

新型复合锚固结构抗爆宏观效应与分析

曾宪明 李世民 林大路 杜宁波 徐孝华

(总参工程兵科研三所 洛阳 471023)

摘要:为研究新型复合锚固结构的抗爆性能,进行了岩石中该结构与单一锚固结构的抗爆效应现场对比试验。试验结果表明:新型复合锚固结构洞室的临界破坏荷载是单一锚固结构洞室的178%;就破坏程度而言,单一锚固结构洞室是新型复合锚固结构洞室的2.5倍;复合锚固结构存在优化设计问题,优化设计因素包括:空孔直径、空孔密度、空孔深度、锚固区深度。新型复合锚固类结构的弱化效应吸能非常显著,用于岩石介质洞室的抗爆加固是完全可行的,并具有显著的技术经济效果。

关键词:新型复合锚固结构 单一锚固结构 抗爆现场试验 宏观效应

1 概述

锚固类结构是指锚杆、锚索、土钉一类岩土工程加固支护结构^[1]。复合锚固类结构是指各单一锚固结构彼此或与其他传统工法及构造措施等联合使用的一类岩土工程加固支护结构^[2-3]。复合锚固类结构型式很多,如常用的“锚杆—土钉—超前锚管微桩”、“土钉—锚索—搅拌桩”复合结构等。锚固类结构和复合锚固类结构大量应用于隧道、矿井,及其他地下空间中。国外的相关研究中,以抗静载问题研究较多,在抗动载研究上,国外开展的多是单一锚固类结构抗爆性能研究,关于复合锚固类结构抗爆性能研究文献尚未见发表。美国、英国和南非在锚固类结构的抗爆性能研究方面做了大量的试验,取得了许多成果^[4-9]。同国外相似,我国开展锚固和复合锚固类结构抗静载问题的研究与应用效果较多,开展抗动载问题研究相对较少。在抗动载研究上,我国开展单一锚固类结构抗爆性能研究较多,而开展复合锚固类结构抗爆性能研究相对较少^[10-13]。

本文所述新型复合锚固类结构,就是在系统布置的锚杆里端部,按照一定的比例,人为地预留一定长度的空孔,填以特殊材料,使其系统地形成一个弱化区,见图1。这种复合锚固结构主要用于地下空间的加固支护上。

新型复合锚固类结构的提出,源于对一次试验异常现象的分析和验证,即由于施工中配制水灰比时的差异,导致两根注浆土钉在相同的动载条件下,二者承载力相差多倍。在此之前,国内外对这类新型复合锚固结构的研究未见报道。

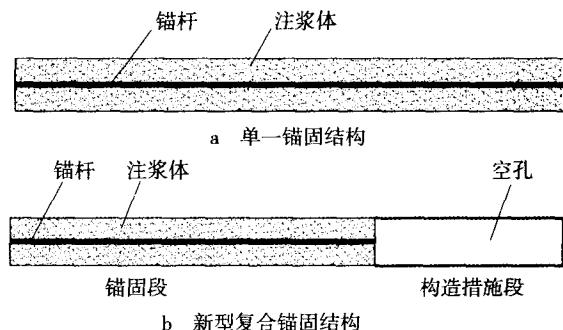


图1 单一锚固结构与新型复合锚固结构示意图

由此,笔者对这种新型复合锚固结构展开了土中抗爆效应现场试验研究和土中动力复制模型试验研究。在土体中,这种特殊复合锚固结构构成三介质系统,明显区别于传统的二介质系统或毛洞单介质系统,如图2所示。试验表明,在相同的条件下,单一锚固结构和复合锚固结构的抗动载压力,分别为黄土毛洞的3.7倍和17倍,相应的装药量分别为黄土毛洞的5倍和33倍^[14]。

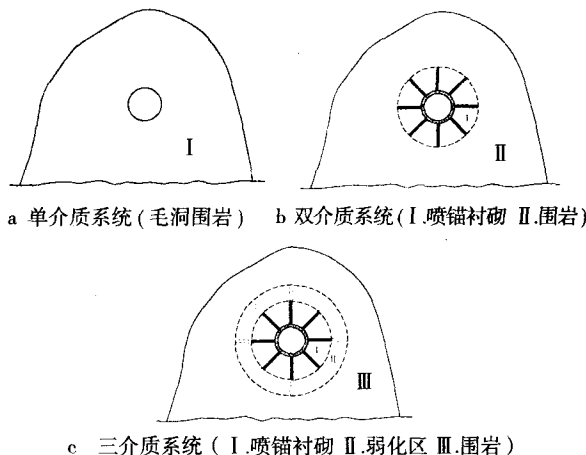


图2 单、双、三介质系统的概念

然而，岩石介质的力学性能不同于土介质。尚不清楚这种复合锚固结构应用于岩石洞室的抗爆性能。由此笔者进一步展开了岩石中的抗爆性能现场对比试验研究。以下主要介绍了两种不同结构型式显著相异的抗爆宏观效果（量测结果另文介绍）。

2 试验方法与条件

试验方法为：在试验现场开挖两个大小相同的方形石坑，在两个坑内浇筑水泥砂浆试件、安装量测探头，待试件充分养护完毕后进行TNT集团装药顶部爆炸试验。在石坑内打筑试件的主要目的是尽可能为试件四壁及底部提供与实际较接近的边界条件（透射边界条件）。

2.1 试验场地

试验场地位于洛阳市宜阳县境内一旧坑道内，石坑介质为石灰岩。两个试件相距约10m，第一个试件进行爆炸试验所产生的地冲击振动对第二个试件的影响甚微，可不予考虑。如图3所示。

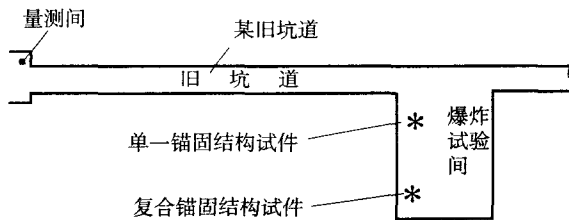


图3 试验场地示意图

2.2 试件与洞室设计参数

所设计的试件、洞室尺寸及材料参数见图4。试件纵向尺寸与宽度相等，即2500mm。

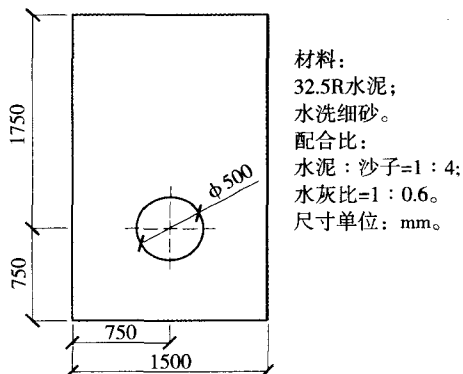


图4 试件及洞室立面图与设计参数

2.3 支护参数设计

支护参数设计考虑了实际工程的一般情况，两类锚固结构的支护设计参数见图5。新型锚固结构除有弱化区外，其他支护参数与单一锚固结构是完全相同的。

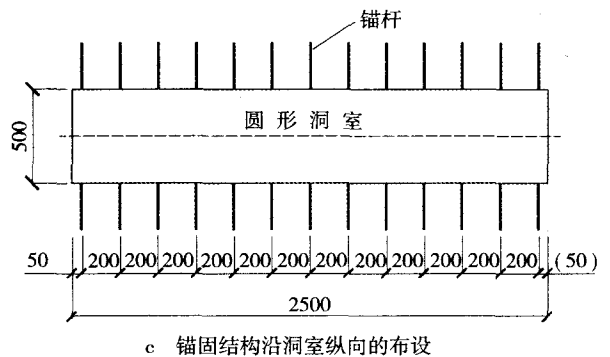
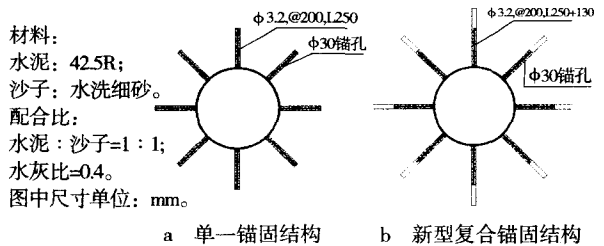


图5 两类锚固结构的实际支护参数

2.4 试件制作

2.4.1 复合锚固结构“构造措施”段的制作

复合锚固结构的制作示意图见图6。

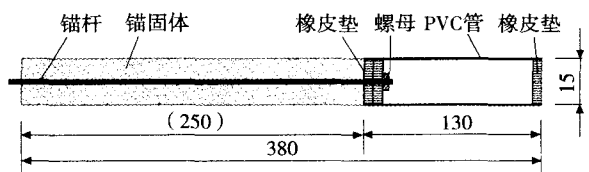


图6 复合锚固结构的制作示意图（单位：mm）

2.4.2 地下洞室衬套的制作

地下洞室衬套采用厚度为1mm的白铁皮卷成外径为500mm，长度为2500mm的衬套，内撑支架被安设在衬套内以限制整个衬套的变形，见图7。

2.4.3 锚固体与衬套的联结

用厚度为2mm的钢板制作长×宽×厚=2500mm×20mm×2mm的钢条，在钢条中线上钻孔，其孔心位置对应于锚杆沿洞室纵向布置的位置，如图8所示。每个试件安装8个钢条。

锚固体与钢条的联结示意图见图9。锚固体与铁皮衬套联结安装示意图见图10，组装后的锚固体见图11。

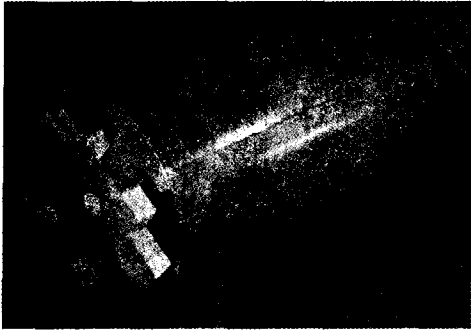


图7 安放内撑支架后的衬套

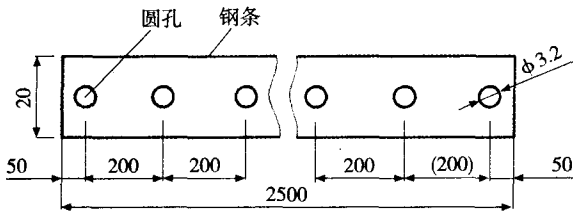


图8 钢条设计示意图 (单位: mm)

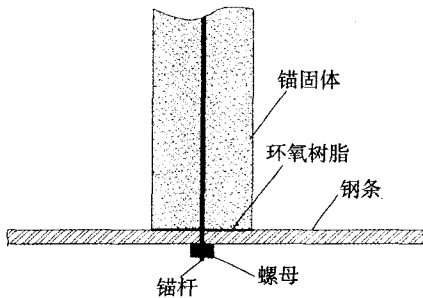


图9 锚固体固定于钢条示意图

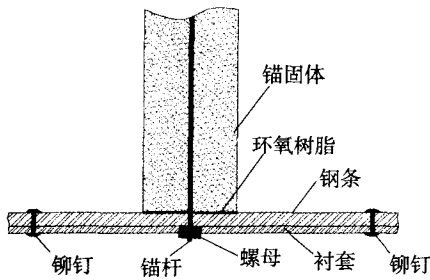


图10 锚固体与铁皮衬套联结示意图

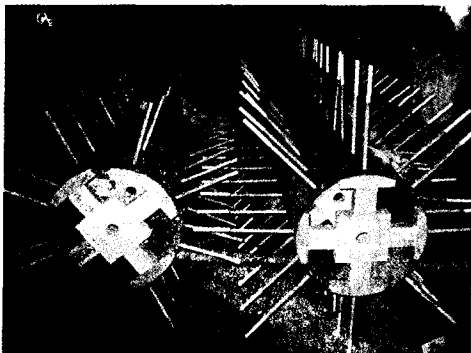


图11 锚固体与铁皮衬套的联结

2.4.4 石坑设计与开挖

开挖两个石坑, 其尺寸均为长×宽×高=2500×1500×2500mm。为便于作业人员施工, 在石坑的一端面再开挖一长×宽×高=800×800×2500mm的竖井, 并将竖井的边角采用砌体衬砌牢固, 见图12。

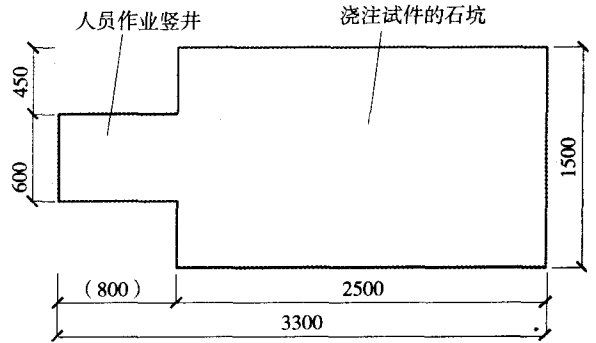


图12 石坑示意图 (单位: mm)

2.4.5 试件浇注

先将两个衬套按设计位置分别吊放在石坑内, 并用钢模板堵住工作竖井端。接着向坑内灌浆, 灌浆过程中注意沿坑壁四周均匀灌注, 以保证衬套位置不变, 并注意不损坏锚固体。浇注过程见图13。浇注完毕, 待水泥浆凝固3d后将钢模拆去, 养护试件至28d后, 将铁皮衬套和钢条拆除。

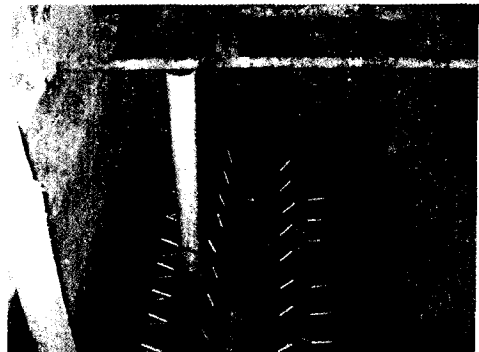


图13 水泥砂浆的浇注

2.5 爆炸加载条件

加载等级按照由低到高的原则进行, 直至将洞室完全炸塌并堵塞为止。水平方向爆心位置始终位于试件上表面的平面中心。每次爆炸严格保证爆心位置不变。试验过程中始终控制两个试件的加载条件一致。详细的加载等级及备注说明见表1。

表1 爆炸加载等级和条件

炮号	装药量 (g)	备注
1	100	在装药下垫三块砖
2	100	在装药下垫三块砖
3	200	在装药下垫三块砖
4	400	在装药下垫三块砖
5	400	在装药下垫三块砖
6	800	在装药下垫三块砖
7	800	在装药下垫三块砖
8	1200	在装药下垫三块砖
9	1600	装药直接接触试件表面
10	2000	装药放在试件表面炸出的爆坑内
11	2400	装药放在试件表面炸出的爆坑内
12	3000	装药放在爆坑底, 其上叠放4块预制的混凝土板
13	3600	装药放在爆坑底, 其上覆盖4块预制混凝土板和8个沙袋
14	4200	装药放在爆坑底, 在装药上覆盖4个沙袋
15	4800	装药放在爆坑底, 在装药上覆盖6个沙袋
16	5400	装药放在爆坑底, 在装药上覆盖8个沙袋
17	6000	装药放在爆坑底, 在装药上覆盖8个沙袋, 再覆盖60砵碎石
18	6600	装药放在爆坑底, 在装药上覆盖9个沙袋, 再覆盖60砵碎石
19	7200	装药放在爆坑底, 直接在装药上覆盖60砵碎石
20	实弹	炮弹放在爆坑底, 在炮弹上覆盖8个沙袋, 再覆盖60砵碎石

3 试验宏观破坏结果

3.1 试件爆坑深度观测结果

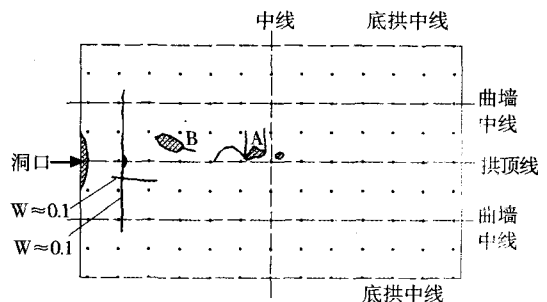
第6炮后, 试件表面开始出现爆坑。表2统计了两个试件的爆坑深度。

表2 两个试件的爆坑深度

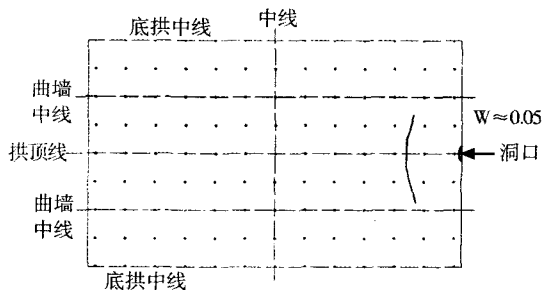
炮次	药量	爆坑深度/cm		
		A非弱化试件	B弱化试件	比值A/B
6	800	0.5	1.0	0.500
7	800	1.0	2.0	0.500
8	1200	2.5	3.5	0.714
9	1600	11	12	0.917
10	2000	22	19	1.158
11	2400	33	29	1.138
12	3000	42	38	1.105
13	3600	50	47	1.064
14	4200	62	59	1.051
15	4800	75	71	1.014
16	5400	83	79	1.051
17	6000	88	87	1.011
18	6600	103	98	1.051
19	7200	114	118	0.966
20	实弹	120	122	0.984

3.2 洞室破坏情况观测结果

第14炮后, 两个试件洞壁开始出现裂缝, 剥落, 崩塌等破坏; 第17炮后, 试件内表面全部被炸坏, 爆坑已扩展至试件全部地表面; 第18炮后, 单一锚固结构洞室完全破坏。如图14-图16所示。

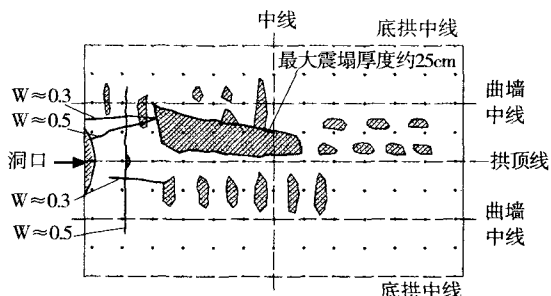


图例: · 锚杆 阴影区 洞壁破碎区 — 裂缝 W: 裂缝宽度
a 单一锚固试件洞壁破坏展开图

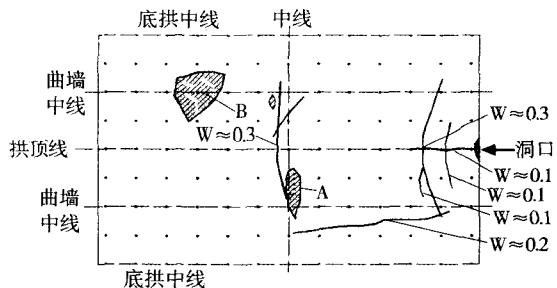


图例: · 锚杆 阴影区 洞壁破碎区 — 裂缝 W: 裂缝宽度
b 新型复合锚固试件洞壁的破坏展开图

图14 第14炮后, 试件洞壁破坏展开图



图例: · 锚杆 阴影区 洞壁破碎区 — 裂缝 W: 裂缝宽度
a 单一锚固试件洞壁破坏展开图



图例: · 锚杆 阴影区 洞壁破碎区 — 裂缝 W: 裂缝宽度
b 新型复合锚固试件洞壁表面破坏展开图

图15 第17炮后, 试件洞壁的破坏展开图



a 单一锚固试件洞壁的破坏:震塌并堵塞



b 新型复合锚固试件洞壁的破坏:局部小块震落

图16 第18炮后,试件洞壁的破坏景象

3.3 洞室内落石高度的观测结果

表3统计了爆心下方两类试件洞室内的落石堆积高度。

表3 爆心下方两类试件洞室内的落石堆积高度

炮次	药量	落石堆积高度/cm		
		A非弱化试件	B弱化试件	比值A/B
15	4800	5	0	∞
16	5400	9	0	∞
17	6000	15	6	2.5
18	6600	30	9	3.3
19	7200	45 (基本堵塞洞室)	27	1.7
20	实弹	基本堵塞洞室	40	1

4 试验宏观观测结果分析

4.1 试件爆坑分析

①随着装药量的增加,弹坑的形成有一个过程,最初是无破坏,接着是表面浆皮脱落,然后出现微小弹坑并逐步增大,与此同时,弹坑附近出现放射状裂纹和裂缝。弹坑最初近似于圆形,此后逐步演变成近似矩形。这是边界条件和装药条件所引起。

a、边界条件:岩坑边线有一堵厚度约为40cm的旧坑道房间间隔墙(衬体)。在药量较小时,边墙反射作用不明显,装药量较大时,墙反

射空气冲击波超压增大,在一定程度上抑制了附近地表的破坏,造成破坏不甚对称。b、装药条件:集团装药块由标准重量为200g的TNT单块组合捆绑而成,一律为矩形立方体。装药量较小时,弹坑形状不明显,装药量较大时,弹坑形状可能会受装药形状影响。由于两个试件的边界条件和装药条件完全相同,因而不会对试验结果带来差异性影响。

②新型复合锚固与单一锚固试件弹坑深度比较见表2。在装药量较小(800g~1200g),单一锚固与新型复合锚固试件弹坑深度的比值在0.5~0.7之间;随着装药量增加(1600g~7200g),这一比值大多数在1.0附近。这说明两类试件就上表面弹坑而言可认为无明显差异;两类试件的加载条件甚为一致,因而此对比试验可靠度较高;而药量较小时的弹坑差异主要源于量测误差,因为弹坑尺寸越小,量测误差越大。

4.2 洞室内表面破坏效应分析

两类试件洞壁破坏见图14~图16。洞室内表面的破坏具有以下特点:

①单一锚固结构洞室内表面的临界破坏始于第14炮,新型复合锚固结构洞室内表面的临界破坏始于第17炮。而在第13炮时两类试件的立面(洞脸)已有竖向裂缝出现,说明洞室内表面的破坏迟于洞脸部位。

②两类试件洞室内表面的破坏方式均为开裂和震塌,破坏区域主要是爆心投影点下方的拱顶及其与洞口之间。

③两类试件破坏规律是,随着爆炸威力加大,裂缝增长、增宽、增多,落石增多、增大并连成一片,形成震塌区。震塌机理主要为爆炸应力波进入拱顶自由面时,形成反射拉伸波使衬砌介质及模拟岩体介质砂浆体受拉造成的。爆炸后结构的往复振动(机械振动效应)也会产生往复拉压的交变应力,导致纵、环向裂缝产生。

④两类洞室内表面的破坏差异显著。第14炮(装药量4.2kg)后,单一锚固结构靠近洞口的洞壁产生了0.1cm的纵、环向裂缝,见图14a,并造成了爆心投影点下方洞壁小规模震塌,最大震塌深度约为1cm,一处离爆心投影点较远的部位,

震塌深度最大为3cm；而相应的新型复合锚固结构洞室丝毫没有震塌破坏发生，仅在靠近洞口的洞壁发现0.05cm的裂缝，见图14b。第15、16炮后造成单一锚固结构洞室产生较大规模震塌时，相应的新型复合锚固结构洞室爆心下方拱顶依然无震塌发生。当第17炮（装药量6kg）后，单一锚固结构洞室出现更大规模震塌破坏（范围为曲墙中线以上50%区域，最大深度约为25cm）时，洞壁环向裂缝宽度已达到0.5cm、纵向裂缝宽度达到0.3cm，见图15a；此时新型复合锚固结构洞室爆心投影点附近才开始出现零星落石，震塌深度最大为2cm，一处离爆心投影点较远的曲墙部位，震塌深度最大为10cm，洞壁环向最大裂缝宽度达到0.3cm、纵向裂缝宽度达到0.2cm，见图15b。第18炮（装药量6.6kg）后，单一锚固结构洞室完全破坏；新型复合锚固结构爆心投影点下方洞壁出现小规模震塌，见图16。第19炮（装药量7.2kg）后，新型复合锚固结构完全破坏。

上述结果表明，单一锚固结构洞室在第14炮后出现震塌破坏；新型复合锚固结构洞室第17炮后出现轻微震塌破坏，新型复合锚固结构临界破坏装药量为单一锚固结构的37000g/20800g=178%。相同装药量下，单一锚固结构洞室表面裂缝宽度是新型复合锚固结构的1.5-2倍；第17炮后，爆心投影点下方震塌深度，前者是后者的2.5倍。复合锚固结构试件的构造措施段具有异乎寻常的吸收爆炸能作用。这种吸能是以弱化区首先产生变形和破坏换得的。

⑤本次试验试件是比照一般工程经验设计的，并不是优化设计，如果是优化设计，构造措施段区域介质的破坏过程应是：A变形→B大变形→C孔壁破裂→D孔壁破碎→E压实→F传力至锚固区结构，如此将获得更大的技术经济效果。估计此次试验，构造措施段区域介质只经历了A、B、C三个阶段。由此推断优化设计应考虑4个因素而不是3个，即：i空孔直径；ii空孔密度；iii空孔深度；iv锚固区深度。只有锚固区有足够的强度、刚度和稳定性，弱化区破坏过程的各个阶段才有完整显现的前提条件和基础。

4.3 坑道立面（洞脸）破坏效应分析

从第13炮开始，坑道立面进入破坏状态，并

随着爆炸威力增大而加剧，破坏形式为开裂和崩塌。相同爆炸条件下，单一锚固试件坑道立面破坏程度明显严重一些。第16炮后，单一锚固试件立面上部跨掉了坑道拱顶以上覆盖厚度的1/4左右，而此时新型复合锚固试件仍能保持整体稳定而不垮塌。这是一个非常重要的事实。这与爆炸应力波强度在弱化区有一定的衰减有关。立面对坑道而言是唯一一个自由面，在爆炸荷载作用下，立面是较薄弱部位，极易产生崩塌和开裂破坏，只是严重程度不同而已。因此，立面破坏应是地下工程防护的重点部位之一。

4.4 洞内落石高度的分析

两个试件洞内落石高度观测结果见表3。落石高度的量测方法对于两个洞室完全相同，即每次量测的震塌下落的块石高度都是累积高度。由表3可见，单一锚固结构试件与新型复合锚固结构试件落石高度的比值范围在1.7~∞之间，而有效数据在1.7~3.3范围内，平均值为2.5。这个值也是很有意义的，它表明，就破坏程度而言，单一锚固结构洞室比新型复合锚固结构洞室的平均要高2.5倍。

5 结论

①两类试件爆坑深度和大小基本一致，表明试验过程中两个试件的加载条件是一致的，因而试验结果较为可靠。

②在由低到高的累次加载作用下，单一锚固结构洞室在第14炮后出现临界震塌破坏、第18炮后产生完全震塌堵塞破坏；新型复合锚固结构洞室第17炮后只出现轻微震塌破坏（不及临界破坏）、第19炮后完全破坏，新型复合锚固结构临界破坏荷载为单一锚固结构的178%。这表明，新型复合锚固结构洞室的临界破坏荷载和极限破坏荷载显著高于单一锚固结构洞室。

③洞内落石高度表明，在累次爆炸加载作用下，就破坏程度而言，单一锚固结构洞室是新型复合锚固结构洞室的2.5倍。

④新型复合锚固结构具有优异的抗爆性能，其作用机理主要是弱化区的变形和破坏吸收了大量爆炸能。较之单一锚固结构，新型复合锚固结构用于岩石类介质洞室的抗爆加固是完全可行的。

⑤复合锚固结构存在优化设计问题，优化设计因素包括：空孔直径、空孔密度、空孔深度、

（下转第40页）

来自清华学子的感谢信

“‘欧维姆奖学金’的设立，反映了贵公司对当代大学生的关心和关爱，是对我们的学习、科研、工作以及生活的鼓励和支持，展示了贵公司良好的社会责任感。”

“您们对大学生教育的无私奉献一定会盛开美丽的花朵！”

“在今后的学习和工作中，我会继续坚持刻苦钻研，对自己严格要求，争取精益求精，牢记‘自强不息，厚德载物’的校训，以期取得更好的成绩，回报贵公司的关心和支持，并为祖国的建设事业作出自己的贡献。”

……

薄薄的信笺上，挥洒着厚厚的情感。这些饱含深情的话语，摘自1月15日收到的来自清华大学土木工程系的学子们寄给欧维姆公司的感谢信。14封感谢信，出自获得2009年度欧维姆奖学金的14位清华学子之手。在感谢信中，学子们分别介绍了各自在去年一年中学习、生活的情况，汇报了各自在科研工作方面取得的成绩和进展。他们把获得欧维姆奖学金作为一个莫大的荣誉的鼓励。他们对欧维姆公司对教育事业的热忱支持

和无私奉献表示衷心的感谢和赞赏，并纷纷表示，不辜负欧维姆公司的期望，继续勤奋学习，刻苦钻研，努力工作，争取为祖国多做贡献。

“欧维姆奖学金”是欧维姆公司和詹天佑土木工程基金会欧维姆预应力技术发展专项基金为保持我国预应力技术的可持续发展而设立，用以奖励土木工程及交通科学专业品学兼优的学生，以鼓励其刻苦学习，积极开拓，早日成才。目前设有“欧维姆奖学金”的大学有东南大学、清华大学和哈尔滨工业大学。迄今为止，东南大学已颁发8届，哈尔滨工业大学已颁发7届，清华大学已颁发4届，有两百多名优秀学生获得了奖励。

“欧维姆奖学金”的设立，是欧维姆公司对社会的回报，对教育事业的支持，对我国工程技术可持续发展的贡献。正如一位学子在感谢信中所写：“欧维姆奖学金对一个学生来说，除了直接的经济上的补助之外，更重要的是它对一个学生的人生观、世界观的影响……真正形成这样一个体系，一个良性循环，对于个人，乃至整个社会和国家，都是裨益无穷的。”

(编辑部)

(上接第35页)

锚固区深度，对此还应深入研究。

⑥在优化设计条件下，构造措施段区域介质的破坏过程应是：A变形→B大变形→C孔壁破裂→D孔壁破碎→E碎石压实→F大部分爆炸波能量传至锚固区，如此将获得更大的技术经济效果。

参考文献

- [1] 曾宪明, 陈肇元等. 锚固类结构安全性与耐久性问题探讨[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(13):2235-2242
- [2] 汪剑辉, 闫顺等. 复合土钉支护在我国的研究与应用[J]. 施工技术, 2006, 35(1):15-19
- [3] 美国交通部联邦部局(FHWA-SA-96-069R), 余诗刚译, 土钉墙设计施工与监测手册[C], 北京: 中国科学技术出版社, 2005
- [4] Otuonye FO. Response of grouted roof bolts to blasting loading[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts. 1988, 25(5):345-349.
- [5] Otuonye FO. Influence of shock waves on the response of full contact rock bolts[A]. In: Proceedings of 9th Symposium on Explosives and Blasting Research[C]. San Diego, California, 1993:261-270.
- [6] Holland DC. The influence of close proximity blasting on the performance of resin bonded rock bolts[D]. Master of Science thesis, University of Aberdeen, U.K. 1989.
- [7] Rogder AA, Holland D C, et al. The behaviour of resin bonded rock bolts and other anchorages subjected to close proximity blasting[A]. In: Proceeding of 8th International Congress on Rock Mechanics[C]. Tokyo, 1995:665-670.
- [8] 沈德义, 刘五一. 介绍国外几种可用于动载条件的锚杆[R]. 89002部队资料室内部报告. 1984:9-11
- [9] Ortlepp WD, Stacey TR. Performance of tunnel support under large deformation static and dynamic loading[J]. Tunneling and Underground Space Technology, 1998, 13(1):15-21.
- [10] 曹国庆. 喷锚支护抗爆性能与设计[J]. 防护工程, 1979, 1(2):34-51.
- [11] 曾宪明, 肖峰, 等. 黄土坑道喷锚网支护的抗爆性能(I, 破坏形态)[J]. 防护工程, 1990, 12(3):20-27.
- [12] 肖峰, 曾宪明. 黄土坑道喷锚网支护的抗爆性能-II, 围压分布形态[J]. 防护工程, 1991, 13(4):37-45.
- [13] 朱如玉, 王承树. 某观察坑道在爆炸荷载作用下的破坏情况的宏观调查分析[J]. 爆炸与冲击, 1982, 2(2):17-26.
- [14] 曾宪明, 杜云鹤, 李世民. 土钉支护抗动载原型与模型对比试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(11):1892-1897