

振动点载荷试验仪的设计

周子龙, 吴志波, 赵云龙

中南大学资源与安全工程学院, 长沙 410083

摘要 为了更加科学地研究点载荷循环加载下不同振动频率、激振力对岩石等材料力学性质的影响, 提出一种振动点载荷试验仪设计方法。振动点载荷试验仪的支架底部平台上设置了静压加载装置, 支架顶部平台上设置了特制的振动电机, 竖向设置的上加压锥与振动电机底部铸造成一体, 下加压锥与静压加载装置上部的加压活塞相连并可通过隔板中心孔随之上下运动, 上加压锥与下加压锥之间放置试件。通过调整振动电机的偏心块夹角及转速, 分别得到不同的激振力及振动频率, 可测试出试件在不同激振力、振动频率下的点载荷强度及破坏所需时间, 进而通过绘图分析可得到使破岩效率最佳且对掘进机截齿损害最小的振动频率与激振力组合。

关键词 振动点载荷试验仪; 振动频率; 激振力

中图分类号 TU458.3

文献标志码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2014.18.004

The Design of Vibration Point Load Tester

ZHOU Zilong, WU Zhibo, ZHAO Yunlong

School of Resources and Safety Engineering, Central South University, Changsha 410083, China

Abstract A vibration point load tester is designed in this paper, for studying the mechanical properties of rock subjected to a cyclic point load, with different vibration frequencies and exciting forces. The instrument consists of a static loading unit and a vibration loading unit. The former is a hydrostatic pressure device fixed on the bottom platform of the bracket. And the latter is a special vibration motor, installed on the top platform of the bracket. The upper loading cone and the special vibration motor are cast as a whole. The lower loading cone is connected with the upper pressurized piston of the hydrostatic pressure device, and can move up and down through the diaphragm hole. Different exciting forces and frequencies can be assigned by adjusting the eccentric block's angle and the motor speed, then the point load and the acting time for reaching the failure point of the rock body under a given exciting force and frequency can be determined. And the best combination of the vibration frequency and the exciting force, with the best rock fragmentation efficiency and the least harm to boring machine cutters, can be obtained.

Keywords vibration point load tester; vibration frequency; exciting force

随着连续化开采在煤矿等软岩矿山的成功应用, 硬岩矿山连续化开采也逐渐提上日程。为此, 国内外各大矿山机械公司投入巨资研究适用于硬岩连续开采的采矿机械, 如瑞典 Atlas Copco 公司与 Bofiden 公司等联合研制的 DBMN7050 采矿机, 德国 Wirth 公司与加拿大 HDPK 采矿研究中心联合研制的四臂式 CM 连续采矿机, 美国 Robbins 公司研制的巷道掘进式的移动采矿机等^[1]。但这些研制成果在经济适用性等方面还远未达到硬岩矿山连续化开采的要求。在众多采矿或破岩机械中, 目前有两种应用最广, 一种是悬臂式掘进机, 另一

种是获得 2013 年中国“十大矿山机械产品”称号的上海上鸣高频破碎锤。悬臂式掘进机的基本工作原理是, 依靠履带式行走机构产生的前进动力, 将悬臂顶压在岩石上, 然后借助于悬臂上不停旋转的切割头切割岩石; 切割头上按一定间距和角度布置若干截齿, 工作时实际上是截齿随着切割头的旋转冲击破岩。高频破碎锤的基本破岩原理是斗齿在激振器的作用下对物体(目标破碎物)产生循环振动冲击而实现破碎。无论是悬臂式掘进机的截齿还是高频破碎锤的斗齿, 其与破碎物的接触面积均很小, 可看做是“点接触”, 其破岩机

收稿日期: 2013-11-06; 修回日期: 2014-05-05

基金项目: 国家自然科学基金优秀青年科学基金项目(51322403); 湖南省科技计划重点项目(2013SK2011)

作者简介: 周子龙, 教授, 研究方向为岩石力学及岩土工程灾害防治, 电子信箱: zlzhou@mail.csu.edu.cn; 吴志波(共同第一作者), 硕士研究生, 研究方向为疲劳力学, 电子信箱: wushuwei@csu.edu.cn

引用格式: 周子龙, 吴志波, 赵云龙. 振动点载荷试验仪的设计[J]. 科技导报, 2014, 32(18): 31-35.

理可解释为利用点载荷循环加载使物体疲劳破坏,即“点疲劳”。因此,可以利用“点疲劳”破岩特性来提高这两种机械的破岩效果,如找到最佳破岩频率、激振力等,以使其更好地适用于硬岩矿山连续化开采。

目前对循环载荷作用下岩石的疲劳破坏及不可逆变形等进行过系统的研究^[2-9],认为岩石的疲劳寿命主要由岩石本身结构、幅值载荷和载荷差决定,并得出了与混凝土疲劳变形类似的轴向变形三阶段规律。Ray等^[9]对单轴循环作用下应变率效应对砂岩力学特性的影响进行了研究,发现疲劳强度和杨氏模量随应变率增加而增加,破坏时的极限应变受应变率控制。Bagde等^[7-9]对不同波形、振幅、加载频率条件下完整砂岩的疲劳特性进行了深入研究,认为加载波形、幅值和加载频率均对岩石疲劳特性有很大影响,方波、低加载频率和低振幅作用下岩石更容易疲劳破坏。陶振宇等^[10]研究了循环加载下波形和加载幅值对岩石力学特性的影响,结果显示,单个循环中加载波形为三角波时引起的岩石变形小于正弦波引起的变形。Burdine^[11]对不同循环加载条件下岩石累积损伤特性进行了研究,认为应变率效应对其影响微乎其微,更进一步的研究证实频率在15~55 Hz范围内改变加载频率几乎无影响。Haimson^[12]对循环加载下硬岩的疲劳特性进行了系统的研究,认为硬岩在循环加载下强度得到了很大削弱,如在应力控制、斜波加载、加载频率为1 Hz的循环加载下岩石单轴抗压和抗拉强度只有其静力加载的60%~80%,同时通过对试件进行声发射和高速摄影研究,得出微裂纹扩展破裂是其主要疲劳破坏机制。然而以上研究均是在单轴或三轴下进行的疲劳试验,属于“面疲劳”,国内外关于“点疲劳”的研究目前尚未见文献报道。综上所述,对点载荷循环加载的研究无论在工程应用上还是理论上都有重要意义。

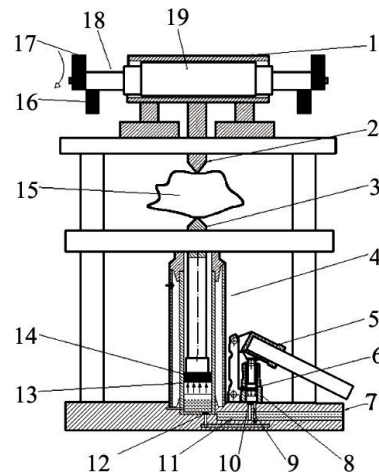
目前,传统的点载荷仪作为一种应用简便的岩块强度测试仪器而被广泛使用^[13]。但现有的点载荷仪基本都停留在静载加压测试试件点载荷强度的层面,还无法对试件进行不同振动频率和激振力的试验。为此,本文提出一种将静压部件与振动单元相结合的振动点载荷试验仪设计方法。

1 结构特点及工作原理

1.1 振动点载荷试验仪结构特点

振动点载荷试验仪的结构如图1所示。该试验仪由静压加载单元和振动加载单元组成,静压加载单元是在支架底部平台上安装的静压加压装置,振动加载单元是在支架顶部平台上安装的振动电机装置。竖向设置的上加压锥与特制的振动电机底部铸造成为一体,下加压锥与静压加压装置上部加压活塞相连并可通过隔板中心孔随之上下运动,上加压锥和下加压锥之间放置试件。根据文献[14]对试验装置的设计与制造要求,本试验仪的装置应在最大试验载荷的反复作用下不产生永久性的扭曲,在整个试验过程中,压板必须保持同一轴线上,误差不超过±0.2 mm。加载系统的刚度主要是为了避免当进行不规则形状试件试验时的滑动问题。因

此,本试验仪采用经淬火处理的45号钢作为框架材料,中间用软硬材料配合,以增加抗磨性;立柱选用4根,以避免多次加压之后上下加压锥的对中性出现偏差。同时参照文献[14]对加压锥的要求,本试验仪加压锥的形状及尺寸如图2所示,其中长度L可根据具体情况加以调整,材料选用坚硬材料制作,如碳化钨和硬化钢,以保证在试验过程中不出现损坏。



1. 振动电机; 2. 上加压锥; 3. 下加压锥; 4. 静压加压装置; 5. 手柄; 6. 小活塞; 7. 支架; 8. 小油缸; 9. 连通管; 10. 吸油单向阀; 11. 油箱; 12. 排油单向阀; 13. 大油缸; 14. 大活塞; 15. 试件; 16. 固定偏心块; 17. 可调偏心块; 18. 旋转轴; 19. 内置电动机

图1 振动点载荷仪结构

Fig. 1 Schematic diagram of vibrating point load tester

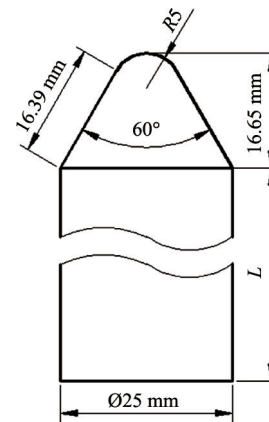


图2 加压锥尺寸

Fig. 2 Schematic diagram figure of loading cone

振动点载荷试验仪的功能特点:

- 1) 振动点载荷试验仪不仅可测出静载下试件的点载荷强度和破坏特性,而且能测出试件在不同激振力、不同振动频率共同作用下的点载荷强度及破坏特性。
- 2) 振动点载荷试验仪的加压锥材料为碳化钨或硬化钢等极坚硬材料,适用于绝大多数不同硬度的岩石等材料。
- 3) 试件不需要特殊加工,各种不规则样品均稍作加工即可用于测试。

1.2 振动点载荷试验仪工作原理

将试件安装于上加压锥与下加压锥之间,通过调整液压加压装置使下加压锥上升,最终使上、下加压锥紧密接触试件的上下表面,并将压力表的压力值调整至零点。振动电机开启后可以产生高频振动,这种振动可以很好地传给与振动电机铸造为一体的上加压锥,因是高频振动,且振动电机固定在支架上部平台上,所以上加压锥的振幅很小,在竖直方向的位移可以忽略,相当于只是将振动造成的应力波传给了试件,不会造成试件在振动加压时松动,从而保证了试件在动载下稳定地进行试验。然后通过液压加压装置对试件进行加压直至试件破坏,记录此时的静压值、振动电机的激振力及转速,并由电机的转速求出电机的振动频率。通过调整振动电机的偏心块夹角和转速,可以分别得到不同的激振力和振动频率,从而可测试出试件在不同激振力和不同振动频率下的点载荷强度及破坏所需时间。

激振力和振动频率的调节方法如下:

1) 如图1所示,当振动电机高速旋转时,可以带动固定偏心块和可调偏心块随之转动。位于外部的可调偏心块表面装有标明最大激振力百分数的标尺,固定偏心块和可调偏心块均用紧固螺栓压紧在电机转轴上。转轴两端面刻有基准线,旋松两侧可调偏心块的压紧螺栓,两侧可调偏心块同向转动,使轴端基准线对准可调偏心块的激振力标尺刻线,调至所需激振力,拧紧可调偏心块的压紧螺栓,装上防护罩,完成调节激振力的全部过程。需要注意的是,除特殊应用情况外,振动电机转轴两端偏心块的位置必须相对应,两端偏心块百分数的设定必须相等,否则振动电机会产生巨大的错向激振力,损伤电机的振动机构。

2) 振动频率的调节相对简单,只需调节内置电动机的转速,然后通过相关公式换算得到不同的振动频率。

2 试验方法

2.1 试件要求

取一批工程条件相同、尺寸15~85 mm的规则或不规则岩块作为试件,如图3所示, D/W 之比在0.3和1.0之间,最好接近1.0; L 至少为 $0.5W$ 。

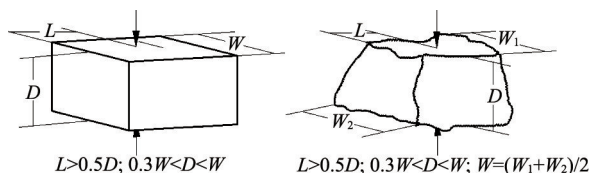


图3 试件尺寸的要求

Fig. 3 The requirement of sample's size

将试件分成两组,其中一组试件数量较少,用于静载试验;另外一组试件数量较多,再分为若干小组,用于动载和静载联合作用试验。

因本研究只是阐述一种设计思路,并未做真实试验,所以无法给出具体岩石性质、取样地点和试件规格,这里只给出对所测试岩石试件的2点要求:

1) 试验样品定义为需要确定单个点载荷强度的一组强度相接近的岩石试件。

2) 试验样品的数量应足够多,其尺寸和形状应符合径向试验、轴向试验、方块体或不规则块体试验的相关规定^[4]。对于常规试验和分类试验,要用完全饱和、天然含水量的试件。

2.2 静载下岩石点载荷强度的测试

2.2.1 试件安装与加载

选择试件最小尺寸方向为加载方向。将试件放入上下加压锥的球端圆锥之间,使上下锥端位于试件中心并与试件紧密接触。接触点距试件自由端的距离不应小于加载点间距的1/2。

试件安装后,调整压力表指针到零点,以在10~80 s内能使试件破坏,即以每秒0.05~0.1 MPa的加载速度匀速加载直到试件破坏,记下加载速率 v 和破坏时的压力 F 。

2.2.2 试件破坏面特点及尺寸测量

正常的试件破坏面应同时通过上、下两个加载点,如果破坏面只通过一个加载点便产生局部破坏,则该次试验无效,应舍弃。破坏面的描述还应包括破坏面的平直或弯曲等情况。

试件破坏后,须对破坏面的尺寸进行测量,测量的尺寸包括上、下两加载点间的距离 D 和垂直于加载点连线的平均宽度 W 。

2.2.3 试验结果整理

试验结果需详细记录每个试件做试验时的加载速率 v 、压力 F 、加载点间距离 D 、破坏面宽度 W 、破坏所需时间 t 、试件的破坏特征。

1) 计算公式。点载荷强度 I_s 是以 P/D^2 之比计算的^[4],其中 D_c 为等价岩芯直径。

对于岩芯径向试验:

$$D_c^2 = D^2 \quad (1)$$

$$P = C \cdot F \quad (2)$$

则点载荷强度计算公式为

$$I_s = \frac{C \cdot F}{D^2} \quad (3)$$

式中, C 为仪器标定系数,即千斤顶的活塞面积, mm^2 ; F 为试件破坏时的压力表读数,MPa; D 为加载点间距离,mm。

对于岩芯轴向试验、方块体试验和不规则块体试验:

$$D_c^2 = 4A/\pi \quad (4)$$

$$P = C \cdot F \quad (5)$$

$$A = W \cdot D \quad (6)$$

则点载荷强度计算公式为

$$I_s = \frac{C \cdot F \cdot \pi}{4 \cdot W \cdot D} \quad (7)$$

式中, W 为试件破坏面上垂直于加载点连线的平均宽度, mm。

2) 尺寸修正。一块岩石试件修正的点载荷强度指数 $I_{s(50)}$ 定义为用 $D=50$ mm 的径向试验所测得的 I_s 值。

通过整理不同试件的 P 和 D_c^2 , 用双对数点绘法将其绘制成坐标曲线图则其关系通常是一直线, 对明显偏离直线的点可不考虑。然后用内插法, 必要时可用外推法, 求得相应于 $D_c^2=2500$ mm² 的 $I_{s(50)}$ 值, 再按 $I_{s(50)} = P_{50}/50^2$ 计算修正后的点载荷强度指数。

3) 平均值的计算。从有效试验中分别舍去两个最高和最低的值, 然后计算其余数值的平均值。

2.3 不同激振力对点载荷强度的影响

从第二组试件中取若干小组, 取其中一小组中的 1 个试件。安装好试件之后开启振动电机, 保持振动频率 ν_1 不变, 选择 1 个激振力 M_1 , 以与静载试验相同的加载速率施加静载, 直至试件破坏。按同样步骤和相同的频率、激振力, 将此小组所有试件做完; 保持振动频率 ν_1 不变, 改变激振力大小 (M_2, M_3, M_4, \dots), 然后按同样步骤将所取各小组所有试件均做完。

从第二组试件中再取若干小组, 保持振动频率 ν_2 不变, 改变激振力大小 (M_1, M_2, M_3, \dots), 按上述步骤进行试验。

具体分组为

$$\left\{ \begin{array}{l} \nu_1 \left\{ \begin{array}{l} M_1 \text{ 做若干试样} \\ M_2 \text{ 做若干试样} \\ \vdots \end{array} \right. \\ \nu_2 \left\{ \begin{array}{l} M_1 \text{ 做若干试样} \\ M_2 \text{ 做若干试样} \\ \vdots \end{array} \right. \\ \vdots \end{array} \right.$$

试验过程中除了记录上述静载试验所需试件参数 F 、 W 、 D 外, 还需记录振动电机的转速 n (用于计算振动频率 ν) 和激振力 M 。通过选取不同的电机转速和激振力, 可以测试出不同振动频率和激振力下试件的振动点载荷强度和破坏特性, 将之与同组静点载荷强度试验所得到的结果对比便可得出施加加载后岩石的强度和破坏特性的变化。

2.4 不同振动频率对点载荷强度的影响

此试验的分组为

$$\left\{ \begin{array}{l} M_1 \left\{ \begin{array}{l} \nu_1 \text{ 做若干试样} \\ \nu_2 \text{ 做若干试样} \\ \vdots \end{array} \right. \\ M_2 \left\{ \begin{array}{l} \nu_1 \text{ 做若干试样} \\ \nu_2 \text{ 做若干试样} \\ \vdots \end{array} \right. \\ \vdots \end{array} \right.$$

显然, 2.4 节试验和 2.3 节试验的差别仅在于先变振动频

率还是先变激振力, 两种试验的结果可以共用。因此, 将 2.3 试验结果合理地整理一下便可用于研究不同振动频率对岩石点载荷强度的影响。

2.5 最优振动频率与激振力组合的确定

若将不同加载频率 ν 所对应的 (t, M) 和 (I_s, M) 绘制成曲线关系图, 就可以更明显地看出振动频率一定时动点载荷强度、破坏所需时间和激振力大小三者之间的关系。为分析简洁明了起见, 取两个加载频率的数据, 则三者之间的关系曲线如图 4 和图 5 所示。

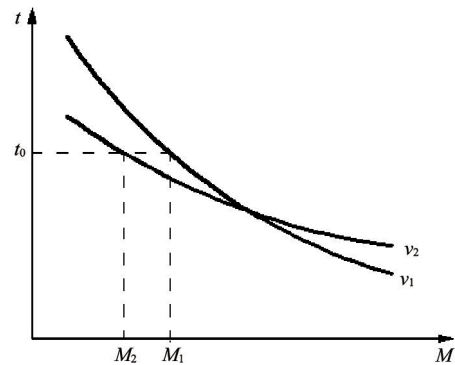


图 4 激振力和破坏所需时间的关系曲线

Fig. 4 Centrifugal force vs time to failure

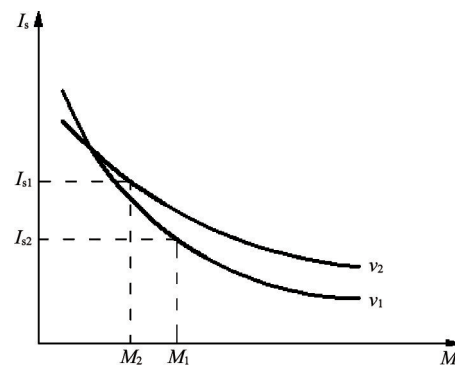


图 5 激振力和点载荷强度的关系曲线

Fig. 5 Centrifugal force and point load strength

在掘进机连续采矿中, 往往对施工进度有所要求, 因此可根据施工进度的要求先确定破岩所需时间 t_0 , 这样在图 4 曲线上可确定激振力 M_1 和 M_2 , 在图 5 曲线上可确定出各种频率下岩石的动点载荷强度 I_s , 则 I_s 较低的激振力 M_1 和振动频率 ν_1 便是破岩效率最佳且对掘进机破碎齿损害最小的最优参数组合。

3 结论

相比于传统点载荷仪, 振动点载荷试验仪不仅可测试静载下试件的点载荷强度和破坏特性, 而且还可测试试件在不同激振力、不同振动频率共同作用下的点载荷强度及破坏特性。利用振动点载荷试验仪可得出最佳振动频率和激振力

的组合,对研究动载下岩石等材料的破坏机理和深井机械化连续开采掘进机的改进均有借鉴意义。

由于目前尚未制作出振动点载荷试验仪样机,还无法通过试验获得相关有效数据。

参考文献(References)

- [1] 李夕兵,姚金蕊,杜坤.高地应力硬岩矿山诱导致裂非爆连续开采初探——以开阳磷矿为例[J].岩石力学与工程学报,2013,32(6):1101-1111.
Li Xibing, Yao Jinrui, Du Kun. Preliminary study for induced fracture and non-explosive continuous mining in high-geostress hard rock mine: A case study of kaiyang phosphate mine[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(6):1101-1111.
- [2] 葛修润,卢应发.循环荷载作用下岩石疲劳破坏和不可逆变形问题的探讨[J].岩土工程学报,1992,14(3):56-60.
Ge Xiurun, Lu Yingfa. Discussion on fatigue failure and irreversible deformation of rock under cyclic loading[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1992, 14(3): 56-60.
- [3] 葛修润,蒋宇,卢允德,等.周期荷载作用下岩石疲劳变形特性试验研究[J].岩石力学与工程学报,2003,22(10):1581-1585.
Ge Xiurun, Jiang Yu, Lu Yunde, et al. Testing study on fatigue deformation law of rock under cyclic loading[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(10): 1581-1585.
- [4] 蒋宇,葛修润,任建喜.岩石疲劳破坏过程中的变形规律及声发射特性[J].岩石力学与工程学报,2004,23(11):1810-1814.
Jiang Yu, Ge Xiurun, Ren Jianxi. Deformation rules and acoustic emission characteristics of rocks in process of fatigue failure[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(11): 1810-1814.
- [5] 章清叙,葛修润,黄铭,等.周期荷载作用下红砂岩三轴疲劳变形特性试验研究[J].岩石力学与工程学报,2006,25(3):473-478.
Zhang Qingxu, Ge Xiurun, Huang Ming, et al. Testing study on fatigue

deformation law of red-sandstone under triaxial compression with cyclic loading[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006(3): 473-478.

- [6] Ray S K, Sarkar M, Singh T N. Effect of cyclic loading and strain rate on the mechanical behaviour of sandstone[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 1999, 36(4): 543-549.
- [7] Bagde M N, Petroš V. Waveform effect on fatigue properties of intact sandstone in uniaxial cyclical loading[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2005, 38(3): 169-196.
- [8] Bagde M N, Petroš V. The effect of machine behaviour and mechanical properties of intact sandstone under static and dynamic uniaxial cyclic loading[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2005, 38(1): 59-67.
- [9] Bagde M N, Petroš V. Fatigue properties of intact sandstone samples subjected to dynamic uniaxial cyclical loading[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2005, 42(2): 237-250.
- [10] Tao Z Y, Mo H L. An experimental study and analysis of the behaviour of rock under cyclic loading[C]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 1990, 27(1): 51-56.
- [11] Burdine N T. Rock failure under dynamic loading conditions[J]. Society of Petroleum Engineers Journal, 1963, 3(1): 1-8.
- [12] Haimson B C. Mechanical behaviour of rock under cyclic loading: 9F, 1T, 11R[C]. 3rd Congress ISRM, Denver Colorado, September 1-7, 1974.
- [13] 朱成顺.快速测量砖强度的点载荷仪:中国,86202432[P].1987-07-15.
Zhu Chengshun. Fast measurement point load strength meter brick: China, 86202432[P]. 1987-07-15.
- [14] Franklin J A. Suggested method for determining point load strength[C]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 1985, 22(2): 51-60.

(责任编辑 韩星明)

·学术动态·



奋力实现中国梦云南报告活动在昆明举行

2014年5月23日,中国科协“弘扬科学道德 践行‘三个倡导’ 奋力实现中国梦”云南报告会在昆明召开。中国科协副主席、党组副书记、书记处书记张勤出席报告会并致辞。中共云南省委常委、省委高校工委书记、滇中产业集聚区(新区)党工委副书记李培主持报告会。

钱学森之子钱永刚、中国工程院院士戚发轫、中国工程院院士孙永福分别作题为“钱学森的科学报国精神”、“中国载人航天工程和载人航天精神”、“青藏铁路——世界工程建设的伟大壮举”的报告,从不同角度讲述了中国老一辈科学家和广大科技工作者胸怀远大理想、坚持科学报国,为实现国家富强、民族振兴而不懈奋斗的光辉事迹。

2013年,中国科协先后在13个省(区、市)举行专场报告会,巡回报告活动主题鲜明,内涵丰富,紧扣实现中华民族伟大复兴中国梦这一时代主题,受到了社会各界的高度评价和中央领导的充分肯定。

详见中国科协网 <http://www.cast.org.cn/n35081/n35096/n10225918/15660384.html>。