

新编**采矿**
实用技术丛书

主 编 唐敏康
副主编 杜 效 张春雷

矿山 工程爆破

邓 飞 何锦龙 赖卫东 编著

KUANGSHAN GONGCHENG BAOPU



化学工业出版社

新编 采矿
实用技术丛书

主 编 唐敏康
副主编 杜 效 张春雷

矿山 工程爆破

邓 飞 何锦龙 赖卫东 编著



化学工业出版社

· 北京 ·

本书从工程应用的角度出发，注重工程爆破现场的操作使用，主要介绍了矿山工程爆破常用爆破器材、起爆方法、浅孔爆破、深孔爆破、井巷掘进爆破、矿山控制爆破和爆破安全技术等，并列举了在爆破施工中出现的安全案例，同时也适当介绍了工程爆破的发展趋势与理论知识。

本书适合矿山采矿一线技术人员和安全监管人员参考，也可作为大中专院校采矿工程、资源工程、交通工程等相关专业的教材。

图书在版编目 (CIP) 数据

矿山工程爆破/邓飞，何锦龙，赖卫东编著．—北京：
化学工业出版社，2013. 3
（新编采矿实用技术丛书）
ISBN 978-7-122-16570-1

I. ①矿… II. ①邓…②何…③赖… III. ①矿山开
采-爆破技术 IV. ①TD235. 4

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2013）第 030096 号

责任编辑：刘丽宏
责任校对：宋 夏

文字编辑：向 东
装帧设计：刘丽华

出版发行：化学工业出版社（北京市东城区青年湖南街 13 号 邮政编码 100011）
印 装：北京云浩印刷有限责任公司
710mm×1000mm 1/16 印张 9 字数 166 千字 2013 年 5 月北京第 1 版第 1 次印刷

购书咨询：010-64518888（传真：010-64519686） 售后服务：010-64518899
网 址：http://www.cip.com.cn
凡购买本书，如有缺损质量问题，本社销售中心负责调换。

定 价：48.00 元 版权所有 违者必究

丛书前言

20 世纪以来，矿产资源被人类持续、大规模、掠夺性地开发，资源枯竭与社会需求的矛盾日显突出。如何保持矿产资源的可持续发展和利用已成为国家层面上的重要课题，而作为矿业工作者，我们的责任就在于如何更科学、合理、高效地开展矿业。

采矿工业是一种最基础的原材料工业，在人类现代文明的进程中，采矿业是最早兴起的工业之一。采矿工程是一个庞大而且复杂的系统工程，牵涉面很广，综合性很强。除采矿方法本身以外，它由开拓、运输提升、供电、排水、充填、供气、供水和通风系统等 8 大系统构成，缺一不可。采矿生产是从地壳中将可利用物质开采出来的行为、过程或作业，直接为矿物加工工程提供矿石，然后成为能源、冶金、化工、建材等行业的原料。而要完成这样一种工程行为，劳动者和管理者必须对采矿工艺流程和支撑采矿工程的相关专业知识有足够的了解和掌握。

《新编采矿实用技术丛书》（下简称《丛书》）是在原《采矿实用技术丛书》的基础上重新编著的。《丛书》根据我国矿山企业生产的发展特点和实际需求进行改编，增加了采矿生产技术的最新研究成果，并新增了矿山法律法规解读和矿山数字化方面的内容。全书共有 11 个分册，即《矿床地下开采》、《矿床露天开采》、《矿山地压测试技术》、《井巷工程》、《矿山工程爆破》、《矿井运输与提升》、《矿井通风与防尘》、《矿山安全工程》、《矿山工程机械》、《计算机在矿业中的应用》和《矿山安全生产法规读本》。

《丛书》结合矿山生产实际，强调实用性与可操作性。从采矿的基础知识入手，深入浅出，图文并茂，通俗易懂，可读性强。《丛书》分册作者具有多年的教学和科研实践经验，从而使图书的内容更符合矿山技术人员的需求，也为生产管理人员提供了有益的借鉴。

《丛书》适合矿山采矿工程技术人员、劳动者、矿山企业领导、技术和安全生产管理人员阅读，也可作为矿山企业采矿工程的培训教材。同时，也可选作矿业类大专院校相关专业教材或教学参考书。

编者

前言

工程爆破是矿山生产过程中一个重要的技术环节。尽管目前我国矿山爆破器材质量和爆破技术水平有了长足的进步，但受从业人员素质参差不齐等因素的影响，爆破作业事故仍时有发生，给国家和人民群众的生命、财产带来重大损失。

为了适应我国的安全生产形势，预防和减少爆破事故的发生，保障爆破作业的安全，爆破作业人员需要全面学习和掌握爆破作业技术和安全知识。为此，我们编写了本书。

《矿山工程爆破》是《新编采矿实用技术丛书》的一种。

本书从应用角度出发，全面介绍了矿山工程爆破相关的技术和安全知识，主要包括矿山常用爆破器材、起爆方法、各种矿山爆破设计计算原理、施工技术和爆破安全技术。力求内容丰富，简明实用，通俗易懂，充分满足矿山爆破技术人员、生产管理人员以及相关专业师生的需要。

由于编者水平所限，书中难免存在不妥之处，恳请广大读者批评指正。

编著者

目录

第1章	1
概论	
1.1 工程爆破的作用	1
1.2 工程爆破的特点	2
1.3 工程爆破展望	3
1.3.1 加强爆破理论研究	3
1.3.2 计算机技术在工程爆破中的应用	3
1.3.3 研制新型爆破器材	3
1.3.4 发展爆破安全技术	3
1.4 爆破漏斗及药包计算原理	4
1.4.1 药包爆破作用原理	4
1.4.2 装药量的计算方法	6
第2章	8
常用爆破器材	
2.1 工业炸药及性能简介	8
2.1.1 炸药的基本性能	9
2.1.2 常用工业炸药的性能	10
2.2 静态破碎剂及非爆破破岩	16
2.2.1 静态破碎剂的种类与主要成分	17
2.2.2 非爆破破岩	18
2.3 聚能药包	21
2.3.1 聚能原理	22
2.3.2 聚能药包的结构与形式	22
2.3.3 聚能药包的应用	23
2.4 炸药爆炸性能的现场测定方法	24
2.4.1 爆力	24
2.4.2 猛度	25

2.4.3 爆速 26

2.4.4 爆轰感度 26

2.5 起爆器材 27

2.5.1 电雷管 27

2.5.2 导爆管雷管 32

2.5.3 导爆管 34

2.5.4 导爆管击发系统 34

2.5.5 导爆索 35

2.6 爆破仪表 36

2.6.1 电爆网路检测用仪表 36

2.6.2 电力起爆器 38

第3章
起爆方法

41

3.1 电雷管起爆法 41

3.1.1 电爆网路的连接 41

3.1.2 电雷管起爆法评价 44

3.1.3 电雷管起爆法的操作要点 44

3.2 导爆索起爆法 45

3.2.1 导爆索的连接方法 45

3.2.2 导爆索起爆网路 46

3.2.3 导爆索起爆法评价 46

3.3 导爆管起爆法 48

3.3.1 导爆管起爆网路组成 48

3.3.2 导爆管爆破网路的基本形式 49

3.3.3 导爆管起爆网路评价 50

3.3.4 导爆管爆破网路敷设要点 50

第4章
浅孔爆破

52

4.1 浅孔凿岩机具 52

4.2 炮孔布置及药量计算 55

4.2.1 零星孤石的浅孔爆破 55

4.2.2	拉槽形式的浅孔爆破	56
4.2.3	浅孔台阶爆破	56
4.2.4	井下浅孔落矿爆破	57
4.3	施工技术	58
4.3.1	钻孔	59
4.3.2	装药	59
4.3.3	填塞	60
4.3.4	网路连接	60
4.3.5	警戒和起爆	61

第5章

深孔爆破

63

5.1	深孔钻孔设备	63
5.2	深孔爆破参数设计计算	67
5.2.1	露天台阶深孔爆破	67
5.2.2	扇形深孔爆破	70
5.2.3	VCR 法深孔爆破	73
5.3	施工技术	75
5.3.1	布孔操作和孔位选择	75
5.3.2	钻孔检查及钻孔排水	76
5.3.3	装药和填塞	77
5.3.4	潜孔钻机的使用和操作技术	81

第6章

井巷掘进爆破

85

6.1	掏槽方式	86
6.2	爆破参数	91
6.2.1	周边眼和辅助眼	91
6.2.2	炮眼数量、深度和装药量	91
6.3	施工技术	93
6.3.1	钻孔作业	94
6.3.2	装药填塞	94
6.3.3	起爆	95

6.3.4 爆后检查	96
------------------	----

第7章 矿山控制爆破	98
-----------------------------	-----------

7.1 微差爆破	98
7.1.1 微差爆破微差时间选择	98
7.1.2 微差爆破的起爆网路	99
7.2 预裂爆破	104
7.3 光面爆破	105
7.4 光面和预裂爆破的施工	106
7.4.1 钻孔	106
7.4.2 装药	107
7.4.3 起爆网路	107

第8章 爆破安全技术	109
-----------------------------	------------

8.1 爆破材料的贮存和保管	109
8.1.1 爆破器材库安全允许距离	109
8.1.2 爆破器材的贮存、收发与库房管理	112
8.2 爆破的有害效应及安全距离确定	113
8.2.1 爆破地震	113
8.2.2 空气冲击波	116
8.2.3 飞石	119
8.2.4 爆破噪声	121
8.2.5 爆破毒气	122
8.3 爆破施工中的安全问题	123
8.3.1 早爆	123
8.3.2 迟爆	125
8.3.3 盲炮	125
8.4 案例分析	127
8.4.1 早爆事故	127
8.4.2 迟爆事故	128
8.4.3 盲炮事故	129

8.4.4 有毒气体事故 129

8.4.5 药库爆炸事故 130

8.4.6 飞石事故 130

8.4.7 空气冲击波事故 131

8.4.8 地震波事故 131

第1章

概 论

1.1 工程爆破的作用

黑火药是我国对人类文明做出重大贡献的四大发明之一，早在公元 803 年的唐代就出现了比较完整的黑火药配方。由于火药能够在瞬时爆发出巨大的能量，所以在军事上、生产上都有重要的使用价值。在人类社会文明的发展过程中，人们对火药的研究制造和使用一直没有间断过。到 13 世纪末，黑火药已经流传到欧洲，作为军事上和生产上使用的炸药。后来，随着欧洲资产阶级产业革命的兴起，由于化学工业的发展，19 世纪中叶瑞典人诺贝尔先后发明了硝酸甘油炸药、雷管和硝化棉《纤维素硝酸酯》炸药，从而使火工器材的品种、安全性能和经济指标等方面发展到了一个新领域。另一方面，资本主义的兴起促进了生产的发展，人类开始大规模地改造自然，如铁路的兴建、海运的发展以及新兴城镇的建设、矿山的开发、公路的兴建等，使土岩工程量激增，因而在机械化程度很低的年代里，爆破施工起了极其重要的作用。20 世纪以来，装药量在几吨至一万多吨的药室爆破，在矿山、铁路、公路建设中得到了广泛的应用。同时，大口径钻机和重型运输、装载机械在工程中的使用及深孔爆破施工的发展，对提高露天矿山基建速度、矿山生产能力起了极为重要的作用。

我国工程爆破技术的发展与国家经济建设的发展和需要密不可分。新中国成立初期，国家为了恢复经济、发展生产，重点抓了铁路、交通、矿山和水利工程设施的修复与建设工作。爆破技术在成渝铁路施工、大批矿山复产与开工以及治淮工程和荆江分洪水利工程建设中发挥了巨大作用。

在矿山建设和生产中，爆破是破碎矿岩的主要手段。我国年产煤量已达 25 亿吨，铁矿石年产量在 8 亿吨以上，石灰石年产量已超 16.5 亿吨。这些矿石都是以爆破方法开采的。

在新中国成立后的 60 多年中，矿山企业是国内采用药室大爆破最多的部门之

一。例如,1956年在甘肃省白银厂铜矿采用大抵抗线集中药包实施万吨级的爆破剥离任务;1971年,四川渡口市朱家包包铁矿露天大爆破是继白银厂大爆破后又一次达到世界先进水平的万吨级大爆破,总装药量10162.22t,爆破量1140万立方米。药室大爆破在露天矿山的基建剥离中应用较为普遍。硐室爆破的应用范围与规模不断扩大,规模最大的广东珠海移山填海爆破工程,炸药总装量近1.2万吨,一次的爆破量达1085万立方米。

光面爆破技术已在矿山井巷掘进中得到了广泛推广和应用,对保护井巷围岩和降低井巷维护成本发挥了重要作用;预裂爆破在露天矿山边坡爆破中的应用对边坡的稳定有着重要作用,增大了露天矿山边坡角从而降低了开采成本。深孔微差爆破在露天和地下矿山的应用使矿山生产能力得到了极大地提高。

总之,矿山工程爆破技术在矿山工程建设和生产中起了很大的作用并得到了迅速的发展。

1.2 工程爆破的特点

矿山工程爆破是利用炸药爆炸产生的巨大能量作为施工手段,为矿山工程服务的一种技术。炸药是易燃易爆物品,在特定的条件下,其性能是稳定的,贮存、运输和使用都是安全的,但如果贮存、运输和使用不当或意外爆炸则将会给人们带来灾害。因此,工程爆破的最基本特点是对安全的高度重视。据统计:在我国企业职工伤亡事故中,各类爆炸事故造成的伤亡占伤亡总数的40%以上。为此,有关部门制定了《中华人民共和国民用爆炸物品安全管理条例》、《爆破安全规程》(GB 6722—2003)、《爆破作业人员安全技术考核标准》,这些爆破行政条例、法规和技术标准是每一位爆破工作者必须掌握、遵守和执行的。

工程爆破的另一个特点是对爆破作业人员的素质要求较高。在爆破事故统计分析中发现,造成爆破事故的主要原因是人为因素,而人为因素造成的爆破事故的主要原因是爆破作业人员素质差、安全意识差和违章作业。因此,所有爆破从业人员都应参加公安部门组织的安全技术培训和考核,持证上岗,每个爆破人员都应明确自己的职责和权限。

实践性强是工程爆破的又一特点。矿山工程爆破中爆破的介质(对象)是岩体,而岩体是多种多样的,即使是同一个矿山,不同地点的岩石也不一样,其爆破参数的选取也应改变。矿山工程爆破中,不同的采掘工程其爆破要求和控制目的不一,在爆破设计、施工中需要考虑的重点也不一样。在矿山爆破设计、施工过程中涉及的因素很多,各因素之间又相互联系并构成错综复杂的关系,因此,需将爆破理论知识、爆破实践经验结合具体情况进行综合分析,精心设计、施工才能达到理

想的爆破效果。

1.3 工程爆破展望

目前,工程爆破的现状是爆破理论落后于实践,在实践中经验很重要,不少情况下是凭经验进行设计和施工,要改变这种状况,还需时日。但可以预计,工程爆破将在以下几个方面产生突破并具有非常好的发展前景。

1.3.1 加强爆破理论研究

随着工程爆破技术和相关科学的发展,爆破理论的研究也有了长足的进展,人们对爆破破岩机理的理解也在逐步深化,有望在不久的将来爆破装药量的计算不再是以经验或半经验公式为主,而是通过炸药爆炸后其能量利用规律和爆破破岩的机理推导出科学的计算公式,并可预估出爆破后的效果。

1.3.2 计算机技术在工程爆破中的应用

随着爆破理论研究的进步和计算机技术的发展,建立通用的爆破数学模型,研发智能型的爆破专家系统,使爆破专家系统具有爆破方案选择优化、自动输出爆破设计图纸和说明书、预测爆破效果功能并通过三维动画显示爆破过程和最终结果。

1.3.3 研制新型爆破器材

爆破技术的改进需要新品种的爆破器材来支持,同时,新的爆破器材的出现又推动爆破技术的进步,如导爆管微差雷管的出现,使大规模的多排微差爆破得以实现。就炸药而言,要发展和完善安全型、环保型的炸药品种,且品种多样化以适应不同爆破对象和爆破环境,如高含硫矿山的专用炸药、井巷光面爆破的专用品种。在起爆器材方面,要研发起爆可靠性高和安全性好的器材,如无起爆药雷管、电子雷管、遥控起爆系统等。

1.3.4 发展爆破安全技术

爆破安全技术包括爆破施工作业中的安全问题和爆破对周围建构物与环境安全的影响两部分。前者主要是爆破器材性能、操作和使用条件以及起爆技术等安全性问题;后者也就是爆破的危害效应问题,主要是与爆破方式、爆破参数和设计方案、安全控制标准有关的技术问题。爆破安全技术的发展就要从上述两个方面入手,实现工程爆破的本质安全,使工程爆破不再是高危行业。

1.4 爆破漏斗及药包计算原理

1.4.1 药包爆破作用原理

炸药受到摩擦、冲击、燃烧等外界作用后，在瞬间会产生剧烈的化学物理变化，产生高温高压气体并释放出巨大的能量及产生强大的冲击波（快速的化学反应、释放能量、产生气体，称为炸药爆炸三要素）。这个能量快速释放过程称为爆炸。

炸药爆炸释放的能量，对岩体介质的破坏作用是很复杂的。目前，爆破理论还没有办法将整个爆破过程解释清楚。但是分析研究的结果表明，炸药在岩体介质中爆炸后，首先产生强大的压力波，在介质内部传播，当压力波传到介质的自由面时，便产生反射的拉力波，由于岩石的抗拉强度只有抗压强度的 $1/10$ 左右，这个拉力波使土岩结构遭到破坏，而破碎的岩块受到爆炸产生的高温高压气体的膨胀作用，因而岩块再次受到猛烈的冲击并发生岩块抛掷的物理现象。爆破是爆生气体和应力波综合作用的结果。

为了反映岩体介质的内部爆炸作用，假设爆炸发生在无限的均匀介质中，药包对周围介质的破坏是呈球形的。由于介质与药包中心的距离不同，所以岩体介质的破坏程度也不同。其爆破作用圈如图 1-1 所示。

（1）压碎区

炸药爆炸瞬间，产生几千度的高温和几万兆帕的高压，形成每秒数千米的爆炸冲击波，最靠近装药的岩石在此冲击波和高温高压爆生气体的作用下，产生很高的径向和切向压应力，此压应力远远大于岩石的动态抗压强度。装药空间岩壁受到强烈压缩而形成空腔（即扩大的爆腔），周围岩石产生粉碎性破坏，形成压碎区（或粉碎区）。可见，压碎区岩石主要受冲击波压缩作用而破坏，压碎区的范围即为岩石中爆炸冲击波的冲击压缩作用范围。

压碎区内冲击波衰减很快，因而压碎区的半径较小，通常只有 $2\sim 3$ 倍的装药半径，破坏范围虽然不大，但破碎程度大，能量消耗多。因此，爆破破岩时应尽量减小压碎区的形成范围。

（2）破裂区

由于冲击波能量的大量消耗，压碎区外，冲击波衰变为压缩应力波，并继续沿径向在岩石中传播。当应力波的径向压应力值低于岩石的抗压强度时，岩石不会被压坏，但仍能引起岩石质点的径向位移。由于岩石受到径向压应力的同时在切线方向上受到拉应力，而岩石是脆性介质，其抗拉强度很低。因此，当切向拉应力值大

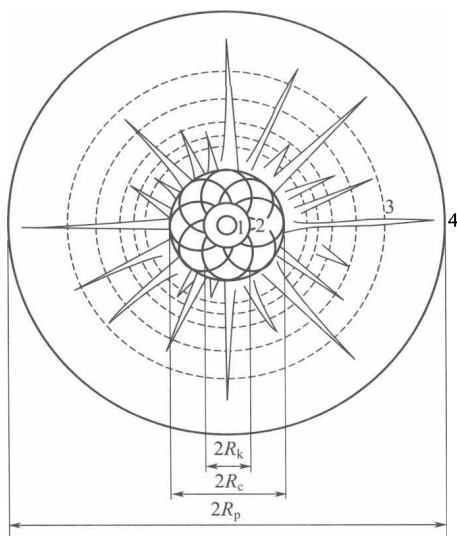


图 1-1 球形药包在岩体内的爆破作用

1—扩大空腔；2—压碎区；3—破裂区；4—振动区

于岩石的抗拉强度时，岩石即被拉断，由此产生与压碎区相通的径向裂隙。继应力波之后，爆生气体充满爆腔，以准静压力的形式作用在空腔壁上和冲入由应力波形成的径向裂隙中，在此高温、高压、爆生气体的膨胀、挤压及气楔作用下径向裂隙继续扩展和延伸。裂隙尖端处气体压力造成的应力集中也起到了加速裂隙扩展的作用。

受冲击波、应力波的强烈压缩作用，岩石内积蓄了一部分弹性变形能。当压碎区形成、径向裂隙展开、爆腔内爆生气体压力下降到一定程度时，原先积蓄的这部分能量就会释放出来，并转变为卸载波向爆源中心传播，产生了与压应力波方向相反的向心拉应力波，使岩石质点产生向心运动，当此拉应力波的拉应力值大于岩石的抗拉强度时，岩石就会被拉断，形成了爆腔周围岩石中的环状裂隙。径向裂隙和环状裂隙的交错生成，形成了压碎区外的破裂区，破裂区内径向裂隙起主导作用。岩石的爆破破坏主要靠的就是破裂区。

（3）振动区

在破裂区外，应力波已大大衰减，并逐渐趋于具有周期性的正弦波，此时应力值已不能造成岩石的破坏，只能引起岩石质点做弹性振动，形成地震波。地震波可以传播到很远的距离，直至爆炸能量完全被岩石吸收为止。

上述情况，显然是在无限介质条件下的一项分析研究。然而实践经验表明，工程爆破通常是在有临空面的情况下进行的。这样一来，可以从一个临空面的平坦地面爆破时的物理图像来阐明其特点，即强大的压力波作用，主要是破碎岩石并使岩块沿着药包与临空面之间的最短距离（称为最小抵抗线）抛掷出去，在爆破点形成

一个漏斗形的倒立圆锥体，如图 1-2 所示。从图中可以看到爆破漏斗各部分的特性与名称：O 点为药包的中心； r 为漏斗开口处的半径，称为爆破漏斗底部半径； W 为从 O 点到地面的垂线长度，称为最小抵抗线； R 为漏斗斜边长度，称为漏斗作用半径。

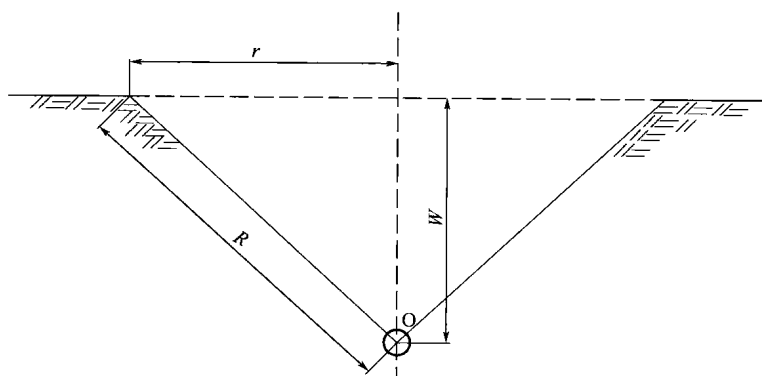


图 1-2 爆破漏斗示意图

O—药包中心； r —爆破漏斗底部半径；
 W —最小抵抗线； R —漏斗作用半径

另外，根据漏斗底部半径 r 与最小抵抗线 W 的比值，可以确定爆破作用指数 n 值为

$$n = \frac{r}{W} \quad (1-1)$$

通过 n 值的大小，在爆破时，可以确定爆破抛掷的类型、爆破漏斗的尺寸和抛掷岩块边界等情况，因此 n 值是爆破工程中的一个重要参数。

1.4.2 装药量的计算方法

在工程实践中，各种爆破方法的药包药量计算公式都用体积核算，即

$$Q = KV \quad (1-2)$$

式中 Q ——药包装药量；

K ——比例系数；

V ——该药包爆破的体积。

在标准抛掷爆破中，因为 $n=1.0$ ，由式 (1-1)， $r=W$ ，根据图 1-2，把标准抛掷漏斗看作倒立的圆锥体，那么显然有

$$V = \frac{1}{3} \pi r^2 W = \frac{1}{3} \pi W^3 \approx W^3 \quad (1-3)$$

则式 (1-2) 变为

$$Q = KW^3 \quad (1-4)$$

把式(1-4)中的比例系数 K 称为标准抛掷爆破漏斗的单位用药量, 单位为 kg/m^3 。

当计算不是标准抛掷爆破的药包装药量时, 式(1-4)中还要加入爆破作用指数 n 的因素, 通常用爆破作用指数函数 $f(n)$ 来表示, 即

$$Q = KW^3 f(n) \quad (1-5)$$

$f(n)$ 是一个以 n 为自变量的函数, 它有许多不同形式, 根据我国爆破工作者的实践经验, 认为鲍列斯夫经验公式比较符合实际, 其公式为 $f(n) = 0.4 + 0.6n^3$, 所以式(1-5)可写成如下形式

$$Q = KW^3 (0.4 + 0.6n^3) \quad (1-6)$$

从式(1-6)可看出:

① 当 $n < 1.0$ 时, $f(n)$ 的数值也小于 1.0, 通常把 $0.75 < n < 1.0$ 的数值代入 $f(n)$, 得出减弱抛掷爆破药包的药量计算公式。 $n < 0.75$ 后, 已看不出明显的爆破漏斗, 这时均按松动爆破处理。

② 当 $n = 1.0$ 时, $f(n) = 1.0$, 式(1-6)变成式(1-4)的形式, 为标准抛掷爆破的药量计算公式。

③ 当 $n > 1.0$ 时, 为加强抛掷药包的药量计算公式。

④ 当 $n = 0$ 时, 式(1-6)变成

$$Q = 0.4KW^3 \quad (1-7)$$

由式(1-7)计算出来的药量, 对不同地质条件和不同要求的松动爆破不一定合适。有时岩石破碎比较多, 即装药量大了一些, 有时又达不到所要求的松动形式(如加强松动等), 故一般松动爆破可用下式计算, 即

$$Q = k'KW^3 \quad (1-8)$$

比较式(1-2)和式(1-8), 如果用 q 代表松动爆破时的单位用药量, 那么

$$q = k'K \quad (1-9)$$

式中, k' 为比例系数, 一般为 0.2~0.6 之间, 经常用的是 $k' = 0.33$, 即松动爆破的单位用药量 q 约为标准抛掷爆破单位用药量的 1/3。松动爆破的药量计算公式可写为

$$Q = qV \quad (1-10)$$