

有限元法确定煤层气井钻井液密度窗口模型应用

林海¹, 陈磊¹, 程远方², 蒋振伟¹, 张振活¹, 凡帆¹, 董海东¹, 郝超¹, 刘婷婷¹

(1. 低渗透油气田勘探开发国家工程实验室, 川庆钻探钻采工程技术研究院, 陕西西安 710018; 2. 中国石油大学(华东)石油工程学院, 山东青岛 266580)

摘要:随着国内市场对天然气需求量的迅速增长, 如何成功开发宁武盆地储量丰富的煤层气资源已成为目前非常规气藏开发的一个重要课题。结合宁武盆地地应力状态、地层孔隙压力、地层强度参数、井斜角和方位角等参数, 科学确定适合煤层气井钻进的钻井液密度窗口, 成为宁武盆地煤层气项目能够高效、安全实现产业化发展的关键因素之一。通过 ANSYS 软件对宁武盆地 9 号煤层建立有限元模型, 分别分析了不同地应力方向时不同井斜角钻井液密度对井眼扩大率的影响规律, 针对不同方位和井斜得出了适用的钻井液密度窗口, 对于下一步宁武盆地煤层气井产业化开发中有效控制煤层坍塌, 降低复杂情况, 提高钻井效率及提高煤层气开发综合效益提供了技术支持。

关键词:煤层气; 地应力; 有限元法; 井壁稳定; 钻井液密度窗口; 宁武盆地

中图分类号: TE371 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-7428(2014)05-0001-05

Determination of Drilling Fluid Density Window Model for CBM Well by FEM/LIN Hai¹, CHEN Lei¹, CHENG Yuan-fang², JIANG Zhen-wei¹, ZHANG Zhen-huo¹, FAN Fan¹, DONG Hai-dong¹, HAO Chao¹, LIU Ting-ting¹ (1. National Engineering Laboratory for Exploration and Development of Low Permeability Oil and Gas Field Drilling Fluid Department of Changqing Engineering and Technology Research Institute in Chuanqing Drilling and Exploration Corporation, Xi'an Shaanxi 710018, China; 2. Department of Petroleum Engineering, University of Petroleum, Qingdao Shandong 266580, China)

Abstract: With the rapid growth of market demand for natural gas, how to successfully develop the rich CBM reservoir in Ningwu basin becomes an important subject in unconventional gas reservoir development. It is one of the key factors to scientifically determine a suitable drilling fluid density window by combining with the crustal stress state, the parameters of formation pore pressure and formation strength, as well as angle of deviation and azimuth angle in order to realize effective and safe coal-bed methane industrialization development in Ningwu basin. The finite element model of No. 9 coal seam in Ningwu basin is established by ANSYS software, the influence rule of hole enlargement ratio is analyzed in the conditions of different crustal stress directions and different well inclination, by which the optimized range of mud density is obtained to control coal seam collapse and reduce complex prescription, and the support for research on improvement of drilling efficiency and comprehensive benefit of CBM in Ningwu basin is found.

Key words: CBM; crustal stress; FEM; borehole stability; drilling fluid density window; Ningwu basin

0 前言

我国煤层气资源量仅次于俄罗斯和加拿大位于世界第三位, 在煤层气未来开发中存在巨大潜力。近年随着我国煤层气开发项目的快速发展, 煤层气井壁稳定问题日渐突出, 研究表明, 在煤层气钻井过程中, 坍塌造成的井壁失稳事故占绝大多数^[1,2]。煤是由高度交连的大分子网和其它互不交连的大分子链组成, 煤是一种具有微孔的基质和称之为割理的天然裂隙网所组成的双孔隙储集岩, 其垮塌机理与泥页岩的垮塌机理存在很大差异性, 主要由于煤

岩沉积环境等导致其抗拉强度很低、弹性模量很小、裂缝发育、脆性大等^[3-5]。从岩石力学角度看, 井壁稳定与否取决于井壁围岩的应力水平与地层强度的比较。井眼围岩的应力水平与井眼液柱压力有关, 若钻井液密度过低, 井眼围岩应力水平较高, 当井壁应力超过岩石的抗剪强度时, 就要发生剪切破坏, 表现为缩径或掉块; 相反, 若钻井液密度过高, 在井壁处就会出现拉应力, 当拉伸应力大于岩石的抗拉强度时, 就要发生拉伸破坏, 表现为井漏。因此要保持井眼稳定, 钻井液密度应保持在一个合理的范围内。

收稿日期: 2013-12-12

基金项目: 国家科技重大专项“大型油气田及煤层气开发”(2011ZX05021)

作者简介: 林海(1980-), 男(汉族), 吉林农安人, 川庆钻探钻采工程技术研究院工程师, 石油工程专业, 主要从事钻井液与完井液技术研究及现场技术服务的管理工作, 陕西省西安市长庆兴隆园小区川庆钻探工程有限公司工程技术研究院长庆分院钻井液与完井液研究所科技楼 A0818 室, cq-eti-linhai@163.com。

影响这一合理泥浆密度范围的主要因素有原地应力状态、地层孔隙压力、地层强度参数、井斜角、方位角等。依据以上因素科学计算出适合煤层气井施工的钻井液密度窗口成为煤层气资源安全、高效开发的关键因素。

1 宁武盆地煤层气概况

宁武盆地行政区划隶属于山西省宁武县、原平县、神池县、静乐县、娄烦县、岚县,呈 NNE 向狭长带状。其主要含煤地层石炭系上统太原组、二叠系下统山西组是煤层气勘探的主要目的层,特点为:煤演化程度中等偏低,表现为中煤阶,属于肥煤~焦煤;太原组 9 号煤分布稳定,厚度大,最厚 20 余米,一般厚度可达 12.0 m,含气量为 11.7~20.3 m³/t,往盆地内部至中部区,煤层含气量还将增高;煤层气资源可靠,煤层埋深 300~1500 m,含气面积 876.0 km²,煤层气远景资源量巨大^[6~8]。

近年来在宁武盆地煤层气井钻探过程中出现了不同程度的井壁失稳、井径扩大现象,给钻井工程和后续的完井工程造成了不利影响。宁武盆地煤层气井大规模产业化发展提出了建立一套科学选取钻井液密度窗口方法的技术要求。

2 煤岩基础力学参数实验

2.1 实验设备(见表 1)

表 1 主要力学实验设备

仪器设备名称	型号	生产厂家
烘箱	202 型	北京
超声波测试仪	PR3905	美国
伺服控制三轴实验系统	EDC25	德国
单轴抗拉强度实验	W10	长春
地应力实验	WT100	长春

2.2 力学实验结果

测试 6 组 18 块岩心,在不同围压条件下进行三轴强度实验,记录轴向应变、径向应变随轴向载荷的变化规律,即得到岩心的全应力-应变曲线。对每块岩心的全应力应变曲线进行处理,可得出岩石的弹性模量、泊松比和峰值强度。对于每一组岩心,由每块岩心的围压和峰值强度,通过绘制应力摩尔圆,可确定出岩心的粘聚力和内摩擦角。

通过煤样三轴测试结果,得出在 10 MPa 围压地层条件下,弹性模量为 4000~5000 MPa,泊松比为 0.32~0.34,该组数据将作为下面太原组煤层井壁稳定分析的弹性参数。

对于以上测试岩心在不同围压下进行三轴强度实验后,根据岩心破坏时的围压和峰值强度,利用应力摩尔圆可以得到此层位的粘聚力和内摩擦角,表 2 是每组岩心根据摩尔圆求出的粘聚力和内摩擦角。

表 2 岩心平均粘聚力、内摩擦角

煤样	岩心组号	粘聚力 /MPa	内摩擦角 /($^{\circ}$)	粘聚力平均值/MPa	平均内摩擦角/ $(^{\circ})$
太原组	1	9.29	38.09	9.98	35.73
	2	8.22	31.05		
	3	12.44	38.05		

3 有限元法分析密度窗口

3.1 有限元软件 ANSYS 简介

有限元法是一种在差分法和变分法的基础上利用计算机进行数值近似计算分析方法,其通过对连续问题进行有限数目的单元离散来近似的,是分析复杂结构和复杂问题的一种强有力的分析工具^[9,10]。目前,有限元法融结构、热、流体、电磁、声学于一体,在技术领域中的应用十分广泛,几乎所有的弹性结构静力学和动力学问题都可用它求得满意的数值近似结果。以有限元分析为基础的大型通用 CAE 软件是由位于美国宾夕法尼亚的 ANSYS 公司开发,广泛用于机械制造、石油化工、轻工、航空、土木工程、水利工程、生物医学等工业领域及科学研究,它领导着世界有限元技术的发展。该软件是第一个通过 ISO9001 质量认证的大型分析设计类软件,也是美国机械工程师协会(ASME)、美国核安全局(NQA)及近 20 种专业技术协会认证的标准分析软件,包含了前置处理、求解器、后处理器并与优化技术相结合等。

3.2 煤层井壁稳定有限元模型

井壁稳定模型所选取的长度为 4 m,长宽比为 1:1,模型的中央是井眼,井眼直径为 0.2 m。考虑到井眼的对称性,采用井眼的 1/4 平面模型。根据岩体力学的观点,距岩体硐室半径 6.5 倍以外的地方几乎不会发生应力重新分布的现象,可以忽略不计。所以上述选取的井壁稳定模型尺寸基本上可以消除边界效应对计算结果的影响。

模型采用平面八节点四边形单元,为平面应变问题。模型一适用于直井(见图 1)、模型二适用于斜井的井壁稳定分析(见图 2),该模型的力的边界上添加了一种表面效应单元(SURF153 单元)之后就可以在边界上施加任意方向的应力。为得到较好

结果并节约计算机内存,因此划分网格所遵循的原则是,在进行模型单元划分时,井壁周围单元划分的细些,而模型边界上和靠近边界的单元划分的粗些。模型一采用的 4684 个四边形单元和 19824 个节点将分析对象离散划分成有限元计算模型,模型二采用的 6238 个四边形单元和 34186 个节点将分析对象离散划分成有限元计算模型。

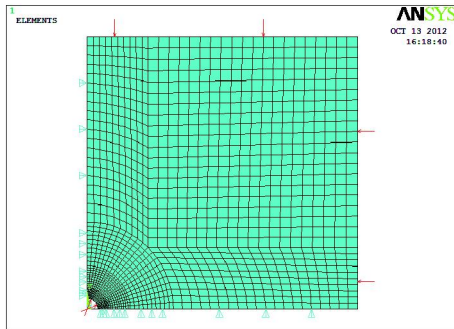


图 1 适用于直井井壁稳定有限元弹塑性分析模型(模型一)

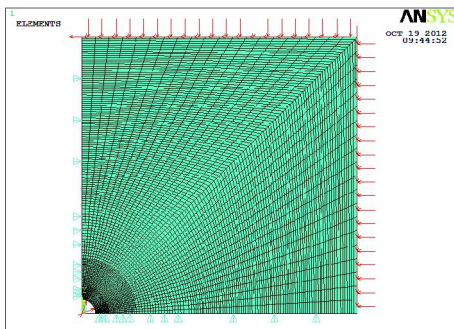


图 2 适用于斜井井壁稳定有限元弹塑性分析模型(模型二)

3.3 有限元模型分析应用

模型使用如下参数:井段 1000 m;最大水平地应力 $\sigma_H = 19$ MPa;最小水平地应力 $\sigma_h = 17$ MPa;垂直地应力 $\sigma_v = 24.5$ MPa;地层孔隙压力当量密度 $\rho_p = 1.00$ g/cm³;有效应力系数 $Biot = 0.75$;弹性模量 $E = 4 \times 10^3$ MPa;泊松比 $\nu = 0.33$;粘聚力 $c = 9.98$ MPa;内摩擦角 $\varphi = 29.06^\circ$ 。其中的弹性参数和强度参数均取岩石力学室内实验结果。

3.3.1 0°方位的定向井井壁稳定性分析

假设沿最大水平地应力方向钻进 0°方位钻井,分析此方向上地层坍塌压力和破裂压力随井斜角的变化规律,分别研究 0°、30°、60°、90°四种不同井斜角下井壁稳定情况。

0°井斜时钻井液密度对井眼扩大率的影响规律:为分析钻井液密度对井眼扩大率的影响规律,建立井斜角为 0°时的井壁稳定模型,静液柱压力当量密度分别取 0.6、0.8、1.0 g/cm³,研究在地应力和井

眼液柱压力作用下井眼的垮塌形态,模拟结果如图 3~5 所示。

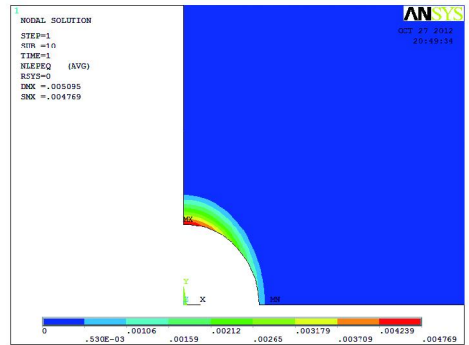


图 3 井斜角 0°时当量密度为 0.6 g/cm³时等效塑性应变

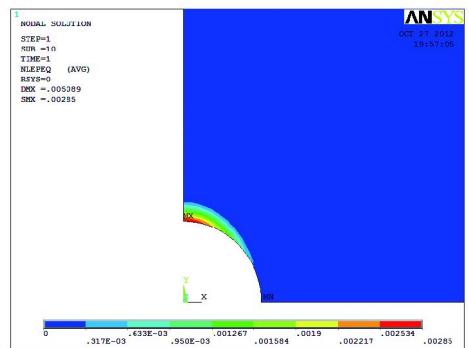


图 4 井斜角 0°时当量密度为 0.8 g/cm³时等效塑性应变

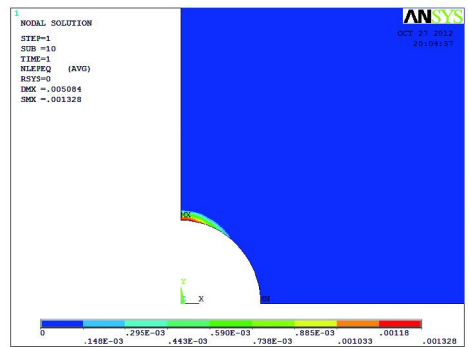


图 5 井斜角为 0°时当量密度为 1.0 g/cm³时等效塑性应变

从以上模拟图可看出:井眼垮塌主要出现在最小水平地应力方位,随着密度提高,井眼扩大率减小,泥浆密度从 0.6 g/cm³升到 1.0 g/cm³,井眼直径从 0.2235 m 降到 0.205 m(参见表 3)。

表 3 0°方位角、0°井斜角时井径扩大率的大小

钻井液当量密度/(g·cm ⁻³)	井眼坍塌半径/m	井眼扩大率/%
0.6	0.1303	30.3
0.8	0.1186	18.6
1.0	0.108	8

根据表 3 做出图 6,可以得到该条件下任意井径扩大率所需的钻井液密度。

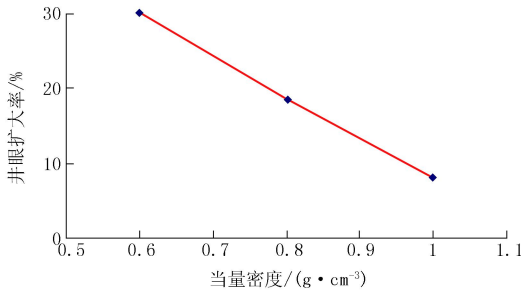
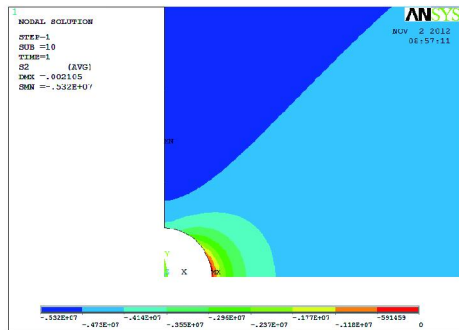


图6 泥浆密度与井径扩大率的关系曲线

当泥浆液柱压力当量密度继续增加时,在井眼将发生拉升破坏。由于煤层的天然裂纹存在,一旦煤层出现拉应力就认为此时的泥浆液柱压力当量密度为破裂压力当量密度。

从图7可以看出,红色区域首先进入拉应力状态,其它彩色部分还处在压应力状态。从图中还可以看出井眼压裂主要出现在最大水平地应力方位,此时的井眼破裂压力当量密度为 2.70 g/cm^3 。

图7 液柱压力当量密度为 2.70 g/cm^3 井眼第二主应力云图

30°井斜条件下钻井液密度对井眼扩大率的影响规律:为分析钻井液密度对井眼扩大率的影响规律,建立方位角为0°、井斜角30°时的井壁稳定模型,液柱压力当量密度分别取0.6、0.8、1.0、1.2 g/cm^3 。研究在地应力和井眼静液柱压力作用下井眼的垮塌形态,模拟结果见表4。

表4 方位角0°、井斜角30°时井眼扩大率的大小

钻井液当量密度/($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	井眼坍塌半径/m	井眼扩大率/%
0.6	0.1427	42.7
0.8	0.1305	30.5
1.0	0.119	19
1.2	0.1078	7.8

根据表4做出图8,可以得到该条件下任意井径扩大率所需的钻井液密度。

根据第二主应力云图井眼破裂压力当量密度为 2.55 g/cm^3 。

60°井斜角条件下钻井液密度对井眼扩大率的

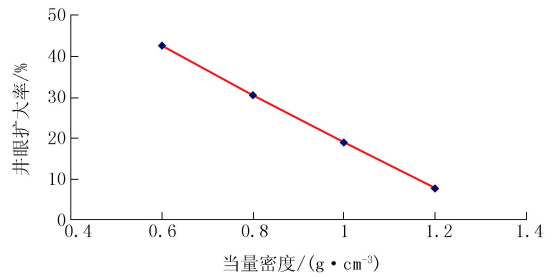


图8 钻井液液柱压力当量密度与井眼扩大率的关系曲线

影响规律:建立方位角为0°、井斜角60°时的井壁稳定模型,井眼液柱压力当量密度分别取1.0、1.2、1.4、1.6 g/cm^3 ,研究在地应力和井眼液柱压力作用下井眼的垮塌形态(见表5)。

表5 方位角为0°、井斜角为60°时井眼扩大率的大小

钻井液当量密度/($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	井眼坍塌半径/m	井眼扩大率/%
1.0	0.1436	43.6
1.2	0.1309	30.9
1.4	0.1203	20.3
1.6	0.1098	9.8

从表5可以看出,井眼垮塌主要出现在最小水平地应力方位,随着密度、井眼扩大率减小,泥浆密度从 1.0 g/cm^3 升到 1.6 g/cm^3 ,井眼直径从0.2436 m降到0.2098 m。根据表5可以得到该条件下任意井径扩大率所需的钻井液密度。根据第二主应力云图得出井眼破裂压力当量密度为 2.28 g/cm^3 。

0°方位角、90°井斜条件下钻井液密度对井眼扩大率的影响规律:建立方位角为0°、井斜角为90°时的井壁稳定模型,井眼液柱压力当量密度分别取1.0、1.3、1.6、1.9 g/cm^3 ,研究在地应力和井眼液柱压力作用下井眼的垮塌形态(见表6)。

表6 井斜角为90°时不同钻井液密度下井眼扩大率的大小

钻井液当量密度/($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	井眼坍塌半径/m	井眼扩大率/%
1.0	0.1576	57.6
1.3	0.1381	38.1
1.6	0.1211	21.1
1.9	0.1053	5.3

从表6可看出,随着密度增加井眼扩大率减小,泥浆密度从 0.8 g/cm^3 升到 1.8 g/cm^3 ,井眼直径从0.2576 m降到0.2053 m。根据表6可以得到该条件下任意井径扩大率所需的钻井液密度。根据第二主应力云图得出井眼破裂压力当量密度为 2.14 g/cm^3 。

3.3.2 45°和90°方位角的定向井井壁稳定性分析
分别定义与最大水平地应力方向成45°角方向为45°方位,垂直最大地应力方向为90°方位,按

3.3.1 中建模方法分别分析对应方向上地层坍塌压力和破裂压力随井斜角的变化规律。分别研究 0° 、 30° 、 60° 、 90° 不同井斜角下井壁稳定问题,得出各种方位、井斜下对应井眼扩大率数据,并绘制相应钻井液液柱压力当量密度与井眼扩大率的关系曲线。(因篇幅关系,各数据表与曲线此处略去)。

4 结论

综合以上有限元分析数据,得到沿不同方位进行钻井作业时煤层坍塌压力和破裂压力随井斜角的变化规律,得出煤层井壁稳定的平均变化规律。

(1)沿最大水平地应力方向钻井,在不同的井斜角条件下,随着井斜角的增加,井眼破裂压力逐渐降低,井眼坍塌压力逐渐升高,且直井钻进相对最为安全。

(2)沿与最大地应力成 45° 方位角钻井,在不同的井斜角条件下,随井斜角的增加,井眼破裂压力逐渐降低,井眼坍塌压力逐渐升高。

(3)沿最小水平地应力方向打井,在不同的井斜角条件下,随井斜角的增加,井眼破裂压力先升高后降低,在井斜角为 30° 时达到峰值;井眼坍塌压力先下降后升高,在井斜角为 30° 时达到峰值。

(4)只要钻井液密度合适,不同方位角下钻井其井眼均可保持稳定,并不会发生垮塌、漏失两种复杂情况同时出现。但是在方位角为 0° 和 45° 时随着

井斜角的增加,井眼坍塌压力增大,破裂压力减小,安全钻井液密度窗口较小;而沿最小水平地应力方向打井时坍塌压力先减小后增加,破裂压力则是先增加后减小。沿最大水平地应力方向打井,井眼稳定性最差,相同井斜角下的坍塌压力大于沿最小水平地应力方向打井时的坍塌压力。

参考文献:

- [1] 申瑞臣,夏焱.煤层气井气体钻井技术发展现状与展望[J].石油钻采工艺,2011,33(3):74-77.
- [2] 张卫东,李孟,姜在兴.煤层气井壁坍塌破裂准则研究[J].中国煤层气,2011,8(6):37-41.
- [3] 陈江峰.储层伤害——煤层气钻井应注意的问题[J].煤炭技术,1998,(2):18-19.
- [4] 陈在君,刘顶运,李登前.煤层垮塌机理分析及钻井液防塌探讨[J].钻井液与完井液,2007,24(4):28-29.
- [5] 申瑞臣,屈平,杨恒林.煤层井壁稳定技术研究进展与发展趋势[J].石油钻探技术,2010,38(3):1-7.
- [6] 叶建平,范志强.中国煤层气勘探开发利用技术进展[M].北京:地质出版社,2006.
- [7] 王宪花,蒋卫东,高颖,等.宁武盆地煤层气勘探现状及试采效果[J].天然气工业,2008,28(3):93-95.
- [8] 李文阳,王慎言,赵庆波.中国煤层气勘探与开发[M].江苏徐州:中国矿业大学出版社,2003.
- [9] 杜平安,甘娥忠,于亚婷.有限元法-原理、建模及应用[M].北京:国防工业出版社,2004.3-5.
- [10] 康国政.大型有限元程序的原理、结构与使用[M].四川成都:西南交通大学出版社,2004.1-4.

第五届“极地地球科学与勘探工程”国际学术研讨会在长春举行

本刊讯 2014年5月20~21日,由吉林大学建设工程学院及吉林大学极地研究中心共同举办的第五届“极地地球科学与勘探工程”国际学术研讨会在长春成功举行。建设工程学院院长孙友宏教授主持了开幕式,吉林大学党委副书记兼副校长韩晓峰教授出席并致欢迎辞,吉林大学极地研究中心主任、国家“千人教授”Pavel Talalay教授主持了学术会议。

本次研讨会历时2天,共有50多位来自俄罗斯、英国、法国、丹麦和中国国家海洋局,中国极地研究中心,中国地质科学院地质力学研究所,勘探技术研所和北京探矿工程研究所,中科院兰州寒区旱区环境与工程研究所,中国气象科学研究院,中国科学院国家天文台南京天文光学技术研究所,杭州电子科技大学及吉林大学等单位从事极地研究的科学家及学者注册参会,收到35篇会议论文摘要,26位专家学者在大会上进行了学术交流。丹麦哥本哈根大学 Anders Svensson 教授的学术报告《Greenland ice cores records: update and perspectives》,英国南极调查局 Keith Makinson 教授的学术报告《BAS hot water drills large and small: current designs, drilling methods, and future challenges》,俄罗斯圣彼得堡极

地海洋地质调查科考队 Sergey Popov 教授的学术报告《Sixty years of Russian remote sensing investigations in Antarctica》,以及法国国家地球物理及环境科学研究中心 Olivier Alemany 教授的学术报告《French ice equipment: A review》,吉林大学 Pavel Talalay 教授的《Exploration of Gamburtsev Subglacial Mountains, East Antarctica: Background and Plans for the Near Future》报告和孙友宏教授的《Development and application of the Crust-1 continental scientific drilling rig》的报告受到会议代表的广泛关注。

会议还针对极地热水钻技术开展了专题研讨,与会专家高度关注中国热水钻技术,并对中国热水钻机系统的关键设备参数及热水钻进工艺提出了宝贵的意见。

“极地地球科学与勘探工程”国际学术研讨会由吉林大学建设工程学院创办,自2010年举行首次会议以来,每年举办一次,共举办了5次。每次会议全面梳理世界各国极地地球科学与勘探技术的最新研究进展和取得的研究成果,深入探讨未来极地科学研究战略。

(吉林大学极地研究中心 供稿)