

大直径空孔双螺旋掏槽在大断面隧道开挖中的应用*

降世良, 刘三军, 王玮

(连云港明达工程爆破有限公司, 江苏 连云港市 222021)

摘要:在沙特 NEOM 隧道支洞项目中, 4[#]支洞为全线路的关键段, 前期开挖爆破中采用 4 空孔直线掏槽方法, 掏槽效果不稳定, 平均进尺为 4.55 m, 炮孔利用率为 91%, 爆破后凿欠和修整的时间较长, 影响隧道掘进效率, 无法满足施工进度要求, 且不利于控制施工成本。为此, 在综合考虑隧道围岩及钻孔条件后, 设计了一种 3×Φ127 mm 空孔的双螺旋掏槽方案, 理论开挖进尺为 5.0 m, 经过 85 个开挖循环的测试统计, 大直径空孔双螺旋掏槽方案的平均循环进尺为 4.86 m, 炮孔利用率为 97.2%, 循环进尺比前期采用的 4 空孔直线掏槽方案提高了 0.31 m, 实际爆破炸药及炮孔消耗均有所降低。在软弱、中硬及坚硬条件下的大断面隧道施工中, 与传统的掏槽爆破方法相比, 大直径空孔双螺旋掏槽方案可提高掘进效率, 降低爆破成本, 经济价值显著。

关键词:大断面隧道; 双螺旋掏槽; 大直径空孔; 爆破进尺

1 工程概况

沙特 NEOM 隧道项目全线共有 6 条支洞, 暗洞全长共 8415.27 m, 其中 4[#]、5[#]、6[#]支洞位于东部山区, 围岩由沉积岩、安山岩、花岗岩、砂岩等一种或多种混合组成, 岩石单轴抗压强度为 20~150 MPa。因隧道为向下开挖, 所以地质条件复杂、围岩等级变化速率较快。

隧道围岩支护等级为 AD-5E~AD-1 级。其中 AD-4 及以上围岩采用全断面爆破开挖法, AD-4 设计循环进尺为 1.5 m, AD-3 设计循环进尺为 3.0 m, AD-3A 及以上设计循环进尺为 5.0 m, 支洞典型断面为 11.52 m(宽)×8.85 m(高), 断面面积为 90.47 m², 设计坡比为 10.3%。

2 爆破方案的选择与分析

2.1 施工背景

隧道支洞采用挪威法开挖, 掌子面开挖前由施工单位、咨询及设计单位的地质工程师对掌子面围岩进行地质素描, 根据素描结果计算岩质评定系数, 然后确定支护类型与下一循环开挖长度。爆破开挖完成后需要立即扫描开挖断面超欠挖情况, 然后及时进行喷射混凝土支护, 待喷射混凝土强度达到 1

MPa 后(约 1.0 h), 方可进入掌子面进行下一道工序的施作, 围岩等级低于 AD-2 时, 要连续完成初喷、锚杆施作和复喷, 工序间环环相扣, 严禁在未完成上道工序前进行下道工序的施作。项目制定的目标循环时长为 17.5~18.5 h, 而每月实际有效工作天数为 28 d, 因此, 只有保证工序间无缝对接才能保证每循环时长控制在目标时长以内, 以此完成制定的工期目标。

2.2 掏槽方案选择

隧道开挖掘进时, 良好的爆破效果能大大减少超欠挖, 节省掌子面修整时间, 并减少一定的喷射混凝土支护, 所以爆破效果对循环时长有重大影响。在隧道爆破中掏槽方式的选择十分重要, 直接决定了隧道开挖掘进效率, 设计合理的掏槽结构能大大增加掏槽长度, 更好地为后方待爆岩体提供自由面, 有效提高炮孔的利用率。项目初始采用四空孔直线掏槽爆破方法, 设计循环进尺为 5.0 m, 经过现场测试统计, 发现该方案平均开挖进尺为 4.55 m, 炮孔利用率为 91.0%。调查发现, 在爆破钻孔时, 掏槽部位的钻孔精度较差, 经常出现穿孔现象。在出渣结束后观察掌子面掏槽情况时, 发现掏槽部位的岩体并未完全抛掷, 掏槽孔底部石渣经过挤压后形成了再生岩, 使得后方岩体自由面不足, 导致掏槽效果不

* 收稿日期: 2023-03-17

作者简介: 降世良(1989—), 男, 山西晋中人, 工程师, 主要从事隧道和露天矿山爆破工作, E-mail: 384253593@qq.com。

佳。另因支洞为向下开挖,围岩等级和岩石质量指标差异性大,所以掏槽孔参数需要根据岩体变化及时调整,无形中增加了部分工作量,且无法保证爆破效果。

螺旋掏槽^[1-3]具有成腔效果好,掏槽面积大等优点,而双螺旋掏槽^[4]结构可以看作两个独立的掏槽系统,可以在单螺旋基础上更好地提高掏槽成功率,增加掏槽爆破的稳定性。根据前期的观察和统计结果,再结合隧道围岩情况及炸药种类等因素,设计出了一种大直径空孔^[5]双螺旋掏槽结构,与传统的楔形掏槽和直眼空孔掏槽相比,爆破效果稳定,有利于缩短隧道开挖循环时长和节约施工材料。

3 爆破参数的确定

隧道爆破参数的选取取决于隧道地质条件、断面大小、循环进尺、凿岩条件等因素,掏槽爆破参数的选取是爆破成功的关键^[6-8]。大直径空孔双螺旋掏槽结构是利用空孔为附近的掏槽孔提供自由面和补偿空间^[9-10],待岩体爆破破碎后,在爆破应力和高压气体的相互作用下,将破碎的岩石抛掷出槽腔外,为后续待爆岩体提供更多的自由面,而其他炮孔参数则可以根据炮孔作用、部位、装药结构等因素选取。

3.1 炮孔数量计算

工作面上的炮孔数量可用式(1)计算^[11]。

$$N = 0.0012 \cdot qS / (ad^2) \quad (1)$$

式中, N 为炮孔数量; q 为炸药单耗; S 为开挖断面面积; a 为炮孔装填系数; d 为药卷直径。

3.2 炸药单耗计算

炸药单耗的主要影响因素有断面大小、掏槽方式、炸药品种、装药方式及岩体结构、裂隙和层理的影响系数等,炸药单耗可用式(2)估算^[12]。

$$q = (0.3\sqrt{f} + 2/\sqrt{S})Cbe\zeta\omega \quad (2)$$

式中, f 为岩石坚固性系数,取 10; C 为药卷直径影响系数,取 0.95; b 为炮孔深度影响系数,取 1.1; e 为炸药能量系数,取 1.25; ζ 为装药密度影响系数,取 1.05; ω 为岩体结构、裂隙和层理影响系数,取 0.8。

3.3 周边孔参数计算

隧道轮廓采用光面爆破,装药结构为不耦合间隔装药,根据爆破施工经验,炮孔间距取炮孔直径的 8~18 倍,光爆层厚度 W_z 参照式(3)计算^[12-13]。

$$K_z = E_z / W_z \quad (3)$$

式中, E_z 为炮孔间距; W_z 为光爆层厚度;一般 K_z 值取 0.7~1.0,实际施工时按照岩石种类进行选取。

在爆破施工中预先按照一定的炮眼间距进行试验,并根据光面爆破效果进行逐步调整,经验值参数见表 1。

表 1 光面爆破参数值

岩石种类	孔间距 E_z/cm	最小抵抗线 W/cm	炮孔密集系数 E	装药系数/ (kg/m)
硬岩	55~70	60~80	0.7~1.0	0.30~0.35
中硬岩	45~65	60~80	0.7~1.0	0.20~0.30
软岩	35~50	45~60	0.5~0.8	0.07~0.12

3.4 崩落孔及底板参数计算

崩落孔的主要作用是爆落掌子面的大部分岩体,应均匀地分布在掏槽孔四周,掏槽孔爆破后为崩落孔爆破提供了充足的自由面,岩体夹制作用大大减小。崩落孔的最小抵抗线及孔间距可参照式(4)和式(5)计算^[12]。

$$W_b = 18 \sim 25D \quad (4)$$

$$E_b = m_b \times W_b \quad (5)$$

式中, W_b 为崩落孔的最小抵抗线,mm; D 为炮孔直径,mm; E_b 为崩落孔孔间距,mm; m_b 为炮孔密集系数系数,取 0.8~1.2,掏槽部位两侧取小值,拱顶部位取大值。

辅助掏槽孔和崩落孔爆破后,部分岩体堆积在底板上,增加了底板孔的爆破荷载和移动阻力,为保证底板爆破效果,便于出渣和修整,底板孔布置可参照崩落孔参数并适当加密。

3.5 双螺旋掏槽孔参数计算

在隧道掏槽爆破中,大直径空孔为首响爆破孔提供自由面,设计和施工时根据现场凿岩机具条件选取空孔直径,在不具备条件时,可采用多个小直径空孔代替,空孔直径与空孔数量可按式(6)和式(7)计算^[14]。

$$d_e = \frac{(3.2L)^2}{\sqrt{N_1}} \quad (6)$$

$$D_e = d_e \sqrt{N_1} \quad (7)$$

式中, d_e 为空孔直径,mm; L 为理论循环进尺,m; N_1 为空孔数量; D_e 为与多个空孔起到相同作用的单个空孔等效直径,mm。

首响爆破孔与空孔之间的距离可根据破碎岩石膨胀系数确定,首响装药孔中心与空孔中心的间距 a 可由式(8)计算^[15-16]。

$$a = \frac{\pi}{2(R+r)} \left[\frac{2(hr^2 + R^2)}{K-1} + r^2 + R^2 \right] \quad (8)$$

式中, r 为首响孔半径,m; R 为中空孔半径,m; h 为装药系数,即装药长度与炮眼长度之比; K 为岩石膨胀系数,可参照表2选取。

表2 岩石膨胀系数 K 的取值

岩石类别	围岩名称	膨胀系数 K
I	砂砾	1.15
I	黏砂土	1.25
II	一般土	1.30
III	硬黏土	1.35
III	岩石	1.60
V	岩石	1.77
V	岩石	1.80
VI	岩石	1.82

掏槽部位装药孔的间距可根据岩石可爆性、岩层裂隙及层理^[17]情况进行设计,间距可参照式(9)和式(10)计算。在微差爆破作业中还应考虑乳化炸药受到先响炮孔产生的冲击波或应力波作用,发生爆轰性能下降,出现残药或拒爆的因素^[18]。

$$b = (1.5 \sim 2.0)a \quad (9)$$

$$c = (1.0 \sim 1.3)b \quad (10)$$

式中, a 为首响炮孔与空孔的距离,mm; b 为首响炮孔与同一螺旋方向第二个爆破孔间的距离,mm; c 为同一螺旋方向第二个爆破孔与第三个爆破孔间的距离,mm。

4 实例分析

沙特 NEOM 隧道 4[#]支洞采用全断面爆破开挖法,钻孔采用全电脑三臂凿岩台车,典型的爆破开挖围岩等级为 AD-3A,爆破设计采用 $3 \times \Phi 127$ mm 空孔双螺旋掏槽爆破方案,炮孔直径为 45 mm,设计进尺 5.0 m,炸药采用沙特化工(SC)生产的 Kemulex 乳化炸药,药卷规格为 40 mm \times 550 mm(500 g)和 32 mm \times 550 mm(500 g),导爆索规格为 40 g/m,炸药密度为 1.05 g/cm³,爆速为 5500 cm/s,孔内雷管采用高精度导爆管雷管。

4.1 爆破参数计算

4.1.1 炮孔数量

按照式(1)计算得出炮孔数量 $N=152$ 个,设计时可参照计算结果作适当调整。

4.1.2 爆破炸药单耗

按照式(2)计算得出爆破炸药单耗 $q=1.32$

kg/m³。

4.1.3 掏槽孔参数

4[#]支洞的岩体主要为安山岩,节理裂隙比较发育,裂隙中常伴有泥质填充物,岩石质量指标为 55%~85%,按照式(6)和式(7)计算得出的结果,可采用 1 个直径为 256 mm 的空孔作为首爆孔的自由面和补偿空间,但现场最大尺寸钻头直径为 127 mm,故设计采用 3 个直径为 127 mm 的空孔,测试表明,可满足 5.0 m 进尺的爆破需求。

按照式(8)计算,炮孔直径 r 为 45 mm,岩石膨胀系数 K 取 1.66,得出首响炮孔与空孔的距离 $a=0.26$ m,取 $a=0.25$ m。

按照式(9)和式(10)计算,并考虑裂隙较为丰富岩层可能发生乳化药卷受压钝化或压力减敏效应的因素,通过多次爆破测试,取 $b=2a=0.50$ m, $c=1.3b=0.65$ m,双螺旋掏槽孔布置参数如图 1 所示。

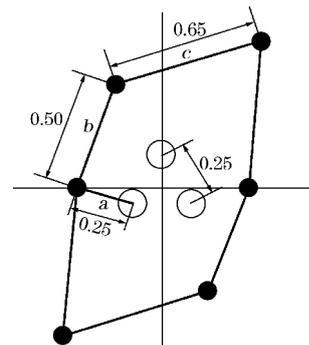


图1 双螺旋掏槽孔布置(单位:m)

扩槽孔须均匀布置在掏槽孔与崩落孔之间,相邻装药孔之间要保持适当间距,防止先响炮孔产生的高压气体对后响炮孔内的药卷造成挤压、钝化或失效。

4.1.4 崩落孔和底板孔参数

按照式(4)和式(5)计算得出崩落孔最小抵抗线为 $W_b=1.03$ m,取炮孔密集系数 $m_b=0.8\sim 1.0$,计算后取断面中下部崩落孔孔间距为 0.95 m,拱部崩落孔孔间距为 1.2 m;二圈眼孔距为 1.0 m;底板孔参照崩落孔进行了适当加密,排距和孔距分别为 0.9 m、0.8 m,二台孔排距与孔距分别为 0.85 m、1.1 m。

4.1.5 周边孔参数

周边孔设计外插角为 2.3°,根据现场围岩条件,并结合施工经验取周边孔孔距 E_z 为 0.6 m,炮孔密集系数 K_z 取 0.8,按照式(3)计算得出光爆层厚度 $W_z=0.75$ m,考虑到周边孔及内圈孔外插角度,实

实际孔口光爆层厚度取 0.65 m。

4.2 炮孔布置及相关参数

施工中多次调整爆破参数^[19-20],最终爆破炮孔

布置如图 2 所示;总钻孔延米为 771.8 m,装药量为 597.88 kg,炸药单耗为 1.32 kg/m³,炮孔及装药参数见表 3。

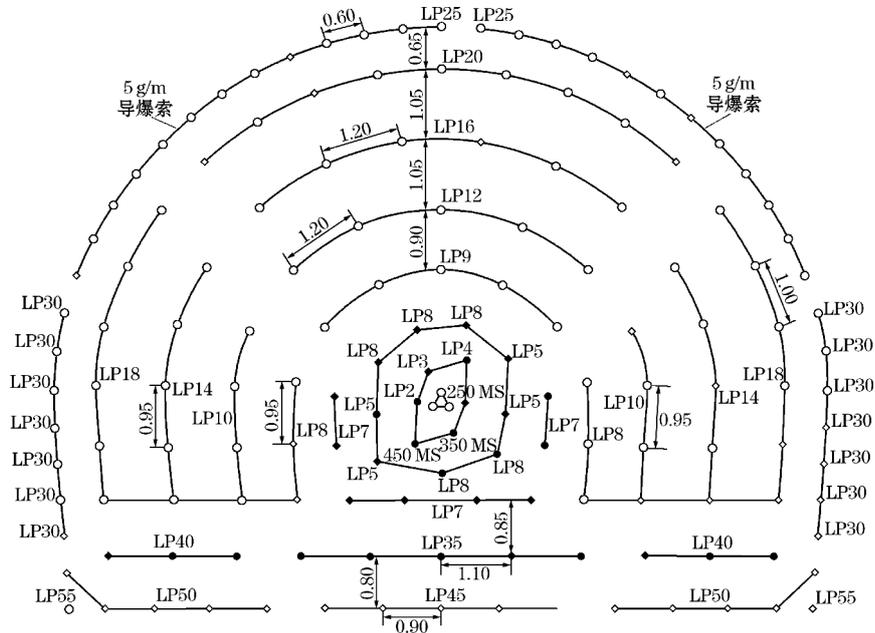


图 2 全断面炮孔布置(单位:m)

表 3 炮孔及装药参数

炮孔类型	炮孔数量	钻孔角度/(°)	炮孔深度/m	延期时间/ms	填塞长度/m	药卷直径/mm	单孔药量/kg	总药量/kg
空孔	3	0	5.2					
掏槽孔	6	0	5.2	200/250/300/350/400/450	0.55	40	7.14	42.84
扩槽孔	9	0	5.2	500/600	0.80	40	6.72	60.48
崩落孔 1	8	0	5.0	700	1.15	40/32	5.20	41.60
崩落孔	40	0	5.0	800/900/1000/1200/1400/1600	1.15	40/32	4.61	194.40
二台孔	11	1.1(向下)	5.0	3500/4000	1.15	40/32	4.86	53.46
底板孔	13	2.3(向下)	5.0	4500/5000	1.15	40/32	4.86	63.18
拱脚孔	4	2.3(外插)	5.0	5500	0.50	32/40 g 导爆索	2.00	8.00
内圈孔	21	1.1(外插)	5.0	1800/2000	1.15	40/32	4.52	94.92
周边孔	39	2.3(外插)	5.0	2500/3000	0.50	32/40 g 导爆索	1.00	39.00
合计	154							597.88

4.3 不同类型炮孔装药结构

掏槽孔采用直径 40 mm 的药卷连续不耦合装药,为降低爆破炸药单耗,崩落孔及底板孔采用直径为 40 mm、32 mm 的药卷混合装药,线装药密度为 0.97 kg/m,周边孔采用直径 32 mm 的药卷+40 g/m 的导爆索,线装药密度为 0.20 kg/m。为减少拱脚段的爆破超挖,两侧拱脚采用直径为 32 mm 的药卷+40 g/m 的导爆索不耦合间隔装药,线装药密度为 0.40 kg/m,装药结构如图 3 所示。

5 爆破效果对比

在大断面隧道爆破施工中,楔形掏槽受限于凿岩设备的有效钻孔长度,最大设计循环进尺为 4.5 m,而且实际炮孔利用率大多数在 90%~95% 之间,实际爆破单耗大于设计单耗;项目前期采用的 4 空孔直眼掏槽结构,掏槽效率偏低,掏槽成功率不稳定,爆破进尺不理想。采用新设计方案后,爆堆集中,块度均匀,单循环最大进尺为 5.0 m,最短

循环时长为 16.5 h,单月最大掘进进尺 161.8 m,经过 85 个循环施工和统计,共掘进 413.1 m,平均进尺 4.86 m,光面爆破效果良好,残眼率达 88%~93%,轮廓超欠挖控制在合理范围内,符合设计要求。比较前期采用的 4 空孔直眼掏槽平均进尺提高了 0.31 m,大大缩短了凿岩时间,进一步提升了爆破掘进效率。

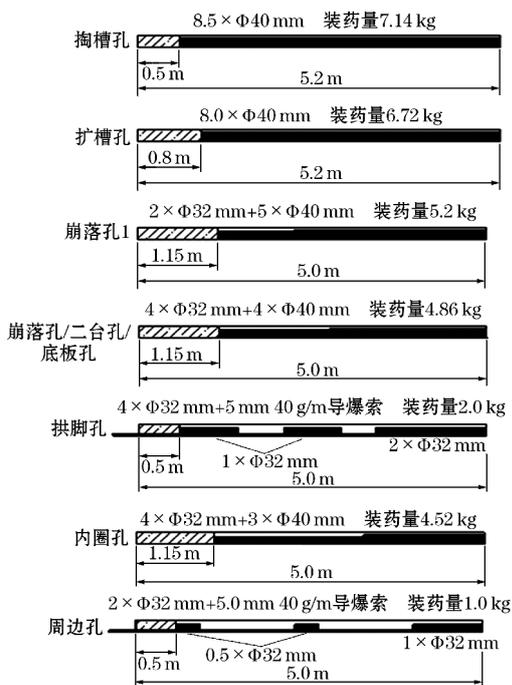


图 3 不同类型的炮孔装药结构

6 结论

(1) 大直径空孔双螺旋掏槽结构可以看作两个相对独立的掏槽体系,比传统的楔形掏槽和 4 空孔直眼掏槽掏槽成功率高、更稳定,且爆破成腔效果好、掏槽面积更大。

(2) 根据炮孔不同部位、作用及装药结构设计合理的爆破参数,既可以减少爆破器材的消耗和改善爆破效果,也可增加爆破进尺,提高掘进效率,还可以节约循环作业时间和施工成本。

(3) 大直径空孔双螺旋掏槽方法的适用性强。实践表明,此方法适用于各种类型的岩体爆破,岩

石质量等级变化时只需调整钻孔深度和装药长度。由此可建立动态爆破设计方案,以满足施工需求。

参考文献:

- [1] 郑祥滨, 魏世杰, 范利华, 等. 单螺旋空孔直眼掏槽成腔过程数值模拟研究[J]. 岩土力学, 2008, 29(9): 2590-2594.
- [2] 李萍. 渐进式大直径空孔螺旋掏槽爆破参数的研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2010.
- [3] 张艳涛, 金焰. 大直径螺旋掏槽爆破施工技术应用[J]. 重庆建筑, 2010(9): 64-65.
- [4] 田占, 孙向远. 螺旋掏槽技术在巷道掘进爆破施工中的应用[J]. 现代矿业, 2019, 35(12): 120-122.
- [5] 范军平, 张召冉, 左进京, 等. 大直径空孔直眼掏槽爆破效果的试验研究[J]. 煤矿安全, 2020, 51(5): 83-87.
- [6] 汪平. 某地下金属矿直眼掏槽爆破试验及控制措施[J]. 金属矿山, 2021(8): 52-56.
- [7] 李杰山. 掏槽爆破技术在巷道掘进中的应用[J]. 能源与节能, 2018(4): 181-182.
- [8] 汪洋. 金属矿山巷道掘进掏槽爆破优化及应用研究[J]. 工程建设, 2021, 4(11): 61-63.
- [9] 唐信来, 黎剑华, 杨伟忠, 等. 岩石工程大空孔螺旋掏槽爆破机理研究及应用[J]. 南昌工程学院学报, 2005, 24(4): 12-15.
- [10] 张召冉, 陈华义, 矫伟刚, 等. 含空孔直眼掏槽空孔效应及爆破参数研究[J]. 煤炭学报, 2020, 45(增刊 2): 791-800.
- [11] 巩中江, 柴敬尧, 杨长庚. 铁路隧道光面爆破施工技术与管理实例[J]. 隧道建设, 2017, 37(12): 1593-1599.
- [12] 汪旭光. 爆破手册[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2010: 488-598.
- [13] 谭海涛, 杨希. 浅谈两河口隧道钻爆施工中光面爆破技术分析[J]. 施工技术, 2011, 40(增刊 1): 165-167.
- [14] 王玮, 怀平生, 降世良. 大断面隧道空孔直线掏槽爆破高效掘进方法[J]. 爆破, 2022, 39(3): 76-81.
- [15] 张祖远, 王海亮. 大直径中空孔直眼掏槽微振动爆破参数研究[J]. 隧道建设, 2015, 35(2): 174-179.
- [16] 李萍, 王玉杰, 柯波. 渐进螺旋掏槽炮孔间距的理论计算[J]. 爆破, 2011, 28(4): 20-23.
- [17] 李建军, 段祝平. 岩体中的节理裂隙对爆破影响的试验研究[J]. 矿冶工程, 2005, 25(5): 1-3.
- [18] 郑卫东, 吴均, 潘伟纲, 等. 岩石结构中的爆炸应力波对乳化炸药性能的影响[J]. 爆破器材, 2020, 49(5): 24-28.
- [19] 杨仁树, 张召冉, 安晨, 等. 煤矿岩巷掘进爆破掏槽孔超深问题探讨[J]. 煤炭科学技术, 2020, 4(1): 10-23.
- [20] 郑静, 李启月, 赵新浩, 等. 楔形掏槽爆破进尺影响因素探究[J]. 矿冶工程, 2020, 40(5): 19-23.