

普济隧道光面爆破預裂爆破 及其对围岩稳定性影响的試驗觀測

鐵道部科學研究院西南研究所

1977年11月 峨眉

~~X6/15~~ 445/2

目 录

前言

一、工程概况	(1)
二、光面炸破和预裂炸破施工	(2)
(一) 试验所用的炸破器材	(2)
(二) 光面炸破和预裂炸破参数	(5)
(三) 三种炸破方法的初步评价	(9)
三、炸破方法对围岩稳定性影响的观测	(16)
(一) 动应变观测	(17)
1. 喷混凝土表面贴片的动应变观测	(17)
2. 电测锚杆的动应变观测	(18)
3. 动应变观测结果的分析	(19)
(二) 振动速度观测	(21)
1. 量测仪器及测点布置	(21)
2. 观测资料整理	(22)
3. 初步分析	(24)
4. 几点体会	(32)

(三) 炮眼中对速度的量测 (33)

(四) 三种爆破方法的围岩稳定性声波量测 (34)

1. 测试方法和测孔布置 (34)

2. 观测结果分析 (34)

参考文献 (37)

前言

普济隧道为配合全断面钻孔台车施工，综合运用控制爆破开挖新工艺。本报告介绍普济隧道施工条件下进行的光面对破、预裂爆破试验，及爆破对隧道围岩稳定性影响的观测结果。共同完成这一试验观测工作仍有铁二局十处、铁二局科研所、铁研院铁建所爆破室、铁研院西南所地路室、隧道室。

一、工程概况

普济隧道全长494.5米。地质构造简单，基岩为侏罗系广元统泥沙岩地层，单斜构造。节理稍发育，但无不良地质现象，地下水不发育。隧道进口约160米范围内除因曲致加宽0.4米外，还因普济车站调车牵出线延伸进洞，最大开挖断面宽度达7.3米。实际开挖断面面积达50米²以上。

2地砂质泥岩新鲜岩样（试件截面 $10 \times 10 \text{ cm}$ ），所测得的单轴抗压强度为 $R_c = 313 \text{ 公斤/厘米}^2$ ；抗拉强度为 $R_p = 20.0 \text{ 公斤/厘米}^2$ 。

台车凿岩机为YG-40型丝杆推进导轨式风钻，钻孔直径约50毫米。采用平行直眼掏槽，50平方米断面共钻炮眼118~126个。

由于围岩软弱，炮眼深度1.8米，每循环进度1.4~1.6米。使用二系列毫秒电雷管九段及三系列毫秒电雷管六段进行毫秒爆破，除光面爆破、预裂爆破周边孔用1号岩石硝铵炸药20毫米直径，60厘米长药卷外，其余均用2号岩石硝铵炸药。国产2000发电容式起爆器起爆。串联网路。无炮泥反向爆破，但进行预裂爆破试验时周边眼堵炮泥。

二、光面爆破和预裂爆破施工

(一) 实验所用的爆破器材：

普济隧道进行光面爆破、预裂爆破试验观测的图例有四：

1. 保持隧道围岩仍稳定状况，使隧道围岩在爆破施工时不受或少受破坏。以便全断面开挖施工可以顺利进行。并保证施工人员的安全。

2. 减少超欠挖并使开挖后的洞壁成形好，利于喷射混凝土施工及改善喷射混凝土衬砌结构的受力状况：

3. 爆破器材，工艺本身的试验研究。

4. 爆破对隧道围岩稳定状况的研究。

多年来的施工实践经，和光面爆破的理论研究结果均表明，光面爆破和预裂爆破的周边炮眼使用毫秒雷管起爆效果较好。

本工地采用煤炭工业部抚顺十一厂生产的二系列毫秒雷管九段，

三系列毫秒雷管六段。构造均为纸管壳，装配式点火管，镍铬桥丝，二米长铁脚线。其名义秒量及实测秒量列于表1。秒量仍量测用SC-14型光线示波器在2地进行。二系列雷管的名义秒量前五段秒差约为25毫秒，后四段仍秒差约为50毫秒；三系列雷管名义秒量各段秒差均为100毫秒等间隔。由表1的量测结果可知，2地所到该批雷管质量欠佳：①前九段二系列毫秒雷管，被测39发雷管中，计有3、4、5、8、9五段中出现秒量出格雷管（见表2）。

毫秒雷管秒量实测结果

表1

段号	发数	起外电压	名义秒量 ms	实测秒量 ms					平均秒量 ms
				1	2	3	4	5	
1	4	220V	< 13	3.6	2	4.6	5.5		3.9
2	4	"	15~35	16.4	12.7	21	20		17.5
3	3	"	40~60	34.6		57.3	62.8		51.5
4	4	"	65~85	91	85.4	113.6	73.64		90.41
5	4	"	90~120	190	155	130	150		156
6	5	"	130~170	143	149	142	140	137	142
7	5	"	178~222	195	200	176	176	180	184
8	5	"	227~273	256	307	240	270	257	266
9	5	"	280~340	347	376	355	355	362	359
10	5	220V		379	378	385	340	365	369
11	5	"		502	472	464	471	484	479
12	5	"		587	557	562	581	602	578
13	5	"		724	716	689	684	714	705
14	5	"		811	730	782	805	731	772
15	5	"		902	862	867	887	910	886

注：①段号10~15实际上为三系列毫秒雷管的5段~10段。

②三系列毫秒雷管名义秒量无资料，据煤炭部供应局介绍为100毫秒等间隔。

其中又以5段、9段最严重。5段被测4发全部出格，9段被测5发中有4发出格。

②三系列毫秒雷管实测30发中尚未发现交叉串段现象，其质量尚可。但其9、10两段（表中13、14号）秒量已十分接近。

③实际施工中，对4段、9段、13段雷管跳段使用。

各段雷管中秒量出格数目 表2

段别	1	2	3	4	5	6	7	8	9
出格数	无	无	1/3	1/4	4/4	无	无	1/5	4/5

为满足普济隧道工作面爆破，预裂爆破施工试验要求，特由铁二局104厂试制了一批直径20毫米的小直径药卷。其主要技术性能见表3。

“104—20”小直径药卷技术性能 表3

炸药种类	药卷规格 直径×长度	殉药距离	密度	每卷重量	实测炸速
	毫米×毫米	厘米	克/厘米 ³	克	米/秒
1号岩石硝铵	20×600	5	1.05~1.10	185	3341

“104—20”20毫米小直径药卷采用1号岩石硝铵炸药，其TNT含量为14%。实际上每根长药卷是由3根200毫米长的药卷，再于其外用腊纸裹成，浸腊防潮处理。实际称量的装药强

度高达 1.03克/厘米^3 ，每米炮眼的装药集中度 308克/米 。实测的平均药速 3341米/秒 ，裸露药包无约束条件下测得的药速最高达 $3360\sim 3480\text{米/秒}$ 。

实际使用的情况说明，这批小直径药卷传药性能良好，但是做为光面爆破、预裂爆破之用，特别是在普济隧道这类软弱围岩条件下进行大断面开挖控制爆破，显然药卷密度和药速均嫌太高。实际施工中，虽然拱部光面爆破成型尚好，但炮眼痕迹保存率不高，如不及时紧跟掌子面喷射混凝土支护，就会有危石坠落。这也就表明应当再生产一批密度低、药速低的小直径药卷。

此外，还在成都加工了一批大致与在 $\times\times$ 线梨树沟隧道试用过的型式相同的塑料扩张套管及一种没有扩张翼片的连接套管。

(二) 光面爆破和预裂爆破参数。

普济隧道围岩软弱，特别是预定的三种爆破方法试验的对比段几乎都处于全泥岩段。施工方案选定为射孔法全断面开挖。为确保施工安全，并考虑到施工单位的技术条件经研究决定三种爆破方法的试验只右边墙位置进行。拱部自始至终用光面爆破法开挖。

在各项试验观测的准备工作完成后，三种爆破试验于1977年7月13日开始，这时隧道开挖里程为 $K82+333.8$ 。三种爆破

方法试验的安排见表4。

三种炸破方法的设计参考数列于表5。炮眼布置示意图见图1。逐日记录的实际钻孔参数列于表6。

三种炸破方法的实际开挖效果列于表7。

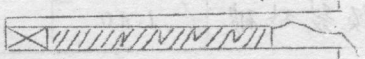
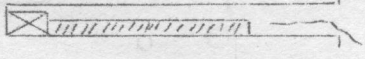
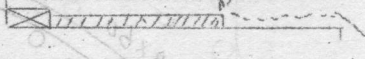
三种炸破方法试验安排

表4

日期	里程	炸破方法		开挖 进度 米	备 注
		拱 部	边 墙		
7月13日	K82+333.8	光面炸破	普通炸破	1.5	网路故障, 2/3 炮眼拒炸
7月14日	+335.1	“	“	1.3	
7月15日	+336.7	“	“	1.6	
7月16日	+338.1	“	“	1.4	
7月17日	+339.1	“	“	1.0	
7月18日	+340.2	光面炸破	光面炸破	1.1	
7月19日	+341.8	“	“	1.6	
7月20日	+342.8	“	“	1.0	
7月22日	+344.4	光面炸破	预裂炸破	1.6	掏槽眼仅0.7~ 1.4米 掏槽眼缺2个33 不够深
7月23日	+345.8	“	“	1.4	
7月24日	+347.0	“	“	1.2	
7月25日	+348.2	光面炸破	光面炸破	1.2	
7月26日	+349.4	“	“	1.2	
7月28日	+350.7	“	“	1.3	

三种炸破方法的设计参数

表5

炸破方法	炮眼直径 D 毫米	周边眼深度 L 米	周边眼间距 E 米	抵抗线 W 米	装药集中度 q 公斤/米	装药结构
普通	50	1.8	70	70	0.58	
光面	50	1.8	60	75	0.29	
预裂	50	1.8	48	50	0.26	

试验炸破参数记录

表6

序号	日期	炸破方法	炮眼总数	炸破进度 米	侧边眼间距 米	侧边眼深度 米	抵抗线 米	每个炮眼装药量 公斤	装药集中度 公斤/米	装药总量 公斤
1	7月30日	普通	116	1.5	0.65	1.6	0.67	1.05	0.66	104.27
2	15日	“	116	1.6	0.68	1.8	0.69	1.05	0.58	125
3	16日	“	117	1.4	0.59	1.3	0.70	0.90	0.69	97.26
4	17日	“	118	1.0	0.63	1.3	0.83	0.75	0.58	88.92
5	18日	光面	117	1.1	0.57	1.2	0.65	0.40	0.33	120.21
6	19日	“	118	1.6	0.60	1.8	0.70	0.52	0.29	117.69
7	20日	“	117	1.0	0.58	1.5	0.70	0.52	0.35	116.28
8	22日	预裂	121	1.6	0.49	1.8	0.55	0.64	0.36	126.62
9	23日	“	120	1.4	0.48	1.9	0.62	0.64	0.34	120.55
10	24日	“	126	1.2	0.45	1.7	0.66	0.52	0.31	126.40

三种炸破方法试验效果

表 7

炸破方法	平均进度 米	平均超挖量 厘米	炮眼痕迹 保存率 %	比炸药消耗量 公斤/米 ³
普通炸破	1.38	43	10~20	1.50
光面炸破	1.23	15	30~40	1.92
预裂炸破	1.40	12	60~80	1.78

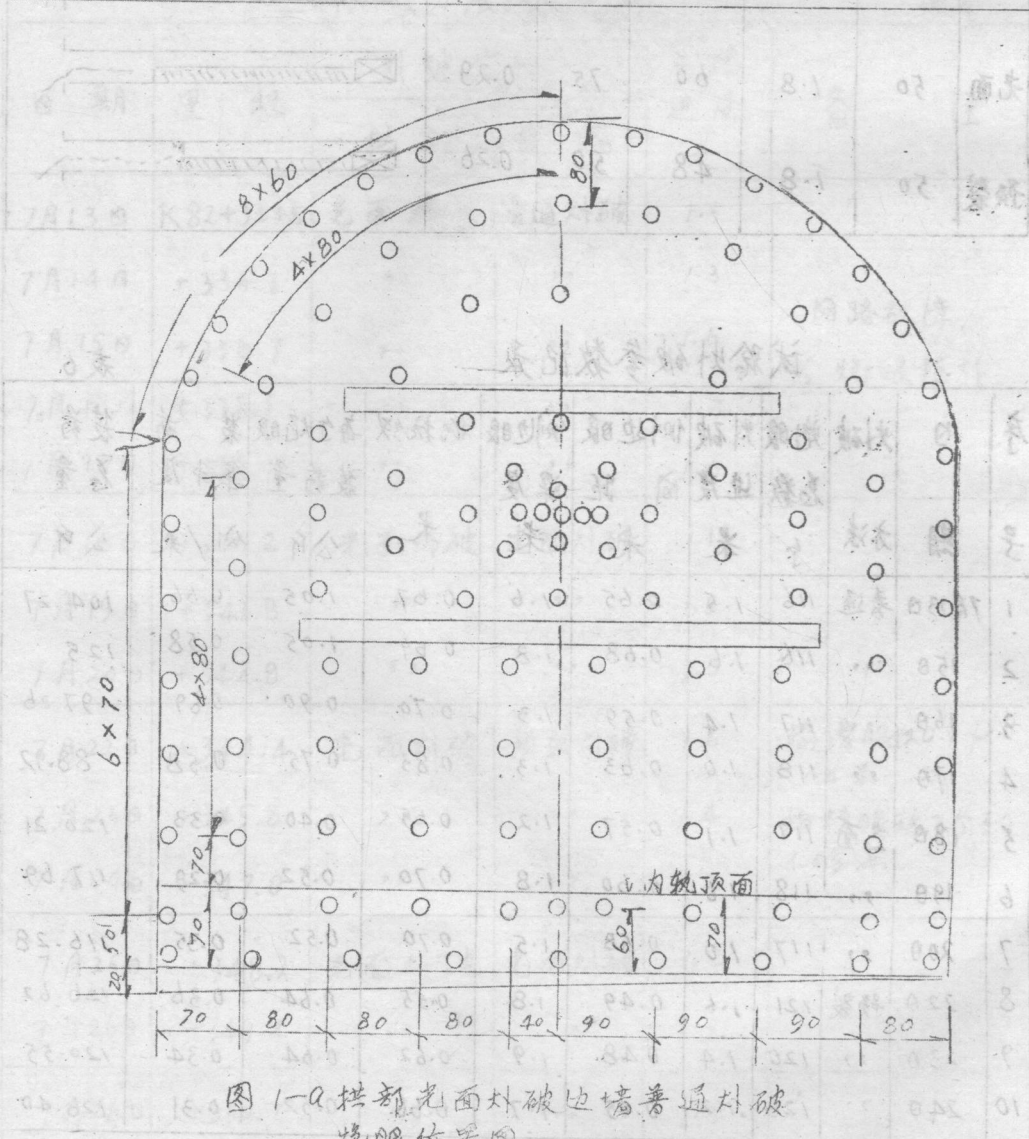


图 1-a 拱部光面炸破边墙普通炸破炮眼布置图

图中尺寸均以厘米计

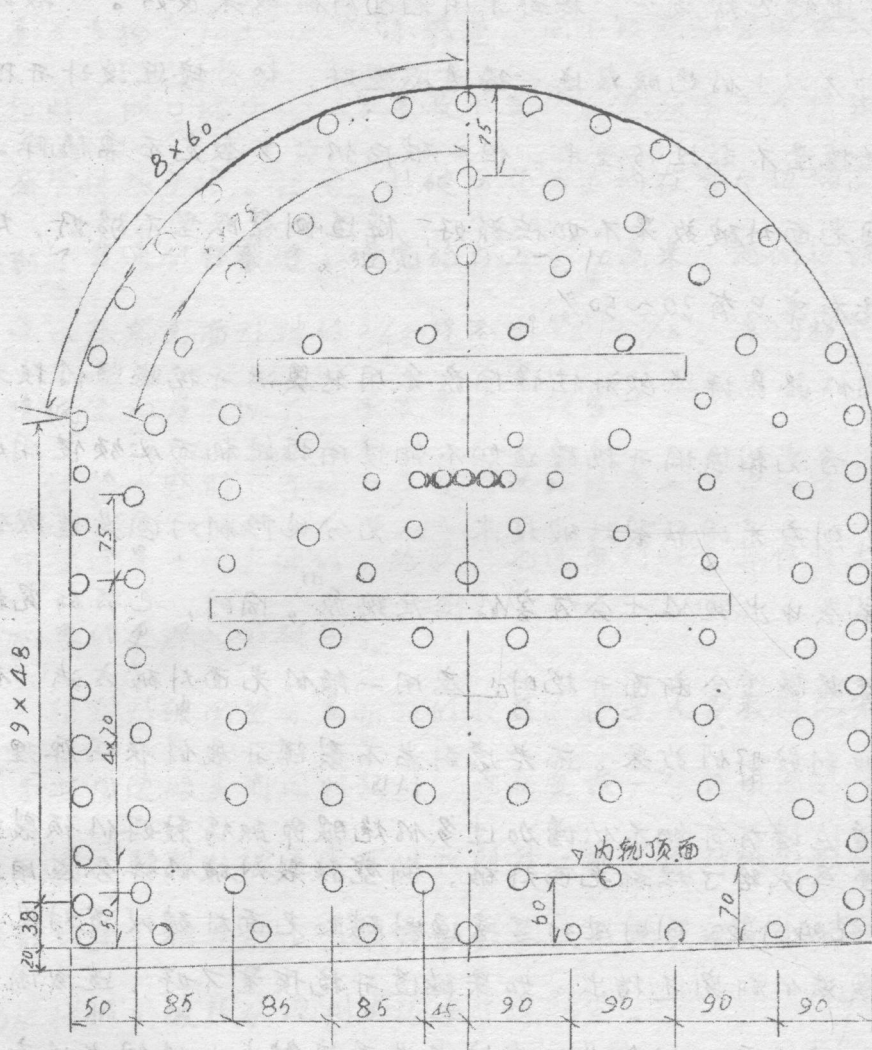


图 1-6 拱部光面炸破边墙预裂
炸破炮眼布置图

图中尺寸均以厘米计

(三) 三种炸破方法的初步评价:

试验结果表明, 在软弱围岩条件下, 隧道开挖采用光面炸破、预裂炸破等控制炸破技术, 无疑是进行全断面机械化开挖安全施工的必要前提。

只要进行正规施工，拱部采用光面爆破效果良好。一般均可保为50%以上的炮眼痕迹，隧道成型好，相当接近设计开挖轮廓。超挖量不超过15厘米。但爆破后仍有少数危石需撬除。边墙采用光面爆破效果不如拱部好，隧道侧壁成型不够好，炮眼痕迹保存率只有30~50%。

法国的路易评述欧洲德语国家采用新奥法开挖隧道的技术发展时，首先就强调开挖隧道如不能使用掘进机而必须使用爆破法时，则应采用预裂爆破技术，以充分地限制对围岩造成的危害及岩层中出现的十分有害的降压现象⁽¹⁾。同时，已有研究指出⁽²⁾，铁路隧道全断面开挖时，应用一般的光面爆破方法，侧壁很难收到较好的效果。而考虑到岩石裂隙开展的顺压原理，使得隧道边墙有可能不必增加过多的炮眼即取得较好的预裂效果。因此，重点试验了拱部光面爆破，侧壁预裂爆破的综合应用技术。为了说明问题，同时进行了普通爆破和光面爆破以资对照。

新奥法的研究还指出：如果隧道开挖质量不好，造成围岩表面超欠挖严重，就会出现支护与岩层接触点上的很大的应力集中，这是常常使支护结构破坏的原因之一。因此，光面爆破和预裂爆破也势在必行。

普济隧道的试验表明，在相同的施工条件下，两侧边眼只需增加共4~6个，即可实现很好的预裂爆破。这时，两侧周边眼每个炮眼光装一节标准直径起爆药，再装1米长（1 $\frac{4}{3}$ 节）

20毫米直径“104-20”小药卷。用1段毫秒雷管串入网路同时起炸。眼口堵炮泥。1米长小直径药卷须用3个扩张翼比塑料套管使其定位。结果，炸破后在两边均在整个边墙高度上观察到了贯通的预裂缝。缝宽约在2~10毫米。两侧边眼痕迹保有率由原来光面炸破的 $3/8$ 提高到 $5/8 \sim 7/8$ 。平均超挖值进一步降低至12厘米以下。围岩表面平顺多了。

试验中感到，在地质多变的铁路隧道开挖中，这一技术的应用前途是十分广阔的。为此，也还要对许多具体技术问题进一步必要的更深入的研究。

预裂炸破固然有着明显的效益，但是大多数研究者均指出：由于其周边眼最先同时起炸，也就是在一个自由面的情况下起炸，因而预裂炸破通常可以收到较一般光面炸破的效果更佳的外形效果，但是减少炸破震动的要求不能实现。我们在几个工地进行的炸破振动观测也证实了这一点。

为了克服这一问题，使预裂炸破工艺更完善，瑞士研究改用一种充气低密度炸药Volumex进行预裂炸破，则振动可降低25%~30%⁽³⁾。此外，国外近年来还有人研究采用沿周边范围内先炸开两条平行的裂缝，即形成一个预裂带的方法来进一步控制预裂炸破的振动效应⁽³⁾⁽⁴⁾。

(1) 小直径药卷、塑料套管。

“104-20”毫米小直径药卷，由于其每节20厘米长的药卷

系由装药机装填，装药密度高，炸速偏高。它与梨树沟隧道使用的“京化—20”及湖北七〇〇三工程使用的“枝城—20”等小直径药卷，及国外类似药的主要性能列于表8。

“104—20”与国内类似炸药性能对照

表8

炸药名称	生产国	药卷规格 直径×长度 (毫米)	硝化甘油或 TNT含量 %	炸速 (米/秒)	殉炸 距离 (毫米)	密度 (克/厘米 ³)	装药 集中度 (公斤/米)
104—20	中国	20×600	TNT 14	3341	50	1.05~1.10	0.31
京化—20	中国	20×610	„ 14	2934	20	0.96~1.06	0.35
枝城—20	中国	20×500	„ 11	2580		0.86	0.25
古立特	瑞典	17×470	硝化甘油 50	3700	24	1.2	0.23
S B新柱	日本	19.7×500	„ 25~28	3060	10以上	1.0	0.31
多奈尔特	英国	21×450		2500		0.90	0.30

值得注意的是，与“104—20”相比“枝城—20”更为有利。“枝城—20”是用2号岩石硝铵炸药改装而成，手工装填，装填密度0.86克/厘米³，TNT含量11%，装药集中度仅0.25公斤/米。实测无约束炸速2580米/秒。因而从炸破效果来看，国内已试用的几种炸药应当说“104—20”虽有炸速性能可靠的优点，但也使猛度提高了。因此，看来今后应在“枝城—20”的基础上进一步望型生产光面炸破、预裂炸破专用小直径长药卷。

晋济隧道最初一段施工中曾较好地坚持使用了专用翼电扩张式塑料套管，及无翼电连接套管两种套管。但其中有一段时间坚持得不够好。之所以如此，使用塑料套管的目和意义宣传得不够是一个重要原因。使用这些塑料套管的原订目的为：

1. 避免在大直径炮眼中装小直径药卷时会重叠装入；
2. 避免周边眼中的小直径炸药卷被先行起炸的内圈眼产生的气浪吸出；
3. 理想的“不偶合作用”要求小药卷在炮眼内有环状空气间隙。

另外，据有关文献报导⁽⁵⁾，由于大炮眼中装小药卷时存在一种“沟槽效应”。即膨胀的炸药气体驱动沟槽中的空气，好象压缩空气柱那样向前运动，它往往会产生超前炸药波阵面几十到几百微秒，而作用于炮眼内炸药上几十到几百巴的超压。它会在炸药未炸药前即通过已有的岩石裂隙硬冲入相邻的炮眼中，使还未炸药的装药被吹出。此外，这一数量级的超压持续这样长时间，会使炸药在炸药波阵面到达前就受到压缩。这对于炸药能力随着密度的增加而降低的硝铵类炸药，沟槽效应可能会使炸药中断。

而在壁厚9毫米内径41毫米的聚乙烯管中进行的实验证明，上述扩张式塑料套管不仅由于其翼电的方向性使其可免于被吸出，同时还抵销了沟槽效应，因此防止了炸药熄灭。同时还指

出，把装药放在炮眼中心也是重要的。因此，今后凡使用不偶合装药进行光面爆破、预裂爆破时，只要有条件，均应坚持使用这些套管。

在没有坚持使用塑料衬纸套管的时候，常常发现爆破后洞内充满了未炸药的硝酸炸药粉尘。并观察到残雷的往往很长的光滑完整的，未炸过的炮根。这些现象也提醒我们今后应进一步对沟槽效应进行研究。

(2) 炮眼距离、堵塞和起炸。

预裂爆破，这次试验中确定炮眼间距为48厘米，预裂缝贯通良好。炮眼痕迹保存率也较高。但由于所用炸药密度和药速偏高，是否具有普遍意义还不宜马上下结论。

但是，预裂爆破时周边眼与内圈崩落眼的间距也十分重要。这次参考有关资料，确定其间距为10倍炮眼直径，即50厘米。施工试验表明，50厘米几乎是上限，凡崩落眼至预裂缝间距大于50厘米（有时高达80厘米），都会使周边岩带留下较长的炮根。

许多研究者还指出，预裂缝或称预裂面，往往在爆破循环中未提供第二个临空面⁽⁶⁾，假如要使这个缝宽到足够大，则预裂爆破本身就会造成对围岩过度的有害振动⁽⁴⁾。因此，内圈崩落眼至预裂缝的间距应较小，装药不可过多。

国内外有关预裂爆破的报导中，无例外地一致强调预裂