

隧道无槽爆破法研究*

Research on the method of no-cut-holes blasting for tunnelling

汪传松

(武汉水利电力大学建筑工程系, 宜昌, 443002)

文 摘 传统的隧道有槽爆破, 所需的炮孔多, 炸药单耗量大, 炮孔利用率低, 爆网复杂, 爆震强烈。针对这种情况, 提出了一种隧道无槽爆破法。该法通过孔内分段起爆和提高炮孔堵塞质量, 在取消掏槽的基础上, 使崩落炮孔的间距达到 2 m 左右, 炮孔的利用率达到甚至超过 100%, 崩落炮孔的分段数降至 6 段以下, 从而使炮孔数减少、炸药单耗和爆震明显降低。

关键词 爆破技术, 地下爆破, 隧道开挖

中图法分类号 TD 235. 1, TV 542, U 455. 41

文献标识码 A

文章编号 1000- 4548(2000) 05- 0555- 04

作者简介 汪传松, 男, 1949 年生, 副教授, 从事建筑材料及水利水电工程施工等方面的研究。

Wang Chuansong

(Wuhan University of Hydraulic and Electric Engineering, Yichang, 443002)

Abstract The traditional method of breaking in shot needs many blast holes and much explosive and it causes the small utilization rate of the drill holes, the complex blasting network and the intense blasting quake. In view of this condition, this paper puts out a method of blasting off solid for tunnelling. It increases the distance between the blasting holes to about 2 m and makes the utilization rate of the drill holes reaching or even more than 100%, and reduces the number of sections of the blasting network to 6 or less. On the basis of no-cut-holes blasting and intensifying the plugging ability, the number of blasting hole has been decreased and the quantity of explosive per each cub. meter of rock deminished and the intensity of the quake evidently lowered.

Key words blasting technique, underground blasting, tunnel excavating

1 前 言*

迄今为止, 隧道和地下井巷的爆破开挖一直都分三步进行, 即先在工作面的适当位置用一定数量的炮孔炸出一个深槽(坑)作为新的补充临空面, 再借助此临空面进行崩落, 最后进行光面爆破。这种爆破方法虽然在长期的实践过程中不断得到改进, 但其所需的炮孔数多、炸药单耗量大、炮孔利用率低、起爆分段数多、爆网复杂以及爆破震动强烈等根本性问题却始终未得到有效解决。表 1 所列是国内外近 10 年来几条隧道的爆破情况, 它们基本上代表着目前隧道的爆破水平。由表 1 不难看出, 目前隧道钻爆过程中仍存在着严重的人力、物力、财力和时间的浪费。针对这种情况, 笔者提出了一种隧道无槽爆破法。这种方法通过孔内分段微差起爆和提高炮孔堵塞质量等, 在取消掏槽的基础上使传统有槽爆破存在的主要问题得到了有效的解决。

2 无槽爆破及其特点

隧道无槽爆破, 就是取消掏槽, 将隧道和井巷的爆破由原来的掏槽、崩落和周边光爆三步改为崩落和周边光爆两步。其中, 崩落用于形成洞身, 使隧道的掘进向前推进; 周边光爆则用于修整洞壁, 以形成较规整的

断面轮廓。为保证在无槽的情况下达到应有的爆破效果和效率, 将所有的崩落孔都分为相同的几段装填炸药, 各段炸药分别堵塞, 独立起爆, 利用各雷管的延时作用, 使各崩落炮孔中的各炸药段都从孔口起依次向孔底独立延时起爆, 直到最后一段, 且各炮孔中序号相同的炸药段在同一时刻起爆。这样, 每爆一段, 岩矿就沿隧道轴线方向剥落一层, 如此层层剥落, 隧道便随之向前推进。

与传统的有槽爆破法相比, 无槽爆破方法具有以下特点:

(1) 直接崩落。整个工作面范围内的岩矿同步崩落, 无需掏槽, 也无需设主爆区。

(2) 所有崩落炮孔都采用孔内分段微差起爆, 即每个崩落孔都分为数段装填炸药, 各段炸药分别堵塞, 独立起爆。

(3) 各崩落炮孔的分段数及各段炮孔的长度、装药系数和堵塞等都基本相同。

(4) 同一崩落孔中的各炸药段由孔口起依次向孔底独立延时起爆, 而孔间起爆不分段。

* 该法已于 1997 年 4 月 21 日以“稀炮孔齐发直接崩落爆破方法”为名申请中国专利, 申请号 97104789. 8

到稿日期: 1999- 07- 22

表 1 几条隧道的爆破情况

Table 1 The blasting condition of several tunnels

隧道名称	开挖断面积 /m ²	炮孔参数(直径×深度) /mm	炮孔数 /个	炸药单耗 /(kg·m ⁻³)	炮孔利用率 /%
大瑶山雷公尖隧道	100.7	48×5 150	200	1.65	90
		102×5 150	3	—	—
大瑶山某导洞	约 10	48×(1 000~ 1 500)	48~ 50	5.0~ 7.4	约 95
		102(中空孔)	4	—	—
		48×(2 000~ 2 500)	48~ 50	3.0~ 3.8	约 95
		102(中空孔)	4	—	—
华蓥山隧道	90.85	42×2 800	190	1.28	预计 92
秦岭 II 线导洞	20.00	48×4 800	89	3.23	预计 94
三峡仙人溪# 2 左线隧道	76.65	48×(4 000~ 4 700)	133	实际> 1.5	实际< 90
三峡茅坪溪泄水隧道	12.2×8.8	—×4 000	140	掏槽 7~ 10	平均> 85
		102(中空孔)	3	—	—
挪威 Nyset- Steggje 隧道	9.00	45×(3 900~ 4 900)	37	—	95~ 96
日本五里峰上田工区	—	—×(4 000~ 500)	—	1.95	约 95
瑞典 Sparvags Tunnel	75.00	48×5 500	124	1.8~ 2.0	82
印度墨尼亚隧道	6.8×6.8	—×2 500	126	—	—

(5) 各崩落孔中序号相同的各炸药段在同一时段起爆(齐发),被爆岩矿由工作面起沿隧道轴线亦即掘进方向逐层剥落,而不是沿平行于工作面的方向崩落。

(6) 崩落炮孔间的距离较大(稀炮孔),除特别坚韧的岩矿外,一般可达 2 m 左右。

(7) 所有炮孔均为直孔,且直径相同。

3 无槽爆破原理

隧道和地下井巷的爆破,总是从单自由面条件开始的。这种爆破与多自由面爆破相比,最显著的特点是被爆岩矿所受的约束力(夹制力)很大,而因炮孔与自由面之间夹角的限制,炸药爆炸时沿自由面外法线方向作用的爆炸气体压力即最有效破坏力很小。无槽爆破就是根据这一特点,从降低约束力和增加最有效破坏力入手,使有槽爆破存在的问题得到满意的解决。

3.1 降低约束力

抵抗线的大小是决定爆破难易程度的关键因素之一。传统有槽爆破(直孔)的爆破效果之所以差,根本原因之一在于其抵抗线过大。无槽爆破采用孔内分段微差起爆,将一个炮孔分为 n 段装填炸药,使各段的抵抗线降至原来的 $1/n$ 。由药包量计算公式 $Q = kw^3$ 知,当抵抗线由 w 降至 $w_1 = w/n$ 时,相应的药包量便由 Q 降为

$$Q_1 = kw_1^3 = k\left(\frac{w}{n}\right)^3 = \frac{Q}{n^3}$$

这样,单孔用药总量仅为

$$nQ_1 = n \cdot \frac{Q}{n^3} = \frac{Q}{n^2}$$

比原用药量减少 $(1 - \frac{1}{n^2})$ 倍,这是无槽爆破能减少炮孔和炸药单耗的根本原因之一。

3.2 增加最有效破坏力

在单自由面条件下,炮孔中的爆炸气体压力可沿自由面和自由面的外法线方向分解为相互垂直的两个分量。显而易见,对于直孔来说,只有当堵塞体通过它与炮孔壁之间的摩擦作用将作用在堵塞体里端面上的爆炸气体压力传给被爆岩矿时,沿自由面外法线方向作用在被爆岩矿上的爆炸气压分量,即最有效破坏力 $P_{\perp}$ 才不会为零,而为

$$P_{\perp} = \mu P_d = \mu \pi r^2 p$$

式中 μ 为堵塞体的摩擦传力系数; P_d 为作用在堵塞体里端面上的爆炸气体压力; r 为堵塞体亦即炮孔的半径; p 为炮孔中的爆炸气体压强峰值。

(1) 影响因素

在传统有槽爆破中,由于下述原因, μ 和 p 都很小,因而 $P_{\perp}$ 一般也很小。

a) 炮孔装药系数过大。其中,掏槽炮孔的装药系数常高达 0.9~ 0.95^[1,2],崩落炮孔的装药系数一般也不低于 0.7。过量的装药限制了炮孔的堵塞长度,致使炮孔因堵塞长度不够而形成“冲天炮”。结果,爆炸气体压强 p 难以升到较高的值。

b) 作用在堵塞体里端面上的爆炸气体总压力很小。首先,作用在堵塞体里端面上的爆炸气体压力与

垂直于炮孔壁的气体压力 P_b 之比 δ 为

$$\delta = \frac{P_d}{P_b} = \frac{\pi r^2 p}{2\pi r l_b p} = \frac{r}{2l_b}$$

当炮孔长度 $l = 500 \text{ cm}$, $r = 2.5 \text{ cm}$ 时, 即使装药长度

$l_b = 0.75 l$, 比值 δ 也仅为 $\frac{1}{300}$; 若 $l_b = 0.9 l$, 则比值 δ

为 $\frac{1}{360}$ 。这说明 P_d 所占的比重极小。当 $r = 2.5 \text{ cm}$ 时, 作用在堵塞体里端面上的爆炸气体总压力为

$$P_d = \pi r^2 p \approx 19.63p$$

不足爆炸气体压强的 20 倍。

c) 堵塞体的传力系数过小。地下爆破与地面爆破一样, 仍采用土、砂或纸团、草把等堵塞炮孔。事实证明, 由这些材料所形成的堵塞体都很不牢固, 它们与炮孔壁间的摩擦传力系数 μ 都远远小于 1, 故 $P_{\perp}$ 远小于 P_d 。

值得注意的是, 即使炮孔为斜孔, 垂直于孔壁的爆炸气体压力在自由面外法线方向的分量不再为零, 但因炮孔的倾斜角度有限, 自由面外法线方向的爆炸气体总压力值仍很小。

无槽爆破通过提高炮孔堵塞质量、增加炮孔堵塞体的数量和改变堵塞体在炮孔中所处的位置等, 使作用在被爆岩矿上的有效破坏力得到了明显增加。

(2) 改善堵塞体的物理力学性质

炮孔的堵塞质量, 首先取决于所用堵塞材料和堵塞方法。无槽爆破采用笔者发明的新材料和新方法堵塞炮孔, 提高了炮孔堵塞体本身的强度及其与炮孔壁的挤压力, 使堵塞体的抗剪破能力大为增强, 沿炮孔壁滑动的可能性明显降低^[3]。

a) 提高了堵塞体的封闭作用, 防止了“冲天炮”的形成, 减少乃至避免了因爆炸气体由炮孔口直接外泄而导致的爆炸气体压强降低, 提高了炮孔中的爆炸气体压强峰值 p , 增加了作用在堵塞体里端面上的爆炸气体总压力。同时促进了炸药的化学反应, 使炸药所蕴含的化学能更快、更充分地释放出来, 因而提高了炸药能量的利用率和爆炸功率;

b) 增大了堵塞体与炮孔壁之间的挤压应力, 使堵塞体的摩擦传力系数 μ 明显提高。作用在堵塞体里端面上的爆炸气体压力能全部或大部分传给被爆岩矿而成为最有效破坏力。

(3) 改变堵塞体在炮孔中的位置

堵塞体的封闭作用, 不仅与其物理力学性质有关, 而且还与其在炮孔中所处的位置有关^[4]。因为堵塞体在炮孔中所处的位置直接决定着最小抵抗线的大小。理论研究和实践证明, 如果堵塞体距炮孔口过近, 其最小抵抗线便很小。在此情况下, 即使堵塞体本身不

丧失作用(既不沿孔壁滑动也不被剪破), 被爆岩矿也会沿最小抵抗线破坏而使爆炸气体外泄, 使被爆岩矿的破坏范围明显减小。无槽爆破由于单孔用药量比有槽爆破少得多, 故其装药长度成倍减小, 这使堵塞体自然后移, 从而保证了抵抗线具有适当的值。

此外, 堵塞质量的提高, 还使被爆岩矿中的应力状态发生改变。在传统的有槽爆破中, 因炮孔装药系数很大, 绝大部分爆炸气体压力都是平行于自由面的。在这种爆炸气体压力的作用下, 炮孔周围的岩矿都处于多维受压状态。无槽爆破与此不同, 由于其堵塞质量提高且堵塞体后移, 自由面外法线方向作用的爆炸气体压力明显增加, 最小抵抗线范围内的岩矿因横力的作用而处于受弯状态(沿自由面的外法线方向凸起), 内部形成主拉应力。文献[5]表明, 岩矿在静力作用下的一维抗拉强度仅为近爆区处于多维受压岩矿实际抗压强度的 1/100 左右。故堵塞体的后移对降低岩矿的爆破难度起到了极为重要的作用。同时, 由材料力学知, 只要弯曲高度(即最小抵抗线)不过大, 则横力引起的弯曲拉应力的分布范围便较宽, 岩矿的破坏范围也因此变大。

(4) 增加堵塞体的数量

无槽爆破将单孔分为 n 段装药, 各段分别堵塞, 使单个炮孔中的堵塞体由一个增加到 n 个, 垂直与平行于自由面的爆炸气体压力之比 Δ 相应地变成

$$\begin{aligned} \Delta &= \frac{P_{d1}}{P_{b1}} + \frac{P_{d2}}{P_{b2}} + \dots + \frac{P_{dn}}{P_{bn}} \\ &= \delta_1 + \delta_2 + \dots + \delta_n = \sum_{i=1}^n \delta_i \geq n\delta \end{aligned}$$

自由面外法线方向的爆炸气体压力相应地变为

$$P_{\perp} = 19.63np$$

与传统有槽爆破相比, Δ 和 $P_{\perp}$ 都扩大 n 倍。

4 应用试验

1994~1997 年, 笔者在清江高坝洲水电工程工地、三峡工程对外交通专用公路仙人溪^{#2}左线隧道、三峡永久船闸地下输水隧道等处作过部分模拟试验和现场试验。

4.1 地面试验

地面试验在清江高坝洲水电工程工地的灰岩中进行, 共分 4 处:

(1) 右岸进场公路路基开挖爆破。在较新鲜岩石的水平面上凿出 4 个直径 40 mm、深 2 m 的直孔, 孔距 2 m, 单孔装药 0.6 kg, 堵长约 30 cm, 孔内未分段, 所得爆坑的口部直径略大于 4 m, 深 2.2 m。清江大桥桥头地面试验的结果与此相近。

(2) 右岸坝肩立面试验也在较新鲜的岩石中进行。试验仅用1个炮孔, 炮孔参数与上相同, 孔内分为3段装药, 其中孔口段装药0.6 kg, 其余2段均为0.4 kg, 爆后测得爆坑的口部直径和深度都大于2 m。

(3) 左岸开关站地面开沟试验。炮孔直径40 mm, 深4 m, 单孔装药1.5 kg, 用含水适当的粘土紧密填充至孔口, 连爆3次, 所得漏斗的口径仅0.8 m左右。后改用无槽法爆破, 单孔装药0.9 kg, 堵塞长度仅0.35 m, 爆坑的口径就达3 m左右, 深度近4 m。

4.2 洞内试验

(1) 三峡工程对外交通专用公路仙人溪[#]2左线隧道, 开挖断面面积76.65 m², 白云岩。原采用斜孔楔形(分阶分段)掏槽, 掏槽孔深4.4~4.7 m, 崩落和周边孔深4 m, 孔径均为45 mm。设计全断面炮孔总数133个, 装药总量303 kg, 炮孔利用率90%。实际孔数和药量都大于设计值, 而炮孔利用率仅75%~85%。采用无槽法爆破, 崩落炮孔的间距1.8~2.3 m, 孔内分3段装药, 全断面炮孔数减至103个, 总装药量降至174.6 kg, 分别比原来减少30%和40%, 而实际炮孔利用率仍接近80%。

(2) 三峡永久船闸地下输水隧道[#]1中墩上游段0+139.7 m处, 新鲜花岗岩, 断面面积144 m², 炮孔直径48 mm, 深3.8 m, 将原掏槽部位改用无槽法爆破, 在节省炸药20%的基础上, 使全断面炮孔利用率达到了93%。

(3) 清江高坝洲左岸灌浆隧道, 较新鲜的石灰岩, 断面尺寸3 m×3 m, 采用4个孔径为40 mm深2 m的炮孔崩落, 孔间距约1.8 m, 孔内分2段装药, 底段0.5 kg, 前段0.6 kg, 实际炮孔利用率100%。

5 结 语

由于隧道无槽爆破技术尚未取得专利权, 其中的某些关键技术尚不能公开, 本文只能对该法作简要介绍, 但由已完成的试验看, 这种方法的应用前景是十分广阔的。

值得指出的是, 目前所做的试验工作还很有限, 要使隧道无槽爆破成为一种系统的理论和成熟的技术, 还有许多工作要做。因此, 欢迎有意者合作进行现场(生产)试验, 以使该项技术早日转化为生产力。

参 考 文 献

- 1 冯叔俞, 马乃耀. 爆破工程: 上. 北京: 中国铁道出版社, 1980
- 2 王梦恕. 大瑶山隧道. 广州: 广东科技出版社, 1994
- 3 汪传松, 汪竹义, 刘国霖等. 炮孔堵塞料包研究. 人民长江, 1997, 28(6): 35
- 4 汪传松. 炮孔堵塞体的作用. 武汉水力电力大学(宜昌)学报, 1999, 21(1): 45~49
- 5 王文龙. 钻眼爆破. 北京: 煤炭工业出版社, 1984

欢迎订阅《工业建筑》(月刊)

本刊为中国建筑科学类核心期刊, 1999年“首届国家期刊奖”获得者, 美国工程信息库(EI Page One)、国际建筑数据库(ICONDA)收录期刊。

《工业建筑》2001年起为大16开, 彩色胶版印刷, 每月20日出版, 国内外公开发售。国内统一刊号CN11-2068/TU, 连续出版物号ISSN1000-8993。全国各地邮局均可订阅本刊, 邮发代号2-825; 读者也可直接汇款到本刊编辑部订阅, 定价每期6

元, 全年定价72元。

本刊兼营广告, 收费合理, 具有一定规模, 已成为展示企业形象的最好舞台。

本刊地址: 北京海淀区西土城路33号 邮编: 100088

传真 (010) 62266694 联系电话: (010) 62225599-3510、3511 3512 3513 E-mail: gyjz@public.sti.ac.cn

《工业建筑》编辑部

《勘察科学技术》2001年征订启事

《勘察科学技术》是由冶金勘察研究总院主办的面向全国工程勘察行业的学术—技术类双月刊, 是中国科技论文统计源期刊, 中国科学文献数据库收录期刊, 美国《SCI》数据库引用期刊, 中国地质文摘引用期刊, 万方数据网上网期刊。多次被评为河北省优秀科技期刊, 曾获得河北省优秀科技期刊特等奖。

《勘察科学技术》创刊于1983年, 国内外公开发售。每双月20日出版, 16开, 64页, 每册定价5.0元, 全年30.0元(含邮

费), 刊号: CN13-1100/TF, ISSN1001-3946, 广告经营许可证号: 1306024000013, 编辑部自办发行。

欢迎单位及个人订阅、投稿, 欢迎刊登广告。欲订者请向本刊编辑部索取订单(常年随时满足读者的订阅要求)。

地址: 河北省保定市东风中路43号 邮编: 071067 电话: (0312) 3020887

《勘察科学技术》编辑部