

doi:10.3963/j.issn.1001-487X.2023.01.026

## 不同爆破开挖工况下盾构管片的响应分析\*

王海亮<sup>1</sup>,赵华鹏<sup>1</sup>,赵军<sup>2,3</sup>,肖景鑫<sup>1</sup>,石晨晨<sup>2,3</sup>

(1. 山东科技大学, 青岛 266590; 2. 中铁二局集团成都新技术爆破工程有限公司, 成都 610000;

3. 中国中铁爆破安全技术研发中心, 成都 610000)

**摘要:** 为分析联络通道爆破开挖时盾构管片的动力响应,基于青岛地铁8号线盾构区间工程,进行了现场振动监测,得出掏槽爆破对管片的振动影响最为强烈的结果。进而基于现场掏槽孔装药量利用 MIDAS-GTS NX 模拟软件建立三维模型,对联络通道出洞、进洞8种不同间距爆破作用下盾构管片的振动、应力的响应规律进行分析,得出:在相同的爆破间距下,相比于进洞爆破,出洞爆破对临近盾构隧道管片的振动影响更为强烈,最大振动速度是进洞爆破的2.9~3.4倍,且随间距的减小振速递增幅度增大;在安全允许振速 $20\text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$ 下,出洞爆破时爆破间距应大于5.0 m,进洞爆破时爆破间距应大于1.25 m,未开挖部分岩石采用非爆破法进行开挖;开口管片应力集中明显,最大主应力的位置随间距的减小,表现为矩形开口底部,到矩形开口侧边的横纵缝相交处,最后到矩形开口上部的两侧顶角;对联络通道与盾构隧道近接交叉部位管片的进行切割,形成的开口不完整结构会减弱自身内侧在爆破荷载下的最大主应力,但会造成自身外侧产生小范围的应力集中,使其成为盾构隧道衬砌结构最为薄弱的位置。

**关键词:** 盾构管片; 联络通道; 爆破; 振动; 应力; 数值模拟

中图分类号: TD235

文献标识码: A

文章编号: 1001-487X(2023)01-0194-11

## Response Analysis of Shield Segments under Different Blasting Excavation Conditions

WANG Hai-liang<sup>1</sup>, ZHAO Hua-peng<sup>1</sup>, ZHAO Jun<sup>2,3</sup>, XIAO Jing-xin<sup>1</sup>, SHI Chen-chen<sup>2,3</sup>

(1. Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China;

2. Chengdu New Technology Blasting Engineering Co., Ltd. of China Railway No. 2 Group,

Chengdu 610000, China; 3. Blasting Safety Technology R&D Center of China Railway

Group Limited, Chengdu 610000, China)

**Abstract:** In order to analyze the dynamic response of the shield segments during the blasting excavation of a connecting channel, on-site vibration monitoring has been conducted based on the shield interval project of Qingdao Metro Line 8. The measured blasting vibration data show that the cut holes have the strongest impact on the shield segment vibrations. Then, based on the on-site charge of the cut holes, the MIDAS-GTS NX simulation software is used to establish a three-dimensional model to analyze the vibrations and stresses of the shield segments with 8 different blasting distances from the exit and entry of the connecting channel. Compared with the entry blasting, the impact of the exit blasting on the vibrations of the adjacent shield tunnel is more intense under the same blasting distance, and the peak vibration velocity is 2.9~3.4 times that of the entry blasting. On the other hand, the growing rate of the peak vibration velocity also increases with the decrease of the distance. When the allowable vibration velocity is  $20\text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$ , the blasting distance should be greater than 5.0 m at the exit and greater than 1.25 m at the entry. The

收稿日期: 2022-08-16

作者简介: 王海亮(1963-), 男, 博士, 教授, 从事爆破、地下工程方面的研究, (E-mail) A405405@263.net。

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(10672091)

rocks that have not been excavated are excavated with non-blasting methods. The stress concentration is the most obvious in the opening segments, but the position where the maximum principal stress is generated shifts from the bottom of the rectangular opening through the intersection of transverse and longitudinal seams on the side of the rectangular opening to the top corners of both sides of the upper part of the rectangular opening with the decrease of spacing. Cutting the segments at the intersection of the connecting channel and the shield tunnel will form an incomplete opening structure, which will weaken the maximum principal stress on its inner side under the blasting load, but will cause a small range of stress concentration on its outer side, making it the weakest position of the shield tunnel lining structure.

**Key words:** shield segment; connecting channel; blasting; vibration; stress; numerical simulation

双洞单线盾构地铁隧道后期运营的需要,使得联络通道得到广泛应用。钻爆法是盾构区间联络通道开挖常用的方法,钻爆法施工时,炸药在爆炸瞬间产生巨大的能量,破碎岩体的同时,也对爆破既有隧道结构的可靠性产生影响<sup>[1]</sup>。

国内外学者在爆破施工对隧道结构影响方面,主要通过现场监测和数值模拟进行研究。现场监测方面,高宇璠等研究了钻爆法下穿既有盾构隧道时管片的振速变化<sup>[2]</sup>,提出了减震措施和优化方案。毛祚财以单段装药量、爆心距为变量<sup>[3]</sup>,研究了相邻隧道施工对既有隧道衬砌的振动影响。数值模拟方面,程平等研究了上方隧道施工对下方既有隧道围岩的质点振动速度以及混凝土衬砌的应力分布影响<sup>[4]</sup>。高卫亮等研究了底部动载作用下隧道衬砌的振速、应力、弯矩分布规律<sup>[5]</sup>。于建新等分析了新建隧道药量、净距、跨度因素下爆破施工对既有隧道围岩与衬砌结构的振速影响<sup>[6]</sup>。张旭等研究了下穿地铁隧道爆破作用对上方既有人防隧道的动力响应<sup>[7]</sup>。DANG V K等研究了既有隧道衬砌在相邻新建隧道爆破作用下的振动特性及应力分布特征<sup>[8]</sup>。杨波等针对盾构隧道间联络道爆破对既有隧道结构的影响<sup>[9]</sup>,优化了爆破施工方案,分析了不同爆破位置对隧道管片稳定性的影响。现场监测结合数值模拟方面,胡刚等研究了爆破振动作用下隧道初次衬砌关键位置的应力、位移变化<sup>[10]</sup>。李小贝研究了新建隧道爆破振动对既有隧道结构振动响应、应力变化<sup>[11]</sup>。吴忠仕等对近距离既有衬砌在爆破荷载作用下的振速峰值和应力进行分析<sup>[12]</sup>。王海亮等分析了隧道工作面爆破前后震动波的传播规律和爆破作用下主隧道的振动响应特征<sup>[13]</sup>。SUN S R等研究了新建隧道对既有隧道支护结构稳定性的影响<sup>[14]</sup>。梁禹等得出在基岩爆破作用下既有隧道衬砌结构强度最薄弱的位置为拱腰与拱底<sup>[15]</sup>。现有研究方向多为新建隧道对既有隧道的衬砌结构、围岩等的影响,鲜见盾构区间联络通道进行钻爆施工对管片结构的影响,鲜见近距离不同工况下联络

通道爆破施工对盾构管片振动及应力响应的系统研究。

以青岛地铁8号线大洋站~青岛北站区间(以下简称大青区间)海底隧道为依托,通过现场振动数据监测及数值模拟,分析了监测点的时程曲线,研究了不同联络通道爆破开挖工况下盾构管片的应力、振动响应规律,对指导现场施工、保护盾构管片结构具有一定的理论意义和实用价值。

## 1 工程概况

### 1.1 工程简介

青岛地铁8号线大青区间下穿胶州湾海域,盾构法隧道长度3.98 km,其中海域盾构段2.9 km,陆域盾构段1.0 km。为方便防火、检修及维护等后期运营,区间段共设计6座联络通道,其中6号~10号联络通道位于海域段,采用矿山法施工。青岛市地铁8号线过海段海域整体地形中间低两端高,海底地形平坦,以淤泥质粉砂为主,海水盾构段左右线分离设置,两条隧道基本为平行关系,中线间距为25 m。隧道衬砌采用装配式钢筋混凝土管片,混凝土强度等级为C55,管片结构厚度0.35 m,宽度为1.5 m,采用错缝拼装,并通过弯螺栓连接。

本研究对象为8号联络通道工程,中心里程为左DK43+796.672,联络通道长18.3 m,净宽3.0 m,高程约-40 m,平均水深4~8 m间变化,爆破周围及地面无建(构)筑物、管线等重点保护对象。

### 1.2 爆破试验参数及方案

联络通道钻爆施工采用2号岩石乳化炸药和数码电子雷管并联起爆网路,延期间隔为50 ms,钻孔机械为风动凿岩机,孔径42 mm。联络通道开挖时,首先对开挖端隧道进行管片切割,后为减小爆破对管片的冲击,采用矩形小断面开挖方式,逐步扩挖至拱形断面。8号联络通道标准断面高4.8 m,宽4.4 m,掏槽孔采用了加强装药方式,即将乳化炸药外皮划破,利用炮棍将炸药在炮孔中填实,达到耦合装药,炮孔布置图如图1所示,爆破参数如表1。

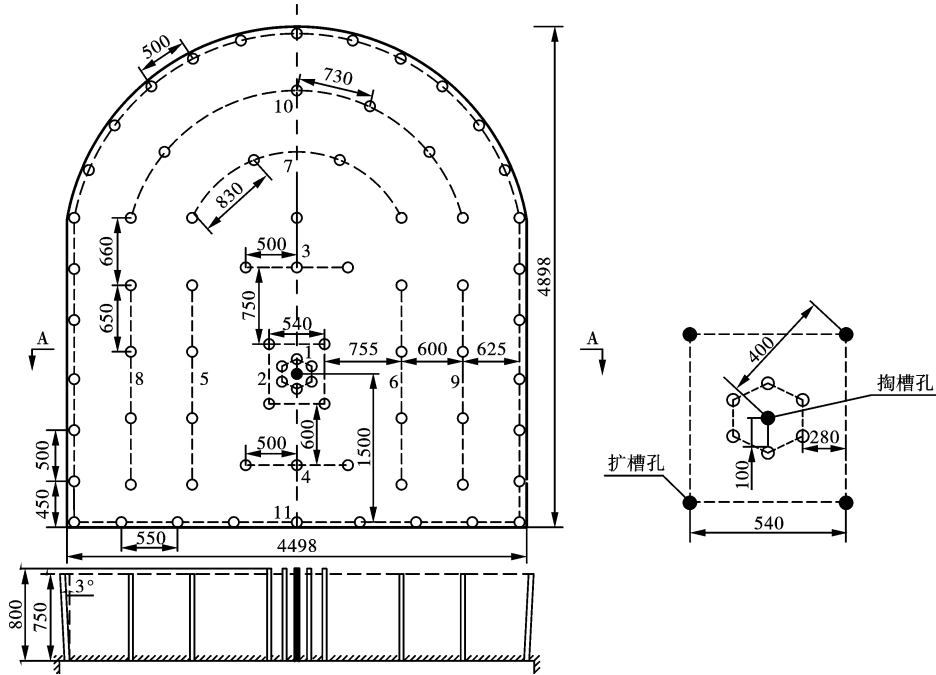


图1 联络通道标准断面炮孔布置(单位:mm)

Fig. 1 Blast hole layout of the standard section of the connecting channel(unit:mm)

表1 联络通道标准断面爆破参数表

Table 1 Blasting parameters of the standard section of the connecting passage

炮孔名称	起爆顺序	累积延期/ ms	孔间延期 间隔/ms	孔数	炮孔深度/m	单孔装药量/ kg	装药量/ kg
掏槽孔	1	0	50	1	0.80	1.6	1.6
空孔	—	—	—	6	0.80	—	—
扩槽孔	2	50	50	4	0.80	0.4	1.6
辅助孔	3~10	100~450	50	33	0.75	0.2	6.6
周边孔	11	500	50	32	0.75	0.2	6.4

### 1.3 监测方案

施工现场拱底有积水与物料等无法布置仪器,拱顶不便安装测振仪器,考虑到侧向爆破荷载下,爆破振动对盾构隧道迎爆侧的影响要大于背爆侧<sup>[3]</sup>,本次监测选择在迎爆盾构隧道(左线)开口左方拱腰侧沿隧道轴向不同距离水平布置13台成都中科测控TC-4850爆破测振仪,测点布置如图2所示。 $S_1 \sim S_4$ 测点使用的4台测振仪器最大量程为 $200 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ ;  $S_5 \sim S_{13}$ 测点使用的9台测振仪最大量程为 $35 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

## 2 监测结果

在青岛地铁8号线大青区间联络通道的爆破施工过程中,监测组对8号联络通道连续进行了3个炮次的监测。进行爆破振动监测时,在爆破施工所在里程的左右线双向各200 m的安全距离设置警戒线、岗哨和标志,避免了行人及其他施工产生的干

扰,所测爆破振动信号可靠性较高。

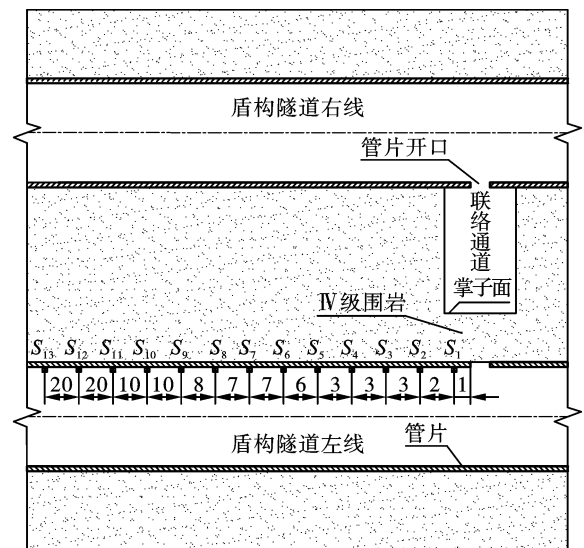


图2 测点位置布置示意(单位:m)

Fig. 2 Schematic layout of the measuring points(unit:m)

随着掌子面的开挖推进,管片与迎爆侧管片之间的岩石间距越来越小,通过计算机软件 Blasting Vibration Analysis,统计预留岩石间距  $D_m$  在 1.5 m、1 m、0.5 m 爆破条件下的试验振动数据,分别见表 2、表 3 与表 4。

表 2 间距  $D_m = 1.5$  m 时各管片测点振速数据Table 2 Vibration velocity data of each segment when  $D_m = 1.5$  m

测点	水平距离 $L/m$	径向最大 振速 $V_r/$ ( $\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$ )	轴向最大 振速 $V_c/$ ( $\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$ )	垂向最大 振速 $V_t/$ ( $\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$ )
$S_1$	1	40.600	27.10	23.41
$S_2$	3	28.830	23.30	20.89
$S_3$	6	21.340	33.64	22.49
$S_4$	9	19.120	21.32	26.12
$S_5$	12	12.020	15.05	21.53
$S_6$	18	2.710	10.75	13.72
$S_7$	25	3.320	5.06	5.43
$S_8$	32	2.030	2.13	1.97
$S_9$	40	0.210	1.83	0.78
$S_{10}$	50	0.150	0.89	0.62
$S_{11}$	60	0.380	0.53	0.44
$S_{12}$	80	0.100	0.52	0.26
$S_{13}$	100	0.057	0.02	0.04

表 3 间距  $D_m = 1.0$  m 时各管片测点振速数据Table 3 Vibration velocity data of each segment when  $D_m = 1.0$  m

测点	水平距离 $L/m$	径向最大 振速 $V_r/$ ( $\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$ )	轴向最大 振速 $V_c/$ ( $\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$ )	垂向最大 振速 $V_t/$ ( $\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$ )
$S_1$	1	53.130	41.750	30.730
$S_2$	3	37.080	17.330	26.170
$S_3$	6	23.630	32.090	25.710
$S_4$	9	28.490	29.880	36.800
$S_5$	12	16.950	30.320	23.600
$S_6$	18	8.020	13.050	12.720
$S_7$	25	2.710	10.750	3.850
$S_8$	32	3.320	5.060	2.910
$S_9$	40	2.030	3.660	0.780
$S_{10}$	50	0.210	1.020	0.440
$S_{11}$	60	0.580	0.790	0.260
$S_{12}$	80	0.180	0.520	0.150
$S_{13}$	100	0.096	0.096	0.105

从表 3、表 4 可知,在联络通道临近管片爆破时,在距离爆源中心 12 m 范围内所测得盾构隧道管片的振动速度,均大于《爆破安全规程》(GB6722—2014)<sup>[16]</sup>中关于交通隧道的振速参考值  $[V] = 10 \sim$

$20 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ ,最大单段齐爆药量  $Q$  均为 1.6 kg,测得单通道最大峰值为  $65.98 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

表 4 间距  $D_m = 0.5$  m 时各管片测点振速数据Table 4 Vibration velocity data of each segment when  $D_m = 0.5$  m

测点	水平距离 $L/m$	径向最大 振速 $V_r/$ ( $\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$ )	轴向最大 振速 $V_c/$ ( $\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$ )	垂向最大 振速 $V_t/$ ( $\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$ )
$S_1$	1	65.980	21.56	57.65
$S_2$	3	50.220	21.08	29.89
$S_3$	6	20.530	47.59	31.82
$S_4$	9	38.300	35.75	28.22
$S_5$	12	12.700	16.95	20.64
$S_6$	18	9.120	12.69	19.10
$S_7$	25	6.350	10.61	10.40
$S_8$	32	3.980	0.10	5.30
$S_9$	40	1.500	2.64	2.47
$S_{10}$	50	1.650	0.99	1.32
$S_{11}$	60	1.020	0.87	1.20
$S_{12}$	80	0.960	0.93	1.17
$S_{13}$	100	1.005	0.70	0.43

选取表 3 中  $D_m = 1$  m 条件下  $S_1$ 、 $S_2$ 、 $S_3$ 、 $S_6$ 、 $S_7$ 、 $S_9$  测点的监测数据进行波形分析,研究地震波随距离的变化。利用计算机软件中科测控平台 workbench 合成上述合成各个测点的  $x$ 、 $y$ 、 $z$  三个通道的振速数据,得到了不同距离的三矢量爆破振动速度时程曲线,如图 3 所示。

由图 4 可知,水平距离 1 m、3 m、6 m 处的合振速波形图中,各振速峰值出现时刻分别约为 0.01 s、0.05 s、0.1 s、0.15 s、0.25 s、0.35 s、0.45 s,与联络通道掌子面使用的雷管延期时间相对应,振速峰值出现在各同段雷管起爆时刻,爆破振动波形中的合振速峰值区分明显且相互独立,表明监测到的数据并没有振动叠加现象。振速曲线峰值随爆心距的增加都呈现衰减趋势,最大振速峰值均在 0 ~ 0.05 s 时刻范围内出现,对应掌子面掏槽部位的掏槽孔与扩槽孔起爆,由此说明联络通道掌子面掏槽部位爆破时,对距离爆源中心近处的管片振动响应影响最为强烈。地震波在 18 ~ 50 m 范围内传播时,随着距离的增加,爆破振动速度时程曲线各振速峰值由相对独立的单峰突出状态转变为平缓状态。在距离大于 32 m 测点的振动波形变得相对平稳,只能区分出最大振速峰值,无法准确判别出各段雷管起爆时刻;在 18 m、32 m、50 m 处,最大振速峰值出现的时刻均为 0.095 s,滞后于距离 6 m 以内的各测点的振速峰值。

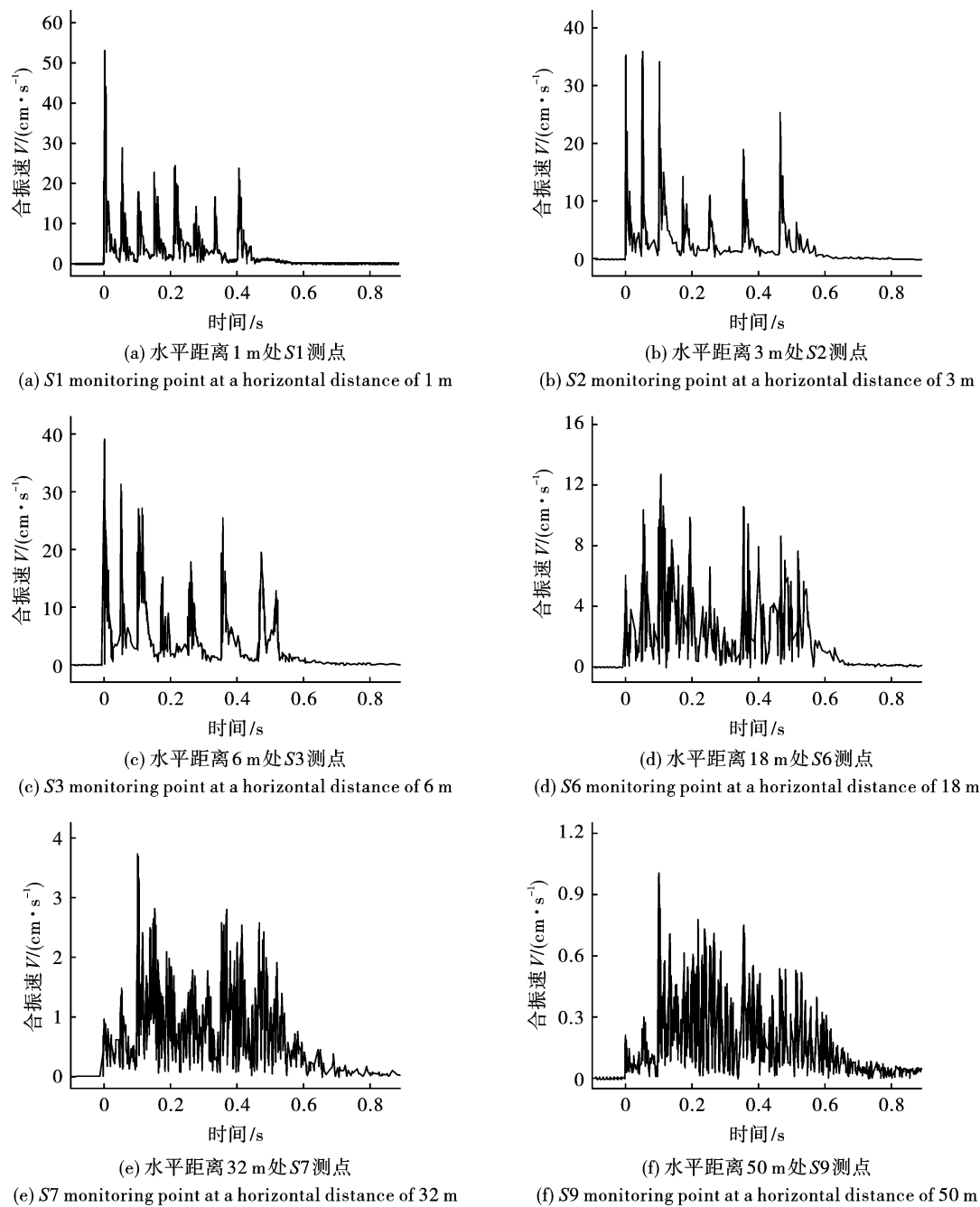


图3 不同水平距离处合振速时程曲线

Fig. 3 Time history curve of the combined vibration velocity at different distances

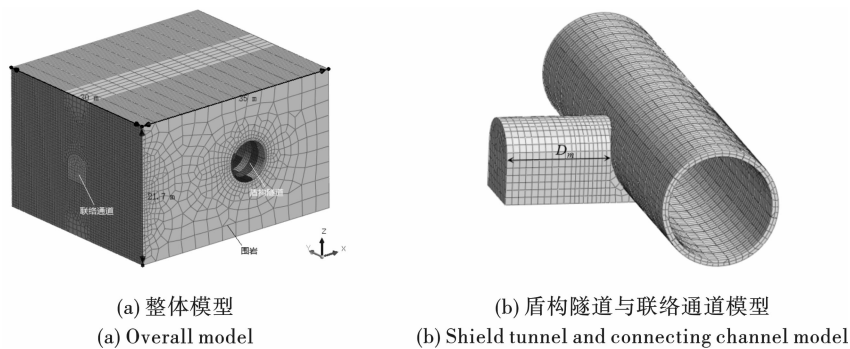


图4 数值模型

Fig. 4 Numerical model

### 3 数值模拟

通过现场实测已知,随着进洞爆破间距的减少,近距离爆破荷载作用下,盾构隧道振动速度峰值超过了规定允许振速。为了厘清爆破荷载作用下掌子面面临近盾构隧洞的安全间距,确保盾构隧道衬砌结构的安全稳定,需进一步建立数值模型开展多工况分析。

#### 3.1 模型建立

由实测分析可知起爆药量为 1.6 kg 的掏槽部位爆破时,临近管片振动响应最为强烈,所以将模型中爆破荷载齐爆药量设置为 1.6 kg。由于不同间距的盾构隧道模型只需改变联络通道掘进方向的未开挖步数,建模过程中,在保证齐爆药量、材料参数不变的前提下,通过 MIDAS-GTS NX 有限元软件“分

割”命令,建立出不同间距  $D_m$  的数值模型。根据联络通道与盾构隧道的关系以及所在区域的地质情况,结合隧道管片结构及配筋设计资料,建立有限元模型如图 4(a) 所示,并划分网格,模型尺寸为长 35 m × 宽 30 m × 高 21.7 m,除隧道外模型介质均为微风化凝灰岩。盾构隧道与联络通道空间结构模型,如图 4(b) 所示。

从区间联络通道开挖的整个施工过程来看,在临近盾构隧道进行联络通道爆破开挖施工,分为两种不同的开挖工况,即进洞爆破与出洞爆破。为探讨联络通道出洞爆破与进洞爆破两种近距离爆破工况下的盾构管片的振动响应,在单段齐爆药量 1.6 kg 不变的情况下,建立相应的数值模型,如图 5 所示。

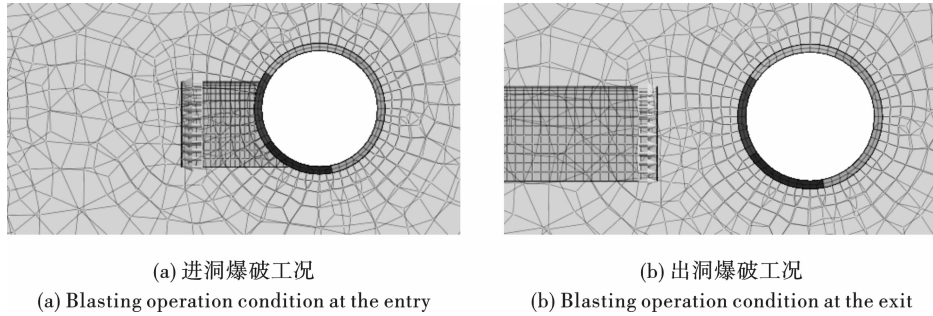


图 5 进洞与出洞工况爆破开挖模型  
Fig. 5 Blasting excavation model for tunnel at the entry and exit

微风化凝灰岩采用理想弹塑性摩尔-库伦 (Mohr-Coulomb) 本构模型进行模拟。盾构隧道管片和

连接螺栓相对刚度较强,计算时选用冯·米塞斯 (Von Mises) 弹性本构。各材料参数见表 5。

表 5 材料参数  
Table 5 Material parameters

岩石类别	密度 $\rho / (\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	弹性模量 $E / \text{GPa}$	泊松比 $\mu$	粘聚力 $c / \text{KPa}$	内摩擦 $\varphi / ^\circ$
微风化凝灰岩	2.34	9	0.20	1800	65
管片	2.50	36	0.20	-	-
连接螺栓	7.85	206	0.31	-	-

#### 3.2 荷载设置

因联络通道与相邻盾构隧道所在地层均为微风化凝灰岩,除此之外,中粗砂、粉质粘土、淤泥及海水等均位于微风化凝灰岩之上,根据地质剖面图及各层位介质的厚度、密度,根据  $P = \rho gh$ ,将上层岩石等效成上覆静荷载,计算得到模型上覆荷载为 626.416 kPa。

目前在隧道爆破施工影响的研究中,关于爆破冲击荷载的相关参数尚无完善的方法和理论加以确定。结合前人研究<sup>[15]</sup>,采用目前在爆破动力响应分

析中应用较为广泛的三角形荷载模型来模拟爆破荷载时程曲线,荷载曲线的最大爆压峰值如公式(1)。

$$P_{\max} = \frac{139.97}{Z} + \frac{844.81}{Z^2} + \frac{2154}{Z^3} - 0.8034 \quad (1)$$

式中:  $Z$  为比例距离,  $Z = R / \sqrt[3]{Q}$ ,  $\text{m}/\text{kg}^{1/3}$ ;  $R$  为爆心至荷载作用面的距离,  $\text{m}$ ;  $Q$  为最大单段药量,  $\text{kg}$ 。

三角形荷载的加载时间可通过见式(2)、式(3)进行计算。

$$t_r = \frac{12 \sqrt{r-2} - \mu Q^{0.05}}{K} \quad (2)$$

$$t_{84} = \frac{84 \sqrt{r-2-\mu Q^{0.2}}}{K} \quad (3)$$

式中： $K$ 为岩体的体积压缩模量； $\mu$ 为岩体的泊松比。 $\bar{r} = r/r_b$ 为对比距离，其中 $r$ 为距炮孔中心的距离，m； $r_b$ 为炮孔半径，m。荷载以1.6 kg最大一次齐爆药量的掏槽孔作为计算基础，掏槽孔深为0.8 m，考虑到为掏槽孔为耦合装药，爆心至荷载作用面的距离 $R$ 取0.4 m，所建荷载均匀施加在开挖轮廓面上。

### 3.3 边界条件

边界采用三维粘滞性人工边界，这种边界条件考虑了由于波能逸散产生的能量损失对岩体动力特性的影响。结合MIDAS-GTS NX边界添加功能，在模型四周建立曲面弹簧来实现粘性边界条件，需首先计算出相应岩体在 $X$ 、 $Y$ 、 $Z$ 方向上阻尼系数，如式(4)和式(5)所示。

$$P \text{ 波: } C_p = \rho \cdot A \cdot \sqrt{\frac{\lambda + 2G}{\rho}} = C_p \cdot A \quad (4)$$

$$S \text{ 波: } C_s = \rho \cdot A \cdot \sqrt{\frac{G}{\rho}} = C_s \cdot A \quad (5)$$

其中  $\lambda = \frac{vE}{(1+v)(1-2v)}$ ； $G = \frac{E}{2(1+v)}$ 。

上述式(4)、(5)两式中， $\lambda$ 为体积弹性系数， $K$ 为剪切弹性系数，kPa； $E$ 为弹性模量； $\nu$ 为泊

松比； $A$ 为截面积， $m^2$ 。

## 4 爆破间距对盾构管片的振动影响

### 4.1 出洞爆破

求解8个不同间距 $D_m$ (分别为0.5 m、0.75 m、1.0 m、1.5 m、2.25 m、3 m、3.75 m、4.5 m)下的出洞爆破模型，提取模型中管片各部分振速，在盾构隧道的拱腰侧振动响应最为强烈。因联络通道洞口处管环需要切割开口，为排除此处管环因开口对振速数据的影响，在保证分析节点位置的一致性前提下，提取不同间距条件下 $T_1 \sim T_9$ 管迎爆侧拱腰上的三向最大振速，节点选取如图6所示。

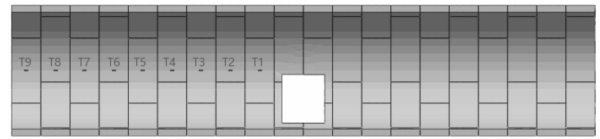


图6 迎爆侧管环拱腰节点选取

Fig. 6 Selection of the nodes at the arch waist of the pipe ring on the explosion side

为探讨出洞爆破不同爆破间距 $D_m$ 下的盾构隧道最大振动速度的响应特性，提取的振速数据见表6，各管环最大振动速度随出洞爆破间距 $D_m$ 的变化曲线如图7所示。

表6 出洞爆破不同间距条件下管环拱腰侧的最大振速

Table 6 Peak vibration velocity at the waist side of the tube ring under different spacings

间距 $D_m/m$	管环迎爆侧拱腰最大振速 $V_m/(cm \cdot s^{-1})$								
	$T_1$	$T_2$	$T_3$	$T_4$	$T_5$	$T_6$	$T_7$	$T_8$	$T_9$
0.50	75.97	23.67	14.75	10.81	8.62	6.84	5.15	4.08	3.48
0.75	70.67	23.56	14.38	10.53	8.41	6.68	5.04	4.02	3.45
1.00	65.85	23.48	13.96	10.20	8.17	6.49	4.91	3.94	3.40
1.50	57.49	22.96	13.53	9.57	7.71	6.14	4.67	3.79	3.31
2.25	48.21	21.56	12.64	8.90	7.20	5.76	4.45	3.66	3.22
3.00	41.01	20.09	11.51	8.30	6.76	5.46	4.27	3.55	3.12
3.75	34.94	18.73	10.64	7.86	6.42	5.23	4.13	3.44	3.02
4.50	21.38	16.75	10.32	7.76	6.44	5.35	4.34	3.60	3.09

由图7可知，不同间距条件下 $T_1$ 管环的振动速度的数值均大于其他环管片，在间距 $D_m$ 小于4.5 m时的近距离爆破荷载下，爆破振动速度激增，远超过了隧道爆破振速允许值 $20 cm \cdot s^{-1}$ 。临近 $T_1$ 管环的 $T_2$ 管环也出现了小幅度的超振现象，但在小间距爆破荷载下并未出现振速激增现象，变化较平稳。结合地震波理论对上述现象进行分析，认为原因为 $T_1$ 管环位于爆破掌子面开挖范围内，导致受爆破荷载影响明显，模型中爆破荷载进行激发后，爆破振动

波的传播形式主要是沿联络通道轴后方岩石传播，强烈的振动波径直作用到后方的 $T_1$ 管片，造成了 $T_1$ 管环的振动响应明显，在爆破间距过小时，受到爆破荷载的冲击作用，导致管片结构的振速激增。

### 4.2 进洞爆破

为探讨从开口处进洞后，进洞爆破开挖时的爆破垂向间距 $D_m$ 对洞口处临近管片的振动影响，提取图6相对应的节点的振动数据，提取结果如表7所示。

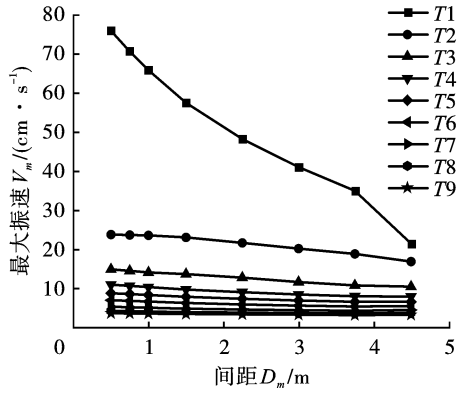


图7 管环最大振动速度  $V_m$  随爆破间距  $D_m$  的变化  
Fig. 7 Variation of the maximum vibration speed of the pipe ring with the blasting distance  $D_m$

各管环最大振动速度随进洞爆破间距  $D_m$  的变化曲线如图8所示。将图7与图8对比可知：不同

进洞间距条件下  $T_1$  管环的最大振动速度大于其他环管片,但与出洞爆破相比,只有在间距  $D_m$  为 0.75 m 时  $T_1$  管环的爆破振动速度才超过了振速允许值  $20 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ ,且在相同间距、同一管片节点位置条件下的出洞爆破振动速度均小于出洞爆破时的振动速度。由此表明,在相同爆破间距下,出洞爆破对临近盾构隧道的振动影响更为强烈,最大振动速度是进洞爆破的 2.9~3.4 倍。

对于振动最为强烈的开口近区管片( $T_1$ ),其进洞爆破工况下,间距为 0.75 m 相比 4.5 m,最大振动速度增加了  $15.07 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ ,并没有出现爆破振速激增现象;出洞爆破工况下,间距为 0.75 m 相比间距为 4.5 m,管片最大振动速度增大了  $49.29 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ ,振速的增长幅度远大于进洞爆破工况;由此表明,相比于进洞爆破,联络通道爆破出洞爆破开挖,随垂向间距的减小振速递增幅度更大。

表7 进洞爆破不同间距条件下管环拱腰侧的最大振速

Table 7 Peak vibration velocity of the waist side of the tube ring under different spacings

间距 $D_m/m$	管环迎爆侧拱腰最大振速 $V_m/(cm \cdot s^{-1})$								
	$T_1$	$T_2$	$T_3$	$T_4$	$T_5$	$T_6$	$T_7$	$T_8$	$T_9$
0.75	24.04	16.57	11.28	8.56	6.82	5.45	4.42	3.77	3.21
1.50	18.26	14.38	10.16	7.82	6.31	5.11	4.22	3.64	3.10
2.25	14.56	12.31	9.08	7.04	5.73	4.68	3.93	3.43	2.93
3.00	12.09	10.56	8.15	6.34	5.14	4.21	3.60	3.19	2.73
3.75	10.31	9.14	7.37	5.76	4.62	3.89	3.33	2.91	2.49
4.50	8.97	8.01	6.70	5.29	4.30	3.89	3.28	2.63	2.23

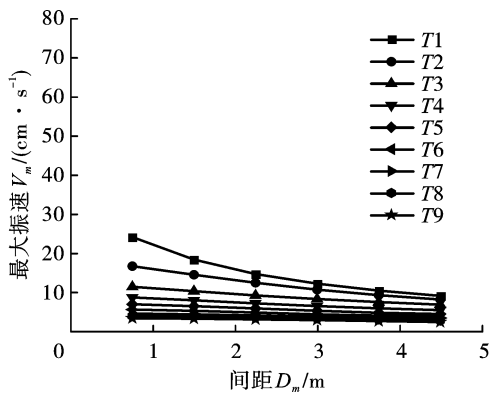


图8 管环最大振动速度随进洞爆破间距  $D_m$  的变化  
Fig. 8 Variation of the peak vibration velocity of the pipe ring with the blasting distance  $D_m$

拟合出洞、进洞开挖时  $T_1$  位置最大振动速度  $V_m$  随爆破间距  $D_m$  的变化关系式,如式(6)。

$$V_m = a \exp\left(-\frac{D_m}{b}\right) - c \quad (6)$$

式中: $a$ 、 $b$ 、 $c$  为相关系数,出洞爆破时, $a$ 、 $b$ 、 $c$  分别为 135.7、7.9、-52;进洞爆破时  $a$ 、 $b$ 、 $c$  分别为

25.71、1.92、6.59。当  $V_m$  为  $20 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$  安全允许振速时,出洞爆破时  $D_m$  为 5.0 m,进洞爆破时  $D_m$  为 1.25 m。因此为保证盾构管片的安全,在出洞爆破时爆破间距  $D_m$  需不小于 5.0 m,出洞爆破时爆破间距  $D_m$  需不小于 1.25 m,未开挖部分岩石采用非爆破法进行开挖。

## 5 出洞爆破下临近盾构管片的应力分析

数值模拟分析结果与现场实测结果表明,在出洞爆破间距较近时,爆源近区管环的迎爆侧会出现爆破超振的现象,且出洞爆破对临近盾构隧道的影响大于进洞爆破。为了分析联络通道爆破对盾构隧道主体结构的影响,本节对不同出洞爆破间距的模型进行应力分析。

### 5.1 整体应力云图分析

通过 Midas-GTS NX 后处理结果条目中“Soild Stresses-SPRINCIPAL A(V)”,提取 8 种不同间距条件下模型的最大第一主应力云图,如图9所示。

通过对图9可知,管片主应力主要集中在

管片迎爆侧,且在联络道开挖范围内,受应力影响最明显的区域为开口处的两环不完整管片,其次是位于开口两侧的最近的两环管片,应力波传播表现为沿隧道轴向从爆源近区管片向两侧管片逐渐衰减,这与侧向爆破荷载的作用方向及位置有很大关系。从最大第一主应力分布及大小变化来看,当间距 $D_m$ 在0.5~1 m范围内,单元最大主应力出现在矩形开口上部两侧顶角处,云图中在此处出现红色的应力集中区;随着间距的增大,当爆破间距从1 m增大到2.25 m时,矩形开口上拱部两侧的主应力逐渐衰减, $D_m=1.5$  m与 $D_m=2.25$  m云图中的主应力最

大值均出现在开口左侧不完整管片的横缝与相邻管环的纵缝相交处,在横纵缝相交处与开口下部出现红色的应力集中区;当间距 $D_m$ 增大到2.25~4.5 m时,云图中开口左侧横纵缝相交处单元的主应力衰减明显,此时主应力的最大值均出现在开口底部,应力集中区仅出现在开口底部的管片外侧边缘。整体来看,最大第一主应力均分布在管环外侧的联络通道开挖范围内,外侧最大第一主应力会随间距的增大而减小,且发生最大第一主应力的区域也会相应发生一定的改变。

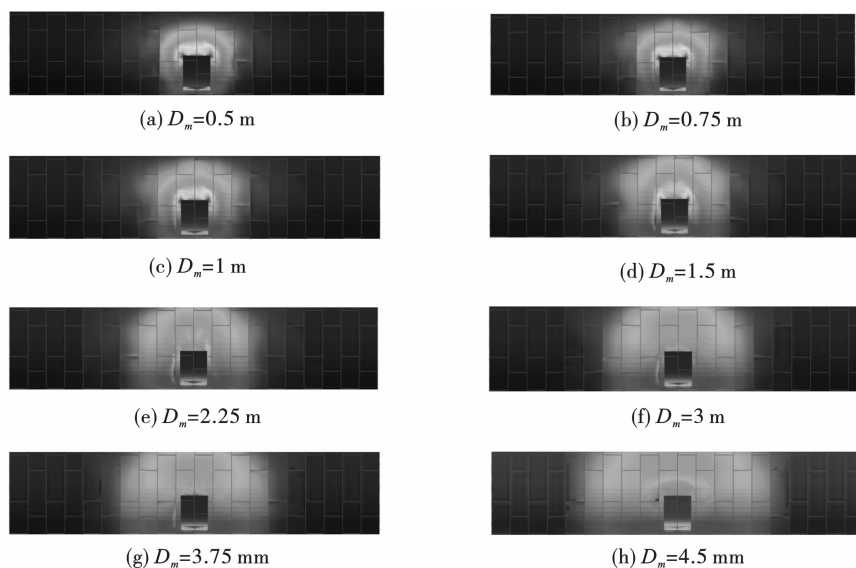


图9 不同间距条件下的第一主应力云图

Fig. 9 Maximum stress cloud diagram under different blasting spacing conditions

## 5.2 开口前后近接部衬砌管片的应力变化

在联络通道开挖前,需要对联络通道洞口处的管片进行切割。管环开口后自身整体稳定性会发生变化<sup>[17]</sup>,在围岩压力的静荷载作用下会使与联络通道相连接的近接交叉部管片产生应力集中,产生受拉的不利受力形式。本节为探讨联络通道爆破施工荷载下管片开口对自身的受力影响。在爆破荷载不变的情况下,建立爆破间距 $D_m$ 为2.25 m及4.5 m的洞口未开口完整管环模型,与开口管环模型进行对比分析,两种模型的振速云图如图10所示。

由图10(a)可知,在间距 $D_m$ 为2.25 m时,最大应力值位于开口侧方的横纵缝相交处,最大主应力为36.35 MPa;而由图10(b)可知,在间距 $D_m$ 为2.25 m时,未开口管环外侧的联络通道开挖范围内最大主应力基本在14.43~25.75 MPa,并未出现明显的应力集中现象。由此表明,在联络通道开挖范围内的管片,开口后会自身外侧产生小范围的

应力集中区,使其成为整个衬砌结构的应力最大处。

分别将图10(c)与图10(d),图10(e)与图10(f)进行对比可以发现,开口工况相比于未开口工况,管片内侧的最大主应力得到了明显的削减,尤其是位于开口下方的拱底部的管片:在间距 $D_m$ 为2.25 m时,开口工况下拱底部管片的最大主应力为13.1 MPa,而未开口工况下拱底部管片的最大主应力为37.07 MPa,削减率为64.7%;在间距 $D_m$ 为4.5 m时,开口工况下拱底部管片的最大主应力为9.28 MPa,而未开口工况下拱底部管片的最大主应力为17.84 MPa,削减率为48%。

管片开口前后的应力变化表明:对联络通道与盾构隧道近接交叉部位管片的进行切割,形成的开口不完整结构会减弱自身内侧在爆破荷载下的最大主应力,但会造成自身外侧产生小范围的应力集中区,使其成为盾构隧道衬砌结构最为薄弱的位置。

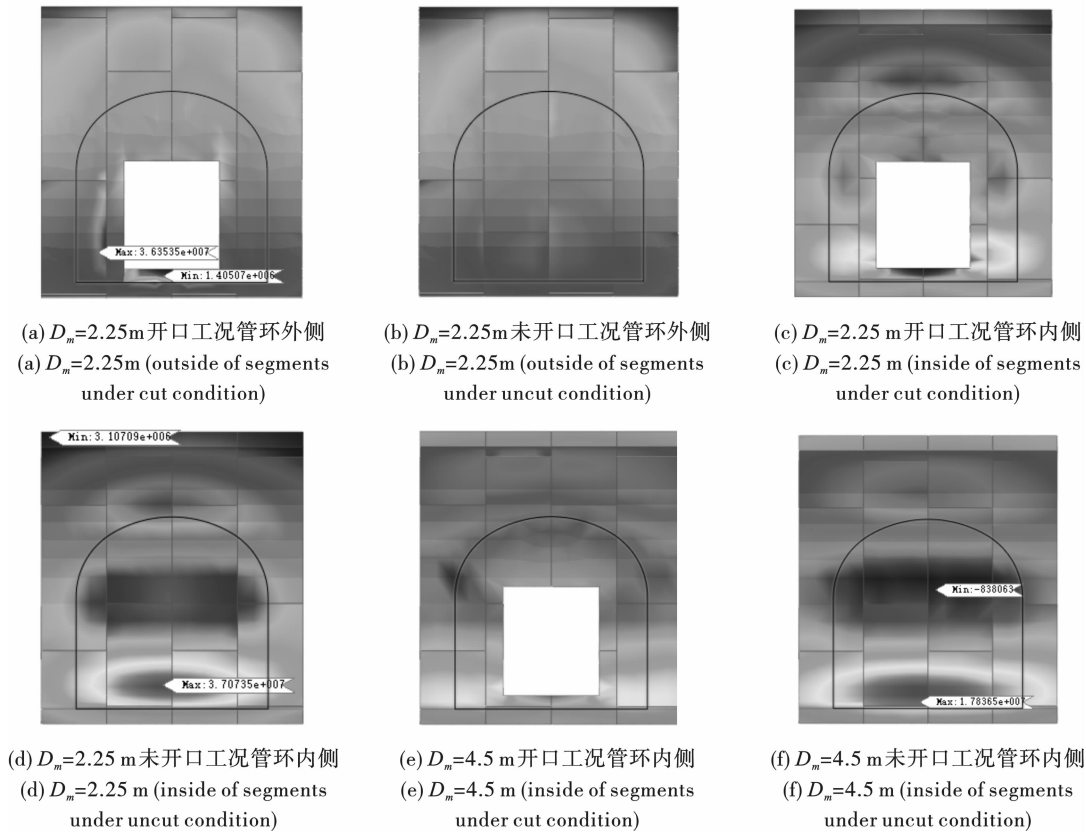


图10 管片开口前后最大主应力云图

Fig. 10 Maximum principal stress cloud diagram before and after the segment opening

## 6 结论

1) 在相同的爆破间距下,相比于进洞爆破,出洞爆破对临近盾构隧道的振动影响更为强烈,最大振动速度是进洞爆破的2.9~3.4倍,随垂向间距的减小振幅递增幅度也更大。为保证盾构管片的安全,在盾构管片20 cm/s的安全允许振速下,在出洞爆破时爆破间距 $D_m$ 需不小于5.0 m,进洞爆破时爆破间距 $D_m$ 需不小于1.25 m,未开挖部分岩石采用非爆破法进行开挖。

2) 管片主应力主要集中在管片迎爆侧,且在联络道开挖范围内,受应力影响最明显的区域为开口处的两环不完整管片,其次是位于开口两侧的最近的两环管片。应力集中最为明显开口管片,但其产生最大主应力的位置随间距的变化呈现出不同的分布规律,随间距的减小,表现为从矩形开口底部,到矩形开口侧边的横纵缝相交处,到矩形开口上部的两侧顶角。

3) 对联络通道与盾构隧道近接交叉部位管片的进行切割,形成的开口不完整结构会减弱自身内侧在爆破荷载下的最大主应力,但会造成自身外侧产生小范围的应力集中,使其成为盾构隧道衬砌结

构最为薄弱的位置。

## 参考文献 (References)

- [1] 汪波,郭新新,王志伟,等.新建隧道爆破施工对既有裂缝病害隧道的动力响应分析[J].爆破,2019,36(1):90-96.
- [1] WANG Bo, GUO Xin-xin, WANG Zhi-wei, et al. Caused dynamic response of existing tunnel with cracks to blasting excavation of newly-built tunnel [J]. Blasting, 2019, 36(1):90-96. (in Chinese)
- [2] 高宇璠,傅洪贤.近距离下穿既有盾构隧道的隧道钻爆降振技术研究[J].振动工程学报,2021,34(2):321-328.
- [2] GAO Yu-fan, FU Hong-xian. Research on vibration reduction technology by drilling and blasting of tunnels passing through existing shield tunnels in short distance [J]. Journal of Vibration Engineering, 2021, 34(2):321-328. (in Chinese)
- [3] 毛祚财.钻爆法原位扩建隧道的振动监测分析[J].工程爆破,2021,27(5):113-118.
- [3] MAO Zuo-chai. Vibration monitoring and analysis of tunnel in-situ expansion by drilling and blasting method [J]. Engineering Blasting, 2021, 27(5):113-118. (in Chinese)

- nese)
- [4] 程平,王林峰,郑志伟,等. 隐伏岩溶区小净距隧道爆破振动规律[J]. 科学技术与工程, 2020, 20(24): 10017-10024.
- [4] CHENG Ping, WANG Lin-feng, ZHENG Zhi-wei, et al. Blasting vibration effect of small clear distance tunnel in hidden karst areas[J]. Science, Technology and Engineering, 2020, 20(24): 10017-10024. (in Chinese)
- [5] 高卫亮,王光勇,张运强. 爆破作用下山岭隧道衬砌动态响应分析[J]. 应用力学学报, 2020, 37(4): 1737-1744, 1873.
- [5] GAO Wei-liang, WANG Guang-yong, ZHANG Yun-qiang. Dynamic response analysis of mountain tunnel lining under blasting[J]. Journal of Applied Mechanics, 2020, 37(4): 1737-1744, 1873. (in Chinese)
- [6] 于建新,刘焕春,魏海霞,等. 近邻隧道爆破施工相互动力影响研究[J]. 现代隧道技术, 2019, 56(6): 85-92.
- [6] YU Jian-xin, LIU Huan-chun, WEI Hai-xia, et al. Study on mutual dynamic effects of blasting construction of adjacent tunnels[J]. Modern Tunnel Technology, 2019, 56(6): 85-92. (in Chinese)
- [7] 张旭,周传波,蒋楠,等. 下穿地铁隧道爆破作用下人防隧道的动力效应[J]. 爆破, 2021, 38(3): 10-18.
- [7] ZHANG Xu, ZHOU Chuan-bo, JIANG Nan, et al. Dynamic effect of civil air-defense tunnel induced by blasting of undercrossing subway tunnel[J]. Blasting, 2021, 38(3): 10-18. (in Chinese)
- [8] V K Dang, DANIEL Dias, DO Ngoc Anh, et al. Impact of blasting at tunnel face on an existing adjacent tunnel[J]. International Journal of GEOMATE, 2018, 15(47): 22-31.
- [9] 杨波,王海亮,褚夫蛟,等. 盾构隧道联络道爆破施工优化[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(20): 8663-8669.
- [9] YANG Bo, WANG Hai-liang, CHU Fu-jiao, et al. Optimization of blasting construction for connecting passage of shield tunnel[J]. Science Technology and Engineering, 2021, 21(20): 8663-8669. (in Chinese)
- [10] 胡刚,费鸿禄,包士杰,等. 爆破荷载作用下隧道初次衬砌结构的动力响应[J]. 公路交通科技, 2019, 36(10): 83-90.
- [10] HU Gang, FEI Hong-lu, BAO Shi-jie, et al. Dynamic response of tunnel primary lining structure under blasting load[J]. Highway Traffic Science and Technology, 2019, 36(10): 83-90. (in Chinese)
- [11] 李小贝. 爆破施工对邻近既有隧道的振动响应研究[J]. 爆破, 2021, 38(4): 149-155.
- [11] LI Xiao-bei. Study on vibration response of blasting construction to adjacent existing tunnel[J]. Blasting, 2021, 38(4): 149-155. (in Chinese)
- [12] 吴忠仕,陈培帅,王伟,等. 扩建隧道爆破对既有衬砌的影响及安全判据[J]. 水利水电技术, 2020, 51(5): 77-85.
- [12] WU Zhong-shi, CHEN Pei-shuai, WANG Wei, et al. Impact from blasting for tunnel expansion on existed tunnel lining and its safety criterion[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2020, 51(5): 77-85. (in Chinese)
- [13] 王海亮,胡红星,张富强. 海底新建隧道爆破对既有隧道的振动影响研究[J]. 山东科技大学学报(自然科学版), 2019, 38(4): 41-49.
- [13] WANG Hai-liang, HU Hong-xing, ZHENG Fu-qiang. Study on blasting vibration of new undersea tunnel affecting existing tunnels[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2019, 38(4): 41-49. (in Chinese)
- [14] SUN Shao-Rui, LING yue. Case Study on Influence of Step Blast-Excavation on Support Systems of Existing Service Tunnel with Small Interval[J]. Advances in Mechanical Engineering, 2010(8), 1-13.
- [15] 梁禹,张庆彬,刘洪震,等. 爆破振动对邻近盾构管片影响的测试与分析[J]. 地下空间与工程学报, 2014, 10(3): 697-704.
- [15] LIANG Yu, ZHANG Qing-bin, LIU Hong-zhen, et al. Field test and analysis on effect of blast-induced vibration on lining of adjacent tunnel[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2014, 10(3): 697-704. (in Chinese)
- [16] 中华人民共和国国家标准. GB6722—2014 爆破安全规程[S].
- [16] National Standard of the People's Republic of China. GB6722—2014 Blasting Safety Regulations[S].
- [17] 李兴龙,彭立敏,吴涛,等. 盾构隧道联络通道施工力学行为数值模拟分析[J]. 铁道标准设计, 2009(4): 102-105.
- [17] LI Xing-long, PENG Li-min, WU Tao, et al. Numerical simulation analysis of construction mechanical behavior of shield tunnel connecting passage[J]. Railway Standard Design, 2009(4): 102-105. (in Chinese)