

# 用地球物理技术对隧道控制爆破的监测与反馈

钟 世 航

( 铁道部科学研究院 北京 100081 )

摘 要 : 招宝山公路隧道为大跨度并行超小净距的隧道 , 两隧道的净距仅为规范规定的 1/7 ~ 1/10 , 保护两隧道间夹岩体成为关键技术。采用控制爆破保护岩体是主要措施之一。作者采用声波测量、陆地声纳等测量岩体受爆破破坏的深度及破坏情况 , 并监测质点振动速度来控制爆破的振动 , 还通过应变、位移和压力等量测的资料来监视隧道的安全 , 以选择和判定控制爆破的施工方案、施工顺序、爆破参数。工程获得成功 , 带来较大的经济效益。

关键词 隧道 控制爆破 监测 反馈 地球物理技术

中图分类号 : P631.4

文献标识码 : A

文章编号 : 1000 - 8918( 2005 )01 - 0084 - 04

招宝山公路隧道是宁波大桥工程之重要组成部分 , 已于 2001 年 6 月建成通车。此桥是目前我国跨度最大的预应力混凝土独塔斜拉桥 , 因地形限制 , 桥隧紧相连。为了建桥的需要 , 在隧道设计中 , 将 2 座并行的开挖跨度各达 14.5 m 的隧道 , 靠近到净距 ( 边到边的最近距离 ) 仅为 4 m , 远小于规范规定的 30 ~ 40 m ( 图 1 )。这样不仅解决了大桥工程的一个难点 , 又使技术得以突破。这将给铁路和公路带来大的经济效益。

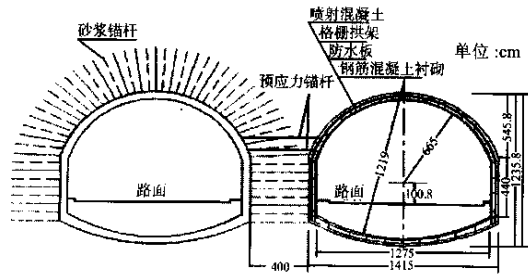


图 1 招宝山隧道设计断面

为实现这一突破 , 在设计中安排了一系列的措施 , 包括施工顺序、施工方法、岩体加固 ( 特别是两隧道间夹岩体的预加固 )、转移荷载等 ; 另外 , 控制爆破也是重要措施之一。隧道埋深最大仅 35 m , 从正下方穿过全国重点保护的威远炮台城门洞和寺庙 , 隧道的西洞口距另一寺庙建筑不到 10 m , 为保护这些建筑 , 必须采用控制爆破。笔者作为隧道设计负责人 , 在设计文件及工程招标书中规定了必须的量测内容 , 并将它列为隧道施工中的一个环节。特别是在隧道上半部 ( 弧形导坑 ) 开挖过程中 , 通过声波测量和陆地声纳法发现开挖爆破对岩体的破坏远超

过设计控制的要求后 , 业主要求设计方介入 , 加强必要的测试 , 并通过试验 , 确定控制爆破的基本方案。

## 1 控制爆破的要求及要监测反馈的资料

### 1.1 为保护已有建筑物的控制爆破

隧道穿过流纹斑岩 , 岩块坚硬 , 节理发育 , 并横切 5 条断层。总体来说 , 大部分属中等稳定岩体 , 断层附近岩体则为破碎软弱岩体。控制爆破的目的是避免爆破振动使隧道顶上要保护的建筑物遭受破坏。威远炮台城门洞是干砌片石砌成 , 片石间没有灰浆粘结 , 庙宇原已发展了裂缝 , 保护措施主要是控制开挖爆破在建筑物上的振动速度。振动速度按

$$v = K(Q^{1/3}/R)a$$

估算 , 其中  $v$  为振动速度 ,  $Q$  为最大一段的炸药量 ,  $R$  为测点与爆源之间的距离 ,  $K$ 、 $a$  为与地形、地质条件有关的系数 , 在现场测取不同  $R$  的  $v$  值做回归统计后确定。在工作中注意控制  $Q$  值 , 合理选取  $K$ 、 $a$  , 并根据每次爆破作业时测得的  $v$  值及时做调整。

### 1.2 为保证隧道安全的控制爆破

在施工安排上 , 规定了 1 个隧道先开挖 , 做好初期支护并加固围岩后 , 再开挖第二个隧道。各隧道均采用长正台阶法施工。由喷锚加格栅拱架合成的初期支护是隧道主要受力结构。为保证隧道安全的控制爆破有 2 个内容。

( 1 ) 在第二个隧道开挖时 , 特别是此隧道下半部开挖时 , 已开挖并做好支护的第一个隧道形成临空面 , 爆破的冲击力将冲压两隧道之间的岩墙。若冲击力过大 , 岩墙抵抗不住 , 将使岩墙发生破坏。爆

破振动过大也会破坏第一隧道已完成的初期支护。为此,在调查及进行数值模拟基础上,确定第二个隧道上半部弧形导坑开挖时必须做控制爆破,下半部开挖时,先预留临靠第一隧道边墙几米宽岩体,这样,加上两隧道间原有的 4 m 厚岩墙,就有较厚岩体可以抵抗第二隧道下半部开挖爆破时指向第一隧道的冲击力。但这块岩体预留厚度是要研究的问题。软岩隧道周边进行光面爆破时,有时预留 0.5 ~ 1 m 厚的光爆层,但本隧道照此预留,显然无济于事,而预留厚了,则不便施工,而且爆除这块岩体时用炸药量大,又会带来问题。笔者认为,这块岩体是最后爆除,此时它已出现第三个临空面,既可减小用炸药量,又对减小冲击力和振动有利,但这种分析尚缺乏说服力,还需要通过试验来证实,并需通过测量资料的反馈来确定这块保护岩体的厚度。笔者还提出在开挖爆破时,在预留这块岩体的周边采用预裂爆破,形成 1 个隔振面,以减小开挖爆破对第一个隧道的冲击与振动。为减小对岩体的破坏,对于软岩隧道,规范中规定可在隧道开挖轮廓的周边做预裂爆破,而对于硬岩,则不采用预裂爆破,而采用光面爆破。若在本隧道这种硬岩中采用预裂爆破,应通过试验和测量资料来判定其效果。

(2)对两隧道相邻的中夹岩体,爆破对岩体的破坏深度应控制在 1 m 以内。这是根据数值模拟,对两隧道中夹岩墙安全厚度取 2 m 为限的结果而定的。为此,需要监测爆破对岩体的破坏深度。爆破破坏深度是指由于爆破使岩体产生裂隙的深度(而非围岩松弛带深度)。

### 1.3 监测手段

#### 1.3.1 爆破振动速度监测

对要保护的文物和建筑物,设立监测点,每次掘进爆破均测定水平与垂向的质点振动速度,并立即反馈以确定下一循环作业的爆破参数。

按规范规定,土坯房的振动速度应控制在 1.0 cm/s 以内,这适合于干砌片石的威远炮台城门及已发生了一些不均匀下沉出现裂缝的庙宇。在对建筑物做必要的加固之后,确定振动速度控制在 3.0 cm/s 以内,这样可加快施工进度,又满足保护建筑物的要求。

开挖第二隧道时对第一隧道岩体的保护,则根据岩体性质和喷锚网加格栅初期支护的刚度,根据计算和经验,并经洞口段试验实测,确定振动速度控制在 15 cm/s 以内,亦在每次爆破时测定水平与垂向的质点振动速度。

万方数据

#### 1.3.2 爆破对岩体破坏深度测定

采用声波测量:在被测位置钻 2 个平行的水平孔,一孔置发射探头,一孔置接收探头,两探头做同步等深移动,测取透过波波速。爆破破坏的岩体中微裂隙增多,原节理变宽,导致声波波速降低,根据声波波速-深度曲线可以确定破坏深度。

声波测量需钻孔,只能选取典型地段进行,在岩体破碎地段亦难以进行,故以陆地声纳法相配合。陆地声纳法是“陆上极小偏移距高频宽带弹性波反射连续剖面法”的简称,它可做剖面测量(作者将有专文介绍用陆地声纳法测松弛带深度问题)。

#### 1.3.3 位移与喷射混凝土应变测定

为确定控制爆破、岩体加固(包括两隧道中夹岩墙及特浅埋段隧道上放岩体的预加固等措施)及其它工程措施的综合效果,在隧道的几个横断面设立了位移及应变量测元件,测量参数为:

(1)初期支护喷射混凝土的切向应变。它反映了初期支护的受力情况,特别是边墙中部是结构最关键的位置,喷层切向应变直接反映了安全可靠度;

(2)第一个隧道的边墙收敛值与在第一个隧道开挖后即在邻靠第二隧道的边墙即安设的深 3.6 m 的多点锚杆位移计(采用不同长度单点位移计组合),它们反映了边墙向内的总位移量(收敛)及两隧道中夹岩墙不同深度的水平位移值,以此来判定岩体的牢固程度、加固手段的可靠性以及边墙的安全可靠度。

## 2 监测结果及对设计和施工的指导

### 2.1 用声波及陆地声纳法测定的爆破破坏深度

在第二隧道的上半断面(弧形导坑)开挖支护后,在邻第一隧道的拱脚上测定不同深度声波波速,并做陆地声纳剖面测量。图 2 是其中 2 组声波测量资料。应当说明,流纹斑岩的节理发育极不均匀,声波测量的钻孔距较小,发射及接收距最小仅 50 cm

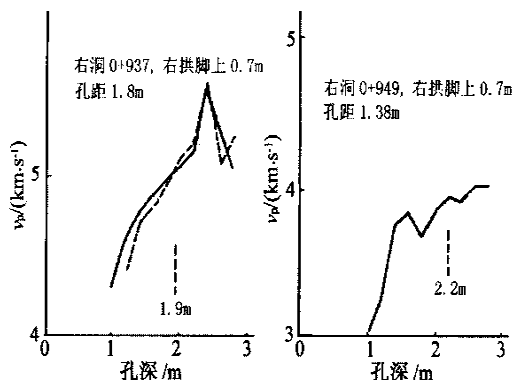


图 2 隧道拱部开挖后岩体破坏深度的声波测量结果

(声波仪采样间隔为  $1\mu\text{s}$ ) ,所测的波速接近岩块的波速,通常远高于地震勘探所测波速(地震勘探的射线经历的距离大,穿过的岩体中有大量节理裂隙,反映的是岩体波速),有时会高出  $50\% \sim 100\%$  ,但我们应用的是其相对变化,可以反映岩体受爆破的破坏深度。由这些资料可见:声波波速从孔口向下约  $2\text{ m}$  大幅降低,反映岩体破坏深度达  $2\text{ m}$  左右。几个测点的岩体破坏深度不一,最小者  $1.2\text{ m}$  ,最大者  $2.6\text{ m}$  。陆地声纳剖面上也清楚地反映出波速降低界线的大幅起伏。在岩体岩性变化不大的情况下,破坏深度的不一,反映了爆破技术的不稳定,技术管理上不规范。

为此,除了责成施工单位认真对待,加强爆破专业技术力量外,并变更设计,对隧道拱腰至拱脚部位的两隧道夹岩体,增设穿通两隧道的低预应力全长注浆锚杆,并确定加固锚杆完成后才可开挖隧道下半部;并加强两隧道间岩墙预加固的质量监督和保证。实践证明,这些加固手段起到了应有的作用,保证了隧道继续开挖的安全。

在隧道下半断面开挖时,重新整顿加强了控制爆破组,请爆破专家任技术负责,与设计负责人共同通过试验、测量资料反馈和计算,改进了控制爆破的方法,变更了爆破参数,加强测量及监理。图3为调整了控制爆破后边墙测定的波速-深度曲线。

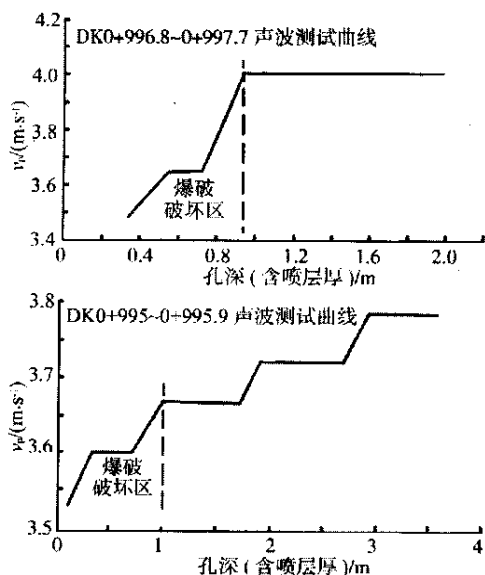


图3 改善控制爆破后边墙岩体破坏深度的声波曲线

它们与同一隧道、同一支护方式,但爆破方式、参数不同的图2的曲线对比,可以看到改进了控制爆破前后爆破对岩体破坏深度的不同。声波波速大幅降低段均仅深  $0.9 \sim 1.0\text{ m}$  ,考虑到钻孔口处还有  $15\text{ cm}$  左右厚的喷射混凝土层,实际上岩体破坏深度为  $0.7\text{ m}$  左右数据,符合设计的要求。量测数据显

示,不同测点爆破破坏深度(即弹性波速大幅降低界线)变化不大,表明爆破技术稳定,管理规范。

## 2.2 爆破时测点振动速度的测定及反馈

### 2.2.1 保护建筑物的控制爆破

在隧道洞口附近的建筑物按土坯房保护,按规范选用  $1.0\text{ cm/s}$  的质点振动速度为控制界线。实测结果表明,在洞口爆破时有3次振动速度较大,爆破后根据测量资料及时做了爆破参数调整。在隧道通过威远炮台城门等建筑物下方时,在每次爆破进度为  $2\text{ m}$  的情况下,仅有3次爆破振动速度略超过规定(水平向、垂向分别为① $3.25\text{ } 3.45$  ;② $3.84$  ,  $3.06$  ;③ $3.77\text{ } 2.73$  ;单位  $\text{cm/s}$  ) ,均及时做了爆破参数调整。

### 2.2.2 保护第一隧道的控制爆破

控制爆破除了要采用适当的爆破参数外,合理的开挖方法及减振措施是更重要的内容。为此,在第二隧道下半断面开挖爆破过程中,设计方与施工控制爆破小组做了一系列的试验及实测反馈工作。试验内容如下。

(1)在第二隧道下半部掘进开挖时,在邻第一隧道侧预留  $3 \sim 4\text{ m}$  爆破保护层的情况下,对预裂爆破隔振带的效果进行分析。在旁侧已开挖隧道的拱脚位置,多次测定不同距离测点的爆破振动速度,做回归分析后得到如下爆破振动衰减规律:未做预裂爆破,即无隔振带时(有向上和向外2个临空面),采用微差爆破

$$v_{\max} = 148(Q^{1/3}/R)^{1.25} \quad (R = 0.90);$$

做了预裂爆破即设隔振带时

$$v_{\max} = 61(Q^{1/3}/R)^{1.49} \quad (R = 0.95)。$$

显然,采用预裂爆破隔振带可明显地降低振动速度,降低率可达  $70\% \sim 80\%$  。

(2)预留  $3 \sim 4\text{ m}$  厚爆破保护层后,爆除这块岩体并做光面爆破时(这时有向上、向外、侧向3个临空面),在旁侧已开挖隧道拱脚位置,做不同距离测点多次测量后的振动速度回归分析得到

$$v_{\max} = 77.48(Q^{1/3}/R)^{1.34} \quad (R = 0.92)。$$

与(1)中未做预裂爆破的情况相比可看到,有3个临空面的预留保护层爆破时产生的振动速度,仅为有2个临空面的中间开挖爆破的  $50\%$  左右,与设预裂爆破设隔振带时的开挖爆破振动相近。根据这些测定结果与测量岩体破坏深度的资料,最后确定开挖顺序与步骤(参见图4)。正式开挖施工时,测定的爆破振动速度值均不大于  $12\text{ cm/s}$  ,略低于安全限值,符合工程设计要求,既保证了安全,又保证了开挖速度。

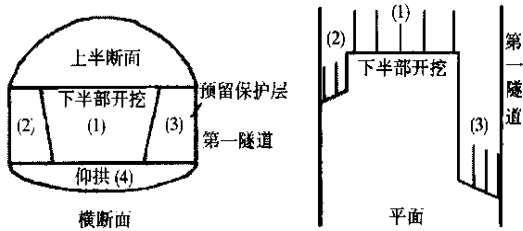


图4 开挖顺序示意

2.3 应变、位移的测量结果

这些测量的目的主要是为了监测隧道安全,并监视设计的各种措施是否合理,如果发现异常,将进一步采取必要的工程措施。测量结果表明,在采用一系列设计及工程措施之后,隧道是安全、稳定的,工程设计与施工是成功的。例如:

(1)两隧道间边墙中夹岩体,水平位移量很小,反映所采取的保护岩体的措施起作用了。图5所示是水平位移值最大的1个测点,中隔岩体最大水平伸长略大于1.0 mm,相对于宽4 m的岩体,这是很微小的值。

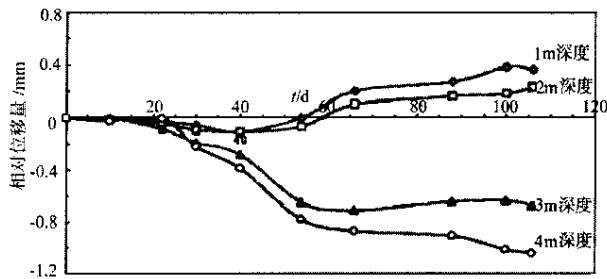


图5 DK0+915 右洞中央岩墙相对水平位移-时间曲线

(2)两隧道中夹岩墙受初期支护的侧向约束,但径向压力值仅0.016 MPa,在设计安全范围内,并表明岩体向两侧没有大的变形。

(3)隧道周边喷射混凝土初期支护的切向应变值大部为拉应变,但最大值不在两隧道相邻的边墙部位,且最大值才189  $\mu\epsilon$  (图6)。

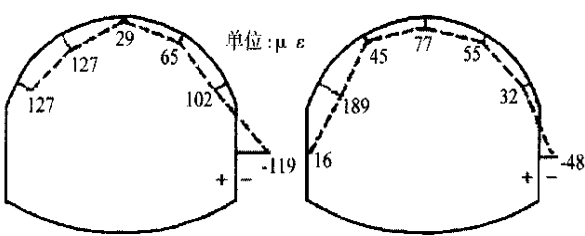


图6 隧道稳定后的喷射混凝土层切向应变

对于C20混凝土来说,并考虑到应变计是在混凝土尚未凝结时埋入的,此时即开始发生变形,混凝土弹模经历随混凝土龄期增大而增高的历程,此拉

应力远在混凝土安全范围之内。边墙上还出现了119  $\mu\epsilon$ 的压应变,值也不大,更是边墙安全的象征。

3 结论

为保证工程及建筑物的安全,对控制爆破的爆破影响采用质点振动速度测定、用声波测量及陆地声纳剖面测定爆破对岩体的破坏深度,并及时反馈指导设计与施工是成功的,波速-深度曲线判定爆破破坏深度直观,在施工方与监理、设计方发生争议时不会对资料产生不同的解释。

在为确定施工步骤和施工顺序和措施以及控制爆破参数的试验中,监测工作对顺利施工起到了很好的作用,在今后类似的工程中也是需要进行的。

为判断隧道的安全、可靠度,为判定对这种特殊设计采取的工程措施是否起到了预想的效果,采取了多种监测手段,除了物探手段外,还依靠了位移、应变、压力等测量。这反映,在工程施工及工程可靠度的监测及信息反馈中,从工程需要出发将会使用多个参数、多种手段的综合。物探工作者有必要熟悉其它测量方法,工程和市场需要是不存在专业界线的。

参考文献:

[1] TBJ204-86, 铁路隧道施工规范[S]. 1987.  
[2] TBJ3-85, 铁路隧道设计规范[S]. 1986.  
[3] 郑大榕. 控制爆破振动研究[A]. 中国土木工程学会隧道及地下工程学会第八届年会论文集—铁道工程学报专刊[C]. 1994: 175-179.  
[4] 李宁, 陈蕴生, 吕强, 等. 隧洞衬砌的爆破损伤模拟试验研究[A]. 面向21世纪的岩石力学与工程[C]. 北京: 中国科学技术出版社, 1996: 677-682.  
[5] 钟世航. 陆地声纳法及其应用效果[J]. 物探与化探, 1997, 21(3): 172-179.  
[6] 钟世航. 宁波大桥工程招宝山隧道—实现了两平行隧道极小净距的理想[A]. 中国土木工程学会1998年全国市政工程专业学术交流会论文集[C]. 天津: 天津大学出版社, 1998: 24-27.  
[7] 钟世航, 卢汝绥, 刘艳清. 大跨度极近距平行隧道的设计与施工[J]. 铁道工程学报, 1998(增刊): 268-272.  
[8] 钟世航. 开发物探技术为工程施工服务[A]. 中国地球物理学会年刊[C]. 西安: 西安地图出版社, 1998.  
[9] 钟世航. 并行隧道超小进净距施工技术[J]. 世界隧道, 2000(增刊): 323-327.  
[10] 杨家松. 隧道爆破振动因素分析及减振技术措施[J]. 世界隧道, 2000(增刊): 323-327.

震效应影响大 ,强夯施工遍数多 ,地震效应影响远 ,夯击能、夯击遍数均与震动影响程度呈正相关关系。

( 5 )强夯震动产生的地震波以低频面波对周边地物振动影响最大 ,地震波沿地表在传播距离上产生垂直向和水平向振动分量 ,其中水平振动速度最大 ,振动位移也最大 ,所以强夯产生的地震效应以水平向振动分量为最大。

( 6 )强夯振动监测应设计为系统监测 ,不能只监测个别点 ,不同的施工遍数均要监测 ,尤其是强夯的最后一击更应监测 ,利用其中最大振动速度值或振幅值进行震动影响评价。

( 7 )强夯振动监测的成果分析 ,应根据项目的具体要求 ,与建筑场地类型、周边地物抗震设防等级、回填料种类级配、场地土均匀性和强夯施工工艺等有关 ,并注意与其他强夯施工监测方法相结合 ,进行全面系统的评价。

参考文献 :

[ 1 ] 工程地质手册编委会. 工程地质手册[ S ]. 北京 :中国建筑出版社 ,1992.  
[ 2 ] 于亚伦 ,刘殿中. 爆破安全规程 GB6722 - 2003[ S ]. 北京 :中国标准出版社. 2003.

AN ANALYSIS OF TAMPER VIBRATION MONITORING APPLICATION

CHU Hong-xian<sup>1</sup> , SHI Hui-jie<sup>1 2</sup>

( 1. China University of Oceanography , Qingdao 266003 , China ; 2. Institute of Oceanographic Geology , MLR , Qingdao 266071 , China )

**Abstract :** Using the synchronous monitoring analysis of tamper vibration , we can obtain seismic intensity evaluation affected by tamper vibration , basic frequency and maximum velocity parameters. With a practical example of tamper vibration monitoring , this paper has analyzed the vibration monitoring result and the contents of practical application.

**Key words :** tamper vibration monitoring ; Rayleigh wave vibration velocity reduction curve of frequency distribution

作者简介 : 褚宏宪( 1973 - ) ,男 ,山东枣庄人 ,助理研究员 ,1996 年毕业于东北农业大学水利与建筑工程专业 ,2004 年获中国海洋大学环境工程专业工程硕士学位 ,主要从事岩土工程研究与工程物探研究 ,公开发表学术论文数篇。

上接 87 页

THE APPLICATION OF GEOPHYSICAL TECHNIQUE TO  
SUPERVISING CONTROLLED BLAST IN A TUNNEL

ZHONG Shi-Hang

( China Academy of Railway Sciences , Beijing 100081 , China )

**Abstract :** In the construction of Ningbo Bridge , Zhaobaoshan highway tunnels were designed as twin tunnels with large span and excessively small interval of 4 m , only 1/7-1/10 of ordinance in the norm. A series of measures should be adopted for the safety of tunnels. One of the crucial measures is the protection of the rock mass between the two tunnels , which includes the utilization of controlled blast to protect rock mass. The author used such techniques as sonic wave measurement , Landsonar method and vibration velocity measurement to measure the depth and condition of rock mass under blasting. In addition , the displacement , the strain and the pressure of the tunnels and the shotcreting or the lining were also measured to inspect the safety of the tunnels. With the help of the measuring data , the construction plan , construction procedures and blasting parameters were determined. The engineering is successful and the economic benefits are obvious.

**Key words :** tunnel ; supervision ; controlled blast ; geophysical technique ; mountain ; static correction ; stack

作者简介 : 钟世航( 1940 - ) ,男 ,研究员 ,1962 年毕业于北京地质学院地球物理勘探系 ,后在铁道部科学研究院从事工程与环境地球物理的研究和勘察及工程检测的实践 ,70 年代中又涉足隧道及地下工程的理论、设计、施工工艺和技术、施工地质及质量检测 and 文物保护及考古方面。2000 年 6 月后并到北方交通大学中国铁路工程总公司隧道及地下工程试验研究中心 ,并自成立钟世航工程数据库 ,公开发表学术论文数篇。