

文章编号: 1000-7598-(2002)06-0787-05

高频应力波检测锚固密实状况的试验研究

朱国维, 彭苏萍, 王怀秀

(中国矿业大学, 北京 100083)

摘要: 针对煤矿井下常用锚杆的类型及其锚固结构状况, 设计制作了相似物理模型; 并自制了一种弹射式加速度检波器, 以便在锚杆端头激发并接收高频应力波。试验表明利用高频应力波无损检测技术可以判定锚杆锚固长度, 评价锚杆施工质量。现场快速普查与抽样拉拔检验相结合, 即能找出一个矿区内同类锚杆的分析判别规律。实际应用进一步证明了该方法的经济适用性。

关键词: 高频应力波; 弹射式传感器; 无损检测; 锚固密实度

中图分类号: P631 **文献标识码:** A

Test research on grouted density inspection of bolts using high frequency stress wave

ZHU Guo-wei, PENG Su-ping, WANG Huai-xiu

(China University of Mining and Technology, Beijing 100083, China)

Abstract: A similarity model is designed according to the type of bolts commonly used in coal mines and their grouted situation. To send out high frequency stress wave and meanwhile receive it on the top of bolt, an acceleration sensor with spring striking pin is invented. It is proved that the bolted length can be inspected accurately and the quality of a bolt can be evaluated by using the non-destructive inspection technique of high frequency stress wave. The rule to distinguish whether the quality of a kind of bolts is eligibility can also be found through express inspecting and drawing at random. It is confirmed by field tests that this method is economical and practical.

Key words: high frequency stress wave; sensor with spring striking pin; non-destructive inspection; grouted density

1 前言

我国煤炭工业尤其重视在井巷工程中利用锚固技术, 广泛开展了锚喷支护在岩巷、半煤岩巷及煤巷支护中的应用研究, 并得到大力推广。但是, 锚杆施工为隐蔽施工工程, 不仅受到穿过地层层位、场地条件等因素的影响, 还取决于施工工艺与施工管理水平, 往往存在这样或那样的潜在缺陷使施工质量难以满足设计要求, 从而造成工程事故与重大经济损失。为此, 必须加强对锚杆施工质量的检测工作, 以确保井巷工程的安全。

锚杆结构状态的检测主要有两方面, 一是为检测杆体部分结构, 如全锚锚杆杆体握裹状况检测等, 二是杆端与介质层的耦合状况评价, 尤其是对端锚

锚杆, 因其端部耦合状况的检测对判定施工质量至关重要。利用高频应力波在杆体中的传播特性, 可以判定杆体结构状况, 确定锚杆握裹段长度、深度; 同时, 对同类型和施工条件下的一批锚杆, 利用端底反射波的相对衰减状况来评价杆体端部的耦合状况。针对煤矿井下常用锚杆的类型, 笔者设计制作了相似模型, 通过改变锚杆锚固状态, 测试研究其对应的声频信号特征, 并结合工程现场检测实例验证, 在锚杆施工质量检测上取得了较好效果。

2 锚杆作用及其检测原理

2.1 锚杆及其支护机理

煤矿井巷掘进后, 在地下应力场的作用下, 表层围岩将遭受破坏形成松动圈, 应及时加以支护。

收稿日期: 2002-02-22

作者简介: 朱国维, 男, 1964年生, 中国矿业大学(北京)博士生, 从事矿井物探及地学仪器研制。

锚杆支护是通过锚入围岩内部的锚杆来改变围岩本身的力学状态,在巷道周围形成一个整体而稳定的岩石带,利用锚杆与围岩的共同作用,达到维护巷道稳定的作用。煤矿井巷锚喷支护一般常用树脂锚杆和水泥砂浆锚杆,其锚固方式又分为全长锚固和端部锚固 2 种,图 1 (a) 所示为拱形巷道断面利用锚杆支护而形成的岩石加固拱,(b)为锚杆通过锚固剂与围岩作用的结构状态。

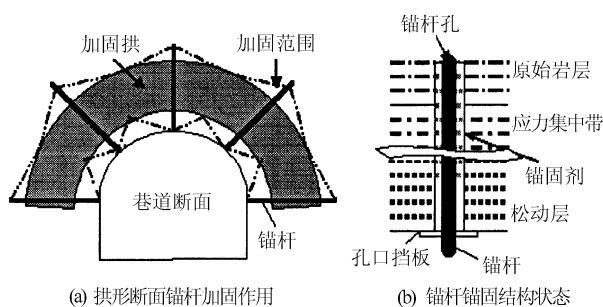


图 1 锚杆支护机理
Fig.1 Bolt supporting mechanism

2.2 检测原理与方法

2.2.1 高频应力波在杆体中的传播

密实状态下的锚固剂凝固后,密实度与锚杆杆体的密实度十分相近,在锚杆孔中,其与锚杆杆体紧密握裹,可近似为一个组合杆体。而锚杆与锚固剂的强度明显大于煤矿巷道围岩,故可把其组合体近似看作是嵌入围岩的一维杆状体。

由波动理论,当震源在锚杆顶端施加一个初始扰动时,杆体中的质点即产生纵向拉伸与压缩的波动,并以纵波的形式在杆体内传播,此时遵循一维波动的传播与反射规律,当入射波到达杆体锚固段的物性变异界面 R 时,将发生反射与透射,如图 2。

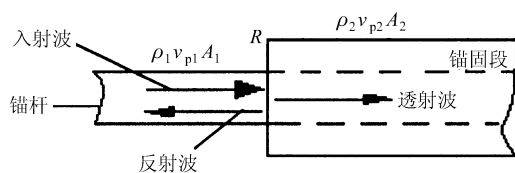


图 2 应力波在锚固界面上的反射
Fig.2 Stress wave reflection at the grouted interface

利用边界条件(力、位移连续),可求出反射波与入射波的振幅比 B'/B ,即反射系数 K 为

$$K = \frac{B'}{B} = \frac{\rho_2 v_{p2} A_2 - \rho_1 v_{p1} A_1}{\rho_2 v_{p2} A_2 + \rho_1 v_{p1} A_1} \quad (1)$$

式中 $\rho_1 v_{p1} A_1$ 为锚杆杆体的波阻抗(杆体密度 ρ_1 ,波速 v_{p1} 和杆体横截面积 A_1 的乘积), $\rho_2 v_{p2} A_2$ 为锚杆与锚固剂组合杆体的波阻抗。

式(1)表明,杆体界面反射波与入射波振幅比不仅取决于密实度和波速的差异,而且还与杆体横截面积的差异有关。由于锚杆自身的杆可以看作为一均质体,组合杆体波阻抗的变化即是由锚固剂锚固密实,并达到有效握裹的状态下形成的。由波动理论, K 的正负将引起反射波的相位变化,据此可以判别反射界面的性质,根据界面反射波的到时求得其深度,不同变性界面的判别特征见表 1。

表 1 杆体反射波相位特征
Table 1 Phase characteristic of reflected wave

反射界面	波阻抗	截面积	反射系数	相位特征
锚固段上界面	$\rho_2 v_{p2} \leq \rho_1 v_{p1}$	$A_2 > A_1$	$K > 0$	反相
锚固段下界面	$\rho_2 v_{p2} \geq \rho_1 v_{p1}$	$A_2 < A_1$	$K < 0$	同相
杆端	$\rho_2 v_{p2} \geq \rho_1 v_{p1}$	$A_2 < A_1$	$K < 0$	同相

应力波在锚杆中传播时,当遇到物性变异界面或端底界面时就会发生反射,其原始振动能量应为各界面反射波能量加透射波的能量之和(振动质点间内摩擦耗损可忽略),而来自某一界面的反射波能量大小与该界面的物性特征密切相关。因此,各界面反射波能量状况能反映出界面的物性变化,是判断界面性质的另一种辅助指标。

2.2.2 检测方法

在锚杆施工中,若因施工因素而造成锚固剂局部不密实或空锚,则形成组合杆体的非规则边界,利用应力波在杆体中传播与反射的原理,可判别锚杆杆体锚固状态和握裹长度。

测试时,在锚杆杆头激发并接收应力波,波在杆体中的传播速度可利用相同的未锚固锚杆进行标定,如图 3(a),设杆长为 L ,杆底反射波到时为 ΔT ,则波速为 $V_p = 2L / \Delta T$,一般通过对数根锚杆进行测试标定后,即可取得该种锚杆的代表波速值。在实际测量中,首先在测试信号波形图上判读杆体界面反射波的相位与到时,并据此判定各界面的性质,然后利用波速值求得各界面的深度,进而得出杆体握裹段长度。图 3(b) 示出锚杆杆体局部握裹状态下,握裹段上下界面反射波对应的波组、相位与到达时间的分布特征。

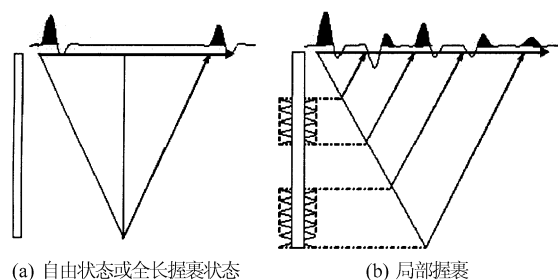


图3 锚杆反射波相位分布特征

Fig.3 Phase distributing characteristic of reflected wave

2.2.3 检测设备

锚杆是一种小型致密的结构体, 应力波在杆体中传播速度极快, 一般为 5 000 m/s 左右, 因此测试仪器应具有高的采样率和采样精度, 测试信号频率要尽可能高。

测试使用的 MJ-1 锚杆检测仪, 为一机电一体化便携式测试系统, 主要技术指标:

声波通道为高阻 (1 道), 通频带为 1~30 kHz;
低阻 (2 道), 通频带为 1~8 000 Hz;

增益为 6~96 db, 6 db 步阶可选;

采样间隔为 2.1 μ s~2.5 ms(任选);

记录长度为 512、1024 点/道;

测力通道为 1 道, 精度为 0.01 kN, 测量范围为 0~12 $\times$ 10 kN;

测位移通道为 1 道, 精度为 0.01 mm, 测量范围为 0~25 mm;

显示为 128 $\times$ 512 优质液晶显示器;

掉电不丢失存储器 (256 K), RS-232 串口, M-160 微型打印机。

功能为声频应力波检测锚杆的锚固状态; 锚杆锚固力的无损检测。

激发接收只能在锚杆端头上进行, 而矿用锚杆直径一般只有 16 mm 左右, 要同时布置激发振源和接收传感器, 采用传统装置显然是不行的。试验设计制作了一种压电式加速度传感器, 传感器壳体直径 15 mm, 在结构中空部分安装一个用于激振的弹簧撞针, 如图 4 所示。该传感器特点是具有很高的压电灵敏度, 响应频率高, 重复测试一致性好, 具高阻抗, 单次振动延续时间短, 极大地减小了续至波对后续波组的干扰, 但对低频响应特性差, 这些特点正好适用于测试锚杆这种致密金属结构体。

测试时, 先将传感器前端顶住锚杆头, 撞针后移, 弹簧小量压缩, 然后手拉撞针, 使撞针再度产生适量位移后, 瞬间释放撞针, 撞针撞击锚杆端头,

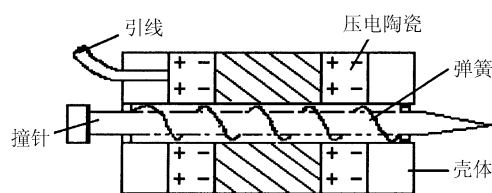


图4 弹射式加速度传感器

Fig.4 Acceleration sensor with spring striking pin

产生弹性应力波。撞针的尖头激振, 相当于点振源, 能激发出频率高、束射性好的高频应力波。

3 模型设计与制作

3.1 模型制做

设计模拟矿井工程中常见的巷道围岩类型, 如粉砂岩、砂质页岩、砂岩等有代表性的岩层, 用水泥: 砂: 水=1: 2: 0.5 的配比制作混凝土模板, 单块模板厚 10 cm, 总共制作了 16 块模板 (煤矿常用锚杆的长度为 1.6 m 左右)。用超声-回弹法测定混凝土强度均值约为 31.6 MPa, 即模拟岩层强度系数 f 值为 3~4 之间, 这是煤矿工程中最常见的岩石类型。

每块模板预留 5 个锚杆孔, 分别用来模拟, 1[#] 全锚树脂锚杆、2[#] 端锚树脂锚杆、3[#] 全锚水泥砂浆锚杆、4[#] 端锚水泥砂浆锚杆、5[#] 备用孔。试验时, 模板间用相同配比的水泥砂浆粘合, 先对接两块板, 然后逐次加接, 每次加接两块, 同时, 全锚锚杆随着模板数量的增加而加长其锚固长度, 加长锚固的长度约小于模板厚度与粘合层厚度之和, 如图 5 所示。为缩短测试周期, 在粘合用的水泥砂浆中加入 5% 的速凝剂, 这样, 每次加板后 5 d 可以开始测试, 一周可以完成一次加板与测试。

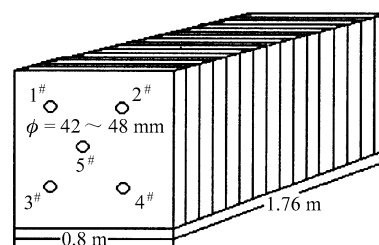


图5 锚杆模型结构

Fig.5 Structure of bolt model

3.2 模型试验

试验工作从锚杆未锚固时开始, 即先对自由状态下锚杆体内的应力波传播和反射特性进行测

定,测出各种类型锚杆的波速值,再改变锚杆锚固段握裹长度和状态进行分步测试研究。

(1) 自由状态下锚杆的检测

自由状态下的锚杆相当于均匀、规则的一维杆状体,在其顶端激发并产生应力波后,应力波在杆体中无明显发射,只在杆端发生反射,且端底反射能量强,往往能观察到端底多次反射现象,并且多次反射波能量衰减减小。图 6 是在一根长 1.53 m 的树脂锚杆上自由状态下的测试信号,可以看到依然很强的二次反射波,反射周期为 0.6088 ms,可以计算出波在杆体中的传播速度为 5.026 m/ms,对采样间隔为 20 μ s 所测的波形进行频谱分析,得平均频差为 1.65 kHz,说明测试系统高频性能好,具宽频带、高分辨率的特点,能满足对锚杆这种小型致密结构体的测试要求。

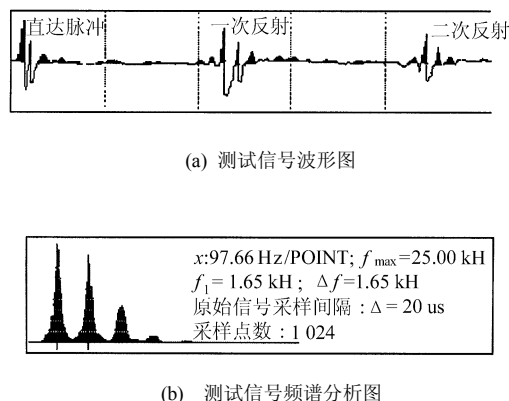


图 6 自由状态下锚杆的测试信号及频谱分析
Fig.6 The testing signal and its frequency analysis of non-grouted bolt

(2) 全锚锚杆锚固密实状态的检测

由于煤系地层中巷道围岩的强度不大,常采用全长锚固的方式,以加强整体结构的支撑力。模型试验开始时,先模拟两种全长锚固锚杆,即:全锚树脂锚杆与全锚水泥砂浆锚杆,随着模板的拼接而加长锚固段的长度,同时进行锚固段长度的测试试验。图 7 是对长 1.585 m 的树脂锚杆,锚固段长度为 0.77 m 时的实测波形图,图中显示锚固段底界面反射时间为 0.322 3 ms,锚杆底端反射时间为 0.609 0 ms,波在锚杆体中的传播速度为 5.205 m/ms,依此求得锚固段底界面深度是 0.839 m,和锚杆顶端距锚固段底界面的实际距离 0.82 m (锚杆露头 0.05 m)相差 2.32 %。

试验发现,当全锚锚杆的前端锚固长度超过锚杆总长度的一半时,锚杆底端反射信号变弱,往往难以分辨,只能根据锚杆的种类和该种锚杆的经验

测试数据来确定波速值,进而反算杆体内各反射界面的深度。

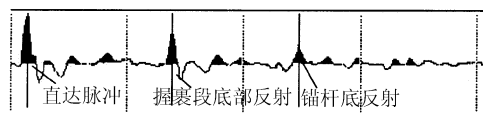


图 7 全长树脂锚杆锚固段长度为 0.77 m 时的实测波形记录
Fig.7 Waveform records of fully resin grouted bolt when its grouted length is 0.77 m

全长水泥砂浆锚杆的测试与全长树脂锚杆同步进行,两者的测试状况相近,故不再赘述。

(3) 端锚锚杆的检测

模板拼接完成后,开始进行树脂锚杆和水泥砂浆锚杆的端部锚固试验,设计端部锚固的长度分别为 0.3、0.4 m。端锚锚杆的锚固段位于锚杆尾部,在锚杆顶端测试,将产生锚固段顶界面和杆底两组反射波,并且顶界面反射相位和振波初始相位相反,底界面反射相位与初始相位相同。图 8 是在树脂端锚锚杆上的实测波形,解析结果详见表 2。

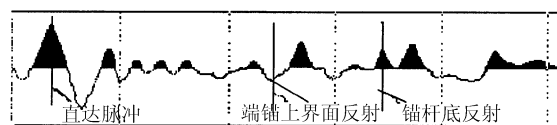


图 8 树脂端锚锚杆的实测波形图
Fig.8 Waveform records of after-body resin grouted bolt

模型试验证明,利用高频应力波检测锚杆锚固段长度是可行的,测试误差一般不超过 5 %,同步拉拔试验结果显示,在相同锚固状态下,树脂锚杆的锚固力大于水泥砂浆锚杆的锚固力,当树脂全长锚杆在锚固密实长度为 0.59 m 时,已达到一般矿用全长锚杆的设计锚固力值 (50 kN)。

4 现场测试方法的研究

在进行模型试验的同时,还到淮南矿业集团公司某矿东、西风井进行了现场实测。该矿-370 m 进风石门开掘在深灰色细砂岩与灰色泥质砂岩互层的岩性段中,岩石稳定性属中等,支护采用小直径全长树脂锚杆,杆体规格为: $\phi 16 \times 1600 \pm 50$ mm。

在进行现场测试时,利用高频应力波检测法快速普查锚杆锚固质量,在锚杆端头利用弹射式加速度传感器激发并接收应力波,根据高频应力波在杆体内的传播特征与边界条件的关系,分析判断锚杆的锚固质量。现场共测试全锚树脂锚杆 187 根,端锚锚杆 128 根,分析总结出了矿区内利用实测成

果评判锚杆锚固质量的一致规则，并通过 MJ-1 锚杆检测仪的无损拉拔设备，对评判标准进行验证。该矿区全锚锚杆、端锚锚杆的分级分类准则见表 3，表 4。

表 2 锚杆锚固长度检测的模型试验结果一览表
Table 2 Model test result from inspecting the grouted length of bolts

类型	实长 / m	测试 / m	误差 / %	锚固力 / kN
全长树脂锚杆	0.21	0.214	1.90	27
	0.34	0.345	1.47	38
	0.59	0.579	1.86	54
	0.82	0.839	2.32	>60
	1.06	1.029	2.92	
	1.25	1.201	3.92	
	1.40	1.465	4.64	
	1.59	1.560	1.58	
全长水泥砂浆锚杆	0.22	0.212	2.23	17
	0.34	0.341	0.21	21
	0.53	0.527	0.57	31
	0.87	0.884	1.61	49
	1.16	1.140	1.72	63
	1.32	1.300	1.52	
	1.45	1.480	2.07	
	1.56	1.600	1.60	
端锚树脂锚杆	0.35	0.363	3.71	45
端锚水泥砂浆锚杆	0.40	0.419	4.75	32

表 3 全锚树脂锚杆现场实测分级
Table 3 Field test grading for fully resin grouted bolt

分类号	级别	反射波特征		质量评价
		杆体	端底反射	
A	优	除上端握裹面外无其他界面反射波，全长锚固	没有	超过设计锚固力
B	良	有 1~2 个同相反射，握裹长度大于 1/2	没有或极弱	达到设计锚固力
C	合格	同相反射界面多，但总握裹长度近 1/2	能分辨底反	稍低于设计锚固力
D	不合格	同相反射界面多，非握裹长度大于 2/3	强反射，可能出现二次反射	锚固力极小或没有

表 4 端锚树脂锚杆现场实测分级

Table 4 Field test grading for after-body resin grouted bolt

分类号	级别	反射波特征	质量评价
A	优	无端底反射	超过设计锚固力
B	良	有端底反射，但较弱	达到设计锚固力
C	合格	端底反射明显，无多次底反	稍低于设计锚固力
D	不合格	端底反射强，可见多次底反	锚固力极小或没有

注：端部岩层一般强度较高，在锚杆底部紧密藕合下，反射界面不明显

现场无损拉拔试验 63 根，其中全锚锚杆 37 根，端锚锚杆 26 根，结果显示应力波测试分级中 A 与 D 级全部正确，只有 8 根在 B、C 级间分级有误，整体判别可靠度大于 87%，不合格的判定完全无误，证明高频应力波检测法对锚杆施工质量的判别结果基本正确，完全能满足工程质量管理要求。

5 结 语

通过室内模型试验研究与现场测试验证表明，利用高频应力波测试技术可以快速、较准确地普查锚杆锚固状况，判定锚杆握裹段长度，并评价其锚固质量。在对一个矿区内同类型锚杆进行质量检测时，首先要进行普查分级，并进行抽样拉拔验证，结合验证情况统计分析，形成该矿区此类锚杆的统一分级准则。模型与现场试验还发现，锚杆端底反射波的能量既反映了杆底与围岩的藕合状况，又与杆体锚固段造成的透射损失有关，一般地，杆体锚固段越长，锚固状况越好，杆底与围岩藕合越紧密，则杆底反射越弱。当杆体锚固段长度超过锚杆长度一半时，杆底反射即变得很弱或消失，这是很有意义的信息，应进一步深入研究。

参 考 文 献

- [1] 袁和生. 煤矿巷道锚杆支护技术[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1997. 44—46.
- [2] 朱国维. 锚杆锚固状态和锚固力的检测方法与研究[硕士学位论文 D]. 淮南: 淮南矿业学院, 1995.