

525498

·专题文集·

预裂爆破 在水电建设中的应用

水利电力部水电建设总局



前 言

在我国水电系统正式使用预裂爆破这一名词,并应用它的原理进行施工,到现在已有20年了。如果以某些方法和效果与其相似而言,还可往前追溯几年。但是,在水电站建设中大规模使用预裂爆破还是近10年的事。葛洲坝、东江、白山、万安等工程及官厅、丰满、密云等扩建工程中都取得一批较好的成果。在浙江、四川等省的中小电站建设中也取得很好的效果。它们的经验证明:在软弱岩石、中硬岩石、坚硬岩石以及比较破碎的岩石中,无论是明挖还是洞挖,钻孔直径从40到150毫米都能进行预裂爆破。

实践证明,采用预裂爆破可以保证工程质量,加快施工进度,降低工程成本,因而这项技术被列入部颁规范内。如果说过去预裂爆破还处于试验和推广时期,现在已到了每个工程都必须采用的阶段。

为了总结经验和推动这一新技术的应用与发展,特请长江水利水电科学院、长办施工处、葛洲坝工程局、第八工程局和00639部队编写这个文集,由长江水利水电科学院负责主编。文集中选用“水电站工程爆破会议”中有关预裂爆破的部份文章,另外还约请了少数文章。为了使用方便和对某些现象进行解释,文章对预裂爆破的原理、设计、工艺及各种经验都叙述得比较详细。

由于预裂爆破技术在水电系统发展得比较迅速、许多工程中好的经验可能没有收集到,希望谅解。对于文集里的错误或不妥之处请予批评指正。

参加文集编辑工作的有张正宇、佟锦岳、龙雪河、陈铁福、杨云玫、李丰、刘宏根、邹仪宣等同志,其中张正宇、佟锦岳两同志为责任编辑。

目 录

- 1、预裂爆破的原理设计试验与施工.....张正宇 (1)
- 2、预裂爆破在葛洲坝工程基岩开挖中的应用.....葛洲坝工程局施工技术处 (79)
- 3、葛洲坝工程预裂爆破设计与实践.....杨云玫 (94)
- 4、预裂爆破技术在东江花岗岩坝基开挖中的试验与应用.....李青杰、龙雪河(125)
- 5、水平预裂爆破在双曲拱坝河床基础开挖中的应用.....贺泽夫、万善仁(141)
- 6、东江双曲拱坝坝基预裂爆破钻孔施工技术.....万善仁(153)
- 7、预裂爆破在花岗岩地层隧洞施工中的应用.....林一心(157)
- 8、拉格都工程的预裂爆破.....马洪琪(168)
- 9、万安水利枢纽应用预裂爆破的情况简介.....中国人民解放军00六三九部队(178)
- 10、在龙羊峡水电工程中应用预裂爆破的一点体会.....王青屏(185)
- 11、紧水滩坝基预裂爆破施工小结.....邹延武、费伟国(189)
- 12、预裂爆破在南阳滩电站、凉滩电站的应用.....马国杰(203)
- 13、密云水库潮河泄空隧洞进水口预裂爆破的消震作用.....赵宗棟(212)
- 14、白山电站扇形孔爆破通过预裂缝后的地震效应.....黄 涛(222)
- 15、预裂爆破钻孔机械.....杨云玫(229)
- 16、预裂爆破中的炸药问题.....曹稼良(237)

预裂爆破的原理设计试验与施工

长江水利水电科学院 张正宇

章 目

- 第一章 概述
- 第二章 预裂爆破的原理
- 第三章 药量计算
- 第四章 主要参数间的关系
- 第五章 预裂爆破质量控制标准
- 第六章 预裂爆破试验
- 第七章 预裂爆破的破坏、震动与预防
- 第八章 预裂爆破的钻孔机械及钻孔质量的控制
- 第九章 预裂爆破实施中的几个问题
- 第十章 地下工程的预裂爆破
- 第十一章 预裂爆破经济效益的评价

第一章 概 述

预裂爆破是在大规模爆破开挖过程中,预先沿设计开挖轮廓线爆出一条裂缝,以防止爆破区外的岩体或其它建筑物破坏的一种新技术。

由于预裂爆破在开挖区和保留区之间形成一条裂缝,使主爆区爆破时应力波传到预裂缝时,部份被反射掉,从而减少透射到保留岩体应力波的强度,达到减震的目的。另一方面,主爆区伸向保留区的裂缝,在预裂缝处被切断,保护保留区岩体的完整性。

预裂面平整美观超挖量少,从而减少混凝土的回填量。它的优越性被越来越多的工程所接受,使用范围也越来越广泛。

1970年到1975年我们曾在葛洲坝水电站与葛洲坝工程局共同进行了预裂爆破试验,奠定葛洲坝工程大量采用预裂爆破的基础。1978—1979年在取得部分施工资料之后,对它的原理、设计及施工进行了总结^[1·2]。但是,葛洲坝工程岩性软弱有其特殊性。中等硬度和坚硬岩石的试验当时没有进行。上述总结的很多见解、计算方法以及经验等,还有待进行一步

证实和检验。几年后在水电系统又取得了一批卓有成效的预裂爆破成果，我们也获得一些资料。这给修改文献〔1〕打下基础。本文对它的大部分章节做了很多增删，对其内容也做了较多的改动。作者希望通过本文给予水电系统广大现场爆破工作者提供某些帮助，同时诚恳地希望大家对本文提出批评和给予帮助，并祝在预裂爆破的实施中取得更多的丰硕成果。

第一节 预裂爆破发展的简史

预裂爆破是在光面爆破的基础上演变而来的。五十年代初期、瑞典朗格福尔斯、基尔斯特罗姆、哈卓普等人首先进行光面爆破试验。以后在美国、加拿大等地进一步发展并有文献报道。美国人霍姆斯在利文斯顿水电站工程中使用了光面爆破。以后，美国尼亚加拉水电站引水渠和竖井开挖施工中使用了预裂爆破法〔4〕。引水渠要求用混凝土衬砌，设计允许欠超不超过2英寸（约5厘米），超挖不大于6英寸（约15厘米）。欠超部分的补挖及超挖部分的回填混凝土费用，均由承包商自付。于是承包商进行了各种各样的试验，计有排孔法、预留保护层、间断装药爆破法、缓冲爆破法和预裂爆破。最后认定预裂爆破法最好。所以采用了这种方法并获得成功。尼亚加拉水电站预裂爆破获得成功的另一重要原因是钻孔精度高，直到今天它的壁面质量仍然令人赞叹。自六十年代以后，预裂爆破在许多国家广泛地被采用。但是，对预裂爆破机理方面的研究却是它应用之后进行的。

我国五十年代后期，在铁路、矿山建设中，做过一些光面爆破和预裂爆破的试验工作。六十年代以来水电工程中也进行过一些试验。例如1964—1965年在陆水电站施工中做过浅孔预裂爆破试验，并在该工程的护坦开挖中应用〔5〕，取得了良好的效果。

七十年代以来，预裂爆破的使用在生产建设中日益增多。马鞍山矿山研究院在南山矿等地采用预裂爆破并取得较好的效果〔6〕。黄岛地下油库竖井施工中也采用了预裂爆破〔7〕。水电系统1973年在葛洲坝水电站进行近20次试验，取得了符合该工程特点的爆破参数。施工中凡能用上它的部位都采用了预裂爆破〔1、2〕。象这样大规模地运用预裂爆破，在国内水电建设中尚属首次。一次预裂的最大深度达26—38米。预裂孔有垂直的、也有倾斜的（60°—80°）。有在软弱砂岩中的，也有在砾岩中的，都得到了整齐的壁面。葛洲坝水电站工程预裂爆破不仅对工程自身起了较大的作用。而且为在水电系统推广应用预裂爆破树立了样板。葛洲坝工程中成功的应用预裂爆破的经验在全国也有重要的影响。所以它获得第一次全国科学大会奖。接着东江水电站在坚硬的花岗岩中也取得了显著的成绩。他们成功地开挖出整齐的带有扇形钻孔的扭曲形建基面。于1982年9月进行了鉴定，获得水电部的奖励。不久前他们又在拱坝基坑成功地采用了水平预裂爆破，将建基面上部的基岩一次爆除，保留岩体经过声波检查基本上都是优良，满足了设计要求。除此之外，许多水电站在明挖和洞挖中都相继采用预裂爆破。例如白山水电站、大化水电站、西洱河三级电站、引滦工程等。随着更多工程采用预裂爆破，使它在水电系统的运用将越来越广泛，作用也越来越大，经济效益也越来越显著。

第二节 预裂爆破在水电工程中的作用

岩石开挖往往是利用炸药的爆炸力，把要挖掉的岩石炸碎并将石碴运走。这种爆炸力经常又会使邻近开挖区的岩体或建筑物同时被破坏。在大规模爆破中，特别是用潜孔钻打眼放炮的条件下，即使采取斜眼梯段、毫秒雷管分段爆破、限制一响起爆药量等措施，破坏区的范围仍然很大。斜眼梯段爆破造成的破坏形状，以图 1—1 表示。表 1—1 列举了我们实测和收集到的破坏范围的资料。表中的数字虽然粗略，但可定性地看出，破坏范围是较大的。例如在中等裂隙发育的岩石中，药包直径 80 毫米的相应地表破坏范围约 5—8 米。在裂隙发育的或有薄层软弱夹层的岩石中，破坏范围还要大。

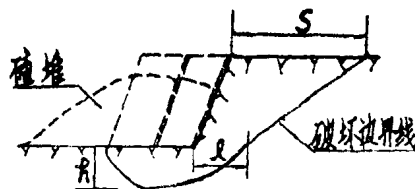


图 1—1 梯段爆破破坏形状图

表 1—1 梯段炮孔爆破破坏范围

岩石特性	梯段后冲表面破坏范围 s (药包直径的倍数)	梯段底部水平破坏范围 l (药包直径的倍数)	梯段底部垂直破坏范围 h (药包直径的倍数)
裂隙发育 (或有软弱夹层)	120—350 (一般 120—190)	140 (葛洲坝工程实测值)	15—36
中等裂隙 ($n < 3\%$)	60—100	20—40	5.5—10

n : 体积裂隙空隙率。

有时大规模开挖区外要保留的岩体，是建筑物的基础或支撑体，或者是建筑物的岸坡，要求完整，以保证建筑物的安全或边坡稳定。过去的爆破方法，对保留岩体的破坏相当严重，超挖几乎是不可避免的。超挖将要用混凝土去回填，这样不仅增加了工程投资，而且超挖部份的岩体会存在许多浮石。不管是明挖或洞挖浮石的处理都是很麻烦的，而且有危险性。必须采用安全防护措施，从而提高了工程造价。

过去为了保护上述部位岩体的完整，在我国主要采用预留保护层或在设计轮廓线上预先打 1—2 排间距很小的防震孔的办法。保护层用手风钻分层多次挖除，最后还须人工撬除，效率很低。防震孔由于打得很密（间距 15 厘米左右），钻孔量增加。它的作用据我们观测，虽有一定的减震作用，但往往不能制止（有时反而吸引）裂缝伸入保留区，因此防护效果不好。

国外（例如美国等）在预裂爆破未产生前，为了减少超欠挖和保护保留岩体，多年来一直采用轮廓线钻孔法，缓冲爆破法和光面爆破法等。

1、轮廓线钻孔法：轮廓线钻孔法是用 50—80 毫米的孔径，按 2—4 倍孔径的间距进行布孔，使岩体沿开挖线成薄弱面，与我国防震孔法类同。轮廓线钻孔与相邻炮孔的间距一般是主爆破孔最小抵抗线的 50—75%。相邻炮孔的间距也相应减少，装药量也要减少 50%（图 1—2）。炸药应在炮孔内均匀分布，并用导爆索起爆。轮廓线钻孔法一般用于明挖。多用于层理、节理与裂隙不发育的均质岩石中。在以后的施工中，有的在部份轮廓钻孔中装入少

台 界 边 阶 线

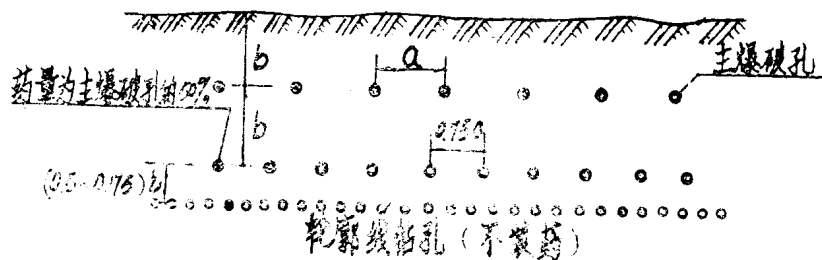


图 1—2 轮廓线钻孔爆破法

量炸药，以改善轮廓线钻孔法的效果。这就导致了缓冲爆破法与光面爆破法的出现。有些人在轮廓线钻孔内装药，并先于主爆区炮孔爆破，这又演变成预裂爆破法。

2、缓冲爆破法

这种方法首先在加拿大采用。它实质上是沿轮廓线打大直径的孔，然后装入少量炸药。在主爆区爆破后最后起爆，类似于光面爆破，但又与之不同。首先是它的钻孔直径大(约100—170毫米)，药卷直径不到钻孔直径的 $\frac{1}{2}$ 。孔内充填砂、碎石或钻屑等，起缓冲作用。也可不充填上述物质而用空气间隔，都可取一定效果。这种方法。为了使孔间岩石断裂，一般用导爆索起爆，因为孔间起爆时差越小，断裂效果也越好。

缓冲爆破法由于采用大孔径，所以钻孔深度可以加大，国外最大曾达28米。它多用于明挖和不易形成光面的沉积岩中，在缓冲孔之间加钻不装药的导向孔，也都是可行的办法。这一方法较之于轮廓线钻孔法，可以减少钻孔量。

3、光面爆破法

光面爆破法，在我国已成为大家比较熟悉的减少围岩破坏的一种施工方法。它的基本原理与缓冲爆破法相似。其不同之处是孔径小，孔内药包周围不装充填物。它的主爆区爆破之后，将光面前的保留层炸除，沿钻孔轴线形成整齐的保留壁面。光面爆破在我国多用于地下工程施工。

这些办法与不采取任何措施，只预留较厚保护层的办法相比，显然前进了一大步。但是它们是都在主爆区爆破之后再行爆破，所以主爆区爆破造成保留岩体的破坏是较难防止的。在靠近它们最近一排主爆区炮孔采取加密孔距和减少装药量等措施，对减少保留岩体破坏有一定的效果。但在大量施工中，仍然难以避免保留岩体不被破坏。

预裂爆破的出现，增加了保护岩体少受破坏的办法。如果缓冲爆破法或光面爆破法与预裂爆破法结合使用，其保护岩体的效果会更好。这样将会增加钻孔量。如何取得最佳效果，又使钻孔工作量减至最少，是一项很有价值的研究课题。它应当从钻孔量，保留岩体质量和施工进度等几个方面综合考虑。

预裂爆破在我国水电工程采用以来，逐渐展现出它强盛的生命力。但是，随着工作的深入，也发现预裂爆破并不是“万灵良药”。它属于内部药包的作用，具有较强的震动和破坏效应。不过人们也认识到既要爆破，就可能产生损坏，预裂是一槌子的买卖，保留岩体受这

一次冲击之后，便有较好的防护能力，以减少其他爆破多次的冲击。我们可不可以寻找一种办法：使预裂爆破后既起着保护保留岩体的作用，又能减少或消除岩体承受预裂爆破时的损坏。这是一个很有意义的问题。

预裂爆破常用于明挖，也可应用于洞挖。洞挖中又多用在两帮。无论是明挖或洞挖，当预裂孔与其他爆破孔一次爆破时，应注意预裂爆破不应破坏其他孔的正常爆破。

一般来说，预裂爆破可以用于任何一类岩石，任何一种地质条件下。但是，在对成缝不利的地应力条件下，有时也较难形成裂缝。对于地质条件不同的地区，预裂的效果也是有差别的。例如，坚硬岩石中，预裂缝比较窄。破碎、软弱岩石中，壁面的质量要差一些。

预裂爆破在水利水电工程应用以来，在开挖上起着变革的作用。它的优越性逐渐被人们所接受。可以确信水电系统预裂爆破技术在广大爆破工作者的共同努力下必定会取得更为优秀的成果。

第二章 预裂爆破的原理

预裂爆破的基本原理，主要是指预裂成缝的机理。也就是为什么能把岩石爆出裂缝，又使裂缝两边的岩石不受或少受破坏？六十年代初期，在工程施工中成功地进行预裂爆破之后，开始了关于预裂成缝机理和模型试验的探讨。美国的W·I·杜瓦尔与R·S佩固首先提出“相邻炮眼产生的爆炸应力波相互干扰”的理论。一年后的1963年美国科罗拉多矿业学院的马赛厄斯等进行了光面爆破和预裂爆破的模型试验研究。以后瑞典的朗格福尔斯等、日本的伊藤一郎，佐佐宏一，南非人布朗等都对预裂和光面爆破的成缝机理提出了见解。最近还有人利用断裂力学的观点解释爆破成缝的机理。也有人用动光弹模型进行研究^[22]。

我们在试验，设计和施工实践中体会到，各个工程地质条件不同（如岩石的走向、倾角、裂隙发育程度和岩石力学强度等），采用的爆破参数不同（钻孔直径、间距和装药量等不同），预裂缝的发展过程、开口宽度等也不一样。室内的模型试验与现场的实际情况差别很大，它们不可能建立定量关系。

在这一章里，我们主要介绍预裂成缝的几种基本见解。因为成缝的理论解释，是指导实践的基础。反过来，从实践中也可以检验这些解释是否正确，或者那些部分是正确的，那些部份是错误的，最终导致正确理论的建立。

因为预裂爆破是靠钻孔装药爆破进行的。为了便于说清问题，有必要先介绍半无限体内柱状药包爆破的物理现象。然后再谈预裂爆破的基本原理和它的特点。

第一节 半无限体单孔爆破的物理现象

炸药爆炸时，在极短的时间内由固体变成气体，体积急剧扩大，产生巨大的能量来破坏岩石。

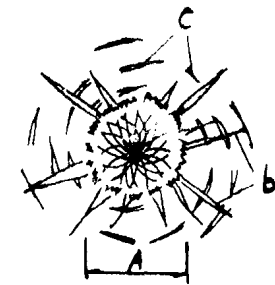
目前世界各国所用的各种炸药的传爆速度大多数为2000—6000米/秒。若以4000/米秒计，几米深的炮孔爆轰过程不过1~2毫秒，浅眼远不到1个毫秒。炸药在这样短暂的时间内，顺药柱将能量释放出来。一方面产生高速的冲击作用，同时产生高温、高压气体。温度可达

2000—5000℃，压力可达5万到20万个大气压。高速冲击作用以波动的方式向四周传播。它作用在孔壁的时间极短，约为微秒量级。由于它带有很高的冲击压力，许多人把它作为动力作用下岩体破坏的能源。高温高压气体比冲击作用的时间要长得多，大约在几个到几十个毫秒以上，与冲击作用相比，可近似地把它看为准静态作用。目前解释岩石爆破破碎原理和预裂爆破机理的都以上述两种作用为基础。

半无限介质中单孔柱状药包爆破后，强大的冲击波以和炮孔同轴的锥形波前（这个锥形波前是爆轰波与冲击波的波速不同而形成的）向周围传播，直接作用到孔壁上陡峭的冲击波波峰压力有几十万个大气压。在较远的地段，逐步变为圆柱状波前，波峰变得平缓，此时冲击波衰变为应力波。图2—1为在大理石中实测不同距离的压力——时间曲线^[21]，可见波峰压力衰减很快。

岩石受到冲击波的巨大压力后，孔周岩体被压碎。压碎区外岩体内产生很大的切向应力，它们造成辐射状开裂的径向裂缝。孔周岩体的压碎区大约不到炮孔半径的一倍。而压碎区外的径向裂缝却能达到大约20倍炮孔直径。冲击波作用的过程是在不到1毫秒的时间内完成的。因此很快就消失了，破裂的岩体又重新闭合。只有到爆炸气体开始作用后，它们才恢复扩张并延长。据福格里森等人的研究，冲击波能量仅占烈性炸药总能量的9%左右。

高压气体是在冲击波之后的第二个作用过程。在它的作用下，气体渗入裂缝中，在径向裂缝的尖端产生所谓的“气刃”效应，使裂缝继续延伸。实验发现，不是所有的径向裂缝都同时延展，只有少数几条裂缝延伸得特别远（图2—2）。



A. 压碎区, B. 径向裂缝, C. 环向裂缝

岩石裂隙发育的地方，爆破裂缝形成的情况要复杂得多，但上述基本道理仍是适用的。

如果有两个相邻的炮孔存在，它们又大体同时起爆，孔内产生的冲击和气体压力既不压坏孔壁，又能使裂缝沿两孔之间连线方向开裂并贯通起来，其他方向不产生或极少产生裂缝。那末，就可使岩体形成一条比较整齐的裂缝，这就是预裂爆破成缝的基本概念。

图2—2 单自由面柱状药包爆破作用图

第二节 预裂爆破的成缝机理

保证预裂爆破成功的必要条件应当是不压坏孔壁和沿预定的方向成缝。

如前所述，炸药爆炸后，产生的冲击压力和高压气体的作用，将会使孔壁产生剧烈的破碎。要想不压坏孔壁必须采用低速炸药或不偶合装药法。图2—3所示：d为药包直径，D为钻孔直径， $\frac{D}{d}$ 称为不偶合系数。试验发现：药包与孔壁之间存在空气间隙，即不偶合系数大于1，会大大降低孔壁所受的压力。伊藤一郎等测量过不偶合条件下孔壁切向应力的变化，如图2—4所示。当不偶合系数为2.5时，作用在药室内壁的最大切向应力只相当于不偶合系

($\sigma_r, \text{kg/cm}^2$)

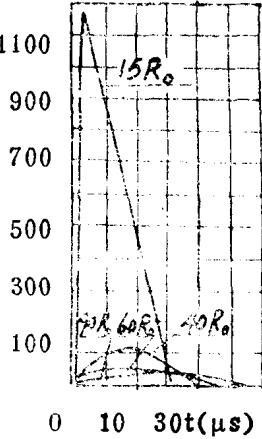


图2—1

数为1.1时的大约1/16。因此，完全有可能将现有的常用炸药，用不偶合装药来降低孔壁压力。把几万个大气压降到每平方厘米只有几千或几百公斤的压力值。当此值小于或接近于岩石的极限抗压强度时便可使孔壁不受压缩破坏或者只有极少量的破坏。

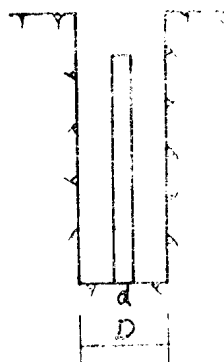


图 2—3

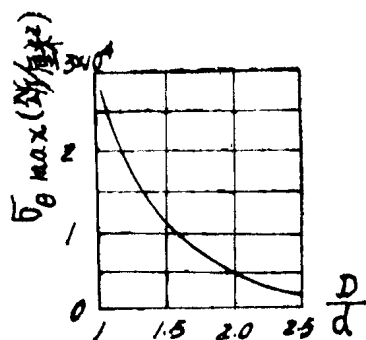


图 2—4 作用在药室内壁的切线方向应力与不偶合系数的关系

在不压坏孔壁的条件得到保证后，沿预定方向成缝只需调整相邻孔的孔距和孔内装药量便可达到。

至于为什么调整药量和相邻孔之间的距离，便可形成裂缝的解释，有以下几种说法。

一、应力波干涉破坏理论：

1962年，W、I、杜瓦尔和K、S、佩因提出“相邻炮眼产生的应力波相互干扰”的理论。五十年代末和六十年代初期正值应力波反射破坏理论盛行之时，不少学者都用这一理论解释爆破漏斗的成因。因此杜瓦尔等提出应力波干涉理论有其历史的根源。应力波干涉理论认为：如果几个相邻炮孔中的炸药同时爆炸，爆炸应力波以炮孔为中心呈放射状向外传播，其切线方向便产生拉应力。由两个爆破孔出发，沿半径方向扩展的应力波，在两孔连线的中点相会，并产生干涉（图2—5）。两个波的汇合处用粗箭头表示合力，它垂直于两个爆破孔轴线的连接面，方向向外。在这个连接面（图2—5中间虚线）的两侧，岩面各向相反的方向移动。因此，两个炮孔轴线的连接面成为受拉面，整个拉应力的作用使岩体沿此面断裂。

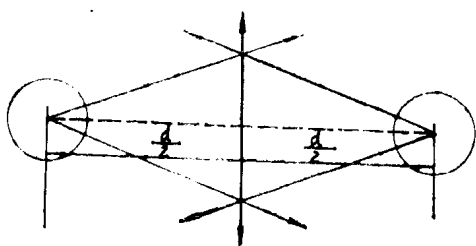


图 2—5

裂缝因此从中点首先产生，并向两孔发展。至于爆炸产生的高压气体在岩体成缝的作用则没有提到。

二、以高压气体为主要作用的理论

在解释预裂爆破成缝原因时，应力波干涉破坏理论、以高压气体为主要作用的理论以及

下面将要提到的应力波和高压气体联合作用的理论，都大体出现于同一时期。只是以后经过更多人的努力，使上述理论更趋于完整。

持高压气体为主要作用理论的作者们也承认应力波的作用。但是，他们认为这种作用是微小的，气体的作用则是主要的。象美国的C、H、约翰逊，瑞典的U、朗格福尔斯、日本的山口梅太郎等人都持这种观点。他们认为在炮孔内准静态气体作用下（因为气体压力的作用时间比应力波长得多），孔周围岩体受到来自孔壁方向的压应力，其切线方向产生拉应力。当附近有空眼存在时孔间连线的孔边产生较强拉应力集中，空孔就象导向孔一样导致裂缝从孔壁产生并沿孔间连线方向发展。两个装药孔之间加一个空眼更有利于裂缝沿连线方向形成。当相邻炮孔内气体压力形成的应力场相互叠加时，拉应力在孔间连线方向得到加强。孔距越小，孔壁压力越大（但不能超过岩石的极限抗压强度），上述拉应力的强度也越大。当它大于岩石抗拉强度时，孔间连线的岩体产生裂缝。随着裂缝的出现，爆炸气体渗入其中使裂缝尖端出现应力集中，从而加速裂缝的发展和扩张。模型试验和理论计算证明，裂缝是从孔壁向外扩展的，而不是象应力波干涉理论所指出的那样，裂缝是从两孔的中间向孔边发展的。这证实了气体作用理论的某些见解。

高压气体为主要作用的理论说明下述结论：

(1) 不论是单孔爆破或是两孔同时爆破，裂缝均能产生，后者更利于裂缝形成，朗格福尔斯在其著作里指出了这一点^[20]。

(2) 要加长爆炸气体的作用时间。因此，强调不偶合装药和堵塞。对于炸药则要求爆速低和生成的气体量多。

(3) 关于应力波的作用，他们认为它并不会使岩体产生贯穿裂缝。仅能形成很多潜在裂隙或称闭合裂隙，它们由孔壁向四周放射。这种无规则的鬃状裂缝只有在高压气体的作用下，才有可能使连线方向出现贯穿裂缝。

三、爆炸应力波与高压气体联合作用理论：

1962年美国科罗拉多矿业学院的研究生马赛厄斯研究预裂爆破机理时就曾提出应力波和高压气体是形成裂缝的主要原因。即应力波扩展时波阵面切线的拉应力造成经向开裂，然后高压气体渗入使裂缝展延而成贯穿裂缝。

1968年美国的科伯特·科特和查理·费尔赫斯特则更进一步从时间顺序上阐明应力波和高压气体的作用。他们指出应力波的作用时间在前而高压气体作用在后。后者在成缝过程中起着决定性的作用。

1980年作者在“预裂爆破及其在水工建设中的运用”一文中曾对这一理论作过比较简单的说明：

“这一理论可以采用以下非常粗略的模式来描述，爆炸应力波由炮孔向四周传播，在孔壁及炮孔连线方向出现裂缝，随后在爆炸气体作用下，使原先的裂缝逐步发展扩大，最后形成平整的开裂面。”

“上述模式将预裂成缝机理分为二个过程，即应力波的作用过程和高压气体的作用过程，它们有先后，但又是连续的不可分割的。

第一个过程，应力波的作用。当它从孔壁向周围传开后，引起的切向拉应力超过岩石的

抗拉强度而使岩石破裂。最初的裂缝出现在从炮孔壁向外的短距离内。如果应力波在两孔之间能够发生叠加，那末，在此区段内，合成拉应力也可能使岩石产生裂缝。因此，应力波的作用，既能够发生叠加，也能在炮孔之间出现某些发状破裂，上述裂缝可能连接起来。于是炮孔连线方向出现较长裂缝的机率较其他方向大得多。这些裂缝给预裂面的形成创造了有利的导向条件。

爆炸高压气体紧接着应力波作用到孔壁上，它的作用时间比应力波要长得多，孔周围便形成类似于静态的应力场。相邻炮孔互相作用，并互位于应力场中。孔中连线方向产生很大的拉应力，孔壁两侧产生拉应力集中。如果孔的间距很近，则炮孔之间连线两侧全部是拉应力区（图2—6），并达到足以拉断岩石的程度。”

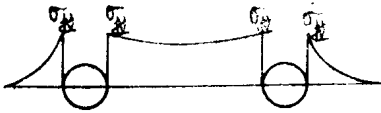


图 2—6

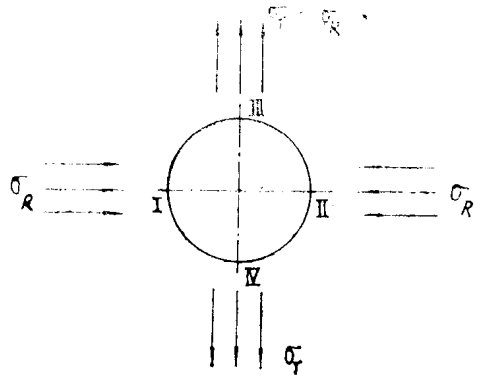


图 2—7

“如果相邻孔的距离很小，上述拉应力可以是岩石抗拉强度的数倍，孔壁的集中拉应力还要大。因此，既使应力波没有产生裂缝，单靠高压气体的作用，也可能使岩石断裂。如果应力波产生了初始裂缝，高压气体的渗入使裂缝尖端产生“气刃效应”。由于气体作用的时间比应力波长得多，其总能量也大得多。所以，气体的作用不仅能保证形成贯通裂缝，还可以使裂缝有一定的宽度。因此爆炸气体作用是预裂缝最终形成的基本条件，起着主导的作用。”

关于裂缝如何在炮孔连线容易形成。赫伯特·科特和查理·费尔赫斯特曾经指出：

1. 当空眼存在时，爆破孔对于空眼的应力场的作用如图2—7的情况。来自连线方向的压应力既可能是应力波引起的也可能是准静应力场产生的。I 和 II 上受到拉应力的作用，而 III 和 IV 受到压应力的作用。这与用手捏皮管一样，管子变成椭圆形，受压的孔壁产生拉应力，与其垂直的一侧孔壁受到挤压。这也是为何沿孔的连线方向易产生径向裂缝，而其他方向裂缝受到抑制的原因之一。

科特等还在丙稀酸树脂板作过试验。在板上钻两个园孔，预先在孔的两边做好径向裂缝，在连线方向的裂缝比其他方向长一点，然后孔内加压。裂缝扩展并连通起来。试验表明半英寸厚的试件所用的临界压力是105公斤/厘米²，比无裂缝孔的试件所需的临界压力小一半。试验还证明：孔间连线的径向裂缝扩展时所需要的压力最小。反言之，这种裂缝较其他方向的裂缝最易延长和扩大。这又是孔中连线方向裂缝最易形成的证据之一。

四、用岩石断裂力学的论点解释预裂成缝，

前述解释预裂成缝机理的理论，都是以经典的强度理论为依据的，并不考虑岩石内部的破坏。七十年代以来，一些学者采用断裂力学（格里菲斯的断裂判据）的理论解释预裂成缝的现象。我国第二届土岩爆破经验交流会（1982年）上，王中黔、王兴发和冯珊芬利用同一理论提出预裂成缝的见解，并得出线装药密度的计算式。

所谓断裂力学是研究材料在破损条件下结构物和构件的强度与变形的科学。这里所指的破损主要是裂纹。当材料内部存在裂纹时，在外界应力作用下，裂纹尖端将产生应力集中。如果尖端的很小范围内处于塑性状态，则可用弹性力学的方法处理，即线性断裂力学，此条件的断裂属于脆性断裂。反之，塑性区与裂缝长度相比达到不能忽略的情况，就成为非线性断裂。目前用来解释预裂爆破成缝机理的主要是线性断裂力学。

按照线性断裂力学的见解，当材料受拉时内部裂纹处于张开状态，称为张开型裂纹或I型裂纹。裂纹尖端的应力强度以强度因子 K_I 表示。

$$K_I = Y \cdot \sigma \sqrt{a} \quad (2-1)$$

式中： σ —外加应力，

a —裂纹长度，

Y —与裂纹形状，加载方式及材料特性有关的量。

在 K_I 时，裂纹尖端产生内应力 σ_v 。外加应力 σ 增大， K_I 随之增加， σ_v 也增大，当 σ_v 大到足以使材料分离，从而导致裂纹失稳时，则裂纹扩展，岩石断裂。此时应力强度因子称为临界应力强度因子，用 K_{Ic} 表示，它又称为断裂韧性。

$$K_{Ic} = Y \cdot \sigma_c \cdot \sqrt{a} \quad (2-2)$$

式中： σ_c —导致裂纹失稳时的临界外加应力。

因此 K_I 和 K_{Ic} 有着密切的联系，但其意义却完全不同。

由上述概念得知，用断裂力学解释预裂成缝，首先的依据是岩石必须存在某些裂缝，当然它们或者是天然的，或者是由于应力波的作用产生的。当高压气体作用时，孔间拉应力使原有裂缝呈张开型，如果 $K_I > K_{Ic}$ 裂缝将会扩展， K_I 若远大于 K_{Ic} ，裂缝将以较高的速度扩展。 K_I 的大小由炮孔内气体压力决定。如果压力没有得到补充， K_I 的值随裂缝的扩展而减小，当减小至小于 K_{Ic} 时裂缝停止延伸。只要预裂孔间的裂缝扩展并连通起来即可形成预裂面。

以上的解释是很粗略的、事实上预裂爆破成缝过程中，裂缝的产生、延伸和终止都应有所控制才能达到理想的预裂面。那末用断裂力学理论如何解释裂缝发展的过程呢？这是一个至关重要的问题，下面简介如下。

（一）预裂面的控制

断裂成缝的主张者，对于如何控制预裂面认为炮孔壁开槽是由一种有效的手段。此时孔壁的压力起着重要的控制作用，压力太高孔壁其他部位产生裂缝，而且会沿炮孔边的天然裂缝发展。因为天然裂缝并不都是沿预裂孔间连线方向生成的。所以任其发展就比较难以控制裂缝方向。当孔壁压力太小时裂缝也不能顺槽口生成。因此孔内必须达到一定压力才能控制裂缝发生。这一压力可以采用（2-2）式求得。实际上槽口产生裂缝所需要的炮孔压力是很

小的。

当裂缝与天然裂缝相交时，它的发展会受阻、转移或分叉，将难以控制裂缝的方向，因此也难以控制预裂面。此时炮孔间距应当小于天然裂缝的间距。按此论点，应当防止裂缝过早的被阻止。

据一些学者研究，如果气体渗入裂缝中，将有利于裂缝的发展。只要孔内超压值没有压碎孔壁，裂缝的延伸长度可达到50倍炮孔直径。

(二) 控制裂缝不分叉

如果裂缝沿槽口尖端发展，只要使其中途不分叉，便能控制预裂面。不分叉的条件就是裂缝尖端的强度因子 K_{Ic} 小于分叉韧性 K_{Ib} 。所以使裂缝延伸而又不分叉的条件是：

$$K_{Ic} < K_I < K_{Ib}$$

根据上述条件，炮孔内长期保持不变的压力是不利的。因为实际测量岩石的开裂速度，坚硬岩石约为每秒1000~2000米，软弱岩石大约为每秒数百米。所以预裂过程中裂缝延伸的时间大约在1毫秒左右（并不是预裂爆破完成的时间）。根据 I 、 W 、戴利的资料，炮孔压力约为700公斤/厘米²时，0.3米的堵塞炮泥被冲开的时间大约为2毫秒。因此，过于密实的堵塞似乎不必要。在实践中，由于气体的等熵膨胀随着断裂空腔尺寸的增加而增加，以及由于气体泄漏，故在裂缝延伸期间压力会衰减。压力减小降低了 K_I 值随裂缝延伸而增加的比率，于是在分叉开始以前允许裂缝增长较大距离。

试验还发现促使闭合裂缝延伸或张开所需要的压力相差很大。裂缝延伸较短时相差几倍的压力，裂缝延伸较长时则相差几十倍的压力。

既然裂缝可以在分叉前有一个允许的增长长度。那末炮孔距离选择得合理的话，就可以使裂缝贯通而不分叉。

在岩石中存在天然裂隙时，情况是很复杂的。如果天然裂隙与延伸裂缝垂直，将阻止裂缝伸长，相平行则利于延伸。成30°~60°角时会产生大量分叉，在 K_I 值很低时也可能发生分叉。所以天然裂隙的存在会大大减小裂缝延伸的能量。

综上所述，在孔边开槽可以控制预裂面的方向并能降低孔壁的压力。槽口产生裂缝所需要的炮孔压力，对于大多数普通类型的岩石来说约为70~350公斤/厘米²。当孔壁压力增加到350~6810公斤/厘米²时，孔壁上小的天然裂隙开始破裂。上述的压力界限并不高，因此需用低爆力的炸药。

只要孔内岩石的压力不过度即可保证裂缝不分叉。小的裂隙不会引起分叉，大的节理裂隙会引起控制面的偏离。

五、关于用断裂力学解释预裂成缝的几点看法

(一) 它实际上是高压气体作用的另一种解释。孔边开槽（那怕是很小的槽口）有助于控制裂缝的产生和延伸。施工中孔壁开槽需要专门的设备。如果孔壁不开槽，裂缝方向如何控制？这一理论并没有说清楚。事实上气体作用下的拉应力场使孔间连线方向的原生或后生裂缝处于张开状态。显然此种状态有利于裂缝按预定的方向发展。

(二) 对于处于张开型裂缝时的预裂面形成的解释以及利用断裂力学的原理进行药量计算都是有益的。但是，实际施工中在众多复杂因素的影响下，如何使炮孔内达到恰到好处的

孔壁压力是很困难的。不过它也指出了用药量过小和过大是有弊病的。

六、几种预裂成缝理论的讨论

(一) 美国科罗拉多学院和南非人布朗用高速摄影机观察模型试验发现, 预裂爆破时, 裂缝由孔壁发生, 然后向中间发展。布朗以每秒400万幅的高速摄影机拍照模型时发现: 裂缝发生甚早并与爆轰波的迅速产生相吻合^[2]。卡尔弗从高速摄影中观察到, 最初高速冲击裂隙从每个炮眼向外扩展一个短距离。这些试验都说明应力波产生了初始裂缝, 并且是由孔壁向中间发展, 而不是象应力波理论所讲的裂缝由中间产生并向孔边发展。至于天然裂缝状态下, 应力波如何引起新裂缝产生和旧裂缝扩展, 至今没有见到有关的试验与报道。但这又是一个最实际的问题。

(二) 实际上工程预裂爆破很难做到应力波在两孔之间的中点相遇。目前我国工程爆破常用的引爆材料, 时间相差最小的是导爆索和毫秒雷管。以毫秒雷管为例来说, 我国工程用毫秒雷管为30段系列, 其中常用的前15段的延迟时间为0至880毫秒。最小的段为1至2段, 名牌时差12毫秒。其余各段之间的时差更大, 即使同一段的最小允许误差也有10毫秒。根据我们的测量, 质量较好的同段时差平均为4毫秒。预裂爆破的孔壁一般小于1米, 假如按1米计算。应力波在岩石中的传播速度多数为2000米/秒~6000米/秒, 以2000米/秒计。假使甲、乙两孔同时爆破, 应力波传至中点的时间为0.25毫秒, 传至另一孔的时间是0.5毫秒。以上假设均是按应力波最有可能在两孔中部相遇来考虑的。由此可见, 即使孔距再增大一些, 保证它们在两孔之间相遇的时间也小于1毫秒。实际工程中有不少用同段或不同段毫秒雷管爆破形成的预裂缝(虽然质量不太好)的实例。而它们引爆的时差都远大于1毫秒。这是应力波理论无法解释的现象。因此, 应力波迭加不是形成预裂缝的必要条件。

如以导爆索引爆, 各孔导爆索连接在主导爆索上并由一个雷管引爆。我国导爆索的传爆速度为6000—7000米/秒, 以6500米/秒计。孔距按1半计, 相邻两孔顺序爆破的时差应是导爆索由先爆孔传到后爆孔的时间差, 即 $1\text{米}/6500\text{米/秒} = 0.154\text{毫秒}$ 。先爆孔应力波传至后爆孔的时间只要小于0.154毫秒, 就可以与后爆孔传播的应力波在两孔之间(靠后爆孔一侧)相遇。也就是说只要应力波在岩石中的传播速度小于导爆索的传爆速度, 就会发生上述相遇的情况, 但决不会在两孔的中点相遇。因为导爆索从先爆孔传至后爆孔时, 先爆孔的应力波已传播一段距离, 后爆孔爆破的应力波与先爆孔的应力波只能在剩余的一段距离的中间相会, 此点只能靠后爆孔的一侧, 岩石中应力波的速度大一些, 相会点靠后爆孔近一些。反之, 远一些。所以, 按应力波理论的要求工程预裂爆破都不能做到在两孔中间相遇。因此这一理论解释不了实际的预裂成缝现象。

(三) 工程实践和模型试验中可以经常看到由孔壁延伸的裂缝在两孔之间交叉的现象。还经常出现裂缝超过边孔向外延伸的现象, 一般为几倍孔距。

以上三方面均说明应力波干涉成缝的理论是站不住脚的。它不能解释众多的成缝现象。

(四) 其他几种理论解释都认为爆炸气体作用是形成裂缝的重要原因或者决定的因素, 这已为实践证明是正确的。但是在对应力波的作用是否形成裂缝, 以及这些裂缝的性质和它们对于构成最终成缝的作用, 前述理论是有分歧的。高压气体作用理论的拥护者, 有些根本

不提应力波的作用。多数人虽然承认应力波可以产生发状裂缝，但却认为这些裂缝对于最终成缝不起太大作用，甚至可以忽略不计。

“联合作用”理论认为应力波可以产生初始裂缝，它们引导预裂缝的形成。

“断裂力学”理论也承认应力波可以产生裂缝。只要气体渗入它的内部就可能引导裂缝的形成。

但是，这些理论的解释者没有那一个认为应力波所形成的裂缝能够构成具有一定宽度的贯穿裂缝。

关于高压气体如何形成裂缝的解释，“气体”和“联合作用”认为准静应力场在两孔之间形成的拉应力超过岩石极限抗拉强度，岩石就会被拉断。至于裂缝的贯通则认为是气体渗入裂缝后导致裂缝尖端应力集中使其发展产生的。用“断裂力学”的观点解释，则认为是原有裂缝尖端的强度因子超过岩石的断裂因子导致裂缝发展的。如果岩石是完整的，而事先没有裂缝产生，这种解释则认为不能产生贯通裂缝。而前二种理论可以解释。但是，世界上无论那种岩石，虽然表面上看不到破损，只要在电子显微镜下进行切片检查均可发现结构颗粒边界有很多的闭合裂缝。所以，断裂理论仍可应用。

断裂理论强调预裂孔开槽以引导裂缝发展。当孔四周存在天然裂隙而孔壁又不开槽，上述理论便较难解释裂缝如何沿两孔之间连线方向发展了。“高压气体”和“联合作用”理论可以用拉力区和空眼导向来解释。但存在天然坏缝时，对于裂缝的分叉和偏离中心线则无法解释。相反，断裂理论又可以作出某些说明，虽然它还不够充分，但总算有个解释。

(五) 正由于爆炸气体对成缝起着重要作用，所以如何控制爆炸压力成为人们关注的对象。因此，产生一些专门为预裂和光面爆破使用的炸药。例如瑞典的古里特、日本的新桂炸药等。1980年以来，在水电部和兵器工业部共同主持下，庆阳化工厂也研制了几种专用炸药。其中2#粉状硝化甘油炸药于1980年8月在河北迁西通过技术鉴定。这种炸药的爆速只有2000~3000米/秒。

对于爆炸气体的作用时间，断裂理论的观点似乎更有道理，它主张爆压应当控制在某个范围，作用时间也不一定要得很长，以免引起裂缝分叉。“气体压力和“联合作用”理论并没有指出这一点。相反，则要求气体压力在孔内保持较长的时间。因此，对于堵塞深度、堵塞材料和堵塞质量它们也各有不同要求。不过不堵塞的观点似乎是不对的。过去曾有过不赞成堵塞的报道，近年来已不多见。

七、作者的看法

(一) 爆炸应力波可以在炮孔周围产生裂缝，并能延续一定长度，如果应力波能在两孔间的某个部位迭加可以促使破裂的产生。两孔爆破的时差越小越有利于应力波的迭加，其孔间一方面造成迭加抗拉应力增加，另一方面使两孔间的拉应力比其他方向大。

只要应力波过后形成了裂缝，它们必将在一定程度上起着导向的作用。

(二) 高压气体紧随应力波之后传到炮孔壁，形成一个稍长(约几毫秒或再长一些)的压力作用时间。炮孔周围产生准静态应力场，沿孔的径向为压应力，与其垂直的切线方向是拉应力。其强度随到孔的距离的增加而衰减，如果孔壁的拉应力超过岩石抗拉强度，则产生径向裂隙。

相邻炮眼爆破时，未爆的孔可视为空眼，准静态应力场使孔间连线的孔壁上产生应力集中，导致裂缝沿孔的连线最易形成和发展。因此空眼也有某种导向作用。

相邻炮眼的准静应力场如能产生迭加，则使孔间连线方向形成一个孔壁大，中间小的拉应力区(图2—6)。位于该拉力区的所有与连线平行的裂缝都呈张开型、这些裂缝的尖端拉力强度因此得到加强，使裂缝更易发展，很有可能使裂缝贯穿。

以上三种情况下，裂缝在孔间连线方向较之其他各方向处于更容易产生和发展的有利地位。张开型裂缝将导致高压气体的渗入，使裂缝发展速度更加加快。一般在其作用下，未贯穿的裂缝连通起来，已贯穿的裂缝受到扩宽。高压气体的渗入是导致预裂缝最终形成的最后一个重要条件。

(三)存在天然裂缝时情况比较复杂。主要视裂缝与预裂缝间相互的位置和岩石的裂隙分布与破碎程度而定。

天然裂隙的存在，完全改变了预裂爆破时动、静应力场的分布。对于成缝而言，因为两孔连线方向的拉应力和孔边应力集中的影响，仍然使位于连线附近的裂隙得以发展和扩宽。但是，裂缝发展的方向由于天然裂隙导致裂缝的分叉，往往偏离了连线方向。这可能是自然状态下预裂缝走向经常与孔中连线不一致的原因。

关于天然裂隙影响预裂成缝的讨论，后面还要叙述，这里不再赘述。

第三节 两相邻孔预裂爆破时的几种组合情况

科特等利用应力波和高压气体联合作用理论，讨论了相邻预裂孔爆破的组合情况。下面我们按照第二章第二节第七点所述的论点，对几种不同组合情况进行讨论。

一、相邻炮孔起爆时间相差很大

见图 2—8 之一。其特点为 A、B 孔各自单独爆破，无论是应力波或准静态应力场都不能产生叠加。

当两炮孔相距很远，各自类似于单孔爆破，难于形成贯通裂缝。当距离很近时两孔爆破便要相互影响了。

(一) 炮孔 A 先爆破，B 孔起空眼作用。A B 连线上 A 的一侧因由 A 传出的应力波强度较大，压缩波波阵面切线方向的拉应力大于岩石极限抗拉强度，I、II 点处便产生裂缝。B 孔上的 I' 和 II' 点因拉应力集中，只要它超过岩石的极限抗拉强度也能形成裂缝。以上两种裂缝都是径向裂缝，并沿 AB 连线延伸。

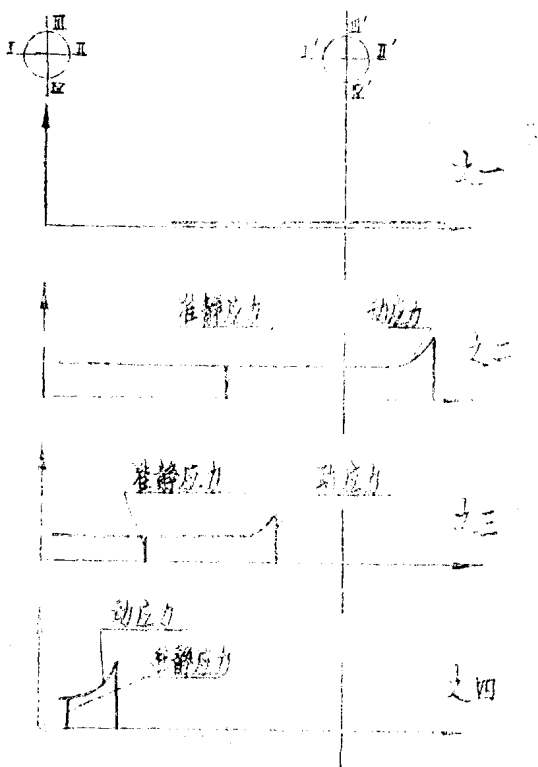


图 2—8