

# 低渗透油藏二元复合驱微观机制研究

熊生春<sup>1,2</sup>, 孙军昌<sup>3</sup>, 何英<sup>2</sup>, 田文博<sup>3</sup>

1. 中国石油大学(北京)石油工程学院, 北京 102249
2. 中国石油勘探开发研究院廊坊分院, 河北廊坊 065007
3. 中国科学院渗流流体力学研究所, 河北廊坊 065007

**摘要** 选取不同渗透率级别的低渗和特低渗储层岩心进行水驱、二元驱油实验, 研究不同驱替方式、驱替压力梯度对驱油效率的影响。实验结果表明, 对于低渗透油藏, 二元驱油效率高于水驱, 随着压力梯度的增大, 驱油效率增加, 并且渗透率越低, 增加幅度越明显。通过核磁共振  $T_2$  谱与恒速压汞微观孔喉测试相结合, 分析岩心束缚水状态含油饱和度分布及残余油分布规律, 发现较高压力梯度下二元驱替后, 低渗透岩心中细微孔隙残余油较少, 而高渗透岩心中较大孔隙残余油较多。

**关键词** 低渗透; 聚合物-表面活性剂驱; 驱油效率; 孔隙结构; 残余油分布

中图分类号 TE311

文献标识码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2012.35.001

## Microscopic Mechanism of Binary Combination Flooding in Low Permeability Reservoir

XIONG Shengchun<sup>1,2</sup>, SUN Junchang<sup>3</sup>, HE Ying<sup>2</sup>, TIAN Wenbo<sup>3</sup>

1. College of Petroleum Engineering, China University of Petroleum, Beijing 102249, China
2. PetroChina Research Institute of Petroleum Exploration & Development-Langfang, Langfang 065007, Hebei Province, China
3. Institute of Porous Flow and Fluid Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Langfang 065007, Hebei Province, China

**Abstract** The permeability stress-sensitivity of formation rock is one of the most important research subjects in the petroleum industry and geotechnical industry. A capillary tube-pore network flow model is presented in order to explain permeability stress-sensitivity based on permeability stress-sensitivity experiments. The new model fully considers the complex connectivity among pore throats, pore structure tortuosity, different types and sizes of pore throats, and their different contribution ratios to the rock permeability. When effective stress is loaded on the low permeability rock samples, the larger pore throats, as the main flow channel, are firstly compressed smaller. Therefore, both fluid flow resistance and pore tortuosity simultaneously increase; it is the main reason that the rock permeability dramatically declines in the initial period for increasing effective stress. Since there are less large pore throats in the rock with lower permeability, those larger pore throats compressed smaller could have a greater impact on the rock permeability. Therefore, the smaller the rock initial permeability is, the stronger its stress-sensitivity is. Comparing with the experimental results for pore structure deformation, the new model is very reasonable for explaining the permeability stress-sensitivity of low permeability rock.

**Keywords** low-permeability; polymer-surfactant flooding; displacement efficiency; pore structure; remaining oil distribution

### 0 引言

目前, 强化采油主要依靠化学驱, 其中聚合物驱所占比例较高, 聚合物驱油已在大庆油田得到了广泛的应用, 并取得了很好的经济效益。王启民、廖广志等<sup>[1]</sup>系统研究了聚合物驱油的理论及其在大庆油田的实践应用, 形成了一定

规模化应用的技术体系。兰玉波等<sup>[2]</sup>使用三维物理模拟实验研究了聚合物驱油的波及系数和驱油效率特征, 发现聚合物驱替后不同渗透率油层的采出程度均有一定的提高。赵永胜等<sup>[3]</sup>结合矿场生产与室内实验研究, 认为聚合物驱油可以提高波及效率, 但不能认为可以提高驱油效率。王德民<sup>[4]</sup>、夏惠

收稿日期: 2012-10-25; 修回日期: 2012-11-16

基金项目: 国家油气重大专项(2011ZX05013-006); 中石油重大科技攻关课题(2011E-0307)

作者简介: 熊生春, 博士后, 研究方向为低渗透油藏渗流理论与应用, 电子信箱: xshch0000@163.com

芬等<sup>[9]</sup>先后研究了黏弹性聚合物提高驱油效率的微观机制,为聚合物驱油技术的广泛应用提供了更加深入的基础指导。

聚合物驱油的微观驱替机制、实践应用和技术体系均已得到较为深入的研究,实际油田开发中也取得了较好的开发效果<sup>[6]</sup>。但是,目前基础研究或矿场应用均是针对渗透率相对较高的储层,对于低渗、特低渗储层研究较少,同时,对于水驱和聚合物驱油后原油在不同尺度微观孔隙下的动用规律并不清楚<sup>[7-8]</sup>。本文结合先进的实验测试技术和研究方法,给出低渗、特低渗储层中聚合物驱油后原油的动用规律和残余油在不同尺度孔隙中的分布规律,对于聚合物驱油技术在低渗透油田的应用具有重要的指导作用;采用核磁共振和恒速压汞实验技术,系统研究了低渗、特低渗储层水驱和二元复合驱替过程中的原油动用规律和残余油分布特征,并进一步研究了驱替压力和渗透率差别等因素对水驱效率、二元复合驱油效率的影响,研究结果对于二元复合驱油技术在低渗、特低渗油藏储层中的应用具有重要的指导意义<sup>[9-10]</sup>。

## 1 实验岩心选择

按照渗透率级差选择  $3.47 \times 10^{-3}$ 、 $26.38 \times 10^{-3}$ 、 $48.39 \times 10^{-3}$  和  $51.04 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$  共 4 块岩心进行二元驱替和不同压力梯度实验,研究二元复合驱替微观渗流机制,岩心基本物性参数如表 1 所示。

表 1 岩心基本参数

Table 1 Basic parameters of cores

样品编号	长度/ $10^{-2}\text{m}$	直径/ $10^{-2}\text{m}$	孔隙度/%	渗透率/ $10^{-3}\mu\text{m}^2$
1	5.06	2.5	15.89	3.47
3	5.05	2.51	22.88	26.38
7	5.05	2.51	26.49	51.04
9	5.02	2.51	21.81	48.39

## 2 二元驱替提高采收率分析

对表 1 所示 4 块岩心分别进行水驱和二元驱油实验,实验流程为先水驱到含水 98% 停止,改为二元驱替,出口端不出油时,停止实验,计算水驱和二元驱的驱油效率。分析 4 块岩心在驱替过程中渗透率、压力梯度与驱油效率之间的关系。

### 2.1 渗透率与驱油效率关系

结合表 2、图 1 和图 2 可以看出,不同渗透率岩心水驱油效率具有一定程度的差异,渗透率越小则水驱效率越低,如渗透率为  $3.47 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$  的 1 号岩心 ( $< 10 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$  属于特低渗透油藏),其水驱效率明显小于渗透率大于  $20 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$  的其余 3 块岩心水驱效率。渗透率分别为  $26.38 \times 10^{-3}$ 、 $48.39 \times 10^{-3}$  和  $51.04 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$  的 3 块岩心 ( $10 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2 < K < 50 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$  属于低渗透油藏)水驱效率差异相对较小。从本次实验结果看,特低

渗透油藏二元驱油效率比水驱提高 2%, 增加幅度较小,效果不明显;低渗透油藏二元驱油效率比水驱提高 3%—6%, 增加幅度相对较高。对于低渗透油藏,总体趋势是:随着渗透率增

表 2 4 块岩心水驱和不同驱替压力的二元驱油实验结果

Table 2 Experimental results of water flooding and different displacement pressure polymer-surfactant flooding for four cores

实验序号	样品编号	水驱效率/%	二元驱油效率/%
1	1	28.97	30.44
2	3	45.86	48.05
3	9	48.17	52.53
4	7	48.85	54.87

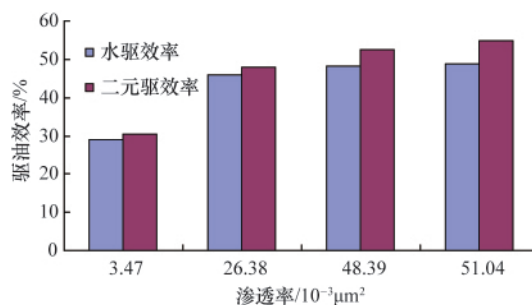


图 1 4 块岩心水驱效率与二元驱油效率对比图

Fig. 1 Contrast chart of different flooding efficiencies for four samples

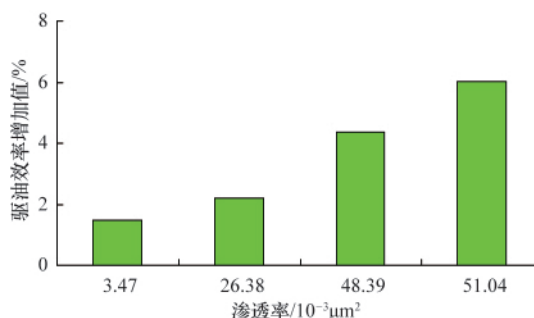


图 2 4 块岩心二元驱油效率比水驱驱油效率增加对比图

Fig. 2 Contrast chart of different enhancing flooding efficiencies for four samples

加,二元驱油效果更加明显。

### 2.2 压力梯度与驱油效率关系

实验过程:水驱—二元驱—二元驱升压 1—二元驱升压 2,分析不同阶段压力梯度与驱油效率之间关系。实验结果见表 3、图 3 所示。

可以看出,渗透率  $3.47 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$  的岩心两次升压后驱油效率增加了 12.67%,渗透率  $26.38 \times 10^{-3}$ 、 $48.39 \times 10^{-3}$ 、 $51.04 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$  的岩心经两次升压后,驱油效率分别增加了 4.57%、

表 3 不同渗透率岩心不同阶段驱油效率实验结果

Table 3 Experimental results of different permeability cores in different stages of oil displacement efficiency

样品编号	渗透率/ $10^{-3}\mu\text{m}^2$	驱油效率/%			
		二元	二元-升压 1	二元-升压 2	2 次升压增加值
1	3.47	30.44	33.07	43.11	12.67
3	26.38	48.05	51.36	52.62	4.57
9	48.39	52.53	54.49	56.99	4.46
7	51.04	54.87	58.91	59.66	4.79

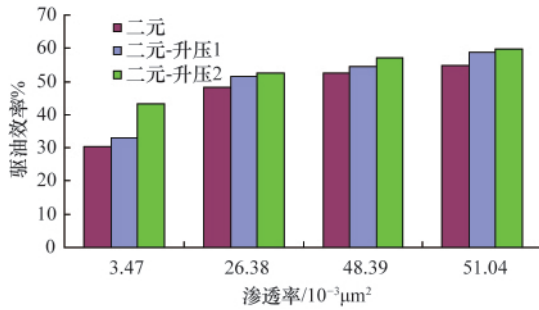


图 3 不同渗透率岩心不同压力梯度下驱油效率对比图  
Fig. 3 Comparison chart of oil displacement efficiency for the cores with different permeability under different pressure gradients

4.46%和 4.79%。对于低渗透油藏,随着压力梯度逐渐升高,二元驱油效率逐渐增加。渗透率越低,随压力梯度的升高,驱油效率增加得越明显;渗透率相对较高时,随压力梯度的升高,驱油效率增加相对较小。对于低渗透油藏,压力梯度是影响驱油效率的重要因素,渗透率越低,压力梯度的影响越明显。

### 3 微观孔隙结构对驱油效率的影响

使用不含氢的特殊合成油进行水驱、二元驱核磁共振实验,同时将核磁共振  $T_2$  谱与恒速压汞微观孔喉测试结果相结合,计算得到不同渗透率岩心(1号岩心  $3.47 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ , 7号岩心  $51.04 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ )束缚水状态下不同孔隙含油饱和度分布以及水驱、二元驱后不同孔隙残余油分布。

由图 4 可以看出,束缚水状态下渗透率较小的岩心原油主要分布在孔喉较小的细微孔隙中,渗透率  $3.47 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$  的岩心绝大多数原油分布在孔隙半径小于  $1 \mu\text{m}$  的孔隙空间中。而渗透率相对较大的岩心中 50% 以上的原油分布在孔隙半径大于  $1 \mu\text{m}$  的孔隙空间中。分布在细微孔隙中的原油进行水驱开发时渗流阻力较大,需要较高的驱替压力梯度,因此其开发难度相对较大,这从微观机制上解释了特低渗透油藏开发难度较大的主要原因。由图 5 可以看出,水驱后渗透率较低岩心中细微孔隙中的原油基本未被驱替出来,只有孔隙半径大于  $1 \mu\text{m}$  的孔隙空间中部分原油被驱替出来。

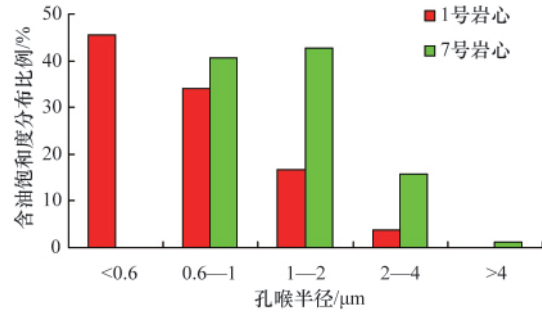


图 4 不同渗透率岩心束缚水状态含油饱和度分布比例  
Fig. 4 Oil saturation ratio distribution of irreducible water state for the cores with different permeability

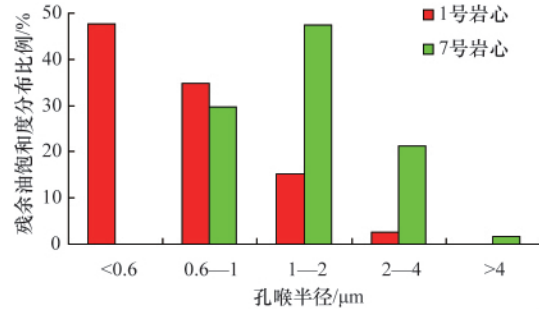


图 5 不同渗透率岩心水驱残余油状态残余油饱和度和分布比例

Fig. 5 Saturation ratio distribution of residual oil for the cores with different permeability

图 6—图 7 为渗透率较低的 1 号岩心水驱和二元驱后残余油饱和度和微观分布特征以及不同驱替压力二元驱后残余油微观分布比例。从图 6 可以看出,渗透率较低的岩心二元驱后其残余油饱和度具有一定程度的减小,动用的是半径小于  $1 \mu\text{m}$  的孔喉所控制的孔隙空间中的原油,半径较大的孔喉控制的孔隙空间中原油动用程度较小。结合图 7 可以看出,二元驱过程中增大驱替压力梯度,同样动用的是半径较小的孔喉所控制的孔隙空间中的原油,半径小于  $1 \mu\text{m}$  的孔喉所控制的孔隙空间中的原油具有较为明显的减少。

图 8—图 9 为渗透率相对较高的 7 号岩心水驱和二元驱后残余油微观分布特征。从图 8 可以看出,渗透率相对较高

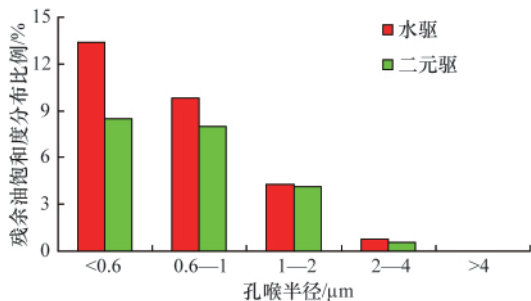
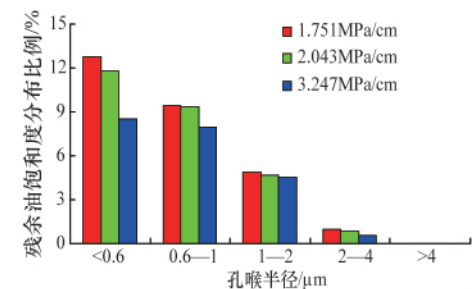
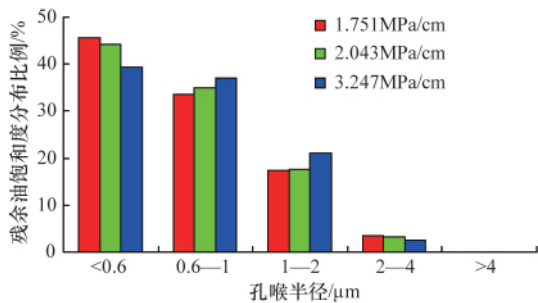


图 6 1号岩心水驱与二元驱(两次增压)后不同孔隙残余油分布特征(绝对量)

Fig. 6 Residual oil distribution of the different pores for the core 1 with water drive and binary drive (two booster, absolute value)



(a)



(b)

图 7 1号岩心不同驱替压力梯度二元驱后残余油微观分布特征的绝对量(a)和相对量(b)

Fig. 7 Microscopic distribution features of residual oil for the core 1 with different displacement pressure gradient binary drive, (a) is absolute magnitude, and (b) is relative value

的岩心,二元驱后其残余油饱和度具有非常明显的减小,作为原油主要储集空间的孔喉半径在 $1-2\mu\text{m}$ 的孔隙空间中,残余油显著减小。从图9不同驱替压力梯度的残余油微观分布可以看出,提高驱替压力梯度对渗透率较高的岩心驱油效率影响较小,提高驱替压力梯度后,被半径分布在 $1-2\mu\text{m}$ 的孔喉所控制的残余油减少幅度很小,该孔隙空间依然是残余油分布的主要孔隙空间。

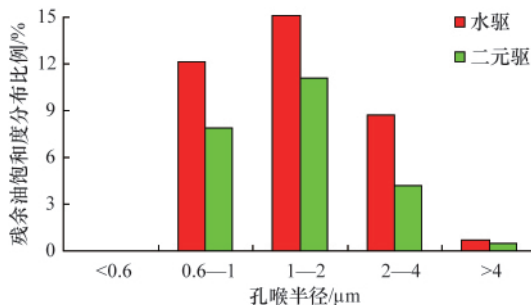
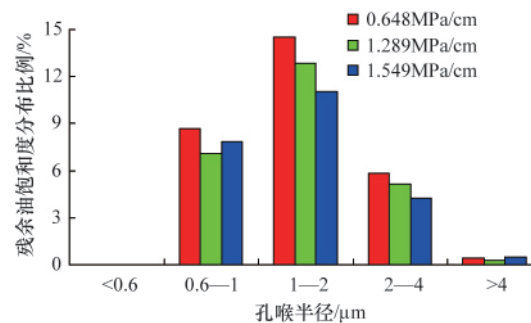
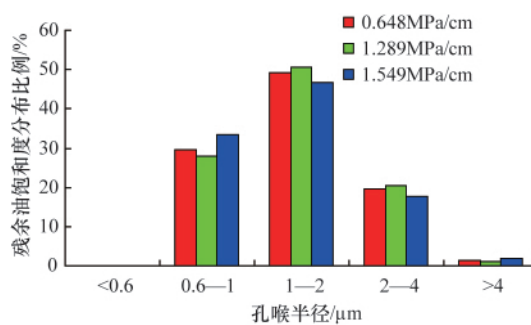


图 8 7号岩心水驱与二元驱(两次增压)后不同孔隙残余油分布特征(绝对量)

Fig. 8 Residual oil distribution of different pores for the core 7 with water drive and binary drive (two booster, absolute value)



(a)



(b)

图 9 7号岩心不同驱替压力梯度二元驱后残余油微观分布特征的绝对量(a)和相对量(b)

Fig. 9 Microscopic distribution features of residual oil for the core 7 with different displacement pressure gradient of binary drive, (a) is absolute magnitude, and (b) is relative value

#### 4 结论

本文采用核磁共振和恒速压汞等实验技术,系统研究了低渗透油藏二元复合驱中驱油规律和残余油分布特征。实验结果表明,(1)二元驱油效率高于水驱效率,并且随渗透率增加,二元驱油效果更明显;(2)增加驱替压力梯度,驱油效率增加,并且渗透率越低的岩心,增加效果越明显;(3)特低渗

透油藏中,小孔隙为主要储集空间,驱替主要动用小孔隙中的原油;(4)低渗透油藏中,残余油主要分布在较大孔隙,增加压力梯度对驱替效果影响不明显,采收率提高幅度小。

## 参考文献 (References)

- [1] 王启民, 廖广志, 牛金刚. 聚合物驱油技术的实践与认识[J]. 大庆石油地质与开发, 1999, 18(4): 1-5.  
Wang Qimin, Liao Guangzhi, Niu Jingang. *Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing*, 1999, 18(4): 1-5.
- [2] 兰玉波, 杨清彦, 李斌会. 聚合物驱波及系数和驱油效率实验研究[J]. 石油学报, 2006, 27(1): 65-68.  
Lan Yubo, Yang Qingyan, Li Binhui. *Acta Petrolei Sinica*, 2006, 27(1): 65-68.
- [3] 赵永胜, 魏国章, 陆会民, 等. 聚合物驱能否提高驱油效率的几点认识[J]. 石油学报, 2001, 22(3): 43-46.  
Zhao Yongsheng, Wei Guozhang, Lu Huimin, et al. *Acta Petrolei Sinica*, 2001, 22(3): 43-46.
- [4] 王德民, 程杰成, 杨清彦. 粘弹性聚合物溶液能够提高岩心的微观驱油效率[J]. 石油学报, 2000, 21(5): 45-51.  
Wang Demin, Cheng Jiecheng, Yang Qingyan. *Acta Petrolei Sinica*, 2000, 21(5): 45-51.
- [5] 夏惠芬, 王德民, 刘中春, 等. 粘弹性聚合物溶液提高微观驱油效率的

机理研究[J]. 石油学报, 2001, 22(4): 60-65.

Xia Huifen, Wang Demin, Liu Zhongchun, et al. *Acta Petrolei Sinica*, 2001, 22(4): 60-65.

- [6] 熊生春, 王业飞, 何英. 孤岛油田聚合物驱后提高采收率实验研究[J]. 断块油气田, 2005, 12(3): 38-40.

Xiong Shengchun, Wang Yefei, He Ying. *Fault-Block Oil & Gas*, 2005, 12(3): 38-40.

- [7] 唐佳斌, 吴文祥. SP二元复合驱用新型表面活性剂的耐温耐盐性能研究[J]. 油田化学, 2011, 28(3): 284-286.

Tang Jiabin, Wu Wenxiang. *Oilfield Chemistry*, 2011, 28(3): 284-286.

- [8] 李彦兴, 孙刚. 抗盐聚合物分子集聚影响因素及其渗流特性[J]. 西南石油大学学报, 2008, 30(2): 127-129.

Li Yanxin, Sun Gang. *Journal of Southwest Petroleum University*, 2008, 30(2): 127-129.

- [9] 孙军昌, 杨正明, 刘学伟, 等. 核磁共振技术在油气储层润湿性评价中的应用综述[J]. 科技导报, 2012, 30(27): 65-70.

Sun Junchang, Yang Zhengming, Liu Xuewei, et al. *Science Technology Review*, 2012, 30(27): 65-70.

- [10] 杨青山, 刘传平, 马宏宇. 三元复合驱储层解释方法[J]. 石油学报, 2010, 31(4): 612-614.

Yang Qingshan, Liu Chuanping, Ma Hongyu. *Acta Petrolei Sinica*, 2010, 31(4): 612-614.

(责任编辑 马宇红, 朱宇)

·学术动态·



## “2013年全国高分子学术论文报告会”征文

由中国化学会高分子学科委员会主办、东华大学承办的“高分子,让生活更美好——2013年全国高分子学术论文报告会”将于2013年10月12—16日在上海举行,这是中国高分子界的一次盛会。

征稿范围:高分子合成;高分子理论、计算与模拟;高分子结构与性能;高分子表征;分子组装与超分子聚合物;功能高分子;光电功能高分子;医用高分子;生物高分子与天然高分子;高分子复合体系;先进纤维;高性能树脂;阻燃高分子;高分子加工与成型;高分子与工业;高分子教育。

截稿日期:2013年6月15日。

联系电话:021-67792954, 67792362。

电子信箱:polymer2013@dhu.edu.cn。

大会网站:www.polymer.cn/polymer2013/。



### 《科技导报》“卷首语”栏目征稿

“卷首语”栏目每期邀请一位中国科学院院士和中国工程院院士就重大科技现象、事件,以及学科发展趋势、科学研究热点和前沿问题等,撰文发表个人的见解、意见和评论。本栏目欢迎院士投稿,每篇文章约2000字,同时请提供作者学术简历、工作照和签名电子文档。投稿邮箱:kjdbbjb@cast.org.cn。