

# 基于小波分析的砂浆锚杆锚固质量缺陷评价\*

杨健辉<sup>1,2</sup> 屈欣<sup>2</sup> 汤秀锋<sup>2</sup> 王文贞<sup>2</sup> 王钦亭<sup>2</sup>

(1. 河南理工大学深部矿井建设重点学科开放实验室,河南焦作 454000;

2. 河南理工大学土木工程学院,河南焦作 454000)

**摘要:** 对深基坑支护中常用的岩土锚杆进行锚固质量无损检测的关键是对采集的动态加速度曲线进行合理的分析。为此,分别设计了三种不同工况模型:无缺陷、一个缺陷和两个缺陷的锚杆模型。通过敲击试验,采集到加速度响应曲线后,利用 Matlab 程序在计算机上实现波形重现,然后采用小波分析等方法对振动波形进行对比分析,建立振动波形与各工况之间的内在联系,以反映锚杆锚固质量的三个度量参数,亦即一次行波周期、时频谱中的频率值和能量衰减程度。结果发现:通过时域波形和时频谱可正确反映不同锚固状态下的动力响应规律,即锚固质量越好,锚杆中应力波衰减就越快。

**关键词:** 砂浆锚杆; 锚固质量; 时域波形; 时频谱; 能量特性

**DOI:** 10.13204/j.gyjz201404033

## ASSESSMENT OF ANCHORING QUALITY AND DEFECTS OF MORTAR BOLT BASED ON WAVELET ANALYSIS

Yang Jianhui<sup>1,2</sup> Qu Xin<sup>2</sup> Tang Xiufeng<sup>2</sup> Wang Wenzhen<sup>2</sup> Wang Qinting<sup>2</sup>

(1. Opening Project of Key Laboratory of Deep Mine Construction, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454000, China;

2. School of Civil Engineering of Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454000, China)

**Abstract:** It is a key for rock-soil anchor used in deep excavation support to assess anchoring quality by nondestructive testing method based on reasonable analysis of dynamic response curve of acceleration signal received by dynamic data recorder. So there different kinds of anchor models were designed for wholly grouted mortar bolts which had no defect, one defect, and two defects. Received the response curves of acceleration signals by tapping test, reappeared in computer by Matlab, then the vibration waveforms could be analyzed and contrasted by wavelet analysis, so the inner connexion between the vibration waveform and every model was established, which could reflected the three measure parameters, i. e. the period of a single cycle, the frequency value of time-frequency spectrum, and the deadening of energy. The results showed the rules of dynamic responses could be correctly reflected by the time domain waveforms and time-frequency spectrum for different anchor qualities. that were the faster of stress wave deadening in bolt, the better of anchor quality.

**Keywords:** mortar bolt; anchor quality; time domain waveform; time-frequency spectrum; energy characteristics

在采矿业、地下工程和岩土工程中的深基坑、高边坡等重大工程的建设中,工程稳定性将直接决定结构的安全性。因此,合理准确地对围岩稳定性进行研究、评价是目前亟需解决的问题。诸如巷道表面收敛位移、深基坑点位移量测、围岩松动圈理论及监测等,已在地下结构工程和煤矿巷道围岩稳定性控制等方面得到了广泛应用<sup>[1-4]</sup>。地下工程监测理论及工程应用的发展得益于现代检测技术的进步,如 Richard D. Neilson 等针对锚杆无损检测的实际状况,设计了一种气动式信号冲击发生设备,并对其进行了动态分析,验证并得出了其发生设备的有效性及其实用性<sup>[5]</sup>。若再结合相关动测仪器,可实现对

矿山压力活动规律的监控、锚固工程评价等内容,从而有可能在围岩和边坡及其支护结构失稳之前采取有效加固措施,以达到主动控制其稳定性的目的。

鉴于现阶段锚杆加固具有失效可控、主动加固、施工简便、成本较低等特点,在弱、破岩体中具有较强的适应性,因而在路堑边坡、隧道及地下工程中得

\* 国家自然科学基金项目(41172317);深部矿井建设省重点学科开放实验室开放基金项目(2011KF-01);河南省教育厅科技攻关项目(2010A560010)。

第一作者:杨健辉,男,1969年出生,博士(后)教授。

电子信箱:yjh\_dr@163.com

收稿日期:2013-03-15

到了广泛应用<sup>[6-7]</sup>。

但因锚固工程的隐蔽性,以及岩土工程的复杂性和针对性,对锚杆作用机理认识的尚不统一性<sup>[8]</sup>,因此仍需要通过实践手段,亦即无损检测技术来间接评价相关理论的适应性。但局限于目前的相关测试理论、仪器设备和测试技术以及现场施工的复杂性等条件限制,这又导致现行的无损检测技术手段还不能完全适应工程应用的要求,亦即目前的理论研究仍滞后于工程需要。本研究结合深基坑支护工程的普遍情况,开展针对性室内模拟试验,以期对相关研究和应用开拓一条道路。

## 1 锚杆锚固状态下的纵向振动理论

### 1.1 自由锚杆的一维纵向振动模型

将锚杆视为一维均匀线弹性体,并根据应力波在一维介质中传播的基本理论及其他假设条件<sup>[9-15]</sup>,在满足锚杆直径  $d$  和杆长  $L$  之比不大于  $1/10$  的情况下,假设长度为  $L$  的无约束锚杆,在距离锚杆端部  $x$  处有一长度为  $dx$  的单元,并用符号  $u(x, t)$  表示在时间为  $t$  时刻  $x$  处的纵向位移,其力学模型如图 1 所示。其中  $P$  为横截面上的法向力。再设锚杆的材料密度为  $\rho$ ,横截面积为  $S$ ,弹性模量为  $E$ ,则截面的抗拉刚度为  $ES(x)$ 。因  $u(x, t)$  是截面位置  $x$  与时间  $t$  的二元函数,因此取微段  $dx$ ,则由 Hooke 定律可知其应变为:

$$\varepsilon = \frac{\Delta(dx)}{dx} = \frac{u + \frac{\partial u}{\partial x}dx - u}{dx} = \frac{\partial u}{\partial x} \quad (1)$$

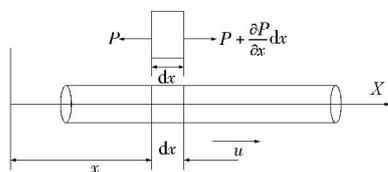


图 1 杆体的纵向振动

Fig. 1 Longitudinal vibration of rod body

再设位于  $x$  处和  $x + dx$  处截面上的拉力分别为  $P$  和  $P + \frac{\partial P}{\partial x}dx$ ,则锚杆拉力  $P$  可近似表示为:

$$P = E\varepsilon S = ES \frac{\partial u}{\partial x} \quad (2)$$

由牛顿第二定律可得到:

$$\rho S dx \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = P + \frac{\partial P}{\partial x}dx - P = \frac{\partial P}{\partial x}dx = \frac{\partial}{\partial x} \left( ES \frac{\partial u}{\partial x} \right) dx \quad (3)$$

据此求出截面  $S(x)$  便可得到式(3)的解。对于一维线弹性杆件来说,  $S(x)$  为常量,则应力波在一维

弹性、自由杆件中传播的波动方程即为:

$$\rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} - E \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = 0 \quad (4a)$$

$$\text{亦即} \quad \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = \frac{1}{v_p^2} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \quad (4b)$$

$$\text{其中} \quad v_p = \sqrt{\frac{E}{\rho}}$$

式中:  $v_p$  为锚杆中应力波的传播速度。

### 1.2 锚杆锚固状态下的数学模型

在锚杆围岩系统共同作用下,考虑到周围介质对波的传播影响,锚杆的纵向振动就变得十分复杂,尤其是砂浆全长黏结锚杆。当锚固介质或者围岩的刚度和阻尼与锚杆的相近时,则会对锚杆的振动特性产生十分明显的影响。为了简化边界条件,可作如下假设<sup>[16]</sup>:

1) 锚杆及周围介质是均匀的;

2) 锚杆周围介质与锚杆之间的相互作用可用阻尼壶来模拟,即用一个线性弹簧和一个与速度有关的阻尼器以平行方式耦合;

3) 锚杆周围介质的剪切应力与深度无关。

则一维弹性自由杆件的波动方程式(4)就变为式(5a)或者式(5b)的阻尼波动方程。

$$SE \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} - \eta \frac{\partial u}{\partial x} - Ku - S\rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = 0 \quad (5a)$$

$$\text{即} \quad \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} - \frac{1}{v_p^2} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} - \frac{\eta}{SE} \frac{\partial u}{\partial x} - \frac{Ku}{SE} = 0 \quad (5b)$$

式中:  $K$  为作用在单位长度上锚杆周围介质的综合弹性约束系数(弹性系数);  $\eta$  为作用在单位长度上锚杆周围介质的综合黏性约束系数(黏性阻尼系数)。

在边界条件下可利用变量分解法对式(5b)求解,并假定:

$$u(x, t) = X(x) T(t) \quad (6)$$

将式(6)代入式(5b),整理后可得到:

$$\frac{\rho S T'' + \eta T' + K T}{S E T} = \frac{X''}{X} = -\beta^2 \quad (7)$$

然后再求解即得到:

$$X(x) = a \cos \beta x + b \sin \beta x \quad (8)$$

再根据边界条件:

$$u(0, t)_{x=0} = 0 \quad t > 0 \quad (9a)$$

$$\left. \frac{\partial u(L, t)}{\partial x} \right|_{x=L} = 0 \quad t > 0 \quad (9b)$$

即可求得:

$$\beta_n = \frac{2n-1}{2L} \pi \quad n = 1, 2, 3 \quad (10)$$

因此有:

$$X_n = \beta_n \sin\left(\frac{2n-1}{2L}\pi x\right) \quad (11)$$

对式(7)整理,可得到:

$$\rho S T'' + \eta T' + K T + S E \beta_n^2 T = 0 \quad (12)$$

求解得:

$$T_n(t) = e^{-\xi t} (c_n \cos \omega_n t + d_n \sin \omega_n t) \quad (13a)$$

$$u_n(t) = \sum_{n=0}^{\infty} e^{-\xi t} (c_n' \cos \omega_n t + d_n' \sin \omega_n t) \sin\left(\frac{2n-1}{2L}\pi x\right) \quad (13b)$$

其中  $\xi = \frac{\eta}{2\rho S}$

$$\omega_n = \sqrt{\left[\beta_n^2 + \frac{K}{SE}\right]v_p^2 - \left[\frac{\eta}{2\rho S}\right]^2}$$

式中:  $\omega_n$  为锚杆锚固系统的固有频率;  $\xi$  为阻尼比。

根据初始边界条件:

$$\begin{cases} u|_{x=0} = 0 \\ \left.\frac{\partial u}{\partial x}\right|_{x=L} = 0 \end{cases} \quad (14)$$

即可求出  $c_n'$ 、 $d_n'$ , 则式(6)的解即为:

$$u(x, t) = \frac{2I}{M} e^{-\xi t} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^{n+1}}{\omega_n} \sin \omega_n t \sin \beta_n x \quad (15)$$

式中:  $I$  为冲击冲量;  $M$  为锚杆的质量。

式(15)即为锚杆围岩体内纵向传播的波动方程解。对式(15)分别求一次微分和二次微分,便得到振动的速度响应和加速度响应。在实际检测时,速度或加速度传感器固定在锚杆的顶端,即  $x = L$ , 则可求得:

$$v(t) = \frac{2I}{M} e^{-\eta t} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\omega_n \cos \omega_n t - \eta \sin \omega_n t}{\omega_n} \quad (16)$$

$$i(t) = \frac{2I}{M} e^{-\eta t} \cdot \sum_{n=1}^{\infty} \frac{[(\eta^2 - \omega_n^2) \sin \omega_n t - 2\eta \omega_n \cos \omega_n t]}{\omega_n} \quad (17)$$

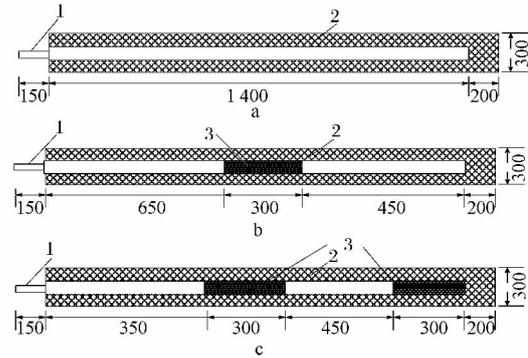
## 2 室内试验及分析

### 2.1 模型制作

考虑到岩层和锚固的复杂性,分别制作了无缺陷、一个缺陷和两个缺陷的锚杆模型,其中,锚杆为  $\phi 18$  HRB335 钢筋,端头拉丝,用于安装托盘;试件基体为 C40 普通混凝土,截面尺寸为  $300 \text{ mm} \times 300 \text{ mm}$ ,长度为  $1.6 \text{ m}$ ,锚杆长度为  $1.55 \text{ m}$ ,中间暗孔长度为  $1.4 \text{ m}$ ,底部预留  $200 \text{ mm}$ ;采用强度等级为 P·O52.5 的水泥为锚固剂;用直径为  $50 \text{ mm}$  的 PVC 管预留出缺陷数量及位置,缺陷长度为  $300 \text{ mm}$ ,缺陷位置分别设在锚杆中部和底部处,缺陷采用填充

基于小波分析的砂浆锚杆锚固质量缺陷评价——杨健辉,等

塑料泡沫模拟,如图2所示。



a—无缺陷; b—含1个缺陷; c—含2个缺陷

1—预制锚杆; 2—岩层; 3—填充泡沫

图2 全长黏结型锚杆模型示意

Fig. 2 The sketches of wholly grouted mortar anchor models

### 2.2 振动信号的小波分析

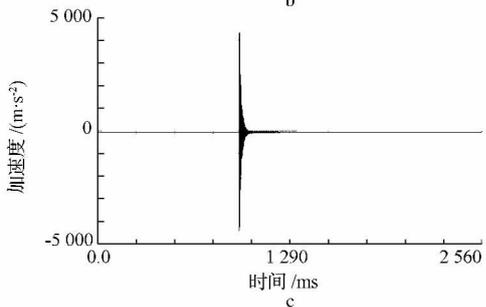
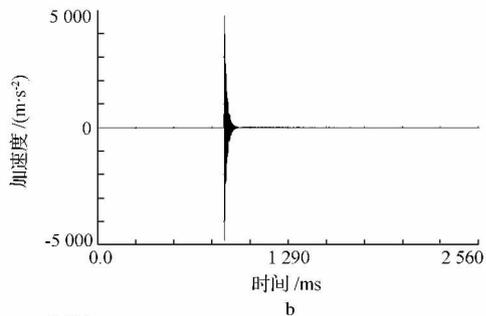
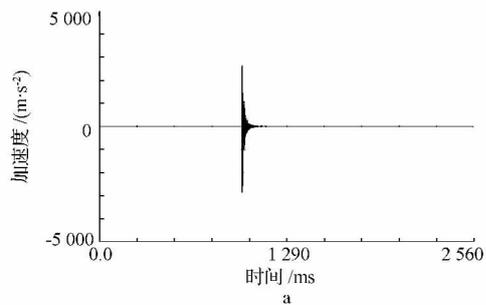
对于底端自由的锚杆,接收到的锚杆底端反射波与入射波同相;对于锚固的锚杆,当应力波传播到锚固段的上界面时,就要发生反射,反射波与初始波反相;同理,锚固段下界面的反射波与入射波同相。根据锚杆的实际锚固情况和围岩的复杂条件,实际得到的速度响应与加速度响应曲线与自由锚杆的波形曲线迥然不同。

试验方法按文献[17-18]确定。首先通过每种试验工况和理论分析,以确定各工况下所应采用的最优激发波,因最优激发波是进行锚固系统动态评价的关键指标,直接决定了所获得的动态响应信号的优劣<sup>[18]</sup>;然后再通过小波分析工具提取最能反映当前振动工况的波形,从而判断锚杆锚固质量以及缺陷的位置。如图3即为上述三种工况的一维振动加速度响应曲线。

对图3中的加速度响应曲线,采用 Matlab 对锚杆端部的动态信号进行小波分析,结果如图4-图6所示。因锚杆振动的频率特性以及时域波形与锚杆受到激励时所产生的能量有关,因而可通过振动能量特性与频率之间的关系,建立锚杆振动频率与拉力之间的响应关系<sup>[19]</sup>。

由于图3a中所测到的振动波形衰减迅速,因此底端反射不易识别。但对照其时频谱图图4,可以找到一个行波周期,并通过时域波形可以计算出与锚杆实际长度一致;同时可以发现,时域波形与时频谱中高频值区域一一对应。其他两种工况,也有同样的规律。由此可以判断锚固质量及缺陷的位置和数量。

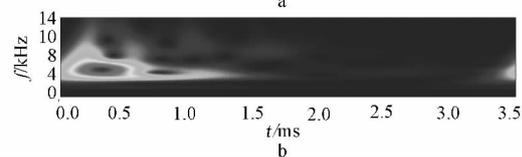
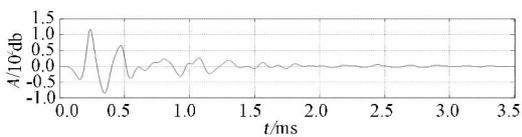
由图4-图6可知:锚杆动力响应曲线的时频谱可以反映应力波在时间序列上的衰减和反射特性,因此可以比较准确地拾取反射信号,从而确定锚



a—无缺陷; b—含1个缺陷; c—含2个缺陷

图3 三种锚杆模型的加速度响应曲线

Fig. 3 The acceleration response curves of three testing models



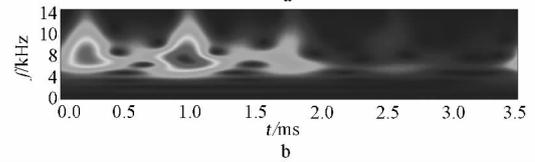
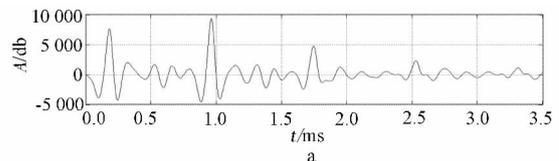
a—时域波形; b—时域频谱

图4 无缺陷时模型的频谱

Fig. 4 The time-frequency diagram of anchor models

杆的长度和缺陷位置及长度,其中,反射信号越明显,时频谱中高频区频率就越高,反之则越低。故可根据时频谱中高频值区域的情况判断应力波的衰减程度,进而判断锚杆的锚固质量。若高频值出现的越多,高频区频率值越高,则锚固质量就越差。如图5、图6所反映的工况,其锚固质量较差,而图4a的一次行波周期内频率已衰减至低频状态,因此锚固质量较好。

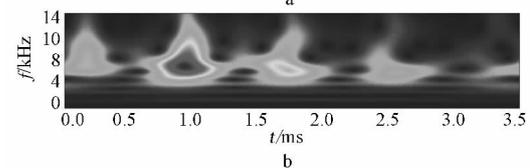
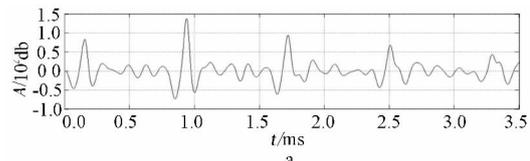
通过模型修正试验,使围岩模拟尽可能与现场



a—时域波形; b—时域频谱

图5 含1个缺陷时模型的频谱

Fig. 5 The time-frequency diagram of anchor models



a—时域波形; b—时域频谱

图6 2个缺陷时模型的频谱

Fig. 6 The time-frequency diagram of anchor models

with two defects

工程地质条件相近,并在环境噪声尽可能小的情况下采集动态信号,就可以获得较为理想的动态曲线,从而提高判断锚固质量的准确度,以便能更好地对锚固质量进行客观评价。

### 3 结语

1) 基于一维弹性杆的波动理论,建立了锚杆锚固状态下的纵向往动力学模型,导出了锚杆-锚固介质系统共同作用时的纵向往波动方程,得到了锚杆端头在激发荷载状态下的动态响应解析解。

2) 针对锚固系统的复杂性,采用模型试验分析的方法,发现通过对锚杆端头所测到的加速度响应曲线的时频分析,并可以正确判断锚固质量和缺陷位置;其次,振动波形与各工况之间具有内在联系,可通过三个度量参数,即一次行波周期、时频谱中的频率值、能量衰减程度对锚固质量进行判断;尤其是时频谱中的频率值能有效地反映锚固质量好坏,即锚固质量越好,则锚杆中应力波衰减就越快。

### 参考文献

- [1] 王思敏,杨志法,刘竹华. 地下工程岩体稳定分析[M]. 北京: 科学出版社, 1984.
- [2] 胡厚田. 土木工程地质[M]. 北京: 高等教育出版社, 2001.

- [3] 于学颢,郑颖人. 地下工程围岩稳定分析[M]. 北京: 煤炭工业出版社,1980.
- [4] 董方庭,宋宏伟. 巷道围岩松动圈支护理论[J]. 煤炭学报, 1994,19(1): 21-32.
- [5] Neilson R D, Ivanovic A, Starkey A J, et al. Design and Dynamic Analysis of a Pneumatic Impulse Generating Device for the Non-Destructive Testing of Ground Anchorages[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2007, 21(6): 2523-2545.
- [6] 程良奎. 岩土锚固的现状与发展[J]. 土木工程学报, 2001, 34(3): 7-13.
- [7] 杨新安,陆士良. 中国煤矿的锚杆支护[J]. 中国煤炭,1995(3): 5-8.
- [8] Nakayama M, Beaudoin B B. A Novel Technique Determining Bond Strength Developed Between Cement Paste and steel[J]. Cement and Concrete Research, 1987, 22(3): 478-488.
- [9] 王富春,李义,孟波. 动测法检测锚杆锚固质量及工作状态的理论与应用[J]. 太原理工大学学报, 2002, 33(2): 169-172.
- [10] 李义,王成. 应力反射波法检测锚杆锚固质量的实验研究[J]. 煤炭学报, 2000, 25(2): 160-164.
- [11] Ivanovic A, Neilson R D. Influence of Geometry and Material Properties on the Axial Vibration of a Rock Bolt[J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 2008, 40(4): 941-951.
- [12] 王秋萍,张虎,吴迎春. 金属杆中纵振动固有频率的研究[J]. 兰州交通大学学报:自然科学版, 2005, 24(3): 144-150.
- [13] 郭凌云,肖明,任祎. 端锚式锚杆数值模拟及其受力分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(1): 4221-4226.
- [14] 许明,张永兴. 锚杆低应变动测的数值研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(9): 1538-1541.
- [15] 杨天春,吴燕清,夏代林. 基于相位推算的锚杆施工质量无损检测分析方法[J]. 煤炭学报, 2009, 34(5): 629-633.
- [16] 王成. 锚杆锚固质量动测新技术的研究[D]. 太原: 太原理工大学, 1998.
- [17] 孟祥程. 基于现场基坑锚杆的动力测试与评价方法研究[D]. 焦作: 河南理工大学, 2013.
- [18] 杨滢涛. 金属锚杆端锚状态下的振动检测度量参数研究[D]. 焦作: 河南理工大学, 2010.
- [19] 孟祥程,杨健辉,杨滢涛. 基于分形维的锚杆有效振动信号特征的提取方法[J]. 玻璃钢/复合材料, 2013(4): 35-38.

(上接第156页)

应的节能减排效果。从具体工程中看出,消能减震阻尼器凭借其自身材料的可回收利用及良好的减震功能,不失为一种良好的绿色加固措施。

4) 绿色环保是当今建筑发展趋势,建筑加固改造技术也应顺应时代的发展潮流。对目前有历史意义的既有建筑符号应在保留基础上进行改造,在此前提下将所采用绿色建筑技术需与建筑功能紧密结合。绿色建筑技术在具体的应用过程中不应该是片面、局部地技术堆砌,而是要从整体上综合考虑,进行有效的组织,系统实施。在改造中须采用较为可靠适用的绿色建筑技术。

## · 会 讯 ·

全国钢结构设计与施工学术交流会拟于2014年6月底7月初在新疆乌鲁木齐市召开,会议面向全国征集与钢结构行业相关的设计、施工与新技术、新材料的学术文章,请广大设计师、工程技术人员及从事钢结构教学研究及爱好者踊跃投稿并参加会议。

论文征集范围:1) 钢结构绿色节能体系;2) 钢结构住宅产业化新技术;3) 复杂结构的设计新技术;4) 高层重型钢结构;5) 大跨度空间钢结构设计;6) 钢-混凝土组合结构设计;7) 桥梁钢结构设计;8) 高效能钢材的研制和应用;9) 钢结构防火、防腐蚀及涂装技术;10) 其他相关结构的设计与应用。

论文截止日期:2014年3月25日前将论文题目、摘要(不超过200字)、作者姓名、联系地址、邮编、电话等报大会筹备组。2014年5月5日之前报送电子版论文全文(5号字、A4版面、不超过5版)。

本次大会拟由国家级刊物《钢结构》杂志正式出版论文集,会议将评选优秀论文,并给予获奖论文奖励。

地址:北京海淀区三里河路9号

Email: gjgsj2014@163.com

电话:010-56034168、88130775

传真:010-88130775

## 参考文献

- [1] GB 50292—1999 民用建筑可靠性鉴定标准[S].
- [2] GB 50023—95 建筑抗震鉴定标准[S].
- [3] GB 50011—2001 建筑抗震设计规范[S].
- [4] GB 50367—2006 混凝土结构加固设计规范[S].
- [5] JGJ 123—2000 既有建筑地基基础加固技术规范[S].
- [6] 唐曹明,黄世敏,王亚勇,等. 中国国家博物馆老馆加固改造结构设计[J]. 建筑结构, 2011, 41(6): 31-35.
- [7] 沈朝霞. 绿色建筑理论在建筑设计中的应用[J]. 工业建筑, 2012, 42(增刊): 41-43.
- [8] 刘强,邱立平,张军杰. 绿色生态节能技术在建筑改造中的应用研究[J]. 工业建筑, 2011, 41(2): 10-13.
- [9] GB 6566—2001 建筑材料放射性核素限量[S].
- [10] GB/T 50378—2006 绿色建筑评价标准[S].