

doi:10.3963/j.issn.1001-487X.2022.01.017

超大城市营运地铁车站下方地墙控制爆破

刘文广

(上海消防技术工程有限公司,上海 200081)

摘要: 既有营运地铁站因其高安全性对爆破振动要求极高,现有规范通常规定在50 m范围外才可实施爆破。工程要求在营运地铁站下方仅2.8 m处,对盾构机穿越区域的车站混凝土连续墙结构进行精确爆破分解,在地铁停运的5 h间隙里完成所有爆破作业,同时要保证地铁站内运营、电气和信号等多种设备的正常使用。通过在地面采用全站仪和水平仪双向控制,把28 m垂直深孔偏斜度控制在5‰;采用30 ms精准毫秒延时爆破形成顶部预裂破碎带、采用分层装药毫秒延时爆破技术,在50 m²穿越区均匀布置72个爆破点等手段;爆破后盾构穿越的结果表明破碎粒径在15 cm以下,与爆破对象同一结构的车站站台,距离爆点5.6 m处实测爆破振动峰值3.4 cm/s,达到了既保证营运车站安全又保证盾构机穿越效果的双重目的,爆破后地铁站结构和电气设施安全运行。

关键词: 控制爆破; 地铁车站; 地下连续墙; 泥水盾构机

中图分类号: TD235.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-487X(2022)01-0115-05

Controlled Blasting of Ground Diaphragm Wall Under Metro Station in Super Large City

LIU Wen-guang

(Shanghai Fire Technology Engineering Co., Ltd., Shanghai 200081, China)

Abstract: The sub-way station in operation is extremely sensitive to blasting vibration. Existing regulations usually stipulate that blasting can only be carried out outside 50 m. The project requires accurate blasting decomposition of the concrete diaphragm wall in the area where the shield machine crosses only 2.8 m below the operating subway station. All blasting work should be completed within 5 hours when the subway stops running. Meanwhile, the normal use of operation, electrical and signal equipment and other equipment in the subway station should be ensured. The deviation of 28 m vertical deep hole is controlled within 5‰ through the bidirectional control of total station and level on the ground. Precise millisecond time delay blasting with 30 ms is used to form a presplitting fracture zone at the top. Layered charging millisecond time delay blasting is adopted and 72 blasting points are evenly arranged in the 50 m² crossing area. The results of shield machine excavation after blasting show that the crushing particle size is less than 15 cm, and the station platform with the same structure as the blasting object is 3.4 cm/s on blasting vibration velocity at the station platform 5.6 m away from the explosion point, which achieves the dual purpose of ensuring the safety of the operating station and the crossing effect of the shield machine, and the subway station structure and electrical facilities operate safely after blasting.

Key words: controlled blasting; subway station; underground diaphragm wall; slurry shield tunneling machine

轨道交通是目前城市交通的重要组成部分,尤其是超大城市;截至2021年,上海地铁运营线路共19条,运营里程772 km。上海地区由于是冲积平

收稿日期:2021-09-24

作者简介:刘文广(1969-),男,高级工程师、工学硕士,主要从事爆破施工技术工作,(E-mail)xfblasting@126.com。

破部位,然后分段装药原地爆破破碎的设计方案,为后续盾构穿越施工减少阻力。

表 1 杨高路地表管线列表

Table 1 List pipelines of Yanggao Road Surface

类型	尺寸/mm	埋深/m	材质
信息	36 孔	0.70	缆
信息	24 孔	0.75	缆
煤气	φ 500	1.00	铁
给水	φ 800	2.40	砼
信息	12 孔	4.50	缆
雨水	φ 800	1.12	砼

3.2 地墙爆破参数

盾构直径 $\phi = 6850 \text{ mm}$,为保证效果,爆破直径设计为 $\phi = 8000 \text{ mm}$ 。在地面混凝土墙顶部往下钻孔至爆破部位,然后在爆破部位定位装药。地表标高为 $+5.8 \text{ m}$,最大钻孔深度约 28 m 。

爆破后的块度要满足盾构螺旋输送机输送要求,根据中交天和 $\phi 6850 \text{ mm}$ 土压平衡盾构机数据,爆破后块度要在 15 cm 以下。以此作为确定爆破参数的依据。

根据类似项目施工项目的经验^[1,2],此次每个穿越点布设 11 个炮孔,炮孔间距 $0.7 \sim 0.8 \text{ m}$,四个穿越点总共布置 44 个炮孔。在车站地墙外侧四个穿越点对应位置设置 3 个泄压孔,共设置 12 个。

炸药单耗控制,普通钢筋混凝土解体需用炸药量为 $0.8 \sim 1.0 \text{ kg/m}^3$,考虑地墙所处位置地下近 30 m ,两侧是饱和土,压力接近 0.3 MPa ,为保证爆破后块度在 15 cm 以下,结合原类似项目施工经验,炸药单耗取 1.8 kg/m^3 。

地墙厚度 0.8 m ,钻孔两侧抵抗线 0.4 m , 28 m 深处偏斜应小于 15 cm ,必须确保钻孔垂直度在 5% 以内。工程地质钻通常要求 100 m 顶角偏斜不应超过 2° ,施工中采用改进型取芯钻机,采用全站仪、水平仪三维监控钻杆垂直度;钻进过程中采用 1 m 岩心筒开孔,逐渐增加至 6 m 定制筒的钻进方式,满足了钻孔要求。

地墙厚度: $h = 800 \text{ mm}$

孔距: $a = (0.85 \sim 1.0) \times h = 680 \sim 800 \text{ mm}$ 。两侧 2 个孔取 $a = 800$,其余取 $a = 700$

孔径: $d = 110 \text{ mm}$

孔数:每个穿越位置钻孔 11 个

抵抗线: $w = 400 \text{ mm}$

单孔药量 Q 计算^[3](中间孔为最大药量)

$$Q = qV = 1.8 \text{ kg/m}^3 \times 0.7 \text{ m} \times 8.0 \text{ m} \times 0.8 \text{ m} = 8.06 \text{ kg}, \text{取 } 8.0 \text{ kg} \quad (1)$$

式中: q 为特定状态下破碎单位混凝土需要的炸药量,取 1.8 kg/m^3 ;见表 2、图 3。

V 是单孔爆破混凝土体积, $V = \text{孔距 } a \times \text{装药长度} \times \text{厚度 } h$ 。

表 2 单幅地墙各孔装药量

Table 2 Charge quantity of each hole of single ground wall

孔号	孔距/mm	装药长度/mm	装药量/kg	装药段数
1、11	800	304	3	3
2、10	800	551	6	6
3、9	700	681	7	7
4、8	700	749	8	8
5、7	700	788	8	8
6	700	800	8	8
合计			72	72

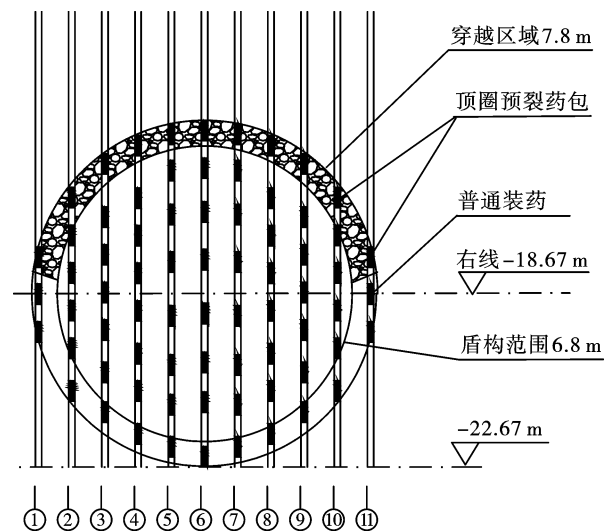


图 3 爆破孔布置剖面图

Fig. 3 Profile of blast hole layout

4 爆破振动控制措施

4.1 爆破震动传播途径

在城市轨道交通地铁沿线周边爆破施工极为敏感;上海“轨道交通管理条例”规定,轨道交通设施 50 m 范围为轨交保护区^[4],如需爆破需要轨交管理部门同意。

在营运车站下方进行地墙爆破,影响最大的是地铁车站结构,同时由于是营运线路,爆破振动还会对车站内营运控制室内的设备、配电房、玻璃屏蔽门、水电风管道、地铁电缆挂架等产生影响。

爆破时,爆破振动由爆破点传播到地铁站主要通过以下 A、B 两条途径(如图 4):

A) 沿地墙直接上传至车站大底板、车站结构:由于两侧地墙和车站大底板非同时浇筑,两者之间

存在结构缝,地震波遇结构缝后传播到车站大底板上时会有所削弱。

B)由地墙周围土体传到车站结构:爆破后震动和冲击波大部分都沿水平方向传播,高频震动在不均匀的土层中会迅速衰减。

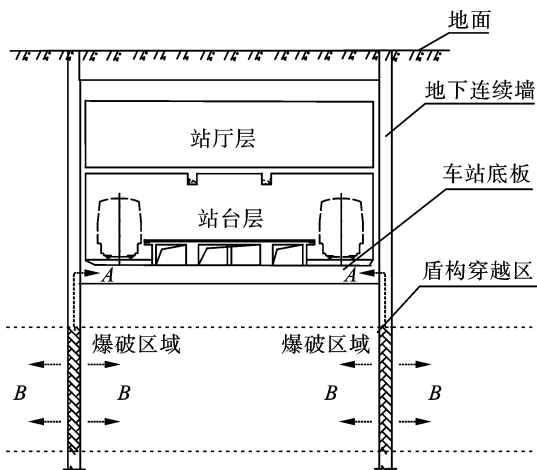


图4 爆破震动传播路径图

Fig. 4 Propagation path of blasting vibration

4.2 减振措施

根据爆破振动计算公式,爆破振动与三方面参数有关:一次起爆药量 Q 、传播距离 R 、传播介质力学参数 K 和 α 。相应的减震措施如下:

(1)从产生振动波的源头控制,减小一次起爆药量:首先4个墙洞依次爆破,间隔3 s,每次起爆1个墙洞;然后每个墙洞上布置11个炮孔,逐孔起爆;每个炮孔爆破时再将一个炮孔装药分为3~8个药包,通过毫秒延时设计逐段起爆。通过以上措施,可以把直径8 m圆形地墙的爆破分成72个小区域,逐个毫秒延时起爆,每次起爆药量控制在1 kg,这样可有效降低爆破振动初始强度。

(2)采用顶部预裂爆破

爆破时通过控制爆破圈顶部11个小药包先行起爆,在爆破轮廓线顶部形成一条破碎预裂圆弧;然后各孔余下药包自1号孔指11号孔采用逐孔、逐个药包起爆的方式,单段最大起爆药量1 kg;这样下部药包产生的振动传到顶部破碎带时会大大衰减,从而减小爆破振动。

(3)采用不耦合装药技术

采用不耦合装药技术,钻孔孔径采用110 mm,药卷直径64 mm,不耦合系数1.71;不耦合装药能有效降低炸药冲击波初始峰值压力,减轻爆破振动的直接冲击。

4.3 起爆网路设计

4.3.1 爆破器材选择

电子雷管延时精度高,可以精确且合理地控制

延期时间,达到良好的降振效果,结合预裂控制爆破,效果会更加显著。根据傅洪贤等在人和场隧道进行电子雷管降速试验、电子雷管与非电雷管联合降速试验^[5],得出隧道电子雷管单孔连续起爆技术,与隧道非电雷管爆破相比,爆破振动降低80%以上。考虑到爆破区域位于地铁站下方,决定采用电子数码雷管起爆网路。

四幅地墙间逐幅起爆,延期时间3 s。每幅地墙选用一个集成适配器,四幅地墙汇总到集中控制器,联网起爆(如图5)。

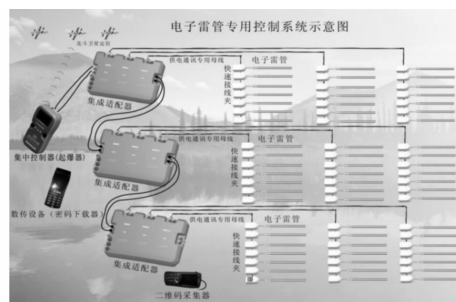


图5 地墙组网图

Fig. 5 Network diagram of ground wall

4.3.2 合理延期时间确定

爆破地震波是多列爆炸波叠加的结果,依据波的叠加原理和波的干涉,延时爆破的最佳间隔时间应该是波的半个周期或奇数倍。但爆破地震波是由不同频率、不同幅值的波在一个有限时间范围内组合的随机过程,爆破地震波的传播受不同地质条件影响,也是极为复杂的。张小军等通过地震波叠加的波动方程,推导出爆破地震波的简析式,然后拟合出震动速度的表达式,得出爆破延期最佳时间在20 ms左右^[6]。

据此,此次单幅地墙72个药包采用两种延期方式:顶部11个药包,延时时间采用30 ms;后续每个孔内的药包自上而下引爆。延时时间采用20 ms;总延期时间详见表3。

5 爆破振动计算

根据控制爆破振动速度公式^[7]

$$V = Kk' \times (Q^{1/3}/R)^\alpha \quad (2)$$

式中: V 为爆破振动速度峰值,cm/s; Q 为单响药量,本次爆破最大单段药量 $Q = 1$ kg; R 为保护物到爆源的距离; K 、 α 与地震波传播地段的介质性质及距离有关系数, K 取116.4, α 取1.74; k' 修正系数,取 $k' = 0.5$ 。见表4。

表 3 单幅地墙延期时间表
Table 3 Extension schedule of single ground wall

孔号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
药包数	3	6	7	8	8	8	8	8	7	6	3
				90	120	150	180	210			
			60						240		
		30		580	720	860	1000	1140		270	
			460						1280		
		360		600	740	880	1020	1160		1400	
各孔药包	0		480						1300		300
延期时间		380		620	760	900	1040	1180		1420	
/ms	320		500						1320		1500
		400		640	780	920	1060	1200		1440	
		340		520					1340		1520
			420		660	800	940	1080	1220		1460
			540						1360		
		440		680	820	960	1100	1240		1480	
			560						1380		
				700	840	980	1120	1260			

表 4 重要保护目标振速计算表
Table 4 Calculation of vibration velocity of important protection targets

距离最近的保护目标	R/m	Q/kg	V/(cm·s ⁻¹)
地下二层 B2 站台	5.6	1	2.91
地下一层 B1 站台	10.6	1	0.95
φ 200/0.8 铁的燃气管	19.0	1	0.35

根据《爆破安全规程》(GB6722—2014)的规定^[8],一般民用建筑物的安全振动速度为 2.5 ~ 3.0 cm/s,所以计算值对周边的建、构筑物是安全的,对于柔性管线,影响更小。

6 爆破效果与小结

6.1 爆破效果

2020 年 9 月 15 日,历经 9 h 的装药和网路布设。凌晨 0:30 四幅地墙依次准时起爆,持续时间 16 s,可听到地下沉闷的爆炸声,并有一点震感,而且见到炮孔和泄压孔有水及部分堵塞物冲出。

爆破后申通公司信号、管道、道交、综合等四

个小分队到地下车站检查,所有设备均安全,地面管道也没有异常。凌晨 5:30,第一列地铁安全运行通过。

10 月 15 日,地铁盾构机到达穿越位置,盾构机控制室跟踪穿越情况,盾构穿越四幅墙的时间 15 ~ 18 min,与盾构机在泥土中设计穿行速度 6 cm/min 基本吻合。出渣机构可见 5 ~ 10 cm 大小砣块。爆破振动监测数据如表 5,监测点如图 6。

6.2 小结

由于爆破结构位于地下 30 m,要保证爆破效果,炸药单耗不宜小,在直径 8 m 的圆形区域药量较为集中,单靠多打孔、分散装药控制爆破振动有施工上的难度;加之待爆结构本身就是车站结构的一部分,距离近,因此要将爆破振动控制手段有限;此次爆破实测数据 2.1 ~ 3.4 cm/s,和以往十多次相关工程类似,但小于地铁机车运行时的站台上的振动值(地铁机车通过时,车站站台实测振速 7 ~ 10 cm/s)^[9,10]。如何把爆破振动降低到 1 cm/s,仍是下一步努力的方向。

表 5 振动速度监测表
Table 5 Vibration speed monitoring

测点位置	单段药量/kg	距离/m	主振频率/Hz	最大振速/(cm·s ⁻¹)
1 号点:(地铁 B2 层)左	1	5.6	4.27	3.429
2 号点:(地铁 B2 层)右	1	5.6	5.49	3.418
3 号点(地铁 B1 层)左侧	1	12.7	18.92	2.364
4 号点(地铁 B1 层)右侧	1	12.7	21.97	2.110