

锚固和复合锚固类结构抗动静性能研究概述

曾宪明 李世民 赵健 林大路 杜宁波

(总参工程兵科研三所 洛阳 471023)

摘要:锚固类结构是指注浆锚杆、锚索、土钉及加筋土一类岩土工程加固支护结构。复合锚固类结构是指各单一锚固类结构彼此或与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。业已证明和证实,锚固与复合锚固类结构具有优异的抗动静载性能,其中有的结构型式已有大量成功应用。但是,锚固和复合锚固类结构抗静载问题研究与应用较多,对抗动载问题研究与应用相对较少。这一状况国内外大体相近。有些锚固和复合锚固结构型式,如国外的吸能锚固和屈服锚固结构,我国的新型复合锚固结构,均有各自特色,特别是都具有极大的抗动载潜能和效费比。将其用于抗静载也是可探讨的。尽管对这些结构所做试验是初步的,都只完成了效应试验,尚未做深入机理研究,但发展前景看好,值得人们关注、借鉴并进一步探讨。

关键词:锚固类结构 复合锚固类结构 抗动静载 研究 概述

1 引言

锚固类结构是指注浆锚杆、锚索、土钉和加筋土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类结构彼此或与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。在抗静载作用方面,锚固和复合锚固类结构不仅在一般岩土工程而且特别是在新奥法不推荐使用软土、流砂、厚杂填土等一类复杂地质体工程中已有大量成功应用,其对人类工程建设的贡献和所产生的社会、经济和军事效益公认是无法估计的。而在抗动载作用方面,这类结构同样具有优异性能。

本文综合论述了锚固和复合锚固类结构抗动静性能研究的国内外进展。限于篇幅,对抗静载问题只作了概括论述,重点主要在抗动载问题上。对特别值得人们关注与借鉴之处,笔者作了较细评述。

2 国内研究现状

我国开展锚固和复合锚固类结构抗静载研究与应用较多,而开展抗动载问题研究较少。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。锚固和复合锚固类结构抗动载研究主

要是从现场试验研究、数值计算和设计理论探讨三方面展开。

2.1 试验研究

试验研究结果一般可靠性较好,置信度较高,比较接近实际情况,是研究该问题的主要方法。

文[2](1979)根据喷锚支护岩石坑道抗顶爆试验,分析指出:锚杆受力特征是先受压缩作用,后受拉伸作用,且拉应力峰值要高于压应力峰值;喷层抗爆作用主要在于防止不稳定岩石崩落和阻止稳定围岩在强大爆炸冲击荷载作用下发生剥离破坏;锚杆抗爆作用主要在于改善坑道受力状态、减轻和限制围岩剥落以及悬吊大块险石。

文[3](1981)采用喷锚网支护作为我国第一条内爆试验巷道永久性支护方案。该试验巷道用于模拟矿井下爆炸及研究相应防爆措施。文[4](1987)报道这条巷道在370余次炸药、煤尘、瓦斯等爆炸试验中均完好无损。

文[5](1986)对砂砾地层中直墙拱顶形坑道喷锚支护在顶爆和侧爆条件下抗爆性能进行了比较试验。结果发现:①同等条件下,侧爆破坏作用要明显大于顶爆;②爆心距坑道较近时,喷锚

支护不仅会出现严重破坏,而且爆炸产生的一氧化碳气体还会沿裂缝进入坑道内,引起坑道内人员中毒;③顶爆时,喷层主要是环向受压,内力分布较对称,而侧爆时,喷层主要是承受弯矩作用,内力分布明显不对称;④侧爆时,坑道断面位形变化是平移、变形、扭转三者复合,顶爆时,坑道断面位形变化仅限于形状改变;⑤在冲击振动方面,侧爆和顶爆相比,坑道底板振动加速度较大,且频率较低,因此,侧爆对坑道内人员和设备威胁更大。

文[6, 7, 8] (1990, 1991, 1992)进行了黄土坑道喷锚网支护抗爆性能试验研究。

文[6]根据试验结果,分别论述了在顶部平面装药和集团装药爆炸作用下,喷锚网支护和无支护黄土坑道破坏形态。结论包括:①在地面空气冲击波作用下,黄土坑道破坏发生在两侧边墙中部,支护参数设计须在此部位给予加强,坑道断面形状宜选用曲墙型;②地面空气冲击波作用下黄土坑道喷锚网支护受力破坏这一动力问题,工程上可作为拟静力问题考虑;③集团装药爆炸作用下,黄土坑道破坏主要发生在爆心投影点下坑道拱顶附近,支护参数设计须在此部位给予加强。

文[7]介绍了上述两种加载条件下,喷射混凝土、喷网、喷锚支护和无支护黄土坑道围土动压分布形态,对其与破坏形态的关系以及试验中发现的爆炸压密效应、嵌固层效应等作了讨论;比较了两种加载条件下,坑道支护不同受力变形特点,并与有限元计算结果进行了比较分析。

文[8]在对黄土坑道临界破坏进行约定基础上,用逼近法求得了毛洞、素喷混凝土支护坑道、喷网支护坑道和喷锚支护坑道临界承载力。

文[9] (1996)分析指出回采巷道基本特征是:围岩松软、成层性显著、受爆破震动和开采动载反复作用,并提出了回采巷道锚杆支护抗爆设计若干基本原则。

文[10]对某巷道内爆破对树脂锚杆影响进行了现场观测。研究指出:①爆破振动会导致树脂锚杆卸载,甚至会使其完全丧失支护能力;②锚

杆预应力不同,锚杆卸载后终值也不同;③受爆破影响的树脂锚杆须进行重复张拉,方能保证其设计预应力。

文[11] (2004)介绍了屈服锚杆原理及制作和安装方法,并报道了某次试验中对其抗爆性能的验证。试验坑道为圆形断面,围岩采用屈服锚杆与喷网联合支护。根据爆后实测结果,屈服锚杆所受压应力和拉应力均很大,超过了材料屈服应力,接近材料极限抗拉强度,说明屈服锚杆在爆炸荷载作用下,能较充分地发挥加固围岩作用。美国和南非也分别独立地对屈服锚杆进行了研究,后者显示其性能特别优异。

文[12] (1996)对李家峡水电工程边坡锚固结构(1000kN级预应力锚索和600kN级预应力高强锚杆)对近区爆炸响应进行了现场测试。分析认为:①在李家峡爆破安全准则条件下,距预裂面3m以外岩体动力响应不会对锚固结构产生很大影响;②爆破的主要影响来自预裂爆破和主炮爆破,其设计合理性是降低对锚固结构影响的关键;③锚固结构预应力有利于限制外锚头松动和减小锚固结构横向振动。

文[13, 14] (1996, 2000)根据李家峡水电工程高边坡施工中现场试验,研究了爆炸对锚固结构的影响,得出结论:①开挖爆破时,由于药量大、距离近,将产生较大冲击荷载,介质及层面反、折射作用等都会对边坡上已建或正在施工的锚固结构带来较大不利影响;②600kN预应力高强锚杆实测最大轴向加速度为2.8g,垂直向为1.75g,实测锚索最大轴向加速度为1.50g,垂直向为0.35g,相应轴向振速为5.12cm/s;③采用动静力分析法在计入爆破对预应力锚杆(索)不利影响条件下,李家峡左肩典型滑面 $f_{24}-\nabla 2080$, $f_{20}-\nabla 2080$ 是最危险滑面之一,在单响药量为100~300kg时,该滑面安全系数将下降约4.4%~6.8%。

文[15] (1998)报道,1989年底,在漫湾水电站左岸边坡预应力锚索加固工程中,进行了国内首次大吨位预应力锚索对边坡开挖爆破适应性现场观测试验。结果显示:预应力锚索对爆破动

载有较好适应性,在一定条件下对锚固性能影响不大;只要选择合理装药量,且锚索施工质量可靠,可以保证锚索锚固性能。

文[16](2003)对紫坪铺高陡边坡施工开挖期间爆破对预应力锚索影响进行了测试研究,通过对多点位移计测得位移-时间曲线进行分析,得到了边坡下部岩石开挖爆破振动效应与边坡上部预应力锚索拉固作用之间关系,为进一步优化进水口高陡边坡预应力锚索设计提供了试验依据。

文[17](2004)分析指出:爆破是锚索预应力损失重要因素之一,当在距锚索3m以内进行爆破时,锚索预应力有明显损失,其量值比锚索在相应时间受静载作用所发生的大36倍左右,但在距离为5m以远,普通爆破影响不甚显著;爆破冲击作用还会使锚固段锚固力发生变化,尤其对破碎松散岩体会产生较大影响。

文[2~17]研究的均是单一锚固类结构。

文[18](1982)对某次坑道抗爆试验中预应力锚索加固效果进行了调查分析。根据调查,处在断层破坏带与节理纵横交错地段、岩石完整性差的大锚杆段(锚索-锚杆-喷网联合支护)未遭到破坏,而与其相邻的毛洞段和离壁被复段却遭到严重破坏。大锚杆段中除4根锚索遭到破坏外,其余均未破坏。在遭到破坏的锚索中,有2根位于坑道两侧拱脚处,钢绞线断口均呈颈缩状,是被塌落结构体所拉断,整块落石特征尺寸分别约为 $5.0\text{m} \times 3.9\text{m} \times 1.9\text{m}$ 和 $3.0\text{m} \times 2.0\text{m} \times 1.9\text{m}$;另两根锚索,一根是锚头,另一根是锚头和不长的一段锚索固定于断层下盘,其它部分则固定在断层上盘。

文[19](1987)也介绍了文[3]所述某次预应力锚索加固洞室抗爆试验研究。对试验结果分析表明:采用锚索-锚杆-喷网联合支护形式,对于改善坑道受力状态、减少最小防护层厚度、缩减相邻洞库间安全距离等具有较高实用价值。

文[20](2003)进行了单一锚固类结构与新型复合锚固类结构(锚杆-构造措施)黄土洞室在TNT集团装药顶爆下的原型与模型对比试验。

研究指出,在相对平面度 $\xi=0.6$ 条件下:①毛洞具有较低抗动载能力;②复合锚固类结构抗动载能力,分别为单一锚固类结构和毛洞的4.6倍和16.9倍,相应的临界加载装药量为单一锚固类结构和毛洞的6.6倍和33倍;③复合锚固类结构具有更好的抗动载性能;④复合锚固类结构优异的抗爆性能源于介质弱化机理;⑤弱化效应与弱化比面积及介质特性有关,因而存在抗爆效应优化问题;⑥研究建立的相似模型相似法则 $\pi_1=l^3/l^3$ (式中: π_1 为主 π 数; l 为模型长度; l 为装药长度),经试验验证是正确的,可据此进行类似试验设计;⑦黄土毛洞在 $\xi=0.6$ 条件下的临界承载能力,比 $\xi=1.0$ 条件下的低42%~56%。

文[18~20]研究的均是复合锚固类结构。其中文[20]是仅见的新型复合锚固类结构抗爆性能对比试验研究。

2.2 数值计算

数值计算是试验研究重要辅助手段,可以给出具试验难以获得的某些信息,有助于了解问题实质。但由于锚固和复合锚固类结构抗爆问题数值计算较为复杂,迄今为止,我国在这方面所做工作尚不多。

文[21](1984)进行了土中喷锚支护洞室在侧爆条件下非线性动态有限元分析。计算模型简化为平面应变状态。锚杆材料模型取为几何非线性杆单元,喷射混凝土和洞室近区土体材料模型取为Drucker-Prager模型,洞室远区材料模型取为线弹性。荷载取为三角形荷载。研究获得了洞室周边位移、喷层应力、塑性区范围、围岩应力及锚杆受力状况计算结果,并与试验结果进行了比较,两者在规律上较为一致。

文[22](2004)运用基于三维快速拉格朗日有限差分原理数值计算软件,分析了预应力锚索对洞室抗爆加固机理。计算完整地模拟了炸药起爆、爆炸应力波传播、应力波与结构体相互作用,以及应力波对结构破坏效应全过程。计算利用程序提供的锚索单元专门模拟锚索作用,而不是将锚索预应力作为集中力施加在加固面上,较为准确地模拟了锚索与被加固介质的共同工作,

比较符合试验实际情况。计算结果与试验结果在规律性上较为一致。

文[23] (2006) 采用Ansys软件对锚杆支护隧道围岩在爆炸荷载作用下应力波传播过程进行了数值模拟。爆炸荷载采用国际上常用计算模式。计算表明: 有支护隧道围岩在爆炸荷载作用下振速随距离变化具有明显衰减特征 (这一特征与静载下剪应力衰减特征相近, 值得关注), 锚杆应力分布并不是对称的, 故设计时不一定选用对称布置方式。

文[24] (2006) 对无支护及有支护隧道围岩在爆炸荷载作用下应力波传播特性进行了有限元数值模拟。分析表明: 在近距离爆炸波传播中, 计算结果具有很好规律性; 锚杆对应力波传播衰减作用明显, 其关系可用指数函数来拟合 (需要指出, 这一规律与静力条件下是相近的一笔者注); 爆炸荷载作用下围岩周边各点振速并不相同, 且相差较大, 建议在设计支护系统时, 可采用不对称支护系统。

文[21~24]研究的均是单一锚固类结构。

文[25] (1988) 对软弱围岩隧道中①无支护、②薄层混凝土支护、③薄层混凝土-径向锚杆支护、④薄层混凝土-径向锚杆-超前锚杆支护、⑤厚层喷射混凝土-径向锚杆-超前锚杆支护五种形式, 在爆破激振力作用下位移场和应力场进行了有限元分析。分析结论对软弱围岩隧道安全施工具有较重要意义。文[25]中第1和第4、5种支护型式分别为单一和复合锚固类结构。

2.3 设计理论探讨

锚固和复合锚固类结构抗爆问题理论分析较为复杂, 涉及到爆炸力学、应力波理论、岩石动力学、强度理论、结构动力学等多方面专业知识。迄今为止, 我国在这方面所做工作尚少。

文[26] (1989) 在诸多试验基础上, 根据坑道锚喷支护受力破坏特点, 将其从受力机制上划分为五种类型, 即“结构力学型”破坏、受压破坏、剪切破坏、拉伸剥离破坏和横向断裂破坏。并指出爆炸荷载有其动态效应和准静态效应。准静态效应下, 坑道支护破坏形态与静态下的相

仿, 而拉伸剥离破坏和横向断裂破坏是动态效应特有破坏型式。

文[27] (1993) 根据试验实测资料, 分析了顶爆下围岩与坑道锚喷支护相互作用若干特点。指出锚杆一端固定在围岩深部, 通过砂浆与喷层表面垫板, 有效约束了锚杆长度范围内围岩变形, 承担了围岩中较大份额荷载, 锚杆应变波形比围岩应变波形饱满得多, 亦即在动载作用全过程中, 锚杆发挥了很好支护作用。

文[28, 29] (2005, 2006) 运用应力波理论和波函数展开法, 研究了爆炸应力波与锚杆相互作用, 给出了爆破振动作用下锚杆周围砂浆体中动应力和峰值振速分布特性, 比较了不同频率应力波对锚杆的影响, 导出了不同频率应力波作用下砂浆锚杆安全质点振速范围。结果表明: 入射频率越高, 砂浆锚杆所允许安全质点振速范围越大。

文[30, 31] (2004, 2006) 在文[11]试验研究基础上, 对土钉支护瞬态应力和应变累计效应进行了研究。文[28]以粘弹性理论为基础, 推导了Maxwell模型下洞室拱顶土钉应力解, 通过与试验数据对比分析得到了洞顶土钉在爆炸应力波作用下瞬态应力公式, 并从相应应力角度检验了结果正确性。文[29]考察对比了毛洞试验段、单一锚固试验段以及复合锚固试验段瞬态应变与爆炸当量关系, 及三者瞬态应变与加载次数关系。指出药量、加载次数和不同支护参数是影响瞬态应变的重要因素, 复合锚固结构具有更好降低动应变变量值、提高工程抗力能力。文[31]还提出了累次应变综合值概念。

上述文献[26~29]和[30, 31]分别研究的是单一和复合锚固类结构。

2.4 抗静载问题研究与应用

锚固和复合锚固类结构在岩土工程中应用十分广泛。我国在60年代 (1951~1960) 末引进先进新奥法后, 在隧道中大量采用喷锚临时支护加二次永久混凝土衬砌, 按照定义, 就是一种复合锚固类结构型式。尤其是近15年来, 我国在铁道工程、交通工程、采矿工程, 尤其是城建工程

中,将锚杆、锚索、土钉与地下连续墙、深层搅拌桩、人工挖孔桩、钢板(管)桩、超前微型桩、挡土墙、加筋土墙等复合起来,提出了众多复合锚固类结构型式,并将其应用于隧道、边坡、基坑和地基加固支护中,取得了极大的社会、经济效益。在锚固类结构获得广泛应用同时,又开展了很多试验研究和理论分析工作,发表了大量论文,促进了锚固类结构的发展。

本文所述新型复合类结构在抗静作用方面尚未见应用。

2.5 小结

①我国对锚固和复合锚固类结构抗静载问题研究较多,对抗动载问题研究相对较少。

②我国对单一锚固类结构抗爆性能研究,明显多于复合锚固类结构。

③单一锚固类结构具有良好抗爆性能,复合锚固类结构则具有更加优异的抗爆性能。

④锚固技术加构造措施是一种特殊型式的复合锚固类结构,具有异乎寻常的抗动静载研究、开发与应用价值。

⑤我国对复合锚固类结构抗动静载性能研究总的来说还不甚深入、细致;试验研究和工程应用较多,理论研究还缺乏系统性和可靠性。

3 国外研究现状

同我国情况相似,国外对锚固和复合锚固类结构抗静载问题研究与应用较多,发表抗动载文献相比之下要少得多。在抗动载研究上,国外开展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,并且一般也不如此称谓。国外抗动载研究主要从现场试验、室内(模型)试验、数值计算三方面展开。

3.1 现场试验研究

国外对锚固类结构抗爆性能现场试验研究做得较多、较细。不过,均为单一锚固类结构型式。

文[32](1984)报道,南非曾在一金矿坑道中,对屈服锚杆和普通锚杆抗爆性能作过对比试验。屈服锚杆的屈服构件设在内锚头部位。试验以坑道一侧安装普通锚杆,另一侧安装屈服锚

杆,在其他条件完全相同情况下,装药爆炸后,采用普通锚杆支护坑道一侧全部塌落,而用屈服锚杆支护一侧则完好无损。这里重点研究的是屈服锚杆。

R.K. Thorpe^[33]等(美国,1985)对半球形密闭洞室内爆作用下锚杆动力响应进行了现场试验研究。试验测得压缩波到达时间与利用一维流体动力程序计算的应力波到达时间吻合。动力试验后的静力测试显示,锚杆预应力无损失,说明动力响应处于弹性阶段。试验结果为进一步建立用于分析部分注浆锚杆动力特性的数值模型提供了验证数据。这是一个典型的锚固类结构抗内爆问题研究。

B. Stillborg^[34](瑞典,1984)对锚索在坚硬岩体中抗爆加固效果进行了现场试验研究。结果表明,锚索在承受峰值质点速度为500mm/s的爆炸时,其性能并未降低。

F.O. Otuonye^[35, 36](美国,1988,1993)对矿井内全长树脂锚杆对爆炸荷载动力响应进行了现场试验。结果表明:①由外锚头附近杆体应变计测得的锚杆频响与外锚头上加速度计测得的数据相关性很好,说明应变计可以用于锚杆动力响应测量;②锚杆外锚头处的振动和应变值均高于内锚头处的相应值(这表明锚杆受力不均匀,且与静载下的分布规律相近—笔者注);③阻尼自然频率(125.2Hz)对锚杆动力作用是主要的,占86.5%,而阻尼频率(1755.0Hz)动力作用较小,只占12.9%;④爆炸振动波衰减可能是由于多次重复爆炸在岩体内形成裂隙及其扩展所致,另外,锚杆与岩体间注浆胶结体被破坏,也导致了爆炸振动波衰减,减少了通过注浆胶结体传递给锚杆的能量。

G.S. Littlejohn^[37, 38]等(英国,1987,1989)在Penmaenbach隧道施工期间对长度为6m、直径为25mm的树脂锚杆抗爆性能进行了现场测试。结果表明:即使锚杆在距隧道工作面距离为1m处,其锚固力也没有明显损失,树脂和锚杆之间粘结性能保持良好;施加预应力可降低爆炸震动对锚杆影响;锚杆自由段越长,锚杆受动荷载就

越大。Littlejohn等还建立了一个锚头处的PPV（峰值质点速度—笔者注）与所受峰值动载之间线性关系式。

D.C. Holland和A.A. Rodger等^[39, 40]（英国，1989，1995）对Penmaenbach隧道和Peny Clip隧道（均位于英国北威尔士）施工过程中安装的树脂锚杆抗爆性能进行了研究。Holland发现预应力增加将导致对锚杆振动加载作用的降低。在Penmaenbach隧道施工现场，Rodger等发现即使锚杆离爆破面距离仅有0.7m，预应力也未出现显著降低，树脂与锚杆也未分离。在Peny Clip隧道施工现场，Rodger等还研究了不同岩体质量对树脂锚杆抗爆加固作用的影响。两处试验场研究结果都表明锚头振动加速度响应谱主要取决于锚杆长度、自由段相对长度、预应力大小及围岩质量等。

D.D. Tannant^[41]等（加拿大，1995）对坑道中仅端锚的锚杆在爆炸荷载作用下动力响应进行了现场试验研究。现场试验包括两种情形，第一种是测量锚杆对邻近平行坑道内部爆炸的动力响应，第二种是测量锚杆对本坑道侧壁内部钻孔充填塞爆炸的动力响应。对于第一种情形，爆炸激励起了锚杆轴向和横向振动，坑道壁上PPV值约为1m/s，锚杆振动时间持续了30~40ms，大于坑道壁振动时间，锚杆最大应力低于其屈服应力，爆炸对坑道壁造成了轻微剥落破坏，降低了一定的锚杆预应力，但整体稳定性依然良好；对于第二种情形，横向振动是锚杆主要振动模式，持续时间为200ms，坑道壁上PPV值大于1m/s，锚杆峰值应力低于其屈服应力，爆炸使坑道壁外凸，并降低了锚杆预应力。

Gisle Stjern^[42]（挪威，1998）报道，为评估近距离爆炸对注浆锚杆影响，在挪威Grong矿场进行了现场试验研究，包括锚杆拉拔试验及对岩石和锚杆进行振动测量。将邻近爆炸点（3.4m）锚杆与安装在较远处（22.0m）锚杆作对比，发现拉拔强度没有下降。把近期灌浆锚杆与早期灌浆锚杆作对比，发现在爆炸荷载作用后两者拉拔强度没有区别。对早先拉拔过的锚杆再次进行拉

拔，结果显示出浆体存在“愈合”效应。试验表明爆炸后锚杆/砂浆性能没有下降。因此得出结论：充分注浆锚杆可以应用在作业面上或接近作业面处。

文[43]（1991）报道了美军对加筋土掩体进行的抗爆试验。与钢筋混凝土掩体相比，加筋土掩体具有造价低廉、构筑方便特点。试验中加筋土采用宽度为4cm、厚度为0.5cm、长度为4m的钢带作为增强材料。试验结果引人关注。总体上说，加筋土掩体是一种有效防护结构。对于复土内的爆炸，多数爆炸未引起墙板破坏，最严重者也只是局部性破损，未危及整个结构。由于掩体构造特性，局部破坏仅损坏数量有限的墙板，并可很快修复。

3.2 室内(模型)试验

同现场试验相比，国外对锚固类结构抗爆性能室内（模型）试验开展得少一些。这可能与模型试验条件离实际工程要远一些有关。

文[42]在进行现场试验同时，还进行了实验室研究，包括测量砂浆抗压和抗弯强度，及分析锚杆、砂浆和岩石组成的岩芯磨光薄片。结果表明，距爆炸点距离不同的锚杆，以及凝固程度不同的砂浆在受到爆炸荷载作用时，在裂缝形态及频度方面没有显示出任何差异。

J.P. Conway^[44]等（美国，1975）对屈服锚杆进行了室内动力试验，结果表明屈服锚杆具有很好抗动载性能，与静力试验相比，动力试验屈服荷载略有增加（15%）。

D.K.V. Mothersille和H. Xu^[45, 46]（英国，1989，1993）对冲击荷载作用下预应力对锚杆动力响应影响进行了实验室模型试验。结果表明，动载沿锚固段按指数规律衰减，冲击荷载大小一定时，锚杆上任意点的动应力都随预应力增加而减小。笔者认为，该项试验以及上述多项结果表明，动、静力条件下锚杆轴向受力规律相似具有一定普遍性。

W.D. Ortlepp^[47, 48]（南非，1994，1998）设计了一种简单有效且可重复试验方法，对屈服锚杆和普通砂浆锚杆抗爆性能进行了宏观对比试

验。结果表明：①在装药量接近相同情况下，由5根 $\phi 25\text{mm}$ 的全长注浆锚杆（静抗力1350kN）加固的混凝土块最大抛射高度为4.7m，是无锚杆加固混凝土块最大抛射高度的90%，试验中有3根锚杆被拉断，2根锚杆被拔出；②由5根 $\phi 22\text{mm}$ 的屈服锚杆（静抗力1105kN）加固的混凝土块最大抛射高度仅为0.5m，锚杆未受到任何破坏；③屈服锚杆在变位过程中比全长注浆锚杆多吸收了超过20倍的能量；④屈服锚杆能够承受12m/s的试件抛射速度。笔者认为，这种类型的屈服锚杆抗爆效应十分优异，试验方法也很新颖，很值得学习和借鉴。

Anders Ansell^[49, 50, 51]（瑞典，2000，2005，2006）研制了一种用于抗爆的新型锚杆，并称其为“吸能锚杆”。吸能锚杆的杆体用软圆钢制作，不设套管，内锚段杆体呈肋状，并冲压有若干个椭圆形孔。垫板是一个壳形圆盘。当受高速冲击时，杆体受拉变长，杆径变细，从而内锚固段以外杆体与砂浆脱落，锚杆外端便可自由让压。文[49，50]介绍了对这种锚杆进行的自由跌落试验。结果表明：当受动载作用时，杆体塑性应变沿杆长分布不均匀，自锚杆外锚头向内递减（静载下受力规律亦大体如此一笔者注），其塑性屈服没有被充分利用；动载作用下，外锚头处螺母以及内锚头段是可靠的；在12m/s的加载速度下，距螺母50mm处杆体发生断裂。文[51]对这种（软圆钢）锚杆在高速加载机上进行了动力试验，并根据试验结果，提出了对这种锚杆进行抗爆设计的基本原则。这种吸能锚杆也很值得我国借鉴。

3.3 数值分析

国外的硬件和软件均有一定优势，但发表相关文献较少，这或许缘于单一计算结论尚难以用于实际工程设计与安全评估。

文[41]采用一维有限差分法对仅端锚的锚杆在爆炸荷载作用下动力响应进行了数值分析。结果表明，端锚锚杆振动可通过一根梁的轴向和横向振动来分析，锚杆内锚头与岩体间连接方式以及外锚头与垫板间连接方式对锚杆动应变值影响很大，内锚头和岩体间连接是数值分析中最复杂

的单元，内锚头和外锚头处的连接也是研究端锚锚杆动力特性中复杂的边界条件。

Ana Ivanovic等^[52]（英国，2002）采用基于有限差分法的集中参数数值模型计算分析了冲击荷载作用下预应力对锚杆动力响应影响。主要得出以下结论：①锚杆长度一定时，自由段长度与锚固段长度比值增加将导致响应基频降低；②锚头是锚杆响应对预应力变化最敏感部位；③锚杆振动加速度衰减率随预应力增加而增加；④预应力增加将导致锚杆锚固段动应力降低。这些结论与作者先前试验研究结论相一致。

H. Hagedorn^[53]（瑞士，2004）采用UDEEC程序评估了喷锚支护洞室在两次相继冲击作用后稳定性。结果表明，钻孔壁与围岩裂隙相交处握裹注浆（环氧树脂）层的破坏避免了锚杆本身破坏，因而锚杆对围岩仍有加固作用，但须考虑对喷层造成的局部破坏影响。

P.J. Zhao等^[54]（新加坡，2003）结合一维弹性波理论和梁的动力分析方法，将喷锚网支护中钢纤维喷射混凝土层简化为一简支弹塑性梁，由此建立了一种冲击荷载作用下喷层抗剥落简化设计计算方法。算例表明，该方法可靠有效的。

3.4 抗静载问题研究与应用

国外尚无锚固和复合锚固类结构这种称谓。但锚固和复合锚固类结构抗静载问题研究与应用却不乏其例^[55~57]，尤其是关于前者，发表了不计其数的文献资料。对于后者，提出的研究与应用成果亦不在少数，其中有的结构型式具有先进性和新颖性。如1985年法国在一处深度为21m的基坑开挖临时支护中（由Montpellier Opera施工开挖），所采用的角钢击入钉，上部加一排锚杆的做法；1990年，法国在Cotiere隧道北进口（一条高速铁路隧道入口）高度为28m的边坡支护中所采用的10排长度为15m的注浆土钉，上部加2排长度为30m的锚杆的“土钉-拉锚”复合系统；德国在一处柏林土钉墙工程中所采用的一种“土钉-拉锚-竖桩”复合支护系统；美国在Oregon DOT Portland和Light Rail工程中采用的一种“加筋土墙-土钉墙”复合挡土结构；1997年日本研发的“板墙土钉支护法”（以预制钢筋混凝土板替代

传统土钉支护中的喷射混凝土面层)等,均可看作是复合锚固类结构在抗静载方面的研究与应用。

本文所述新型复合锚固类结构型式及其研究与应用成果国外未见发表。

3.5 小结

①国外尚无“单一锚固类结构”、“复合锚固类结构”这种称谓,但在抗静载研究与应用方面也不乏其例。

②国外对锚固类结构抗爆性能试验研究非常重视,试验做得较多、较全和较细,特别是某些原型试验规模很大,有的试验方法很新颖,且近三十年来在持续进行研究。但均为单一锚固类结构。关于复合锚固类结构文献未见发表。后者受力更为复杂,研究起来更困难。

③国外关于锚固类结构抗爆性能数值计算文献甚少,某些用于工程设计的计算结论往往是与相应试验研究结果相印证。

④国外对某些锚固类结构(如吸能锚杆支护和屈服锚杆支护结构;前者国内未见发表,后者国内有研究,但原理有别)抗爆性能研究成果,对我国具有借鉴意义。

4 结论

综上所述,锚固和复合锚固类结构抗动静载性能研究是一个较复杂问题,其研究面很宽,内容主要涵盖锚固和复合锚固类结构在动静载作用下的响应、加固效应、破坏机理,动静载对锚固力影响、新型抗动静载锚固技术,以及复合锚固类结构的优化复合设计理论与方法等方面。虽然各类锚固结构抗动静载性能的研究存在诸多共同特点,但对于特定工程结构、地质环境、锚固型式、荷载大小等条件,结论往往存在较大差异甚至相互矛盾,需要具体问题具体分析,不可以一概全。然而,试验研究总是主要研究方法,数值计算和理论分析则是不可或缺的辅助研究手段。

以下问题,无论国内或国外,均具有共性:

①复合锚固类结构抗动、静载性能研究均很不够,尤其是对前者的研究与应用更欠缺。

②国外提出的特殊型式的锚固结构(屈服锚杆和吸能锚杆支护结构),其抗爆性能极为优异,我国尚未见发表,具有良好开发应用前景,

我国应加以借鉴并深入研究。

③本文所述新型复合锚固类结构国内外未见发表,其优异的抗动、静性能迄今仅见冰山一角,探讨其复杂作用机理和优化设计方法尚有许多工作要做。

④有关复合锚固类结构试验研究及应用成果,迄今还未能上升到系统、严密、公认的理论阐释程度。

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] 曹国庆.喷锚支护抗爆性能与设计[J].防护工程.1979,1(2):34-51
- [3] 王学礼.喷锚支护在内爆巷道中的应用[J].建井技术.1981,2(2):17-20
- [4] 王学礼.内压巷道锚、喷、网支护参数的选择及实践效果[J].建井技术.1987,8(2):40-42
- [5] 任辉启.砂砾地层中坑道喷锚支护在顶爆和侧爆条件下的抗爆性能[J].防护工程.1986,8(1):12-18
- [6] 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
- [7] 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
- [8] 曹长林,曾宪明.黄土坑道喷锚网支护的抗爆性能-III,支护受力变形特性;临界承载能力[J].防护工程.1992,14(1):46-55
- [9] 康天合,薛亚东.基于围岩条件与动载作用的回采巷道锚杆支护设计原则[J].岩石力学与工程学报.1996,15(s1):571-576
- [10] 侯忠杰.爆破对树脂锚杆载荷的影响[J].矿山压力与顶板管理.1997,14(1):36-39
- [11] 盛宏光,张勇.钻地武器侵彻爆炸条件下坑道岩体的锚固技术初探[A].见:中国土木工程学会防护工程分会第九次学术年会论文集[C],长春,2004(2):1542-1547
- [12] 张云,刘开运.近区爆破对锚固设施的影响研究[J].水利发电.1996(8):23-26
- [13] 陆遐龄.爆破对600kN预应力锚杆影响及锚固测力探讨[A].见:中国土木工程学会防护工程分会第五次学术年会论文集[C],成都,1996.453-464
- [14] 陆遐龄.岩石高边坡爆破开挖对锚固设施的影响[J].爆破.2000,17(s1):147-151
- [15] 宋茂信.岩体边坡开挖爆破对预应力锚索锚固性能影响的现场观测[J].防护工程.1998,20(3):74-77
- [16] 苏华义,张继春.紫坪铺高陡边坡抗爆破振动分析[J].岩石力学与工程学报.2003,22(11):1916-1918
- [17] 周德培.锚索预应力损失的影响因素及对策[A].中国岩石力学与工程学会第八次学术大会论文集[C].成都,2004:610-613
- [18] 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
- [19] 黄承贤.在爆炸荷载作用下长锚杆喷锚支护坑道的动态反应[J].岩石力学.1987,8(3):1-11

- [20] 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
- [21] 孙永志, 刘朝等. 土中喷锚支护洞室非线性动态有限元分析[J]. 防护工程. 1984,6(1): 19-31
- [22] 郑际汪, 陈理真. 爆破荷载作用下隧道围岩稳定性分析[J]. 矿山压力与顶板管理. 2004, 21(4): 53-55
- [23] 杨苏杭, 沈俊等. 预应力锚索对洞室抗爆加固效应的三维动力分析[J]. 防护工程. 2006, 28(1): 20-24
- [24] 荣耀, 许锡宾等. 锚杆对应力波传播影响的有限元分析[J]. 地下空间与工程学报. 2006, 2(1): 115-119
- [25] 赵幸源. 隧道爆破开挖效应的动静力有限元分析[A]. 中国土木工程学会隧道及地下工程学会第五届年会论文集[C]. 南京, 1988. 591-599
- [26] 王承树. 爆炸荷载作用下喷锚支护破坏形态[J]. 岩石力学与工程学报. 1989, 8(1): 73-91
- [27] 王承树. 动载下围岩与坑道喷锚支护的相互作用[A]. 见: 曹志远主编, 结构与介质相互作用理论及其应用——全国首届结构与介质相互作用学术会议论文集[C]. 南京: 河海大学出版社, 1993. 853-857
- [28] 易长平. 爆破振动对地下洞室的影响研究[D]. 武汉大学博士学位论文. 2005
- [29] 易长平, 卢文波. 爆破振动对砂浆锚杆的影响研究[J]. 岩土力学. 2006, 27(8): 1312-1316
- [30] 喻晓今, 曾宪明等. 土钉瞬态应力的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报. 2004, 23(6): 4438-4441
- [31] 喻晓今, 余学文等. 数种情形下土钉的瞬态应变累积效应分析[J]. 华东交通大学学报. 2006, 23(4): 1-4
- [32] 沈德义, 刘五一. 介绍国外几种可用于动载条件的锚杆. 89002部队资料室内部资料. 1984: 9-11
- [33] Thorpe R K, Heuze, F. E. Dynamic response of rock reinforcement in a cavity under internal blast loading: an add-on test to the pre-mill yard event[R]. DE86004667. 1985
- [34] Stillborg B. Experimental investigation of steel cables for rock reinforcement in hard rock. Doctoral thesis. Luleå University, Luleå, Sweden, 1984.
- [35] Otuonye F O. Response of grouted roof bolts to blasting loading[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts. 1988. 25(5): 345 - 349
- [36] Otuonye F O. 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
- [37] Littlejohn G S, Rodger A A, et al. Monitoring the influence of blasting on the performance of rock bolts at Penmaenbach tunnel[A]. In: Proceedings of 1st International Conference on Foundations & Tunnels[C]. Edinburgh, 1987(2): 99 - 106
- [38] Littlejohn G S, Rodger A A, et al. Dynamic response of rock bolt systems[A]. In: Proceedings of 2nd International Conference on Foundations & Tunnels[C]. London, 1989(2): 57 - 64
- [39] Holland D C. The influence of close proximity blasting on the performance of resin bonded rock bolts. Master of Science thesis, University of Aberdeen, U.K. 1989
- [40] Rogler A A, 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
- [41] Tannant D D, Brummer R K, Yi X. Rock bolt behaviour under dynamic loading: field test and modelling[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts. 1995, 32(6): 537 - 550
- [42] Gisle Stjern, Arne Myrvang. The influence of blasting on grouted rockbolts[J]. Tunneling and Underground Space Technology. 1998, 13(1): 65 - 70
- [43] 李晓军. 美军加筋土掩体的抗爆试验. 防护工程快报. 89002部队资料室内部资料. 1991, No. 69
- [44] Conway J P, et al. Laboratory studies of yielding rock bolts[R]. PB245560, 1975
- [45] Mothersille D K V. The influence of close proximity blasting on the performance of resin bonded bolts. PhD thesis. University of Bradford, U.K. 1989
- [46] Xu, H. The dynamic and static behaviour of resin bonded rock bolts in tunneling. PhD thesis, University of Bradford, U.K. 1993
- [47] Ortlepp W D. Grouted Rock as Rockburst Support: A Simple Design Approach and An Effective Test Procedure[J]. Journal of The South African Institute of Mining & Metallurgy. 1994, 94(2): 47 - 63
- [48] Ortlepp W D, Stacey T R. Performance of tunnel support under large deformation static and dynamic loading[J]. Tunneling and Underground Space Technology, 1998, 13(1): 15 - 21
- [49] Anders Ansell. Testing and modelling of an energy absorbing rock bolt[A]. In: Jones N, Brebbia C A, Structure under shock and impact VII[C]. The University of Liverpool, U.K. and Wessex Institute of Technology, U.K., 2000. 417 - 424
- [50] Anders Ansell. Laboratory testing of a new type of energy absorbing rock bolt[J]. Tunneling and Underground Space Technology, 2005, 20(4): 291 - 300
- [51] Anders Ansell. Dynamic testing of steel for a new type of energy absorbing rock bolt[J]. Journal of Constructional Steel Research. 2006, 62(5): 501 - 512
- [52] Ana Ivanovic, Richard D Neilson, et al. Influence of prestress on the dynamic response of ground anchorages[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering. 2002, 128(3): 237 - 249
- [53] Hagedorn H. Dynamic rock bolt test and UDEC simulation for a large cavern under shock load[A]. In: Proceeding of International UDEC/3DEC Symposium on Numerical Modeling of Discrete Materials in Geotechnical Engineering, Civil Engineering, and Earth Sciences[C]. Bochum, Germany, 2004. 191 - 197
- [54] Zhao P J, Lok T S, et al. Simplified spall-resistance design for combined rock bolts and steel fiber reinforced shotcrete support system subjected to shock load[A]. In: Proceedings of 5th Asia-pacific conference on shock & impact loads on structures[C]. Changsha, China, 2003. 465 - 478
- [55] 陈肇元, 崔京浩主编. 土钉支护在基坑工程中的应用 (第二版). 北京: 中国建筑工业出版社. 2000. 12: 5 ~ 6
- [56] 美国交通部联邦总局 (FHWA-SA-96-069R). 余诗刚译. 土钉墙设计施工与监测手册. 北京: 中国科学技术出版社. 2000. 5: 94 ~ 95
- [57] Gyaneswor Pokharel, Tatsumi Ochiai. Design and construction of a new soil nailing (PAN Wall) method. Ground Engineering. 1997, 30 (5): 28