

# 基于RFPA-SRM的顺倾软岩边坡断层影响机理

陈鹏,周志伟,曹兰柱

辽宁工程技术大学矿业学院,辽宁阜新 123000

**摘要** 结合元宝山露天矿工程实例,基于细观力学方法和强度折减理论,应用RFPA-SRM对比模拟了有无断层作用下,顺倾软岩边坡失稳的动态过程,分析了边坡的稳定性,研究了断层对边坡失稳的影响机理。由结果分析得出:考虑断层时, $F_s=1.099>1$ ,边坡稳定,不考虑断层时, $F_s=1.176$ ,稳定系数增加0.077;边坡失稳破坏是一个渐进的过程,经历了裂隙的发生、扩展和贯通阶段,后形成滑动面,发生滑坡,同时存在拉伸和剪切两种破坏方式;断层存在导致的应力状态改变和自身的强度特性是使滑坡模式和稳定性发生变化的根本原因。

**关键词** 断层;顺倾软岩边坡;RFPA-SRM;拉破裂

**中图分类号** TD824

**文献标志码** A

**doi** 10.3981/j.issn.1000-7857.2013.36.004

## Fault Influence in Slope of Down Dip Soft Rock Based on RFPA-SRM

CHEN Peng, ZHOU Zhiwei, CAO Lanzhu

College of Mine, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, Liaoning Province, China

**Abstract** According to the actual data of Yanbaoshan open-pit and based on the mesoscopic mechanics method and the strength reduction method, the dynamic instability processes of the down dip soft rock with and without fault are simulated by the RFPA-SRM, then the stability of the slope, the affected form and the failure mechanism of the fault are studied. It is indicated that with fault,  $F_s=1.099$ , without fault,  $F_s=1.176$ , the slope is stable; the landslide or the failure of the slope is a gradual process of crack generation, extension, cut-through stages and the tensile failure and the shear failure co-exist; the root cause is that the fault causes the change of the failure mode and the stability of the slope through the rock stress condition influenced by the fault and the strength characteristics.

**Keywords** fault; down dip soft rock slope; RFPA-SRM; tensile failure

### 0 引言

顺倾软岩边坡是露天矿生产中经常遇到的一类边坡,坡高较低,坡长一般较长,同时,由于构造和自身强度特性等原因,其稳定性相对不高<sup>[1]</sup>。岩体在漫长的地质演化中,内部会形成大量的断层、节理<sup>[2]</sup>,当软岩边坡受到断层影响时,其稳定性将进一步下降,破坏模式与机理也变得复杂而多样,具有显著地受断层等结构面控制的特征。在中国许多露天矿生产过程中,顺倾软岩边坡滑坡时有发生<sup>[3]</sup>,断层作为其影响因素发挥了重要作用。为此,许多学者进行过相关研究,如,杜丽惠等<sup>[4]</sup>应用直接约束法对边坡断层进行研究,阐述了断层对边坡失稳的作用;杨继红等<sup>[5]</sup>利用数值模拟技术分析了断层对边坡失稳模式的影响。但是大多数研究针对高陡岩

质边坡,且方法多为地质力学模型试验或仅考虑剪切破坏的数值模拟<sup>[6-8]</sup>。

本文应用基于细观力学方法和强度折减理论,同时考虑拉破裂与剪破坏的真实破裂过程分析软件RFPA-SRM<sup>[9]</sup>,以元宝山露天矿东帮作为研究背景,分析断层影响下顺倾软岩边坡稳定性,并通过建立对比模型,进一步研究断层对边坡体的影响机理,为露天矿安全生产提供科学依据,并希望为相关工程实践提供一些借鉴。

### 1 边坡工程地质特征

元宝山露天矿地处冲击平原,地表平缓,上层为第四系,其下为侏罗系含煤地层。第四系表层为3~5m厚的亚黏土、

收稿日期:2013-08-05;修回日期:2013-11-22

基金项目:国家自然科学基金项目(51104084,51004103);辽宁省教育厅重点实验室科研项目(LS2010075)

作者简介:陈鹏,教授,研究方向为露天采矿优化设计与边坡稳定,电子邮箱:chenpengmiao@163.com

其余为冲积、洪积圆砾、河泥砾为主,平均厚53.5m。侏罗系含煤地层以泥岩、碳质泥岩、砂岩、煤为主,其中泥岩、砂岩较多,属于软岩,煤层节理较发育。在矿区的东部有一大型断层F1,断层产状为:走向N24°E~N45°E,倾向西北,倾角46°~64°,落差大于200m。由于该断层距到界东帮立面最短水平距离在50~90m之间,对东帮滑坡将有重要影响。地层倾角一般为8°,煤层以马尾状分布,岩性转换处多含有碳质泥岩夹层,根据补勘资料,主要弱层分为1<sup>#</sup>、2<sup>#</sup>、3<sup>#</sup>和4<sup>#</sup>。到界边坡坡角20°,坡高222m。边坡地质剖面图如图1所示,各物理力学指标:C为内聚力、 $\Phi$ 为内摩擦角、E为体积模量、 $\mu$ 为泊松比、 $\Gamma$ 为容重等,见表1。

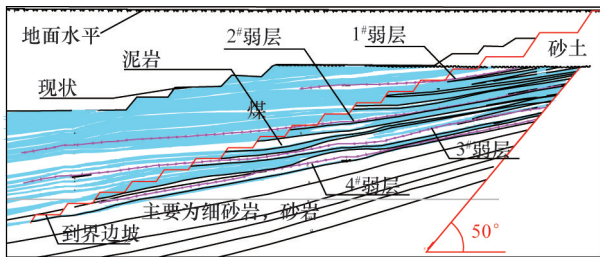


图1 地质剖面图  
Fig. 1 Stratigraphic section

表1 计算所需岩体物理力学指标

Table 1 Geotechnical physical mechanics index for calculation

地层	土、岩	含水率/%	C/kPa	$\Phi/(\circ)$	E/MPa	$\mu$	$\Gamma/(kN \cdot m^3)$
	砂土		0	37.60			22.20
	细砂岩		120	25.00	550	0.30	20.00
第四系	煤	20.10	60	31.00	600	0.29	13.10
侏罗系	砂岩	13.00	173	27.00	880	0.25	21.10
	泥岩	11.50	109	24.66	500	0.35	21.10
	弱层	16.50	2.15	10.86	20	0.45	18.00

## 2 RFPA-SRM 介绍

RFPA-SRM是在RFPA的基础上,将强度折减思想引入细观本构模型中,建立的岩土工程稳定性分析方法。它继承了RFPA的优点,能够反映岩土结构随强度劣化而呈现出渐进破坏诱致失稳的演化过程。与其他数值模拟方法一样,它可以自动搜索最危险滑移面位置,确定其稳定系数,但同时考虑剪切破坏与拉伸破坏,这更符合岩土体破坏的真实情况,其结果更加准确可靠<sup>[10,11]</sup>。

### 2.1 强度准则

RFPA-SRM主要引入具有拉伸截断的Mohr-Coulomb准则作为细观基元破坏的准则。在模拟计算初期,认为细观基元是弹性的,随着基元应力的增加,Mohr-Coulomb准则和最大拉应力准则将分别作为基元破坏的阈值。其具体过程为:

考查拉伸破坏,如拉应力达到给定的拉应力阈值,则基元发生拉伸破坏;若未发生拉伸破坏,则继续考查剪切破坏,如应力状态满足Mohr-Coulomb准则,则基元发生剪切破坏。对已破坏基元通过给定的残余强度系数使其具有一定残余强度,其本构关系用弹-脆性本构关系来表达。

### 2.2 岩土结构失稳判据

目前边坡分析软件的失稳判据主要有两类:一类为迭代分析计算中结果不收敛作为边坡失稳标志;另一类为边坡变形过程中塑性区贯通作为边坡失稳的标志。RFPA-SRM采用折减计算步中出现基元破坏数最大时的时刻作为边坡失稳的临界点,其本质上与上述两类方法是一致的。由于RFPA-SRM在进行计算分析时,自动记录每一折减步中的基元破坏个数,用这种方法来判断边坡失稳,是简单而有效的。

### 2.3 安全系数的定义

RFPA-SRM引入强度折减思想,其安全系数基于强度储备的概念,在强度折减过程中,边坡失稳时刻所求得的折减系数即为边坡安全系数。结合RFPA特有的基元本构模型特征,RFPA-SRM的强度折减方法采用对初始强度 $f_0$ 折减。 $f_0$ 为统一基元的抗压抗剪、抗拉强度,其折减准则为:

$$f_0^{\text{Trial}} = \frac{f_0}{f_s^{\text{Trial}}} \quad (1)$$

式中, $f_0^{\text{Trial}}$ 为试验强度; $f_s^{\text{Trial}}$ 为试验安全系数。

在计算过程中,对强度按一定步长进行折减,则每折减一次,当前的试验强度就对应一个试验安全系数,当基元的破坏数目达到最大值,即边坡失稳时刻,此时的试验安全系数即为最终的安全系数 $F_s$ 。

$$F_s = \frac{1}{1 - (k-1)\Delta} \quad (2)$$

式中, $k$ 为滑坡时计算步数, $\Delta$ 为强度折减系数。

## 3 RFPA-SRM 数值模拟

元宝山露天矿到界东帮边坡将受到断层影响,威胁到露天矿的安全生产。应用RFPA-SRM数值模拟软件分别建立真实模型与对比模型,确定边坡稳定性,分析研究断层对顺倾软岩边坡的作用形式与影响机理,为露天矿安全生产提供依据。

在自重加载条件下,模型的两侧为位移约束,即水平位移为0;模型底部固定不动,相当于固定支座提供的约束,如图2所示。

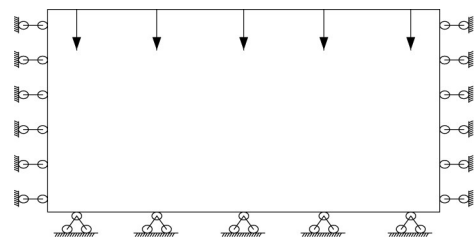


图2 模型边界条件

Fig. 2 Boundary condition of the model

### 3.1 东帮边坡数值模拟

根据补勘资料与工程实际情况,建立数值模型,如图3所示。其中,较暗的区域为弹性模量较小的岩土体。模型经10步折减计算,发生滑坡,按照RFPA-SRM稳定系数定义得出稳定系数:

$$F_s = \frac{1}{1 - (k - 1)\Delta} = \frac{1}{1 - (10 - 1) \times 0.01} = 1.099$$

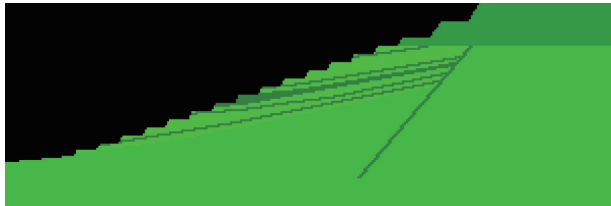


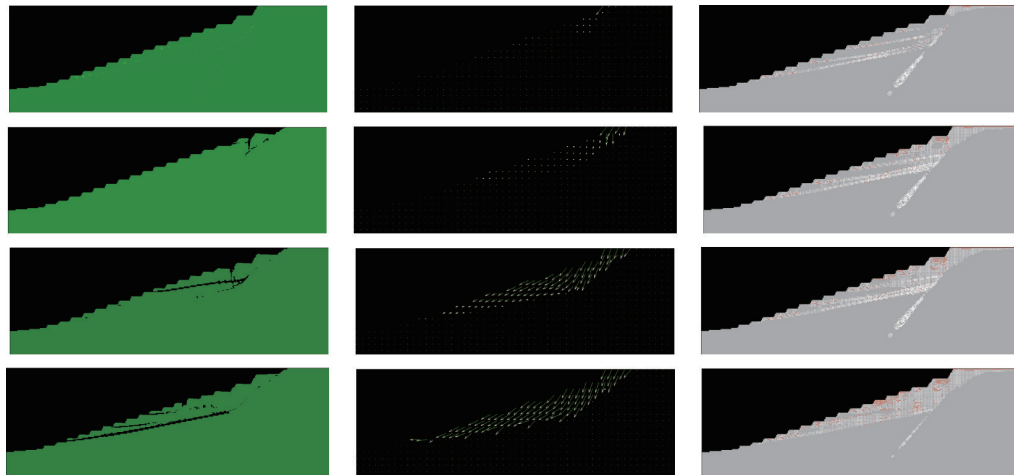
图3 东帮边坡模型

Fig. 3 Model of eastern slope

图4包含东帮边坡失稳过程中的应变带、位移矢量场和

声发射演变过程图。结合应变带和位移矢量场演变过程图可知,上部岩体在自重作用下沿断层,发生以沉降为主的变形,挤压下部岩体沿着弱层向临空面蠕变,裂隙不断产生,随着强度折减的进行,裂隙扩展,连接,折减到10步时,最终沿4#弱层贯通,其与断层连接形成连续滑移面,发生“切层—顺层式”滑移;在这过程中,经历了裂缝发生、扩展和贯通阶段,真实地体现出边坡破坏是一渐进式的过程,并非一蹴而就;2#、3#弱层附近岩体均有不同程度的错动变形。

图4(c)表明,坡面附近岩体主要以拉破裂形式为主,而深部岩体主要以压剪破裂为主,即边坡是在拉、剪的复合作用下发生破坏的;在失稳过程中,坡体岩土体内断层和弱层处首先发生剪切破坏,不断形成微裂隙,破坏范围逐渐增加,达到一定范围后,发生滑坡;可以看出,在强度折减计算过程中,边坡宏观失稳破坏是由其内部岩石微破裂萌生、扩展直至贯通形成的,这些微破裂主要发生在边坡断层、裂隙带或岩层界面等软弱介质周围。



(a) 应变带云图  
(a) Strain nephogram

(b) 位移矢量图  
(b) Displacement field vectorgraph

(c) 声发射图  
(c) Acoustic emission diagram

图4 边坡渐进破坏过程图

Fig. 4 Progressive failure processes

### 3.2 东帮边坡无断层数值模拟

根据补勘资料,建立试验数值模型,如图5所示。其中,较暗的区域为弹性模量较小的岩土体。模型经16步折减计算,发生滑坡,按照RFPA-SRM稳定系数定义得出稳定系数:

$$F_s = \frac{1}{1 - (k - 1)\Delta} = \frac{1}{1 - (16 - 1) \times 0.01} = 1.176$$

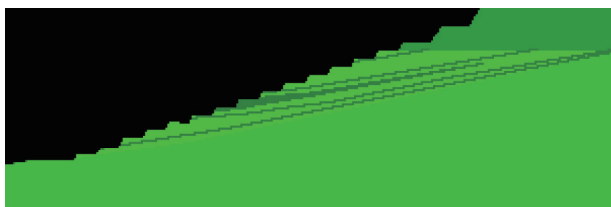


图5 不考虑断层时,东帮边坡模型

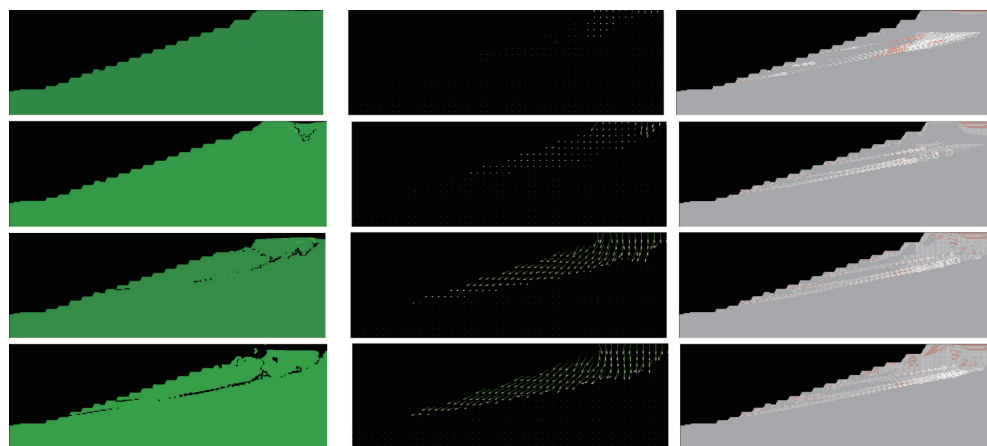
Fig. 5 Model of eastern slope without fault

图6包含有东帮边坡无断层失稳过程中的应变带、位移矢量场和声发射演变过程图。结合应变带和位移矢量场演变过程图可知,上部岩体在自重作用下发生以沉降为主的变形,下部岩体受到挤压,沿着弱层向临空面滑动,裂隙沿4#弱层不断形成,随着强度折减的进行,裂隙不断扩展,边坡体变形不断增大,折减到16步时,单元破坏数最大,滑坡形成。第四系剪切圆弧与4#弱层连接,形成连续滑移面,发生“切层—顺层式”滑移;在这一过程中,仅3#弱层附近岩体有一定程度的错动变形;其与有断层时相比,滑移模式变化较大,边坡体破坏程度不同。

图6(c)表明,拉破裂主要发生于坡顶部,而深部岩体还是以压剪破裂为主;在失稳过程中,坡体弱层上部发生压剪破裂和小范围拉破裂,随折减继续,压剪破裂在弱层处不断

发生,同时,上部拉破裂也持续增加,微裂隙不断形成,岩土体内破坏范围逐渐增大,变形加剧,最终发生滑坡;与有断层

相比,模型上部破坏区域较大,但边坡体完整性较好,稳定系数也大于有断层时,边坡开挖后处于稳定状态。



(a) 应变带云图 (b) 位移矢量图 (c) 声发射图  
(a) Strain nephogram (b) Displacement field vectorgraph (c) Acoustic emission diagram

图6 边坡渐进破坏过程图

Fig. 6 Progressive failure processes

### 3.3 断层影响分析

对以上分析结果对比可知,断层的存在直接影响着边坡滑坡模式,有断层时,滑体侧边界为剪切面和断层面构成,失稳后边坡体多处发生错动,强度折减的稳定系数比无断层时明显减小。无断层时,边坡体上部存在较多拉裂隙,表明它可以为下部边坡体提供拉力,增强边坡体的抗滑力,断层的存在截断了此作用,同时,断层处易发生应力集中,弱层与其交叉处裂隙易于产生和扩展,边坡完整性将受到破坏,边坡稳定性降低。

边坡体开挖时发生变形,是由于原岩体内的应力发生改变,若应力值未超出岩体的强度,则岩体仅发生变形,如果超出其强度,则发生破坏。根据数值模拟结果,绘制了不同条件下边坡岩体的剪应力分布等值线图,如图7、8所示。显然,当断层存在时,应力状态发生很大变化,断层和弱层相交叉区域剪应力相对集中,坡面附近岩体的剪应力增大,这易于产生裂隙,降低岩体完整性。另外,断层本身强度指标“交叉”,接触面活跃,在它们共同作用下,边坡体稳定性降低,引发以断层为侧边界进行沉降,沿弱层挤出的“切层—顺层式”滑移。由此,断层影响了顺倾软岩边坡稳定性,直接决定了边坡失稳的模式。

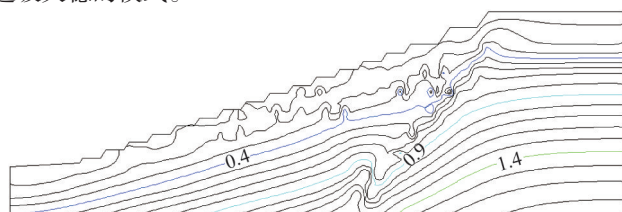


图7 考虑断层时,剪应力等值线图

Fig. 7 Shear stress contour of slope with fault

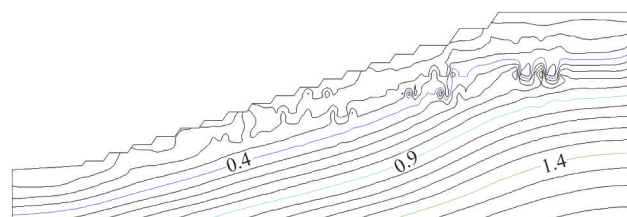


图8 未考虑断层时,剪应力等值线图

Fig. 8 Shear stress contour of slope without fault

## 4 结论

基于细观力学方法和强度折减理论,以元宝山露天煤矿采场东帮边坡为工程背景,应用RFPA-SRM数值模拟对东帮边坡的稳定性进行了分析,模拟研究了边坡失稳过程中变形破坏特征、位移特征及应力分布特征,分析了F1断层对露天矿东帮边坡的影响及滑坡机理。

(1) 滑坡的发生是一个复杂的动态过程,这一过程经历了裂隙的发生、扩展和贯通阶段,形成滑动面,位移逐渐增加,破坏范围逐渐增大,直至发生滑坡。

(2) 边坡岩体破坏形式为上部岩体发生拉张破坏,下部岩体发生剪切破坏;考虑断层的作用时,断层和上部第四系剪切圆弧构成滑体的侧边界,4#弱层为底部边界,  $F_s=1.099$ ;无断层作用时,第四系内部剪切圆弧为侧边界,煤系地层为滑体的底边界,  $F_s=1.176$ 。

(3) 边坡体内赋存的2#、3#、4#弱层附近岩土体均有一定程度的错动变形,尤其是3#、4#弱层,边坡施工时应采取相应防治措施。

(4) 由于断层的存在,断层和弱层相交区域剪应力相对

集中,坡面附近岩体剪应力增加,因此,断层存在导致的应力状态改变和自身的强度特性是使得滑坡模式和稳定性发生变化的根本原因。

#### 参考文献 (References)

- [1] 杨秀,曹兰柱. RFPA-SRM 在软岩边坡稳定性分析[J]. 科技导报, 2011, 26(11): 116-121.  
Yang Xiu, Cao Lanzhu. Science & Technology Review, 2011, 26(11): 116-121.
- [2] 刘刚,赵坚,宋宏伟. 节理分布对岩体破坏影响的数值模拟研究[J]. 中国矿业大学学报, 2010, 36(1): 17-23.  
Liu Gang, Zhao Jian, Song Hongwei. Journal of China University of Mining & Technology, 2010, 36(1): 17-23.
- [3] 曹兰柱,霍丽红. 顺倾软岩边坡稳定性分析与防治[J]. 科技导报, 2011, 29(36): 46-49.  
Cao Lanzhu, Huo Lihong. Science & Technology Review, 2011, 29(36): 46-49.
- [4] 杜丽惠,刘先行,刘宁. 评价高边坡断层的直接约束方法[J]. 清华大学学报, 2005, 45(12): 1613-1616.  
Du Lihui, Liu Xianxing, Liu Ning. Journal of Tsinghua University, 2005, 45(12): 1613-1616.
- [5] 杨继红,董金玉,刘汉东,等. 岩体结构控制下的边坡变形破坏模式分析[J]. 煤炭学报, 2011, 36(S1): 58-63.  
Yang Jihong, Dong Jinyu, Liu Handong, et al. Journal of China Coal Society, 2011, 36(S1): 58-63.
- [6] 张丙印,师瑞锋,王刚. 高面板堆石坝面板脱空问题的接触力学分析[J]. 岩土工程学报, 2003(3): 361-364.  
Zhang Bingyin, Shi Ruifeng, Wang Gang. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2003(3): 361-364.
- [7] 杜丽惠,张小妹,刘宁. 水布垭地下厂房开挖施工过程的数值仿真分析[J]. 水力发电, 2004, 30(2): 26-29.  
Du Lihui, Zhang Xiaomei, Liu Ning. Water Power, 2004, 30(2): 26-29.
- [8] 胡常礼,魏春启. 露天煤矿采场软岩边坡稳定性研究[J]. 世界科技研究与发展, 2011, 33(1): 79-81.  
Hu Changli, Wei Chunqi. World Science and Technology Research & Development, 2011, 33(1): 79-81.
- [9] 唐春安,李连崇,李常文,等. 岩土工程稳定性分析 RFPA 强度折减法[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(8): 1522-1529.  
Tang Chunan, Li Liancong, Li Changwen, et al. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(8): 1522-1529.
- [10] 陈星明,张乐健,王丽. 拉拉铜矿排土场稳定性的 RFPA 数值模拟[J]. 中国矿业, 2013, 22(6): 97-100.  
Chen Xingming, Zhang Yuejian, Wang Li. China Mining Magazine, 2013, 22(6): 97-100.
- [11] 郝艳红. 节理岩质边坡变形破坏的数值模拟分析[D]. 沈阳: 东北大学, 2007.  
Hao Yanhong. Numerical simulation and analysis of deformation and failure of jointed rock slopes[D]. Shenyang: Northeastern University, 2007.

(责任编辑 吴晓丽)

#### ·学术动态·



## 中国科协第 85 期“新观点新学说学术沙龙”聚焦 “新概念造纸技术与纸基功能材料”

2013 年 10 月 16—17 日,由中国科协主办、中国造纸学会承办,主题为“新概念造纸技术与纸基功能材料”的中国科协第 85 期“新观点新学说学术沙龙”在成都举办。中国制浆造纸研究院院长曹春昱、陕西科技大学副校长张美云、华南理工大学制浆造纸国家重点实验室常务副主任陈港为领衔专家。

传统的造纸方法绝大多数以植物纤维为原料,采用化学、机械方法把纤维从木材或其他原料中分离出来,使用大量的水配制成悬浮液在纸机抄造出纸张。我国无论是纤维资源还是水资源都十分短缺,如能不用(少用)植物纤维原料和水来造纸,不但能节约资源,也可以减少对环境的污染,将会引起造纸工业的革命性变革。在造纸领域早就有应用合成纤维、陶瓷纤维和玻璃纤维等非植物纤维造纸的先例。近年还有人尝试用矿物纤维如海泡石纤维、硅灰石纤维和石膏微纤维等非植物纤维造纸。新概念造纸技术不但会解决资源短缺问题,更有可能开发生产出为现代工业、国防、生活所需的纸基功能材料。

来自中国制浆造纸研究院、中国中轻国际工程有限公司、中国海诚工程科技有限公司等企业、科研院所、高等学校的 21 位专家学者与会,就新概念造纸技术与纸基功能材料等议题展开研讨和交流。

详见中国科协网 <http://www.cast.org.cn/n35081/n35533/n38575/15133091.html>。