

国家自然科学基金专项基金(51227003)

国家自然科学基金青年基金(51104151)

中央高校基本科研业务费专项资金(2011QNA18)

煤矿非全长黏结锚杆 无损检测技术开发与应用

张 凯 吴 宇 周跃进 薛道成 著

中国矿业大学出版社

China University of Mining and Technology Press

国家自然科学基金专项基金(512270033)

国家自然科学基金青年基金(51104151)

中央高校基本科研业务费专项资金(2011QNA18)

煤矿非全长黏结锚杆无损检测 技术开发与应用

张 凯 吴 宇 周跃进 薛道成 著

中国矿业大学出版社

内 容 提 要

本书针对煤矿非全长黏结锚杆的无损检测开展了系统的理论和试验研究,建立了锚杆锚固质量及工作状态的无损检测方法和技术。首先,利用弹性波传播和梁振动理论,研究了弹性波在非全长黏结锚杆中的传播规律以及外部激励下锚杆的振动规律,基于此提出了非全长黏结锚杆锚固质量及工作状态的检测方法和流程;然后,利用信号处理和电路设计方法研制了锚杆锚固质量动力无损检测仪及测试分析软件;最后,进行了大量的室内和现场试验,验证和完善了所开发的锚杆无损检测技术。

本书可供从事采矿工程、隧道工程,工程力学等专业的科技工作者、研究生参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

煤矿非全长黏结锚杆无损检测技术开发与应用/张
凯等著. —徐州:中国矿业大学出版社, 2013. 12
ISBN 978 - 7 - 5646 - 2026 - 4
I. ①煤… II. ①张… III. ①煤矿开采—锚杆支护—
无损检测—研究 IV. ①TD353
中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 214077 号

书 名 煤矿非全长黏结锚杆无损检测技术开发与应用
著 者 张 凯 吴 宇 周跃进 薛道成
责任编辑 杨 洋
出版发行 中国矿业大学出版社有限责任公司
(江苏省徐州市解放南路 邮编 221008)
营销热线 (0516)83885307 83884995
出版服务 (0516)83885767 83884920
网 址 <http://www.cumtp.com> E-mail: cumtpvip@cumtp.com
印 刷 徐州中矿大印发科技有限公司
开 本 787×960 1/16 印张 8.25 字数 148 千字
版次印次 2013 年 12 月第 1 版 2013 年 12 月第 1 次印刷
定 价 25.00 元

(图书出现印装质量问题,本社负责调换)

前 言

我国煤矿主要为井工开采,由于地质条件复杂多变,加上生产技术和管理水平有待进一步提高,煤矿安全事故一直制约着煤矿的高效生产。为了确保煤矿生产的安全,国家已经实施了很多措施,包括关停中小煤矿等,然而煤矿安全事故仍然时有发生,其中巷道顶板垮落事故占据较大比重。煤矿巷道发生顶板事故的原因:一方面是地质条件复杂,顶板事故多发生于有断层影响的地质条件异常区域;另一方面是缺乏对支护结构工作状态的检测和监测,不能掌握事故发生之前支护结构的异常信息。

锚杆支护具有成本低、施工简便、支护性能可靠等优点,自 19 世纪末投入工程应用以来,在岩土工程中发挥了重要作用。目前,锚杆支护是我国煤矿井下巷道支护的主要手段,我国很多矿区煤巷锚杆支护率达到 60%,有些矿区超过了 90%,甚至达到 100%。随时、实时检测巷道锚杆支护的质量与工作状态,对确保锚杆支护工程质量的可靠性与煤矿生产安全具有重要意义。目前,锚杆支护质量检测手段主要有拉拔试验和锚杆测力计等,这些方法要么对锚杆锚固结构产生损伤,要么需要事先布置测点并安装相关的传感器等,均不适于大范围应用。

鉴于目前锚杆施工质量和工作状态检测方面存在的不足,作者所在课题组在锚杆支护无损检测领域进行了长期的研究,在理论和方法上都取得了一定的突破,开发了锚杆无损检测技术。该项技术可以在对锚杆锚固状态没有扰动的条件下,一方面可以快速测定锚杆的特征长度,包括自由段长度、锚固长度和全长,从而评价锚杆的施工质量;另一方面可以测定锚杆当前受到的轴力,结合拉拔试验测得的锚固力可以用于评价锚杆的工作状态是否正常。目前,该项技术已在数个矿区得到了推广应用,为了便于煤矿现场人员更好地掌握该技术,作者在本书中对课题组的研究成果进行了总结。考虑到本书主要面向煤矿生产一线的工作人员,内容选取上偏向于工程应用,在理论上仅作简单介绍。

本书是作者所在课题组多年研究成果的总结,在写作过程中综合了同课题

组科研人员的研究成果,同时广泛参阅了国内外的相关论著,在此谨表谢意。本书的写作和出版得到了中国矿业大学缪协兴教授的鼓励和支持,在此表示衷心的感谢。感谢课题组茅献彪教授、白海波教授、王连国教授、赵玉成教授、陈占清教授、浦海教授、马占国教授等给予的指导和帮助。同时,感谢中国矿业大学出版社编辑为本书出版所付出的辛勤工作。

相关的研究和本书的出版得到了国家自然科学基金专项基金项目(51227003)、国家自然科学基金青年基金(51104151)和中央高校基本科研业务费专项资金(2011QNA18)的资助,在此表示诚挚的谢意。

深部岩土力学与地下工程国家重点实验室为本书的研究工作提供了完备的试验条件和良好的工作环境,在此表示感谢。

由于作者水平有限,写作也比较仓促,书中难免有疏漏之处,恳请读者谅解与指正。

作者

2013年7月

目 录

1 绪论	1
1.1 背景与意义	1
1.2 国内外现状	3
1.2.1 锚杆施工质量控制与检测	3
1.2.2 锚杆支护无损检测理论与技术	5
2 煤矿锚杆支护无损检测原理	9
2.1 锚杆长度检测的原理和方法	9
2.1.1 锚杆纵向振动力学模型	9
2.1.2 纵向波传播特性	10
2.1.3 纵向波在锚固界面处的传播特征	12
2.1.4 锚杆长度检测方法	16
2.2 锚杆轴力检测的原理与方法	16
2.2.1 锚杆横向振动力学模型	16
2.2.2 横向固有频率	17
2.2.3 轴力对横向固有频率的影响	20
2.2.4 围岩状态对横向固有频率的影响	25
2.2.5 锚杆轴力检测方法	27
3 锚杆支护无损检测仪的研制	29
3.1 锚杆支护无损检测仪的构成	29
3.1.1 总体构成	29
3.1.2 硬件系统	31
3.1.3 软件系统	35
3.2 信号采集系统	37

3.2.1	主要技术性能参数	37
3.2.2	信号采集原理及工作流程	38
3.3	激振与拾振系统	40
3.3.1	长度无损检测的激振与拾振	40
3.3.2	轴力无损检测的激振与拾振	44
3.4	信号分析系统	47
3.4.1	锚杆长度分析系统	47
3.4.2	锚杆轴力分析系统	53
3.5	巷道锚杆支护状态评价	55
3.5.1	单根锚杆支护状态评价	56
3.5.2	巷道锚杆支护状态评价方法	58
4	锚杆支护无损检测的试验研究	61
4.1	实验室试验	61
4.1.1	试验系统的建立和测试方案	61
4.1.2	锚杆长度检测与分析	63
4.1.3	锚杆轴力检测与分析	65
4.2	模拟巷道试验	67
4.2.1	模拟巷道概况	67
4.2.2	锚杆长度检测与分析	69
4.2.3	锚杆轴力检测与分析	71
4.3	煤矿井下试验	72
4.3.1	试验内容	72
4.3.2	锚杆长度检测与分析	73
4.3.3	锚杆轴力检测与分析	76
4.3.4	井下试验总结	80
5	锚杆无损检测技术的工程实践	81
5.1	淮北矿区的工程应用	81
5.1.1	试验巷道概况	81
5.1.2	锚杆长度检测结果及分析	83

5.1.3 锚杆轴力检测结果及分析	89
5.2 枣庄矿区的工程应用	94
5.2.1 试验巷道概况	94
5.2.2 锚杆长度检测结果及分析	101
5.2.3 锚杆轴向受力检测结果及分析	103
5.3 潞安矿区的工程应用	109
5.3.1 试验巷道概况	109
5.3.2 锚杆长度检测结果及分析	110
5.3.3 锚杆轴向受力检测结果及分析	114
6 结语	118
参考文献	120

1 绪 论

1.1 背景与意义

进入 21 世纪,我国经济快速发展,对能源的需求量持续增加。煤炭作为我国经济的主要能源供给,其在一次性能源结构中的比重一直在 70%左右,在相当长的一段时期内,持续稳定的煤炭供给将是我国经济建设稳步发展的基础。因此,煤炭资源的安全高效开发直接关系到国民经济的健康发展。

我国煤矿主要为井工开采,由于地质条件的复杂多变,加上生产技术和管理水平有待进一步提高,煤矿的安全事故一直制约着煤矿的高效生产。为了确保煤矿生产的安全,国家已经实施了很多措施,包括关停中小煤矿等,然而煤矿安全事故仍然时有发生,其中巷道顶板垮落事故占据较大比重。据我国煤矿 2010 年 1~4 月统计结果,全国煤矿生产共发生各类事故死亡 771 人,其中因顶板事故死亡居首位(达 250 人),占 51.2%。每年因支护结构失效而发生的巷道顶板垮落事故死亡人数约 800 多人,无论事故发生的次数和死亡的人数都高于煤矿瓦斯等灾害。煤矿巷道发生顶板事故的原因,一方面是地质条件复杂,顶板事故多发生于有断层影响的地质条件异常区域^[1];另一方面是缺乏对支护结构工作状态的检测和监测,不能掌握事故发生之前支护结构的异常信息。

锚杆支护具有成本低、施工简便、支护性能可靠等优点,自 19 世纪末投入工程应用以来,在岩土工程中发挥了重要作用。目前,锚杆支护是我国煤矿井下巷道支护的主要手段,我国很多矿区煤巷锚杆支护率达到 60%,有些矿区超过了 90%,甚至达到 100%^[2]。尽管《煤矿安全规程》和《煤巷锚杆支

护技术规范》等对锚杆支护技术有明确的施工和检验要求,煤矿生产单位也在生产实践中积累了很多经验,但仍无法避免锚杆支护相关的事故。2003年某矿施工的一条综采机巷发生了一起冒顶堵人事故,自扒矸机前 3.2 m 到迎头向后 6.4 m、长 7.8 m 的范围内顶板全部冒落,初始冒高最大 5.5 m,冒宽 2.8~3.6 m。调研事故现场发现锚杆和锚索的锚固长度未达到设计要求,设计中每孔三支药卷,锚杆的锚固长度 1.8~1.9 m,锚索约 1.3 m。而实际回收 40 根锚杆,其中 30 根锚杆的锚固长度在 1.0~1.3 m 之间,10 根仅 0.6~0.8 m,明显不符合要求,锚索的锚固长度平均约 2.4 m,远大于 1.3 m。据此可推断,在锚杆安装时锚固剂数量不足,而锚索在施工过程中,锚固剂中途损失一部分,锚固段不实,锚固效果不理想,引起抗拉强度降低^[3]。

锚杆的施工质量直接决定了锚杆支护的安全性,事故发生后,可以通过失效的锚杆看到锚杆的锚固质量,但是这时已经造成无法挽回的损失。因此,实现随时、实时检测巷道锚杆支护的质量与工作状态,对确保锚杆支护工程质量的可靠性与煤矿生产安全具有重要意义。目前,锚杆支护质量检测可分为两大类:破坏性试验和无损检测。锚杆破坏性检测试验主要为锚杆的抗拉拔试验,该试验是借助于专用的锚杆拉拔仪对锚杆实施轴向拉伸,直至锚杆被拉动,测得锚杆最大的抗拉拔力,即锚固力,随之被测锚杆的支护作用丧失。锚杆的无损检测方法有:借助于测力锚杆、液压枕或专用压力传感器,测出锚杆的实时轴力,属静力无损检测方法。这些检测方法的主要缺点:① 改变了锚杆支护系统的结构或支护状态,测得的结果与实际受力状况存在较大差异;② 需要事先布置测点并安装相关的传感器等,不能大面积、随机地实施锚杆支护质量等检测。

鉴于目前锚杆施工质量和工作状态检测方面存在的不足,笔者所在课题组在锚杆支护无损检测领域进行了长期的研究,在理论和方法上都取得了一定的突破,开发了锚杆无损检测技术。该项技术可以在对锚杆锚固状态没有扰动的条件下,一方面可以快速测定锚杆的特征长度,包括自由段长度、锚固长度和全长,从而评价锚杆的施工质量;另一方面可以测定锚杆当前受到的轴力,结合拉拔试验测得的锚固力可以用于评价锚杆的工作状态是否正常。

目前,该项技术已在数个矿区得到了推广应用,为了便于煤矿现场人员更好地掌握该技术,本书简要介绍了该项技术的基本原理和仪器设备的构成,并重点介绍了室内试验和现场应用情况。

1.2 国内外现状

1.2.1 锚杆施工质量控制与检测

为了对锚杆的施工质量进行控制,《煤矿安全规程》对锚杆的现场施工过程有明确的要求:

① 锚杆、锚喷等支护的端头与掘进工作面的距离,锚杆的形式、规格、安装角度,混凝土标号、喷体厚度,挂网所采用金属网的规格以及围岩涌水的处理等,必须在施工组织设计或作业规程中规定。

② 采用钻爆法掘进的岩石巷道,必须采用光面爆破。

③ 打锚杆眼前,必须首先敲帮问顶,将活矸处理掉,在确保安全的条件下方可作业。

④ 使用锚固剂固定锚杆时,应将孔壁冲洗干净,砂浆锚杆必须灌满填实。

⑤ 软岩使用锚杆支护时,必须全长锚固。

⑥ 锚杆必须按规定做拉力试验。煤巷还必须进行顶板离层监测,并用记录牌板显示。对喷体必须做厚度和强度检查,并有检查和试验记录。在井下做锚固力试验时,必须有安全措施。

⑦ 锚杆必须用机械或力矩扳手拧紧,确保锚杆的托板紧贴巷壁。

煤炭行业标准《煤巷锚杆支护技术规范》(MT/T 1104—2009)对煤巷锚杆支护设计提出了具体的要求,如采区巷道布置时,应尽量使煤巷的轴线方向与最大水平主应力的方向平行;支护设计应采用动态设计方法,设计应在地质力学评估的基础上按以下程序进行:初始设计→井下监测→信息反馈→正式设计。受实际开采区域地质条件和施工工艺水平的影响,目前很

多煤矿无法完全满足技术规范的要求。

在锚杆施工方面,技术规范在锚杆孔施工和锚杆安装方面都给做了详细的规定。

锚杆孔施工时要求:

① 顶板锚杆孔应由外向掘进工作面逐排顺序施工,每排锚杆孔宜由中间向两帮顺序施工。

② 锚杆孔实际钻孔角度相对设计角度的偏差应不大于 5° 。

③ 锚杆孔的间排距误差应不超过 100 mm。

④ 锚杆孔深度误差应在 0~30 mm。

⑤ 锚杆孔内的煤岩粉应吹干净。

锚杆安装时要求:

① 锚杆安装应优先采用快速安装工艺。

② 锚固剂使用前应进行检查,不应使用过期、硬结、破裂等变质失效的锚固剂。

③ 当使用两卷以上不同型号的树脂锚固剂时,应按锚固剂凝固速度先快后慢的顺序,将锚固剂依次放入钻孔中,先将锚固剂推到孔底,再启动锚杆钻机搅拌树脂锚固剂。

④ 螺母应采用机械设备紧固,需要二次紧固时,其扭矩或预紧力大小、紧固时间应在作业规程、措施中明确规定。

⑤ 螺母安装达到规定预紧力矩后,一般不得将螺母卸下重新安装。

⑥ 托板应紧贴钢带、网或巷道围岩表面,当锚杆与巷道的周边不垂直时应使用异型托板。

⑦ 锚杆托板与螺母之间宜使用减摩垫圈。

如果严格遵循《煤矿安全规程》和《煤巷锚杆支护技术规范》的要求设计和安装锚杆,即使在围岩条件比较差的区域,锚杆的锚固质量也可以确保。但是现场施工时,很难保证施工过程完全符合规程和规范的要求,这也是造成锚杆事故的主要原因。因此,加强锚杆锚固质量和预紧力的检测,对控制锚杆施工质量有重要作用。《煤巷锚杆支护技术规范》对相关内容也做了

规定。

技术规范中说明,锚杆支护施工质量检测的内容包括锚杆(索)锚固力检测、锚杆(索)安装几何参数检测、锚杆(索)预紧力矩或预紧力检测、锚杆(索)托板安装质量检测、组合构件和网安装质量检测、喷射混凝土的强度和喷层厚度检测。在锚固力检测方面,采用锚杆拉拔计进行检测,锚杆锚固力检测抽样率为3%,每300根顶、帮锚杆各抽样一组(共9根)进行检查,不足300根时,按300根进行。规定锚杆锚固力均不低于设计锚固力为合格。如有一根低于设计锚固力,应重新抽样检测,如重新检测的锚杆锚固力均不低于锚杆设计锚固力为合格,如仍有一根不合格则判别锚杆施工安装质量为不合格。在锚杆预紧力或力矩检测方面,要求抽样率不低于5%,每300根顶、帮锚杆抽样各一组(共15根)进行检测,不足300根时,按300根进行。锚杆预紧力或力矩不低于设计预紧力矩的90%为合格。

1.2.2 锚杆支护无损检测理论与技术

传统的锚杆检测方法,如拉拔试验^[4,5]、锚杆应力计或测力锚杆监测^[6,7]等,得到了广泛应用,在控制锚杆施工质量和掌握锚杆工作状态方面起到了积极的作用,但是这些检测和监测手段的缺点也是很明显的,有的对锚杆锚固状态产生扰动,有的只能定点监测,均不利于大范围使用。相比传统的检测手段,无损检测方法具有明显的优越性,可以实现随机和随时检测巷道锚杆支护的质量与工作性能,是对传统检测手段的一个有力补充,甚至可替代传统检测方法。

20世纪70年代以来,国内外许多研究人员对锚杆无损检测进行了大量的研究,这些研究工作主要集中于锚杆锚固质量检测方面。这方面的研究与桩基质量检测^[8]的原理类似,都是基于弹性波或电磁波在不同介质中反射、折射和透射规律。

国内外相继研制了锚杆锚固质量无损检测设备,但均未在实际工程中广泛使用。1988年,瑞典的图尔纳(H. F. Thurner)提出用检测超声波能量损耗的原理来检测锚杆系统的灌注质量^[9],并研制了 Boltometer 锚杆质量检测仪,

这是第一台在市场上可以买到的锚杆锚固质量检测仪。该仪器的基本原理是从锚杆外露端输入纵(P)波和横(S)波,然后用同一个传感器接收从锚杆底端反射回来的波,根据反射波形的幅值大小确定锚杆的锚固质量。由于压电传感器类探头的特殊要求,使用 Boltmeter 前必须保证锚杆外露端头为一个光滑平面以保证传感器与锚杆端头良好的耦合效果。该方法存在激发条件苛刻、波衰减快、仪器生产成本高的缺点,一般对 4~5 m 长的土层锚杆检测有一定效果,但检测结果也只能推断锚杆的相对抗拔力,不能对锚杆锚固质量的完整性进行评价。

伦敦帝国大学在超声波测试方面进行了长期的研究,比尔德(Beard)等^[10,11]将相关成果应用于锚杆锚固质量的检测,研制了 GRANIT 仪器,开发了计算波散射的程序用于模拟波在锚杆中的传播,并进行了实验室与现场试验,但是由于数值计算模型过于简化,试验结果和数值计算结果差别较大,最终该仪器没有得到推广应用。

德国矿山研究院(DMT)公司也开发出了一种超声波锚杆无损检测系统,能提供明确的信息来说明锚杆是否因断裂而失效,准确判断断裂的位置。由于超声波衰减速度较快,在进行注浆饱和度检测时,规定测试锚杆长度不宜超过 6 m,该仪器在矿井和隧道工程的锚杆检测中得到小范围应用。

我国科技工作者在研制锚杆质量检测仪方面也做了大量的工作。1987年,铁道部科学研究院铁建所钟世航教授提出用声波能量对比的方法来评价砂浆饱和度,研究了水泥砂浆灌注的饱和度与反射波振幅的关系,并研制了 TM—1 型锚杆质量检测仪。该套设备包括接收仪器、接收传感器、激发器和耦合装置,由示波器监视波形,显示锚杆长度、反射波幅值和推断水泥砂浆饱满度级别,激发器采用弹簧驱动,该仪器分析功能简单,用机械撞击的激发方式使激发的能量具有很大随机性,信号极为不稳定,因而该检测仪器一直没有投入工程应用。

八五计划期间,为配合采煤巷道快速掘进,国家计委批准了重点科技攻关项目“锚杆锚固状态与锚固力检测方法和仪器的研究”,该项目由淮南矿业学院和长沙白云仪器联合开展。项目组成功研制了 MJ—1 型锚杆检测仪,并

依据大量现场测试结果提出了锚杆质量分级表。

尽管以上仪器设备未在工程中推广使用,但是在锚杆锚固质量检测方法和技术上做了有益的尝试。很多学者利用这些设备或其他信号采集设备进行了大量的试验研究,不断推进锚杆无损检测技术的进步。郭世明等^[12]进行了大量的现场试验,研究利用弹性波检测锚杆锚固质量的方法,取得一定的效果,锚杆长度检测误差一般能控制在 5% 以内,且能定性评价锚杆的注浆饱和度和。汪明武等^[13-15]从理论和试验上研究了弹性波快速检测锚杆锚固状态的原理,通过模型试验分析了弹性波在锚杆中的反射相位特征和能量衰减变化规律,同时探讨了无损检测锚杆锚固力的方法;为了便于工程应用,提出了用于锚杆锚固工程质量评价分析的人工神经网络模型,并结合实例应用表明该方法的可行性和有效性。虽然该技术在淮南矿业集团潘一矿得到了应用,但是由于信号采样率较低、操作安装困难、成本较高等原因,未能在煤矿中推广使用。太原理工大学的李义等^[16-22]等对弹性波的激发特征、反射信号特征以及弹性波在锚固段中的波速等进行了全面的研究,并提出了固结波速的概念,用于定量评价锚杆锚固质量。汪天翼等^[23,24]利用弹性波对水工结构的锚杆支护进行了锚固质量无损检测,许明等^[25,26]、夏代林等^[27]、李青锋等^[28,29]和秦莹^[30]等在锚杆锚固质量检测的理论和信号处理方法方面进行了研究。另外,郭安萍^[31]、陈波^[32]和汤井田^[33]分别尝试将声发射、电磁波以及电阻率测试等方法应用于锚杆质量检测中,虽然研究结果表明这些方法具有一定的可行性,但出于安全的考虑,这些方法在煤矿井下可能并不适用。

以上的研究内容都是关于锚杆锚固状态检测的,许多学者在锚杆轴力检测方面也开展了工作。试验和数值分析结果表明^[34],锚杆受力状态改变与巷道变形破坏过程是紧密联系的,掌握锚杆实时受力有利于评价锚杆支护及巷道的安全性,同时也可反映锚杆支护设计的合理性。

美国矿业局的斯迪伯雷(Stebly)等^[35]用超声技术测试锚杆中的载荷,研究开发一种适用于全长锚固和端部锚固锚杆中应力的无损检测方法,并研制了测试仪器。1990 年塔多利民(Tadolini)采用该仪器测试了全长锚固和端部锚固锚杆中的应力^[36],结果表明采用该仪器可以检测锚固锚杆的长度,而且

通过检测锚杆中的实时应力可以监控围岩及边坡稳定性。

王富春等^[37]和薛道成等^[38]的理论研究表明,端锚锚杆的工作载荷与其振动频率呈幂函数关系,李义等^[39]和薛道成等^[38]利用室内试验验证了该理论的正确性,并提出了锚杆轴力无损检测的方法。

许多学者在理论和试验方面对锚杆无损检测进行了研究,为锚杆无损检测技术的开发奠定了基础,目前该项技术已较为成熟,在煤矿井下已积累了丰富的应用经验。在此背景下,本书对锚杆无损检测技术进行了全面总结,内容包括锚杆无损检测的基本理论和方法、检测仪器的研制、室内和现场试验等,使读者对该领域有总体的认识。鉴于本书的目的是为现场操作人员提供参考,因此,基本理论部分仅作简略介绍,有兴趣的读者可参阅相关文献^[40,41],本书的重点是根据几个典型矿区的工程应用实例,详细介绍锚杆无损检测技术的应用及检测成果分析方法。

2 煤矿锚杆支护无损检测原理

2.1 锚杆长度检测的原理和方法

锚杆长度检测是通过测量弹性波在锚杆中的传播时间来实现的。锚杆锚固结构比较复杂,包含很多分界面,包括自由段与锚固面的分界面、锚杆与锚固剂的分界面以及锚杆底端与围岩的交界面等,弹性波在其中传播时会不断发生反射和透射,在此过程中波的能量逐渐衰减。为了检测锚杆自由段和锚固段长度,需要准确识别出自由段和锚固段交界面和锚杆底端的反射信号。锚杆长度检测理论研究的目的是掌握反射波的信号特征。

2.1.1 锚杆纵向振动力学模型

以煤矿广泛采用的端部锚固锚杆为例,其结构示意图见图 2-1,托盘与围岩的接触面有一定的刚度,简化为一对弹簧。锚杆的受力分布见图 2-2(a),锚杆杆体长度为 L ,树脂锚固段长度为 L_1 ,锚固段中分布有剪力和轴力,而自由段中仅分布有轴力,在锚杆外端通过托盘和螺母对围岩施加预紧力。由于托盘与围岩体之间存在明显挤压变形,因此在分析锚杆杆体的纵向振动时可

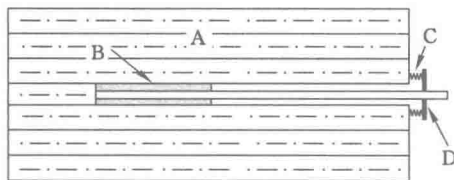


图 2-1 锚杆锚固系统简化模型

A——围岩;B——锚固段;C——托盘与围岩接触面;D——托盘