

隧道系统锚杆研究现状与发展方向

赵东平^{1,2} 王卢伟² 喻 渝³ 刘建友⁴

(1. 西南交通大学交通隧道工程教育部重点实验室, 四川成都 610031; 2. 西南交通大学土木工程学院, 四川成都 610031;
3. 中铁二院工程集团有限责任公司, 四川成都 610031; 4. 中铁工程设计咨询集团有限公司, 北京 100055)

摘要: 对近 40 年以来国内外公开发表的隧道锚杆研究论文进行统计和分析, 阐述隧道系统锚杆国内外研究现状, 揭示隧道系统锚杆研究的薄弱环节。研究表明, 隧道系统锚杆的研究主要集中在锚杆作用效果、锚杆计算理论、锚杆设计参数和新型锚杆研发等方面。部分研究表明黄土隧道拱部系统锚杆作用效果不明显, 目前国内工程界及学术界对隧道系统锚杆作用效果的认识尚不统一; 在全长黏结型锚杆的力学模型及计算理论方面研究成果较多, 但基于 Mindlin 位移解推导的锚杆轴力解析解未考虑中性点的影响; 关于隧道系统锚杆的设计及计算理论研究甚少, 个别学者提出的经验公式及解析公式中的输入参数大多不易获取, 因此在实际工程中仍难以应用; 在隧道系统锚杆的设计方面, 针对临界锚固长度有一定研究, 但是在系统锚杆的布置方式及系统锚杆与围岩的匹配性方面尚无研究成果, 隧道系统锚杆设计主要采用经验类比法。从力学机理及理论计算方法上对隧道系统锚杆与围岩联合作用机理及承载拱的承载原理进行深入研究, 同时开展新型材料锚杆及新型构造锚杆的研发是未来的发展方向。

关键词: 隧道; 系统锚杆; 研究现状; 发展方向

中图分类号: TU398⁺.9 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-131X(2020)08-0116-13

Research status and development direction of tunnel system bolt

Zhao Dongping^{1,2} Wang Luwei² Yu Yu³ Liu Jianyou⁴

(1. Key Laboratory of Transportation Tunnel Engineering of the Ministry of Education, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China;
2. School of Civil Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China; 3. China Railway Eryuan Engineering Group Co., Ltd., Chengdu 610031, China; 4. Railway Engineering Consulting Group Co., Ltd., Beijing 100055)

Abstract: The statistics and analysis were carried out for research papers on tunnel anchor bolts published in the past 40 years, the research status of tunnel anchor bolts at home and abroad was discussed, and the weak links in the research of tunnel system bolt were revealed. The analysis shows that the research of tunnel anchor bolts mainly focuses on the effect of anchor bolts, the calculation theory of anchor bolt, the design parameters of anchor bolts and the development of new anchor bolts. Some researches indicate that: at the crown on the loess tunnel, the effect of system bolt is not obvious, and nowadays the understanding of domestic engineers and scholars on the effect of tunnel system bolt is still not unified; although many research results on the mechanical model and calculation theory of the full-length bonded anchor bolts can be found, the analytical solution for the axial force of the anchor bolt derived from the Mindlin displacement solution does not take into account the influence of the neutral point; researches on the design and calculation theory in tunnel system bolt are few, and additionally the input parameters of empirical formulas and analytical formulas proposed by some scholars are mostly difficult to obtain, so it is still difficult to apply them to practical tunnel projects. In the design of tunnel system bolt, some researches on the critical anchorage length are available, but research results on the arrangement of tunnel system bolt and their matching with surrounding rock are still absent. As a result, for the design of tunnel system bolt, it is generally to adopt the empirical analogy method. The design method of the tunnel system bolt shall be further explored and the system bolt of new material and new configuration shall be developed in the future.

Keywords: tunnel; system bolt; research status; development direction

E-mail: zhaodp@swjtu.edu.cn

基金项目: 中央高校基础科学研究业务费专项基金(2682019CX03)

作者简介: 赵东平, 博士, 教授级高级工程师、副教授

收稿日期: 2019-10-15

引 言

20 世纪 60 年代, 新奥法开始引入中国, 该方法强调隧道围岩既是荷载来源同时也是支护的主体材料之一, 但前提条件是围岩内部可形成围岩自承载拱。以新奥法理念建造隧道时, 喷射混凝土和隧道锚杆是两种重要的支护手段。喷射混凝土可快速封闭开挖后的围岩表面, 锚杆则可从内部提高围岩的承载能力。隧道锚杆包括局部锚杆和系统锚杆, 局部锚杆可对局部不稳定的岩块或岩体进行局部锚固; 系统锚杆的主要作用则是对隧道开挖周边的围岩松动区(或称为扰动区)进行锚固, 辅助隧道周边围岩承载。

目前关于隧道锚杆的研究大多聚焦于锚杆的受力特性以及单根锚杆的理论计算问题。关于系统锚杆力学机理及系统锚杆与围岩形成的复合承载拱承载机理仅有少量研究, 而在实际工程中, 隧道系统锚杆主要采用工程经验法进行设计。本文从已发表的隧道锚杆研究论文数量、研究侧重点、系统锚杆作用效果、锚杆施工技术、锚杆计算理论及新型锚杆等方面对隧道系统锚杆研究历程进行回顾和总结, 提出隧道锚杆支护基础理论研究的薄弱环节, 便于工程界和研究机构修正研究方向, 进而更好地支撑和服务隧道工程建设。

1 隧道锚杆论文统计分析

为了清晰地展示工程界和学术界在隧道锚杆领域研究发展历程, 对 1974 年~2019 年期间已经发表且与隧道锚杆支护相关的论文进行统计。文献来源自 CNKI、Web of Science、ScienceDirect 等主流数据库。在对论文进行检索时, 以“隧道”、“锚杆”、“系统锚杆”等为检索关键词, 同时对检索到的文献摘要及内容进行分析, 研究其主要内容与隧道锚杆的相关度, 删除相关度不大的文献, 最后得到汇总文献 570 篇。将检索到的论文以 5 年为一个周期间隔, 按发表年份进行归类, 统计结果见图 1。

隧道锚杆论文发表数量统计结果显示, 关于隧道锚杆的研究可大致划分为三个阶段: 第一个阶段为 1974 年~1995 年, 这一阶段是研究的起步阶段, 发表的研究论文保持在一个较低的水平; 第二个阶段为 1995 年~2015 年, 这一阶段是研究的鼎盛阶段, 发表的研究论文持续增长, 并保持在一个较高水平; 第三个阶段是 2015 年至今, 这一阶段对隧道锚杆的

研究热度出现下降趋势, 论文发表数量明显减少。

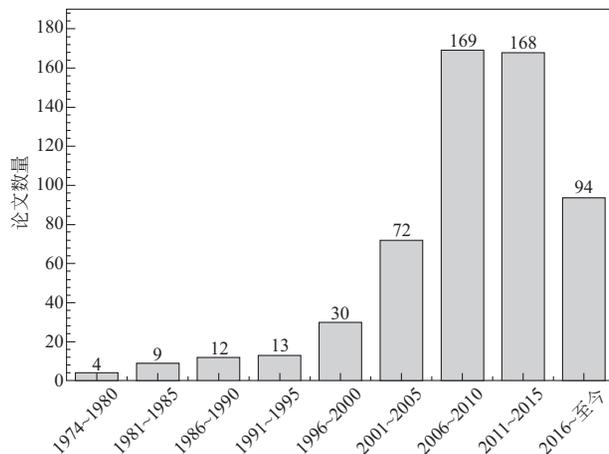


图 1 隧道锚杆研究论文发表数量年份分布

Fig. 1 Quantity and year distribution of research papers on tunnel bolts

另一方面, 按论文的研究主题侧重点进行分类统计, 各个主题侧重点在总体中的占比情况见图 2。

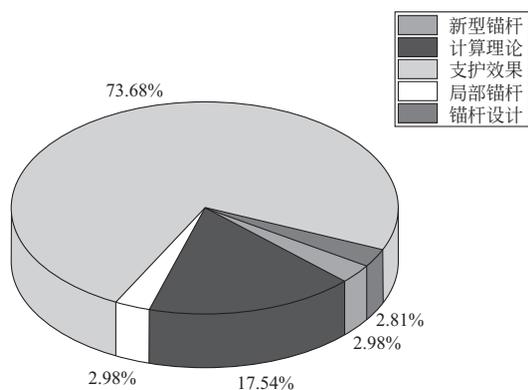


图 2 论文研究主题分类占比

Fig. 2 Proportions of different classifications of paper subjects

图 2 显示, 针对隧道锚杆的研究存在着研究侧重点分布不均匀的情况。既有研究中关于局部锚杆的研究占比达 73.68%, 而关于锚杆计算理论的研究占比仅为 17.54%, 涉及隧道系统锚杆设计方面的研究占比最低, 仅为 2.81%。对既有研究论文的内容进行研读发现, 大部分只停留在局部锚杆的理论和受力研究。在隧道系统锚杆-围岩复合体作用效应及基本计算理论方面的研究成果甚少, 能支撑实际隧道工程设计的系统锚杆计算理论更是鲜见报道。

2 隧道系统锚杆支护效果

针对隧道系统锚杆支护效果问题, 国内众多学者依托不同工程开展了相关研究工作。谭忠盛、喻

渝等^[1-2]等依托郑西客运专线某黄土隧道, 基于现场试验测试结果认为, 浅埋黄土隧道有系统锚杆时隧道周边位移较无系统锚杆加大; 深埋黄土隧道有系统锚杆与无系统锚杆时隧道周边位移基本相当; 无论深埋或浅埋隧道, 实测锚杆轴力最大值均不超过 12kN。陈建勋^[3]基于哈尔滨绕城高速公路天恒山隧道 VI 级围岩段现场试验结果, 认为在高含水量土质隧道中, 锚杆施作难度大、质量较差并且其支护作用不佳。陈力华^[4]根据有限元强度折减法并结合数值模拟, 通过计算不同地质条件下锚杆对于隧道衬砌安全系数的影响, 认为在部分地质条件情况下锚杆对于隧道衬砌安全的影响不大。刘洋^[5]等依托武西高速桃花峪隧道, 针对有锚杆段和无锚杆段隧道周边位移及支护内力进行对比研究, 结果显示, 有锚杆段的拱顶变形和水平收敛略小于无锚杆段, 有锚杆段围岩与初期支护接触压力较无锚杆段小, 但接触压力减少量值占压力初值(减小前的接触压力)比值不大。杨旻、陈建勋、邹育麟等^[6-8]依托不同隧道开展了锚杆作用效果的研究, 但其结果均表明在软弱围岩中锚杆的作用有限, 甚至觉得在部分区域可以取消系统锚杆。

与上述部分学者对隧道系统锚杆在部分特殊地层支护效果存在质疑的观点相反, 国内也有部分知名学者认为隧道系统锚杆的作用不可替代。例如: 王建宇、关宝树、王梦恕等^[9-11]认为锚杆作为新奥法喷锚支护的关键支护构件之一, 在软弱破碎岩体中系统锚杆可以提高岩体完整性, 进而起到加固隧道围岩的作用。

从目前的研究来看, 部分学者认为隧道系统锚杆的作用效果不佳, 甚至主张取消隧道系统锚杆; 另一方面, 也有部分学者认为系统锚杆的作用不容忽视。这反映出我们对隧道系统锚杆的作用机理及使用条件缺乏统一认识。

2.1 隧道系统锚杆的作用

根据锚杆的锚固机理可将锚杆分为机械锚杆(例如, 胀壳式锚杆)、全长黏结型锚杆(例如, 水泥砂浆或树脂锚杆)及摩擦型锚杆(例如, 水涨式锚杆)等类型, 主要类型锚杆的示意图如图 3 所示。不同类型的隧道锚杆都可从围岩内部对围岩进行锚固, 进而提高隧道周边破碎围岩的自承载能力^[12]。

现阶段普遍认为系统锚杆是通过使隧道周边被扰动围岩形成承载拱来达到承载效果的, 但有部分学者认为系统锚杆长度往往小于坍塌拱的高度, 其锚杆整体处于破碎区并没有起到锚固的作用。

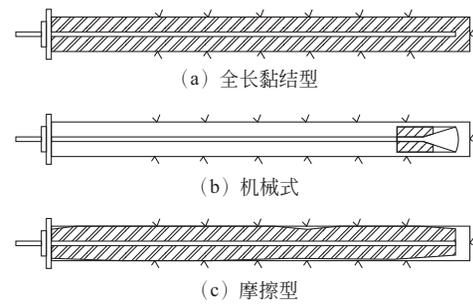


图 3 隧道系统锚杆主要类型示意图

Fig. 3 Schematic diagram of main types of tunnel bolts

在浅埋情况下, 靠近地表的围岩一般节理发育。甚至在某些地方岩体的节理是开放的, 隧道开挖前, 下部围岩对上部围岩起到支撑作用。在隧道施工过程中随着下部岩体被开挖以至于上部岩体临空, 甚至部分已经存在的未开放节理将会受到扰动, 进而产生潜在的岩体松动, 此时隧道锚杆(系统锚杆或局部锚杆)可起到锚固上部围岩, 维持洞室稳定的作用^[13], 如图 4 所示。

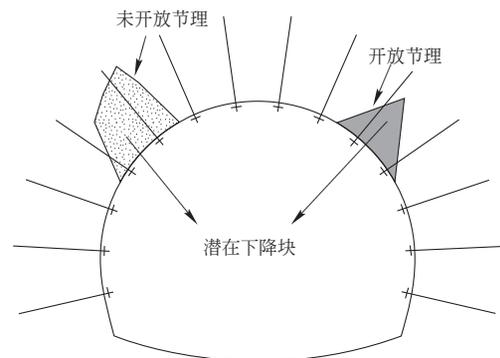


图 4 浅埋隧道锚杆作用示意图

Fig. 4 Schematic diagram of system bolts in shallow tunnel

在深埋情况下, 围岩的连续性会相对较好, 节理发育相较于靠近地表的岩层要弱, 即使有节理一般也会在较高应力的条件下处于闭合状态, 所以在深埋条件下锚杆的主要作用不再局限于支撑上部围岩的稳定。对大埋深隧道, 往往存在高应力情况, 软弱围岩会在高应力的作用下产生大变形现象, 坚硬围岩会在高应力作用下产生侵入软弱岩体或者产生岩爆现象。所以, 在深埋条件下, 隧道系统锚杆的主要作用是控制隧道收敛变形量, 防止潜在的岩爆等危害, 同时对隧道周边一定范围内潜在的围岩扰动区进行加固, 进而提高围岩自承载能力, 深埋条件下, 隧道系统锚杆作用如图 5 所示。

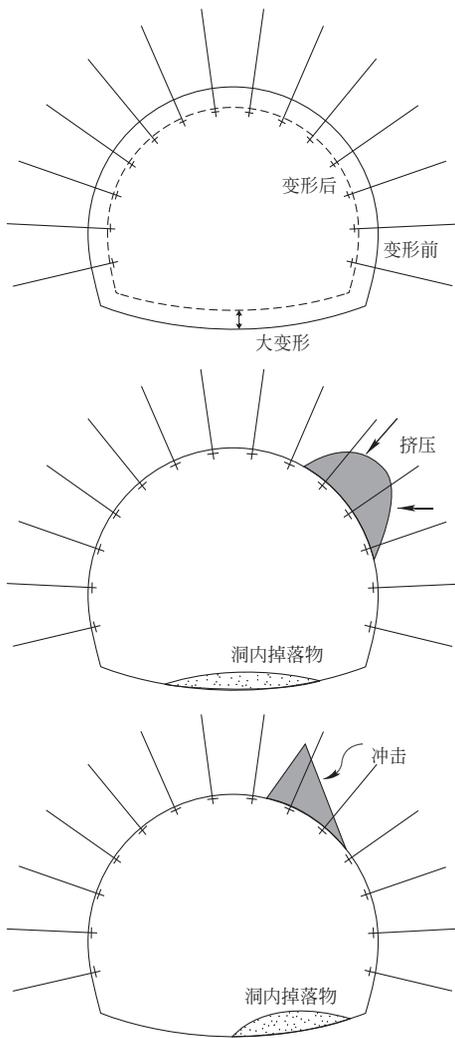


图 5 深埋隧道锚杆作用示意图
Fig. 5 Schematic diagram of system bolts in deep tunnel

显然无论在浅埋还是深埋隧道中，隧道系统锚杆都具有支护围岩稳定的作用，对于大埋深高地应力软岩隧道，隧道系统锚杆更是主要的锚固手段之一。

2.2 隧道系统锚杆承载原理

国内外学者普遍认为，隧道系统锚杆中的单根锚杆均有相对明确的锚固范围，其锚固范围的叠加区域则被认为是系统锚杆支护形成的承载拱。

如图 6 所示，破碎的岩块在一组锚杆的作用下，若上部存在个荷载，此时由于锚杆对于岩块(或局部不稳定岩体)的约束作用，将会在破碎岩块内部形成了一个类似拱的承载结构，该拱结构相比隧道围岩可以承受一个较大的荷载^[14]。当然，拱的厚度及其分布的规律与锚杆长度、锚杆间距及锚杆的锚固时机等密切相关，相关的定量研究未见报道。

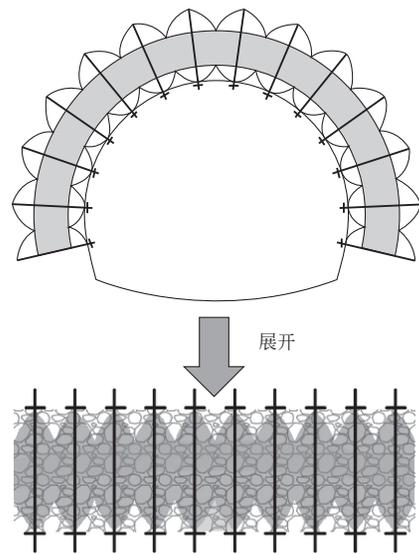


图 6 锚杆承压拱示意图^[14]

Fig. 6 Schematic diagram of system bolts bearing arch^[14]

Li^[13] 等人曾在埋深接近 1000m 的矿洞中沿隧道径向钻取了一个约 10m 的岩芯，通过对岩芯的产状进行分析发现，在高应力情况下，爆破施工导致周边围岩产生新的裂缝。岩芯取样结果表明，距洞周 2.1m 范围内岩芯极为不完整(图 7(a))，距洞周 2.1~5.2m 范围内岩芯严重饼化(图 7(b))，距洞周 5.2~8.5m 范围岩芯轻微饼化(图 7(c))，距洞周 8.5m 以外范围岩芯完整性较好(图 7(d))。

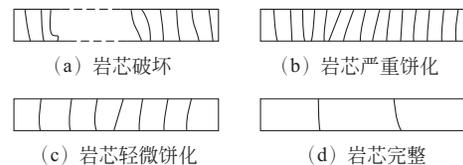


图 7 金属矿洞中岩芯饼化情况

Fig. 7 Rock core fragmentation in metal mine tunnel

那么可以假设，在高应力情况下，围岩出现层状的裂缝变形，此时，隧道系统锚杆的作用就相当于把数层薄板加固成为一个组合梁，进而对隧道周边径向范围围岩进行加固，改善围岩受力条件，从而起到支护作用。其承载原理如图 8 所示。

显然，在无锚杆的情况下，层状结构会产生较大的张拉裂缝，呈现出不协调的变形，进而导致围岩的承载能力有限。而在有系统锚杆的情况下，由于锚杆对围岩变形的约束作用，组合梁的承载能力将大大增加。所以，在高应力情况下，系统锚杆可显著提高围岩的承载能力，并防止岩爆后导致的围岩次生破坏。

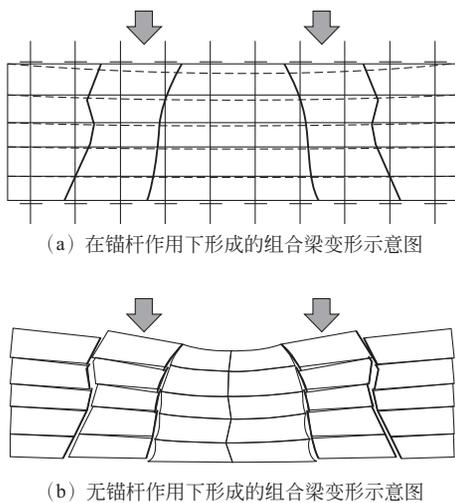


图 8 隧道系统锚杆加固围岩示意图

Fig. 8 Schematic diagram of surrounding rock reinforced by system bolts

3 系统锚杆理论计算问题

关于系统锚杆-围岩复合体受力机理及理论计算方法的研究甚少,既有研究大多仍停留在定性阶段。赵俭斌等人^[15]结合隧道施工经验,以隧道周边位移为控制标准,提出系统锚杆加固范围的计算方法,并据此对系统锚杆的设计参数进行理论推导。郭小红等^[16]根据承压拱理论提出系统锚杆承载能力的计算方法,并针对不同围岩条件及衬砌类型给出支护建议。张慧健等^[17]依托乌蒙山二号四线铁路隧道通过数值模拟和现场测试的方法,得出在隧道开挖过程中系统锚杆轴力的分布规律,认为锚杆在隧道拱肩处轴力最大并与围岩的相对变形有关。黄耀英^[18]对系统锚杆在节理岩体中的作用模型进行了研究,用 Maxwell 元件、Kelvin 元件和 Bingham 元件串联来模拟岩体变形,并推导出相应的有限元计算公式,其研究认为系统锚杆在节理岩体中的作用贡献率与岩体的性质和锚杆的密度以及节理的性状有关。Bobet 等^[19]基于离散机械耦合、摩擦耦合、连续机械耦合及连续摩擦耦合等理论模型对锚杆的受力特征进行了分析。尤春安^[20]基于 Mindlin 位移解推导出全长黏结型锚杆的轴力及轴向切应力的分布特征。Freeman^[21]依托 Kielder 隧道,通过现场试验的方法得到全长黏结型锚杆的受力规律。

总体来看,关于隧道锚杆理论计算方面的研究尚不充分,相比隧道系统锚杆而言,学者对全长黏结型隧道锚杆给予了较高的关注度,其计算理论的

研究也相对较为深入;而关于隧道系统锚杆的理论研究成果明显偏少,且尚未形成统一认识,也未在工程设计中广泛应用,这也是国内工程界对隧道系统锚杆功能不重视的原因之一。

3.1 全长黏结型锚杆计算理论

对于全长黏结型锚杆,荷载是通过锚固料与杆体之间的界面传递至围岩的。随着隧道周边围岩向开挖边界变形,施作在围岩内部的锚杆构件就会产生相应变形,进而在锚杆构件内部形成拉应力,由于锚杆材料抗拉强度远大于围岩抗拉强度,因此,抗力可通过锚固料传递到围岩,进而对围岩的收敛变形起到约束作用,即达到对围岩的加固效果,如图 9 所示。

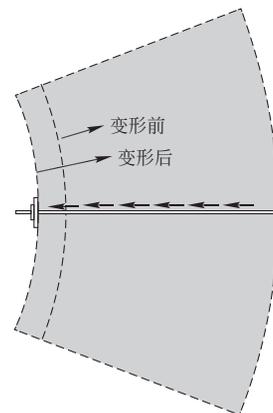


图 9 锚杆加固机理示意图

Fig. 9 Schematic diagram of reinforcing mechanism of bolts

当假设埋入围岩中的锚杆是半无限长的前提下,根据 Mindlin 问题^[22]的位移解,尤春安^[20]推导了锚杆杆体剪切应力沿长度方向分布规律,即式(1);通过对其沿杆体长度方向积分得到锚杆轴力沿杆体长度方向的分布规律,即式(2)。

$$\tau = \frac{Ptz}{2\pi a} e^{-\frac{1}{2}tz^2} \quad (1)$$

$$N = Pe^{-\frac{1}{2}tz^2} \quad (2)$$

式中: $t = \frac{1}{(1+\nu)(3-2\nu)a^2} \left(\frac{E}{E_a} \right)$; a 为锚杆杆体半径, mm; E 为岩体弹性模量, GPa; E_a 为杆体弹性模量, GPa; ν 为岩体泊松比; P 为锚杆端头拉拔力, kN; z 为集中力作用的深度, m。

研究表明^[21-25], 全长黏结型锚杆存在中性点。所谓中性点是指锚杆与锚固材料之间的切应力为零的点。锚杆沿杆体分布的剪切应力会在中性点处出现反向,锚杆轴力在中性点处达到最大值。隧道围

岩变形与锚杆剪应力及轴力的关系示意图如图 10 及图 11 所示。

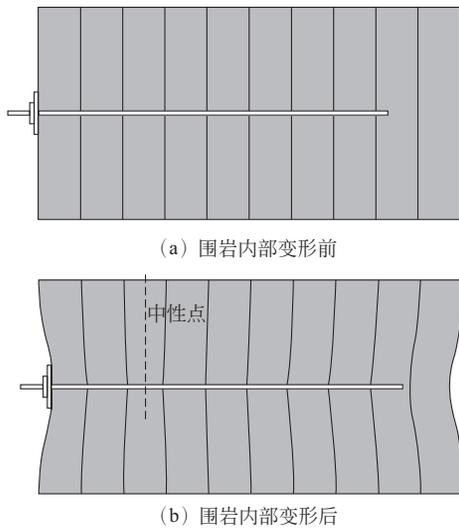


图 10 全长黏结型锚杆作用示意图

Fig. 10 Schematic diagram of full-length bonded anchor bolts

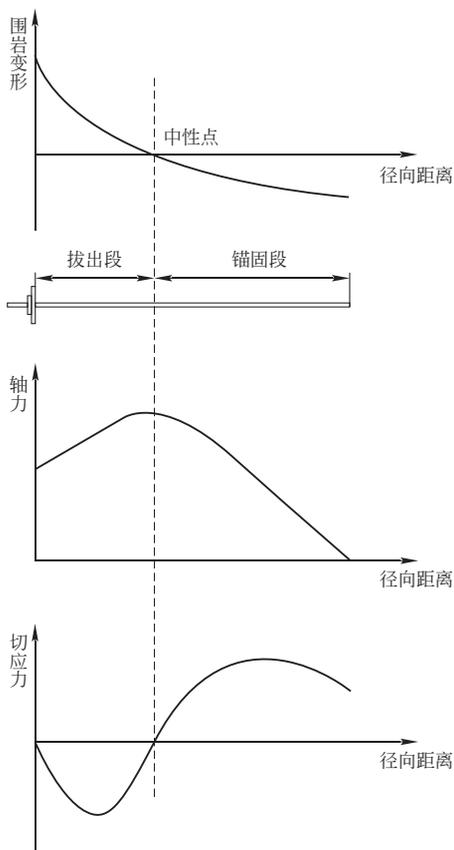


图 11 锚杆剪切应力及轴力分布示意图

Fig. 11 Distribution of shear stress and axial force of bolt

Freeman 基于 Kielder 隧道的现场监测数据分析结果，得出全长黏结锚杆在与围岩共同变形时存在着

一个中性面，在这个界面上围岩变形很小，可近似为零的结论。在中性面与锚杆锚头之间部分锚杆的剪切应力指向洞内，在中性面与锚端间部分锚杆的剪切应力指向围岩深部方向。

上述分析显示，在全长黏结型锚杆的计算理论方面已经有了一定的研究，但尤春安在基于 Mindlin 位移解推导的锚杆剪应力及轴力沿杆长度方向分布公式中并未考虑中性点影响，即式(1)和式(2)与锚杆的实际受力是有区别的。

3.2 系统锚杆成拱效应理论

目前国内外对于隧道系统锚杆的成拱效应有一定的研究，均认为在岩体中系统锚杆可以形成一个拱结构(或称之为承压拱)，但对承载拱厚度的界定以及在不同围岩级别情况下如何根据该理论确定隧道系统锚杆设计参数等方面的研究仍然非常欠缺。

赵俭斌^[15]在计算承压拱厚度问题中引入 K_l 作为锚杆影响范围的系数，通过锚杆相互作用效应原理推导出承压拱厚度与锚杆几何位置参数的关系(如图 12(a)所示)，即式(3)：

$$l^2 - (1 - 4K_l^2) / (2K_l) \cdot s \cdot l - s^2 - d^2 = 0 \quad (3)$$

式中： K_l 为锚杆影响范围系数^[26]； s 为锚杆中点距离，m； L 为锚杆长度，m； d 为承压拱厚度，m。

郭小红等^[16]认为承压拱为系统锚杆与喷射混凝土层共同作用形成的，在计算过程中引入了喷射混凝土层厚度 D_{ph} ，其提出的承压拱厚度计算公式，见式(4)。

$$D_g = L_0 - B_s \cdot c \cdot \tan(\phi_j) - D_0 + D_{ph} \quad (4)$$

式中： D_g 为系统锚杆承压拱厚度，m； L_0 为系统锚杆设计入土长度，m； D_{ph} 为喷射混凝土厚度，若喷射混凝土内设有钢架则取 0，m； B_s 为系统锚杆外侧端部折算间距，m； R_0 为承载拱内轮廓线半径，一般取开挖轮廓线半径，m； D_0 为承载拱厚度安全系数； ϕ_j 为岩体的计算摩擦角，°。

Li^[13]基于 Hobst、Zajic^[27]的研究成果，认为锚杆的锚固作用范围是从端部沿着某一角度向外扩展，所以其影响范围的计算模型如图 12(b)所示，则其承载拱的厚度为交互区的厚度。

目前有部分针对全长黏结锚杆的受力机理的研究，但提出的理论算法很难具有普适性，原因主要是考虑的模式较为理想，与实际地质条件关联性不强。而关于承压拱的理论算法引入一系列影响参数，这些参数的确定有待进一步的研究，所以目前现有的理论计算方法难以在实际工程中应用。

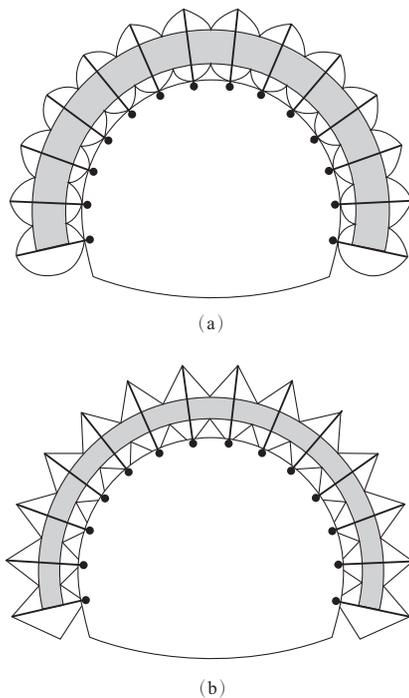


图 12 系统锚杆承载拱厚度示意图
Fig. 12 Schematic diagram of bearing arch thickness of system bolt

4 系统锚杆设计及布置问题

4.1 锚杆的设计长度

现阶段系统锚杆的设计仍然处于经验阶段，针对锚杆锚固长度的问题国内外已经做了较多研究，对于临界锚固长度已经有了一定的认识^[28]。浙江大学的张洁等人^[29]提出临界锚固长度为岩土介质中锚固类结构杆体的极限锚固长度，超过此长度，其承载力将不再明显增加。此外，龙照等^[30]根据锚固体与周围岩土体之间的位移协调原理，推导出锚杆临界锚固长度的简化计算公式。张德华等^[31]针对强挤压型隧道锚杆支护参数因无工程类比而存在的问题，提出基于对数螺线角确定强挤压型隧道锚杆支护参数的方法。李怀珍等^[32]基于锚固体与围岩界面的相对滑移导致脱黏的问题，提出煤矿巷道树脂锚杆合理锚固长度的计算流程(图 13)，并给出设计实例。

显然，临界锚固长度的计算对于系统锚杆设计长度计算具有指导意义，但目前适用于隧道系统锚杆设计长度计算的理论或试验较少，隧道系统锚杆设计仍然需要大量的理论研究来支撑。

4.2 系统锚杆的布置形式

目前国内隧道系统锚杆的布置形式主要是矩形或梅花形两种，其布置范围和相关设计参数大多还

是依靠工程类比的经验手段确定。以铁路隧道为例，国内不同时速的单双线铁路隧道锚杆设计参数如表 1 和表 2 所示，表中的参数就是以工程类比为主确定的。由于缺少严密的理论算法支撑，隧道系统锚杆的设计不可避免的存在浪费或支护强度不足等问题，这方面的优化研究^[33-36]也主要停留在针对现场出现特定问题后的优化设计研究(例如：大变形、岩爆、黄土等)，在系统锚杆的设计参数如何与围岩参数进行匹配方面，研究成果很少。目前少量的研究成果不存在普遍适用性，所以仍需要理论研究来支撑后续的系统锚杆设计参数的确定。

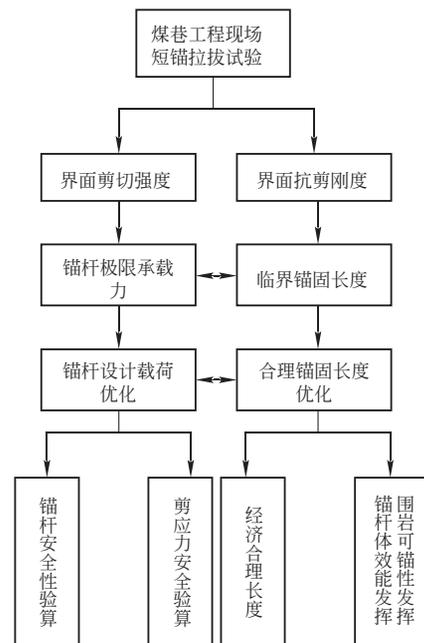


图 13 煤巷树脂锚杆合理锚固长度确定流程图^[32]
Fig. 13 Flow chart for determining reasonable anchorage length of resin bolt in coal tunnel

表 1 单线铁路隧道锚杆设计参数
Table 1 Design parameters of anchor bolts for single-track railway tunnels

围岩级别	设计位置	时速 160、200、250、350(km/h)	
		环距(m)×纵距(m)	长度(m)
Ⅲ	拱、墙	1.2×1.5	2.5
Ⅳ	拱、墙	1.2×1.2	3
Ⅴ	拱、墙	1.2×1.0	3(3.5)

注：括号内数字对应于时速 350km/h 隧道锚杆设计参数，其余时速锚杆设计参数相同。

Li^[13]在文献[37]的研究基础上提出隧道锚杆长度和间距的设计方法。Charlie C. Li 提出，为了避免施工和锚杆安装的困难，拱顶部分锚杆和边墙部分锚杆应满足式(5)和式(6)的要求：

表 2 国内现行铁路(双线)隧道锚杆设计参数

Table 2 Design parameters of anchor bolts for double-track railway tunnels

围岩级别	设计位置	时速 160、200、250、350(km/h)	
		环距(m)×纵距(m)	长度(m)
Ⅲ	拱、墙	1.2×1.5	3
Ⅳ	拱、墙	1.2×1.2	3.5(3)
Ⅴ	拱、墙	1.2×1.0	4(3.5)

注：括号内数字对应于时速 160km/h 隧道锚杆设计参数，其余时速锚杆设计参数相同。

$$L_b \leq 0.5H \text{ (拱顶)} \quad (5)$$

$$L_b \leq 0.5B \text{ (边墙)} \quad (6)$$

式中： L_b 为锚杆长度，m； H 为开挖高度，m； B 为开挖跨度，m。

在围岩破碎区高度较小时，锚杆长度至少要大于破碎区高度 1m：

$$L_b \geq d_f + 1 \quad (7)$$

式中： d_f 为围岩破碎区高度，m。

在围岩破碎区高度较大时，锚杆一般较短，锚杆长度一般选取 2~3m。

挪威公路在硬岩中锚杆长度按照式(8)设计：

$$L_b = 1.4 + 0.184B \quad (8)$$

隧道系统锚杆环向间距和纵向间距相等，一般取 1.0~2.5m。若考虑围岩节理，当节理间距在 0.3~1.0m 时，系统锚杆间距可按式(9)确定；当围岩破碎区较大时，系统锚杆间距则按式(10)确定：

$$s = (3 \sim 4)e \quad (9)$$

$$s \leq 3e \quad (10)$$

式中： s 为锚杆间距，m； e 为节理间距，m。

Charlie C. Li 提出的设计方法是基于隧道开挖过程中隧道围岩的节理特性表征以及破碎区高度的经验算法，但在实际设计过程中我们难以估计这些因素。对于特定工程，要想获取上述参数可能伴随着较长的工期，因此会导致隧道锚杆设计施工效率低下等问题。

5 系统锚杆施工问题

隧道系统锚杆施工是隧道工程的一个中间工序，也是一个分项隐蔽工程。受制于工法配套、检测技术、工程定额及大型施工机械国产率低等问题，隧道系统锚杆的自动化施工水平低下。

与锚杆类型紧密相关，不同类型的锚杆施工工艺存在较大差异。普通中空锚杆及砂浆锚杆施工工艺为：钻孔-安装锚杆-安装止浆塞-安装垫板及螺母

-注浆；自进式锚杆施工时由于采用一次性钻头，钻孔及锚杆安全整合在一个工序，即钻孔及杆体安装一次到位；摩擦型锚杆不需要注浆，但是需要采用特殊设备将锚杆涨开压紧岩壁(通常采用水压涨开)。

在隧道系统锚杆具体施做时，有三种做法：其一，采用 YT28 型风动凿岩机钻孔，人工安装杆体，再采用小型注浆设备注浆；其二，采用双臂或三臂凿岩台车钻孔，人工辅助安装杆体，采用专用注浆设备注浆；其三，采用自动锚杆台车施工，锚杆钻孔、安装及注浆全部自动化完成。

目前，我国绝大部分隧道工程中的隧道系统锚杆施工采用第一种做法，个别铁路采用了第二种做法。例如，在建的郑万高铁隧道中系统锚杆施工曾采用第二种做法^[38]，相比第一种做法，不仅提高了隧道系统锚杆的施工质量，同时也提高了锚杆的施工效率。可以预见，未来隧道系统锚杆的施工将会向全机械化和自动化的方向发展。

6 新构造锚杆及新材料锚杆

自 20 世纪 60 年代起，国内外在各类工程中大量使用锚杆(索)，这种支护的性能及可靠性已经得到证实，但是其耐久性问题是制约其长期性能的一个重要因素^[39]。近年来，为解决传统钢质锚杆(索)的耐久性问题，国内外开展了锚杆的耐腐蚀性能研究以及新型材料锚杆的应用研究^[40-44]。

关于锚杆的耐久性，目前尚无理论模型进行描述。锚杆在服役期内处在应力腐蚀和环境腐蚀复合作用的条件下，其腐蚀过程更加复杂。目前已经有一些抗腐蚀材料锚杆，例如 GFRP(玻璃纤维)锚杆、CFRP(碳纤维)锚杆、AFRP(芳纶纤维)锚杆、BFRP(玄武岩纤维)锚杆等，但其是否能够代替传统钢质锚杆作为永久支护有待进一步研究。

近年来，随着川藏铁路等重点工程的启动，铁路线上出现超长深埋和极高地应力隧道，随之带来了大变形和强岩爆治理难题。目前国内外针对隧道大变形和隧道岩爆的锚杆支护方式有一些研究，主要思路是将传统系统锚杆采用可适应大变形的吸能锚杆替代，当围岩产生大变形时其锚杆可以随着围岩产生较大量值的变形，并且可以提供稳定的支护力。

6.1 新型材料锚杆

新型材料锚杆大多表现为抗拉强度大、材料抗腐蚀性强、质量轻的特点，可以较好地避免金属锚杆的耐腐蚀性能差的问题。现阶段已经有使用玻璃

纤维锚杆用于盾构隧道掌子面临时加固的报道。在对锚杆受力研究的过程中发现^[45-52], 锚杆不仅承受拉力, 在部分地层中还可能处于受剪状态。新型材料锚杆的弱抗剪性能是否满足隧道系统锚杆的支护要求, 有必要进一步研究。

在对新型材料锚杆进行设计时, 除了考虑强度之外, 其外形构造设计也需要进一步研究。由于其力学性能以及破坏形式与常规金属锚杆不同, 所以其构造形式也需要进行专门设计。相关文献^[53-54]中采用 DDA(不连续变形分析)法分析了不同构造形式下金属锚杆与界面材料间的力学行为, 该方法为新型材料锚杆材料界面力学行为的研究提供了一种新思路。

6.2 新构造锚杆

关于新型构造锚杆的研究主要表现为吸能锚杆的开发。在 20 世纪末, 吸能锚杆的概念在南非提出, 并应用于南非的煤矿中^[55-58]。围岩大变形或岩爆可以认为是隧道周边岩体在扰动下的一种释能行为, 为保证隧道设计内轮廓, 需要对于围岩大变形和岩爆进行约束, 该过程相当于支护体系吸收了周围岩体释放的能量, 该过程可理解为“吸能”。在物理学上的概念能量即为做功, 所以对锚杆支护“吸能”的要求是既要产生一定量的变形但又不至于隧道坍塌或侵限。Stjern^[59]等人在 1995 年提出了理想的吸能锚杆的物理模型, 见图 14。

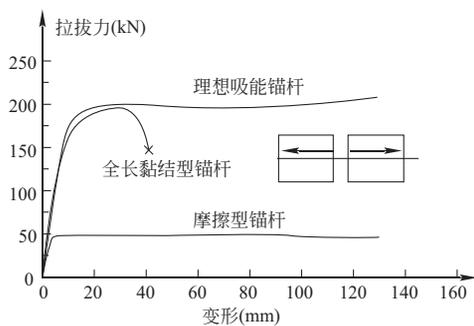


图 14 吸能锚杆理想模型

Fig. 14 Ideal model of energy-absorbing anchor bolt

目前, 国内外均有不同形式的吸能锚杆, 例如: 中国矿业大学的何满潮院士团队开发了恒阻大变形锚杆, 同济大学的孙均院士团队开发了让压锚杆, 挪威科技大学的 Charlie C. Li 团队开发的 D-bolt, 锚杆构造如图 15 所示。上述新型构造锚杆虽然命名有所区别, 但本质上都采用了“吸能”的设计概念。吸能锚杆的支护原理是能够在锚杆强化过程之前以一个较大的稳定支护作用力让围岩产生可控的变形,

进而起到释能和吸能作用。

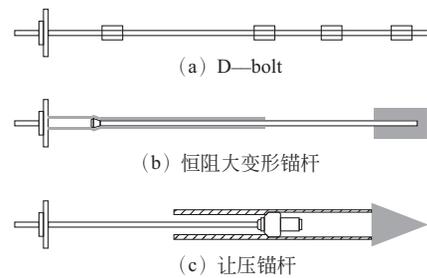


图 15 吸能锚杆示意图

Fig. 15 Schematic diagram of energy-absorbing anchor bolt

何满潮和 Charlie C. Li 均对于各自研发的吸能锚杆进行了静力和动力测试, 得出其应力应变曲线(荷载位移曲线)^[60-65]。而孙钧院士等人开发的让压锚杆在理论上则有一个较大的失效荷载^[66], 上述新型构造锚杆的荷载一位移曲线如图 16 所示。

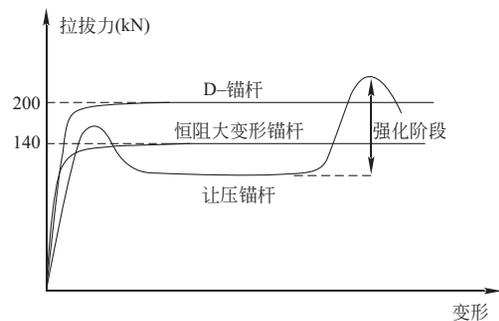


图 16 锚杆荷载-位移曲线

Fig. 16 Load-displacement curve of anchor bolt

上述分析表明, 关于新型锚杆国内外都已开展大量的研究, 新型构造或新材料锚杆主要应用于常规锚杆难以满足要求或对耐久性有严格要求的隧道支护场合。近年来, 我国隧道建设逐渐向长大及深埋方向发展, 大埋深隧道产生了软岩大变形或岩爆问题, 新型构造锚杆(主要是吸能锚杆)及不同锚杆布置形式(长短结合)在克服上述问题时展现出一定的技术优势, 上述领域是未来的发展方向之一。

7 结 论

通过对近 40 年来隧道锚杆支护相关研究成果的系统性梳理, 得出结论如下:

(1) 针对系统锚杆支护效果问题, 目前普遍认为在黄土隧道中系统锚杆在机理上难以起到加固围岩的作用, 并且由于锚杆的施作导致衬砌闭合成环时间推迟, 进而使得围岩变形加大。但是, 对于一般围岩条件下的隧道而言, 系统锚杆是必要而且有效

的支护手段之一。

(2) 在相关试验量测结果的基础上, 针对全长黏结型锚杆的受力问题, 已经有了一定的研究, 得出了全长黏结型锚杆在岩体中的轴力分布规律; 但在基于 Mindlin 位移解推导的锚杆内力解析解中尚未考虑中性点对于锚杆受力的影响。

(3) 在隧道系统锚杆的设计参数方面, 国内外主要采用的是经验方法。既有研究主要涉及单根锚杆在临界锚固长度的计算方法方面, 少量成果针对隧道系统锚杆的成拱效应开展了研究。但目前提出的理论公式中需要较多的参数, 而这些参数在施工前大多无法获取, 因此很难在实际工程中推广应用。

(4) 隧道系统锚杆施工的机械化和自动化是未来发展方向, 为达到上述目标, 需要在隧道工法配套、无损检测技术、工程定额及大型施工机械国产化等方面开展深入系统研究。

(5) 国内外对于新型构造隧道锚杆和新材料隧道锚杆开展了一定的研究, 现阶段的研究主要针对铜质锚杆存在的耐久性问题和不良地质情况下隧道施工等复杂工程问题展开。对一般围岩地段, 新型材料隧道系统锚杆的适用性研究尚无报道。

(6) 新型吸能锚杆及长短结合的锚杆布置形式有助于缓解大埋深隧道施工中遇到的硬岩岩爆和软岩大变形问题, 更为通用及造价适中的吸能锚杆是未来研究方向。

(7) 锚杆的研究热度的下降趋势反映出工程界对隧道系统锚杆作用的重要性认识不足, 在系统锚杆与围岩的匹配性及系统锚杆的成拱效应及承载机理等方面是今后的重点研究方向。

参 考 文 献

- [1] 谭忠盛, 喻渝, 王明年, 等. 大断面浅埋黄土隧道锚杆作用效果的试验研究[J]. 岩土力学, 2008, 29(2): 491-495, 506 (Tan Zhongsheng, Yu Yu, Wang Mingnian, et al. Experimental study on bolt effect on large section shallow depth loess tunnels[J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(2): 491-495, 506 (in Chinese))
- [2] 谭忠盛, 喻渝, 王明年, 等. 大断面深埋黄土隧道锚杆作用效果的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(8): 1618-1625 (Tan Zhongsheng, Yu Yu, Wang Mingnian, et al. Experimental study on bolt effect on large section deep-buried tunnel in loess[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(8): 1618-1625 (in Chinese))
- [3] 陈建勋, 王超, 罗彦斌, 等. 高含水量土质隧道不设系统锚杆的试验研究[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(5): 12-18 (Chen Jianxun, Wang Chao, Luo Yanbin, et al. Experimental research on high-water-content soil tunnel without systematic bolts [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32(5): 12-18 (in Chinese))
- [4] 陈力华, 林志, 李星平. 公路隧道中系统锚杆的能效研究[J]. 岩土力学, 2011, 32(6): 1843-1848 (Chen Lihua, Lin Zhi, Li Xingping. Study of efficacy of systematic anchor bolts in highway tunnels[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(6): 1843-1848 (in Chinese))
- [5] 刘洋, 谭忠盛. 浅埋大跨小净距桃花峪黄土隧道系统锚杆作用效果研究[J]. 隧道建设, 2015, 35(6): 514-520 (Liu Yang, Tan Zhongsheng. Study on effect of systematic anchor bolts in construction of shallow-covered large-span small-spacing loess tunnels: case study on Taohuayu tunnel [J]. Tunnel Construction, 2015, 35(6): 514-520 (in Chinese))
- [6] 杨畅, 谭忠盛, 李松涛, 等. 特长公路隧道洪积黏土围岩系统锚杆的作用效果研究[J]. 土木工程学报, 2017, 50(增 2): 127-133 (Yang Yang, Tan Zhongsheng, Li Songtao, et al. Research on the effect of systematic bolts in diluvial clay of estern extra-long highway tunnel[J]. China Civil Engineering Journal, 2017, 50(S2): 127-133 (in Chinese))
- [7] 邹育麟, 何川, 周艺, 等. 强震区软弱破碎千枚岩隧道系统锚杆支护作用效果分析[J]. 岩土力学, 2013, 34(7): 2000-2008 (Zou Yulin, He Chuan, Zhou Yi, et al. Analysis of supporting effect of systematic bolts applied to weak and broken phyllite tunnels in meizoseismal area[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(7): 2000-2008 (in Chinese))
- [8] 陈建勋, 杨善胜, 罗彦斌, 等. 软弱围岩隧道取消系统锚杆的现场试验研究[J]. 岩土力学, 2011, 32(1): 15-20 (Chen Jianxun, Yang Shansheng, Luo Yanbin, et al. Field test research on elimination of systematic rock bolts in weak rock tunnel[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(1): 15-20 (in Chinese))
- [9] 王建宇. 地下工程喷锚支护原理和设计[M]. 北京: 中国铁道出版社, 1980
- [10] 关宝树. 隧道工程设计要点集[M]. 北京: 人民交通出版社, 2003
- [11] 王梦恕. 地下工程浅埋暗挖技术通论[M]. 合肥: 安徽教育出版社, 2004
- [12] 重庆建筑工程学院, 同济大学, 哈尔滨建筑工程学院, 等. 岩石地下建筑结构[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1982
- [13] Li C C. Principles of rock-bolting design[J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2017, 9(3): 396-414
- [14] Hoek E. Practical rock engineering-rock bolts and cables [M]. Toronto: Rocscience, 2007
- [15] 赵俭斌, 易南概, 高德山, 等. 承压拱在隧道喷锚支护参数优化设计中的应用[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2003, 35(6): 677-678, 697 (Zhao Jianbin, Yi Nangai, Gao Deshan, et al. Application of bearing arch to optimization of tunnel combined bolting and shotcreting parameters. [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2003, 35(6): 677-678, 697 (in Chinese))
- [16] 郭小红, 王梦恕. 隧道支护结构中锚杆的能效分析[J]. 岩土力学, 2007, 28(10): 2234-2239 (Guo Xiaohong,

- Wang Mengshu. Analysis of efficacy of rock bolt for tunnel support structure[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2007, 28(10): 2234-2239 (in Chinese))
- [17] 章慧健, 仇文革, 卿伟宸. 多部开挖系统锚杆轴力分布特点研究[J]. *铁道学报*, 2013, 35(12): 90-94 (Zhang Huijian, Qiu Wenge, Qing Weichen. Study on distribution of axial forces of systematic anchor bars in tunnel multi-partition excavation [J]. *Journal of The China Railway Society*, 2013, 35(12): 90-94 (in Chinese))
- [18] 黄耀英, 郑宏. 系统锚杆对节理岩体等效凝聚力影响数值试验初探[J]. *煤炭学报*, 2010, 35(9): 1440-1445 (Huang Yaoying, Zheng Hong. Preliminary study of reinforced effect for jointed rock's equivalent cohesion with system anchor rod by numerical test [J]. *Journal of China Coal Society*, 2010, 35(9): 1440-1445 (in Chinese))
- [19] Bobet A, Einstein H H. Tunnel reinforcement with rock-bolts[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2011, 26(1): 100-123
- [20] 尤春安. 全长粘结式锚杆的受力分析[J]. *岩石力学与工程学报*, 2000, 19(3): 339-341 (You Chun'an. Mechanical analysis on wholly grouted anchor [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2000, 19(3): 339-341 (in Chinese))
- [21] Freeman T J. The behavior of fully-bonded rock bolts in the Kielder experimental tunnel[J]. *Tunnels and Tunnelling*, 1978, 10(5): 37-40
- [22] Mindlin R D. Force at a point in the Interior of a semi-infinite solid[J]. *Physics*, 1936, 7(5): 195-202
- [23] Li C. Analytical study of the behavior of rock bolts[M]. Amsterdam: Balkema Publishers, 2000
- [24] Li C. Analytical models for rock bolts[J]. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 1999, 36(8): 1013-1029
- [25] Guan Z, Jiang Y, Tanabasi Y, et al. Reinforcement mechanics of passive bolts in conventional tunnelling[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2007, 44(4): 625-636
- [26] 赵俭斌. 隧道喷锚支护衬砌参数的优化研究[R]. 沈阳: 沈阳建筑工程学院, 朝阳交通局, 2000
- [27] Hobst L, Zajic J. Anchoring in rock and soil[M]. New York: Elsevier Scientific Publishing Company, 1983
- [28] 曾宪明, 林大路, 李世民, 等. 锚固类结构杆体临界锚固长度问题综合研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2008, 28(增2): 3609-3625 (Zeng Xianming, Lin Dalu, Li Shimin, et al. Comprehensive research of critical anchorage length problem of rod of anchorage structure [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2008, 28(S2): 3609-3625 (in Chinese))
- [29] 张洁, 尚岳全, 叶彬. 锚杆临界锚固长度解析计算[J]. *岩石力学与工程学报*, 2005, 24(7): 1134-1138 (Zhang Jie, Shang Yuequan, Ye Bin. Analytical calculations of critical anchorage length of bolts [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2005, 24(7): 1134-1138 (in Chinese))
- [30] 龙照, 赵明华, 张恩祥, 等. 锚杆临界锚固长度简化计算方法[J]. *岩土力学*, 2010, 31(9): 2991-2994, 3011 (Long Zhao, Zhao Minghua, Zhang Enxiang, et al. A simplified method for calculating critical anchorage length of bolt [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2010, 31(9): 2991-2994, 3011 (in Chinese))
- [31] 张德华, 王梦恕, 符华兴, 等. 强挤压型隧道锚杆支护参数的确定[J]. *岩石力学与工程学报*, 2004, 23(13): 2201-2204 (Zhang Dehua, Wang Mengshu, Fu Huaxing, et al. Determination of parameters for bolts in strong extrusion tunnel [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2004, 23(13): 2201-2204 (in Chinese))
- [32] 李怀珍, 李学华. 基于界面滑移脱黏的锚杆合理锚固长度研究[J]. *岩土力学*, 2017, 38(11): 3106-3112, 3172 (Li Huaizhen, Li Xuehua. Determination of rational anchorage length of bolt based on slip-debonding failure mode of interface [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2017, 38(11): 3106-3112, 3172 (in Chinese))
- [33] 章荣军, 郑俊杰, 杨庆年. 地震作用下浅埋隧道系统锚杆参数优化[J]. *华中科技大学学报: 自然科学版*, 2009, 37(5): 98-101 (Zhang Rongjun, Zheng Junjie, Yang Qingnian. Parameter optimization for systematic bolts of shallow tunnel under earthquake action [J]. *Journal of Huazhong University of Science and Technology: Natural Science Edition*, 2009, 37(5): 98-101 (in Chinese))
- [34] 吴金刚, 陈仁东, 杨冰, 等. 公路隧道预设计中系统锚杆配置范围的研究[J]. *土木工程学报*, 2012, 45(2): 147-154 (Wu Jingang, Chen Rendong, Yang Bing, et al. A study of the distribution range of system anchors in highway tunnel pre-design [J]. *China Civil Engineering Journal*, 2012, 45(2): 147-154 (in Chinese))
- [35] 章慧健, 仇文革, 赵斌, 等. 系统锚杆的非均衡支护研究[J]. *现代隧道技术*, 2015, 52(1): 98-104 (Zhang Huijian, Qiu Wenge, Zhao Bin, et al. Research on nonuniform support of system anchor bolts [J]. *Modern Tunnelling Technology*, 2015, 52(1): 98-104 (in Chinese))
- [36] 张社荣, 顾岩, 张宗亮. 超大型地下洞室围岩锚杆支护方式的优化设计[J]. *水力发电学报*, 2007, 26(5): 47-52 (Zhang Sherong, Gu Yan, Zhang Zongliang. The optimized design of rock-bolts supporting the large-scale underground cavities [J]. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2007, 26(5): 47-52 (in Chinese))
- [37] Barton N R, Lien R, Lunde J. Engineering classification of rock masses for the design of tunnel support [J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 1974, 6(4): 189-236
- [38] 王志坚. 郑万高铁隧道大断面机械化施工关键技术研究[J]. *隧道建设(中英文)*, 2018, 38(8): 1257-1270 (Wang Zhijian. Research on key technology of large cross-sectional mechanized construction of Zhengzhou-Wanzhou High-speed railway tunnel [J]. *Tunnel Construction*, 2018, 38(8): 1257-1270 (in Chinese))
- [39] 曾宪明, 雷志梁, 张文巾, 等. 关于锚杆“定时炸弹”问题的讨论——答郭映忠教授[J]. *岩石力学与工程学报*, 2002, 21(1): 143-147 (Zeng Xianming, Lei Zhiliang, Zhang Wenjin, et al. Discussion about “time bomb” question for bolt—an answer to professor guo yingzhong [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2002, 21(1): 143-147 (in Chinese))

- [40] Li F, Jin H, Hu D, et al. Influence of temperature and roughness of surrounding rocks on mechanical behavior of rock bolts[J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2017, 103(12): 55-63
- [41] 肖玲, 李长松, 曾宪明, 等. 承载锚杆与非承载锚杆腐蚀力学性能对比试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2007, 26(4): 720-726 (Xiao Ling, Li Changsong, Zeng Xianming, et al. Comparison test study on mechanical performance of loaded bolt and unloaded bolt against corrosion[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2007, 26(4): 720-726 (in Chinese))
- [42] 高丹盈, 张钢琴. 纤维增强塑料锚杆锚固性能的数值分析[J]. *岩石力学与工程学报*, 2005, 24(20): 3724-3729 (Gao Danying, Zhang Gangqin. Numerical analysis of anchorage behavior of fiber reinforced plastic bolts[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2005, 24(20): 3724-3729 (in Chinese))
- [43] 贾新, 袁勇, 李焯芬. 新型玻璃纤维增强塑料砂浆锚杆的黏结性能试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2006, 25(10): 2108-2114 (Jia Xin, Yuan Yong, Lee C F. Experimental study on bond behavior of new type cement grouted gfrp bolts[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2006, 25(10): 2108-2114 (in Chinese))
- [44] 何满潮, 李晨, 宫伟力, 等. NPR 锚杆/索支护原理及大变形控制技术[J]. *岩石力学与工程学报*, 2016, 35(8): 1513-1529 (He Manchao, Li Chen, Gong Weili, et al. Support principles of NPR bolts/cables and control techniques of large deformation[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2016, 35(8): 1513-1529 (in Chinese))
- [45] 刘波, 陶龙光, 李先炜, 等. 锚杆拉剪大变形应变分析[J]. *岩石力学与工程学报*, 2000, 19(3): 334-334 (Liu Bo, Tao Longguang, Li Xianwei, et al. Analysis on bolt strain with large deformation under shearing-tensile load[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2000, 19(3): 334-334 (in Chinese))
- [46] Song H, Duan Y, Yang J. Numerical simulation on bolted rock joint shearing performance[J]. *Mining Science and Technology (China)*, 2010, 20(3): 460-465
- [47] Li L, Hagan P C, Saydam S, et al. Shear resistance contribution of support systems in double shear test[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2016, 56: 168-175
- [48] Ferrero A M. The shear strength of reinforced rock joints[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Science & Geomechanics Abstracts*, 1995, 32(6): 595-605
- [49] Bo L, Tao L G, Zhou H W, et al. Calculation of complete curve of shear resistance for bolted rock joints based on large deformation analysis[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2004, 26(1): 140-144
- [50] Liu J, Yang H, Wen H, et al. Analytical model for the load transmission law of rock bolt subjected to open and sliding joint displacements[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2017, 100: 1-9
- [51] Forbes B, Vlachopoulos N, Hyett A J, et al. A new optical sensing technique for monitoring shear of rock bolts[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2017, 66: 34-46
- [52] Tahmasebinia F, Zhang Chengguo, Canbulatet I, et al. Numerical and analytical simulation of the structural behaviour of fully grouted cable bolts under impulsive loading[J]. *International Journal of Mining Science and Technology*, 2018, 28: 807-811
- [53] Cao C, Ren T, Cook C, et al. Analytical approach in optimising selection of rebar bolts in preventing rock bolting failure[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2014, 72: 16-25
- [54] Yokota Y, Zhao Z, Shang J, et al. Effect of bolt configuration on the interface behaviour between a rock bolt and bond material: A comprehensive DDA investigation[J]. *Computers and Geotechnics*, 2019, 105: 116-128
- [55] Ortlev W D. The design of support for the containment of rock burst damage in tunnels—an engineering approach [C]//*Proceedings of the Rock support in mining and underground construction*. Rotterdam: A A Balkema, 1992
- [56] Jager A J. Two new support units for the control of rock burst damage [C]//*Proceedings of the Rock support in mining and underground construction*. Rotterdam: A A Balkema, 1992
- [57] Li C C, Stjern G, Myrvang A. A review on the performance of conventional and energy-absorbing rockbolts[J]. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 2014, 6(4): 315-327
- [58] Li C C. A new energy-absorbing bolt for rock support in high stress rock masses[J]. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 2010, 47(3): 396-404
- [59] Stjern G. Practical performance of rock bolts[D]. Trondheim: Norwegian University of Science and Technology, 1995
- [60] 宫伟力, 孙雅星, 高霞, 等. 基于落锤冲击试验的恒阻大变形锚杆动力学特性[J]. *岩石力学与工程学报*, 2018, 37(11): 2498-2509 (Gong Weili, Sun Yaxing, Gao Xia, et al. Characteristics of constant-resistance-large-deformation bolts based on weight-dropping tests[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2018, 37(11): 2498-2509 (in Chinese))
- [61] 何满潮, 郭志彪, 等. 恒阻大变形锚杆力学特性及其工程应用[J]. *岩石力学与工程学报*, 2014, 33(7): 1297-1308 (He Manchao, Guo Zhibiao, et al. Mechanical property and engineering application of anchorbolt with constant resistance and large deformation[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2014, 33(7): 1297-1308 (in Chinese))
- [62] He M, Li C, Gong W, et al. Dynamic tests for a constant-resistance-large-deformation bolt using a modified SHTB system[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2017, 64: 103-116
- [63] Li C C, Doucet C. Performance of D-bolts under dynamic loading[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2012, 45(2): 193-204
- [64] Li C C. Performance of D-bolts under static loading[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2012, 45(2):

- 183-192
- [65] 张彪, 张志强, 汪波, 等. 让压锚杆在大变形隧道支护应用中试验研究[J]. 岩土力学, 2016, 37(7): 2047-2055 (Zhang Biao, Zhang Zhiqiang, Wang Bo, et al. Experimental study of application of yielding bolt to large deformation tunnel[J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, 37(7): 2047-2055 (in Chinese))
- [66] 孙钧, 潘晓明, 王勇. 隧道软弱围岩挤压大变形非线性

流变力学特征及其锚固机制研究[J]. 隧道建设, 2015, 35(10): 969-980 (Sun Jun, Pan Xiaoming, Wang Yong. Study on non-linear rheologic mechanical property of squeezing deformation of soft surrounding rock in tunneling and its anchorage mechanism [J]. Tunnel Construction, 2015, 35(10): 969-980 (in Chinese))

赵东平(1979—),男,博士,教授级高级工程师、副教授。主要从事隧道锚杆支护技术、隧道结构可靠度理论及隧道通风防灾技术研究。

王卢伟(1996—),男,硕士研究生。主要从事隧道锚杆支护设计理论方面的研究。

喻 渝(1967—),男,硕士,教授级高级工程师。主要从事隧道及地下工程设计方面的研究。

刘建友(1982—),男,博士,高级工程师。主要从事隧道及地下工程设计方面的研究。

(上接第 44 页)

- [5] 冯若强, 王希, 朱洁, 等. 北京新机场装配式单层铝合金网壳结构整体稳定性能研究[J]. 建筑结构学报, 2019, 41(4): 11-18 (Feng Ruoqiang, Wang Xi, Zhu Jie, et al. Stability analysis of single-layer aluminium alloy reticulated shells with Temcor joints at Beijing new airport[J]. Journal of Building Structures, 2019, 41(4): 11-18 (in Chinese))
- [6] 沈祖炎, 郭小农, 李元齐. 铝合金结构研究现状简述[J]. 建筑结构学报, 2007, 28(6): 100-109 (Shen Zuyan, Guo Xiaonong, Li Yuanqi. State-of-the-arts of research on aluminum alloy structures [J]. Journal of Building Structures, 2007, 28(6): 100-109 (in Chinese))
- [7] Guo X, Xiong Z, Luo Y, et al. Application of the component method to aluminum alloy gusset joints[J]. Advances in Structural Engineering, 2015, 18(11): 1931-1946
- [8] López A, Puente I, Serna M A. Numerical model and experimental tests on single-layer latticed domes with semi-rigid joints[J]. Computers & Structures, 2007, 85(7/8): 360-374
- [9] Liu H B, Ding Y Z, Chen Z H. Static stability behavior of aluminum alloy single-layer spherical latticed shell structure with Temcor joints[J]. Thin-Walled Structures, 2017, 120: 355-365
- [10] Guo X N, Xiong Z, Luo Y F, et al. Experimental investigation on the semi-rigid behaviour of aluminium alloy gusset joints[J]. Thin-Walled Structures, 2015, 87: 30-40

- [11] Xiong Z, Guo X N, Luo Y F, et al. Experimental and numerical studies on single-layer reticulated shells with aluminium alloy gusset joints[J]. Thin-Walled Structures, 2017, 118: 124-136
- [12] Shi M, Xiang P, Wu M. Experimental investigation on bending and shear performance of two-way aluminum alloy gusset joints [J]. Thin-Walled Structures, 2018, 122: 124-136
- [13] 张竞乐, 赵金城, 许洪明. 单层网壳板式节点的刚度分析[J]. 工业建筑, 2005, 35(4): 88-90 (Zhang Jingle, Zhao Jincheng, Xu Hongming. Analysis of stiffness of gusset-type joints for single-layer reticulated shells [J]. Industrial Construction, 2005, 35(4): 88-90 (in Chinese))
- [14] Xu S, Chen Z H, Wang X D, et al. Hysteretic out-of-plane behavior of the Temcor joint[J]. Thin-Walled Structures, 2015, 94: 585-592
- [15] 徐晗. 铝合金螺栓连接节点性能研究[D]. 上海: 同济大学, 2012 (Xu Han. The loading behavior of aluminum alloy bolted connections and joints [D]. Shanghai: Tongji University, 2012 (in Chinese))
- [16] GB 50429—2007 铝合金结构设计规范[S]. 北京: 中国计划出版社, 2008 (GB 50429—2007 Code for design of aluminium structures[S]. Beijing: China Planning Press, 2008 (in Chinese))

张志杰(1994—),男,博士研究生。主要从事大跨空间结构方面的研究。

冯若强(1978—),男,博士,教授。主要从事大跨空间结构的研究。

刘峰成(1988—),男,博士研究生。主要从事大跨空间结构的研究。