枢纽工程基坑开挖爆破中,采用 20~80 段的电—非电起爆网路,从而大大减少了爆破事故。

(2) 1984 年,沙溪口水电站厂房基础开挖采用 34 段的电—非电起爆网路一次破岩 3 万 m^3 。

(3) 1985 年,广州市内某城建工程中,采用电—非电起爆网路,一次成功地起爆 12000 余发雷管,创造了我国当时一次起爆雷管数量最多的最高纪录。

2. “线”模式

“线”模式系导爆管非电起爆网路系统应用拓展阶段。它充分地利用了非电导爆管雷管串联具有延时累加的特性,在呈直线状布置的炮孔中进行每个炮孔逐孔顺序毫秒延时爆破,从而避免了串、重段现象,提高了爆破效率。其代表性工程实例如:1986 年初在葛洲坝水利枢纽大江围堰混凝土心墙爆除中,全部采用了导爆管非电起爆网路,仅用了 3 个段别的雷管,将 47.78t 炸药分成 324 段,创造当时国内一次毫秒延时起爆段数的最高纪录。

3. “面”模式

“面”模式主要是将导爆管非电起爆网路全面、深入地进行试验研究,并推广应用于坝基等大区多排孔的毫秒延时爆破作业中。它表现在下列诸工程的研究应用中。

(1) 长江水利委员会长江科学院和设计院在系统总结分析上述“点”与“线”模式基础上,结合工程实际,组成专业试验组,在张正宇教授带领下,于 1985 年在岩滩水电站与广西水电工程局共同开展导爆管接力起爆系统的试验研究。同年完成接力起爆网路试验,并在深孔台阶多排多孔和手风钻孔台阶小间排距多排多孔爆破中应用,取得了优异成绩。该系统的研究成功,为水利水电行业大规模开挖深孔台阶爆破,加快施工进度、减小单段药量、降低爆破振动效应、减少保留岩体损坏打下了基础。

(2) 1986 年,葛洲坝工程大江围堰防渗墙爆破拆除,采用接力起爆网路,将 47.8t 炸药分为 324 段起爆,创下了当时全国一次爆破分段最高纪录。

(3) 1987 年,长江科学院与铁道科学研究院一道,采用非电双孔孔间毫秒延时爆破

技术于郑州铝厂黄河提水泵房附近 3~15m 区段,将四排炮孔中的 3t 炸药分成 64 段爆破,顺利地炸掉了堤埂,确保了泵站的安全。这次爆破,首次明确提出“孔内装高段别雷管、孔外装低段别雷管”这一经典概念与措施。

(4) 1987 年,在山西禹口提水工程的公路开挖爆破中,采用非电起爆网路实施毫秒延时爆破多次,成功地进行了小间排距的深孔爆破与手风钻孔组成的台阶多段毫秒延时爆破。

(5) 1987~1998 年,长江科学院与长江水利委员会设计院结合国家“七五”攻关课题“坝基开挖爆破技术”,进一步完善接力起爆系统。全面分析了国内采用导爆管网路中发生拒爆的原因,并对接力起爆系统的可靠度和延时特性加以研究,给出接力起爆网路事故树,并且为确保网路安全可靠,考虑物的不安全状态与人的不安全行为两方面,采用适当措施确保接力起爆系统的安全可靠。在此概念基础上,研究了接力起爆系统的设计可靠度和网路敷设工艺对可靠度的影响,提出可靠度计算方法和相应计算公式,编制了导爆管接力起爆网路操作细则。为保证接力起爆系统的更加安全准爆,对起爆网路的延时特性进行分析,建立网路中实施搭接的计算方法,提高了网路的安全性。从 20 世纪 80 年代中期开始,大、中型水电站已普遍使用导爆管起爆系统。至 90 年代,该系统已在水利水电系统全面推广,并成为各种开挖爆破最主要的起爆方法。

(6) 1994 年 12 月,在胶州湾高速公路路堑开挖爆破中,为使 203 排、3080 个炮孔、73.8t 炸药一次爆破,长江水利委员会设计院和中铁三局采用了导爆管接力起爆网路,分 594 段,延期时间长达 4770ms,成功实现了长 470m、深 10m、爆破方量 11.5 万 m^3 的路堑一次爆破成型。

(7) 1999 年 6 月 8 日,在四川省开县新县城开州大道路槽开挖爆破中,长江科学院和葛洲坝工程局采用导爆管接力起爆网路,实现孔间、孔内毫秒延期爆破,最高分段数达 786 段,创造了当时国内一次爆破分段数的最高纪录。

4. “立体”模式

“立体”模式系导爆管非电起爆网路系统“面”模式应用的进一步发展,由二维“面”模式发展为三维“立体”模式。如在多层多排硐室爆破导爆管起爆网路中,每一层多排药室导爆管起爆网路属“面”模式二维网路,将各层起爆网路连接起来后,即形成三维立体起爆网路。

1.1.2 导爆索孔外传爆网路

导爆索孔外传爆网路是将孔内导爆管连接到导爆索上,利用孔内导爆管雷管不同段别的延期时间,实现孔内毫秒延时爆破。如孔内装同一段别的导爆管雷管,在导爆索上用不同段别的雷管引爆,也可实现孔外毫秒延时爆破;如孔内装不同段别的导爆管雷管,孔外也用不同段别的雷管引爆导爆索,即可组成孔内、孔外导爆索—导爆管雷管毫秒延时爆破起爆网路。该形式的起爆网路简单,连接方便;但在进行大区爆破时,普遍存在同段起爆药量大、引起的爆破振动和空气冲击波较大、爆破块度不均匀、大块率高等缺陷。



1.1.3 导爆管反射四通网路

导爆管反射四通起爆系统由导爆管、塑料反射四通接头和导爆管雷管组成。反射四通接头的特性使导爆管的连接具有任意性,即数量上和连接部位的任意性。通过增加通道的数量和采用复式来加强起爆系统的可靠性。利用导爆管和反射四通接头,按一定设计规则、连接技巧,可将整个网路连接成多种形式的闭合网路。

导爆管四通起爆网路具有以下特点:

(1) 整个网路可形成网状多通道,传爆方向可四通八达,个别组合雷管或局部导爆管缺陷不影响整个网路的准爆性。

(2) 对于每个起爆雷管,至少保证有两个方向传递爆轰波,可以起双保险作用。

(3) 网路中只要有一个点被击发,即可引爆整个网路。

(4) 网路连接简单、检查方便。

(5) 起爆雷管不受限制,可以包封闭网路无限扩展。

(6) 起爆网路防水性能较差。

导爆管四通起爆网路被广泛应用在城市拆除爆破中,也用在矿山开采等爆破中。



1.2 导爆管起爆系统理论研究目的

导爆管起爆系统的理论研究分为:导爆管起爆、传爆机理研究、导爆管雷管研究以及起爆网路可靠度研究等方面。其中导爆管起爆、传爆机理研究前人已做了大量科研工作,对其传爆、起爆特性等已了解得比较深入,根据这些理论成果已研制成功了普通导爆管、高强度导爆管、耐温抗腐蚀导爆管等。目前我国在导爆管雷管研究方面与世界先进水平相比还存在一定的差距,主要表现在雷管的延时精度上,虽然高精度雷管在理论上已能做到,并且国内已有等间隔、高精度雷管通过鉴定,有的还投入了生产,但要达到先进国家的水平,在生产工艺等方面却往往表现的力不从心。导爆管起爆网路可靠度实际上是建立在雷管可能存在一定的缺陷以及雷管延时存在误差的前提下开展的研究工作,主要目的是怎样提高起爆准爆率、减少雷管延时误差带来的影响。



1.3 导爆管起爆系统发展趋势

1.3.1 延期时间精确化

逐孔起爆技术在国外矿山中已经较为成熟,其技术核心是单孔延时起爆,依靠高精度导爆管的精确延时,利用孔内雷管和地表雷管的合理延期时间组合,使每个炮孔从起爆点开始,在空间和时间上均按照设计起爆顺序单独起爆。这也是作者所研究的导爆管接力起爆网路的核心思想,只不过当时的研究是建立在国产导爆管的品种、规格基础上,并充分

考虑了各段雷管的延期时间、误差及起爆可靠性等，是适合当时国情的逐孔（逐段）起爆技术。

根据爆破作用原理，炮孔自由面的增加有利于提高炮孔内炸药爆炸能量的利用率。利用逐孔起爆技术，每个炮孔起爆时，至少有前方、侧向和上方 3 个相对临空面；同时合理的孔间、排间时差，可增加相邻孔岩石在空中的碰撞和挤压，改善爆破块度；应力波在临空面上的反射拉伸作用和相邻孔爆炸应力波的叠加作用，大大提高了爆炸能量的利用率，极大改善了岩石爆破破碎效果。

近年来，国外研究机构在大量试验基础上，提出了单位孔间延期时间和单位排间延期时间的概念，认为当同排孔间最佳延期时间为 $3\sim 8\text{ms/m}$ 、排间最佳延期时间为 $8\sim 15\text{ms/m}$ 内选择时，可以达到最佳爆破效果。根据爆区岩石性质，在充分考虑起爆网路安全的前提下，选择高精度的孔外传爆雷管和孔内起爆雷管组成导爆管起爆网路，已是导爆管起爆系统的发展趋势。

1.3.2 网路连接便捷化

在以往的导爆管起爆网路连接中，一般采用胶布绑扎的方法，该方法绑扎劳动强度大、花费时间长，传爆雷管采用普通 8 号导爆管雷管，爆炸威力大，且需要一定的绑扎技巧和防护方法才能保证传爆节点的安全可靠。

澳瑞凯（威海）爆破器材有限公司生产的高精度导爆管雷管，将地表传爆雷管与孔内起爆雷管分开。地表传爆雷管自带不同颜色的连接块，规格有：9ms（绿色）、17ms（黄色）、25ms（红色）、42ms（白色）、65ms（蓝色）、100ms（黑色），便于区分和检查。利用地表传爆雷管进行连接，只需把导爆管卡在连接块上即可，由于传爆雷管采用 6 号雷管，其威力相对 8 号雷管要低，雷管起爆后连接块基本完整，只是正对雷管底部的部分被炸开，因而不会对其他传爆网路产生破坏影响。利用地表传爆雷管自带连接块进行网路连接，方便、快捷、可靠，大大降低了劳动强度，节约了联网时间。

目前，云南燃料一厂也研制成功了自带连接块的地表传爆雷管的高精度导爆管，并在云南糯扎渡水电站 3 号导流洞围堰拆除爆破中得到成功应用。

在导爆索引爆导爆管的网路连接中，以往也是采用胶布等绑扎连接，且导爆索为能起爆炸药的普通导爆索，其连接可靠性相对较低，导爆索的爆炸能量也很容易将导爆管破坏。现已有专门用于将导爆管连接到导爆索上的“T”塑料卡问世，这大大降低了连接劳动强度，且连接后的导爆管与导爆索呈垂直状态，大大增加了传爆可靠性。如传爆导爆索采用低能导爆索，则导爆索引爆导爆管的网路安全性将更高。

1.3.3 网路形式多样化

导爆管起爆网路由于分段灵活，连接方便，起爆网路形式也变化多端，呈多样化的趋势。根据工程实际情况，如分段数不是很多，可直接利用导爆管雷管不同段别的延期时间直接进行孔内分段；如爆破单段药量控制严格、分段数较多，则可采用导爆管接力起爆网



路；为增加网路的可靠度，还采用复式导爆管接力起爆网路等。在重要的爆破工程中，如围堰拆除爆破中，由于拆除条件苛刻，安全控制标准严格，爆破效果要求高，往往采用高精度导爆管接力起爆网路。在城市拆除爆破中，毫秒延时、秒延时接力起爆网路，导爆索—导爆管起爆网路以及导爆管复式闭合四通起爆网路也经常采用。导爆管复式闭合分系统串联网路、互动有序起爆网路等也在实际工程中得到成功应用。

第 2 章 导爆管及其传爆机理

导爆管是塑料导爆管的简称，又称“非电导爆管”，是 20 世纪 70 年代发展起来的一种新型起爆器材，源于瑞典。我国于 1978 年成功研发了导爆管，并于 1981 年研究制定了导爆管的技术条件；1991 年发布了标准 WJ 2019—1991《塑料导爆管》；2004 年又修订并发布了标准 WJ/T 2019—2004《塑料导爆管》。导爆管从其成功研发到标准制定，以及在工程爆破等领域迅速而广泛的应用，均取得了长足的进步，但由于材料与应用、理论等方面的原因，我国导爆管方面的技术水平与世界先进水平相比，仍然存在一定差距，表现在导爆管的抗拉性能、传爆可靠性等诸方面尚不及欧美等发达国家的同类产品，且在导爆管及雷管性能测定的标准上，我国也不如欧盟相应标准（EN 13763.1~27—2000~2004 Explosives for civil uses [s] European Committee for standardization）系统与完善。

导爆管可由各种雷管、导爆索、击发笔、专用激发枪及引火头等引发，并在管内形成一种特殊的爆轰，其爆轰波以恒定速度传播。但导爆管只能引爆雷管而不能引爆炸药。在工程爆破中，其作用是传递低速爆轰波、输出冲击波（火焰）冲能，直接引爆雷管，进而引爆炸药（工业炸药）。

导爆管的传爆是一种波动现象，爆轰波在导爆管内传播，会产生管道效应及内管道效应，下面对于这些现象以及导爆管的起爆、传爆机理和特性作简要介绍。



2.1 导爆管结构和分类

2.1.1 导爆管结构

导爆管是一种内壁涂有薄层高能混合炸药粉末的塑料软管，管壁材料为高压聚乙烯等塑料，通过挤塑成型，导爆管结构如图 2.1 所示。不同类型的导爆管管体所用的塑料品种、颜色也不完全相同。

导爆管外径为 $2.95\text{mm} \pm 0.15\text{mm}$ ，内径为 $1.4\text{mm} \pm 0.1\text{mm}$ 。混合炸药粉末主要成分为：91% 的奥克托今（HMX）或黑索金（RDX）、9% 的铝粉。导爆管内的装药量一般为 $14 \sim 16\text{mg/m}$ 。

1. 导爆管管体材料

塑料管既是导爆管的外壳，又是导爆药涂敷的载体，还是导爆药形成低速爆轰的条件与传播低速爆轰波的媒介。导爆管管体起到保护管内导爆药和黏附导爆药的作用，故作为导爆管的塑料管材必须满足如下要求。

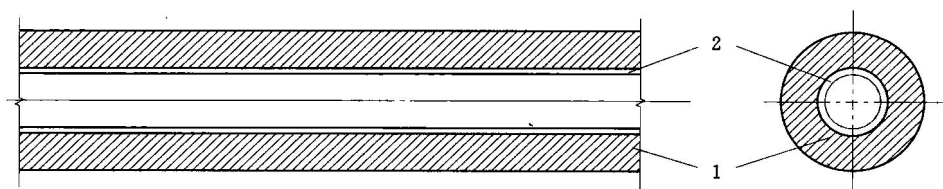


图 2.1 导爆管结构

1—高压聚乙烯塑料管；2—炸药粉末（导爆药）

(1) 具有较高的抗张强度，如对爆速为 1950m/s 的普通导爆管，要求其径向抗张强度应大于 13.7MPa，轴向屈服力应不小于 15.7MPa，以保证导爆管的抗拉性能与传爆性能。

(2) 具有适当的柔韧性，以便联网使用。

(3) 具有一定的刚度，以使导爆管具有良好的外形。

(4) 与导爆药之间具有附着能力，以便导爆药黏附。

(5) 具有良好的热加工性能与热稳定性，即要求塑料是热塑性的，且在热加工时具有良好的流动性，冷却定型后不脆裂。

(6) 加工温度适宜，考虑到热加工中猛炸药的安全，热加工成型温度不应超过 200℃。

(7) 理化安定性好，不与导爆药发生化学反应，不易老化降解。

(8) 具有良好的光学性能，以便实施光学检验。

普通导爆管的管体材料为高压聚乙烯。高强度导爆管的管体内层材料为高压聚乙烯、外层为混合材料的复合结构。以高压聚乙烯为主的内层结构柔软性好，混合炸药粉末涂敷均匀，但由于高压聚乙烯抗拉强度低，并随温度的升高而降低，且耐热性差，所以作为高强度导爆管需在高压聚乙烯内管外包裹耐温隔热层。高强度导爆管外层以高压聚乙烯、聚丙烯为主料，添加抗冻剂、防老化剂、抗静电剂、相溶剂等制成混合材料。外层管的作用：一是保护和加强内层管传爆性能的稳定；二是加强导爆管的抗冻、耐热、耐酸碱性能，使其抗拉强度增大、伸长率降低。

高压聚乙烯又称低密度聚乙烯，是含有支链（分子中的侧基）的半结晶态高分子聚合物。结构上的这个特点使得高压聚乙烯兼有无定型高聚物和结晶高聚物两种特性。高压聚乙烯分子中含有一定数量的支链，这使得高压聚乙烯有反映主链段运动和支链段运动特点的两个玻璃化温度：高玻璃化温度 $T_g(U)$ 和低玻璃化温度 $T_g(L)$ 。不同品种的高压聚乙烯玻璃化温度是不一样的。作为导爆管管材的高压聚乙烯玻璃化温度为：

$$T_g(U) = 253K$$

$$T_g(L) = 206K$$

$T_g(U)$ 与高压聚乙烯分子支化程度和运动状态有关， $T_g(L)$ 则与分子量大小和主链段运动有关。材料处于高于或低于玻璃化温度的环境时，聚合物分子链段运动情况是不一样的，在聚合物材料的力学和其他性能上也就有明显的差异。一般认为，环境温度 $T < T_g(L)$ 时，分子处于“冻结”状态。这时，除了分子中的原子能在自身位置振动外，主

链段和支链段均不易旋转和位移,材料处于玻璃态,材料较硬,弹性模量大,受外力作用不易变形。环境温度介于 $T_g(L)$ 和 $T_g(U)$ 之间时,分子中主链段可作“曲柄”运动,支链仍然“冻结”。这时材料的弹性模量和硬度都比玻璃态时减小,柔顺性略有增加,但材料受外力作用后变形仍不容易。环境温度高于 $T_g(U)$ 而小于黏流温度时,分子的主链段和支链段均可运动,而且环境温度愈接近熔点,材料分子的结晶度愈小。这时材料的弹性模量小,可塑性加大,材料受外力作用后容易变形。

高分子材料受外力作用后,分子中的构象要随之改变。分子构象改变需要一定的时间,如果外力作用时间较长,分子构象来得及进行改变以相适应,这时的材料力学性能就完全同静态时一样;如果外力作用时间很短(称力作用频率很高),分子构象来不及改变,这时就相当于材料在较低温度时的状态。因此,材料的玻璃化温度与外力作用时间(力作用频率)有关。外力作用频率增加,材料的玻璃化温度会相应增高。

L. E. 尼尔生 (L. E. Nielsen) 和 D. W. 范克雷维伦 (D. W. Van Krevelen) 研究结果表明:高分子材料玻璃化温度随外力作用频率的提高而增加。尼尔生还给出了玻璃化温度变化的一般规律:

- (1) 外力作用频率为 1Hz 时,材料的 T_g 比膨胀法和差热法测得的 T_g 高 5~15℃;
- (2) 多数高分子受外力作用的频率提高一个数量级,材料的玻璃化温度升高 7℃。

2. 导爆管管体尺寸

导爆管尺寸主要是指管体内、外径。普通导爆管外径为 3mm,内径为 1.4mm,导爆管壁厚为 0.8mm;双层复合结构的高强度导爆管:外管外径 3.0mm±0.1mm,内管外径 2.1mm±0.5mm,内管内径 1.4mm±0.1mm,导爆管壁厚为 0.8mm。导爆管管体尺寸主要根据管壁能承受的爆轰波压力及雷管装配的尺寸要求来确定。

导爆管传爆时,管腔内将产生一定强度的爆轰波压力,导爆管相当于无限长厚壁圆筒,根据管壁能承受爆轰波压力来确定管壁厚度,其强度计算公式为:

$$[\sigma_t]_{\max} = \frac{D^2 + d^2}{D^2 - d^2} P \quad (2.1)$$

式中: $[\sigma_t]_{\max}$ 为最大切向应力, MPa; D 为导爆管外径, mm; d 为导爆管内径, mm; P 为导爆管内最大工作压力, MPa。

将导爆管管材的允许使用应力 $[\sigma]$ 代入后得:

$$\frac{D}{d} \geq \sqrt{\frac{[\sigma] + P}{[\sigma] - P}} \quad (2.2)$$

取普通导爆管的允许使用应力 $[\sigma] = 8.34 \text{ MPa}$ (高压聚乙烯熔融指数 $M. I. = 2.0$, $M. I.$ 较小时允许使用应力较高),导爆管腔内压力取 $P = 4.12 \text{ MPa}$,代入式 (2.2) 算得 D/d 。计算结果表明:只有当导爆管外内径之比大于 1.72,才能保证导爆管 ($M. I. = 2.0$ 的高压聚乙烯材料) 传爆时管壁不破坏。综合考虑导爆管的原材料、生产工艺、加工水平等各方面的因素,导爆管设计时要求 $D/d \geq 2$ 。

导爆管与雷管组合时,需要采用外径与雷管口径一致、内径与导爆管外径匹配的卡口塞。为保证组合件连接牢固和卡口塞生产的可行性,导爆管不能设计得太粗;同时要使导爆管管口泄出能的大小合适,保证雷管点火、组合件工作的可靠,导爆管又不能设计得太