

储层压力下氮气泡沫封堵性能影响因素研究

杨朝蓬¹, 高树生^{1,2}, 汪益宁³, 柯文奇⁴, 路岩⁵, 王忠滨⁶

1. 中国科学院渗流流体力学研究所, 河北廊坊 065007
2. 中国石油勘探开发研究院廊坊分院, 河北廊坊 065007
3. 中国石油大学石油工程教育部重点实验室, 北京 102249
4. 中国石化石油勘探开发研究院, 北京 100083
5. 中国石油天然气勘探开发公司, 北京 100034
6. 中国石化胜利油田孤岛采油厂, 山东东营 257231

摘要 储层压力对泡沫产生的封堵能力影响较大。为了研究泡沫在实际储层压力下封堵性能的影响因素, 实验设置 10MPa 的回压模拟泡沫生成的环境压力, 以氮气作为气相介质研究储层压力、气液比、渗透率、含油饱和度、地层倾角等对泡沫封堵性和稳定性的影响。实验结果表明, 储层压力影响泡沫的封堵性能, 压力越大泡沫产生的阻力效应越小。在一定的储层压力下, 存在最佳的气液比, 使得泡沫产生的阻力效应最强。储层的孔隙结构影响泡沫的存在形态, 渗透率越高的储层中泡沫的封堵作用越强。低含油饱和度情况下, 泡沫仍能产生一定的封堵作用, 但是封堵有效期很短, 因此氮气泡沫可以在低含油饱和度储层中形成暂时封堵。泡沫在存在倾角的储层中更易均匀分布, 产生的封堵阻力越高, 同时也说明泡沫在垂向上的封堵能力更佳。

关键词 氮气泡沫; 封堵能力; 储层压力; 含油饱和度; 地层倾角

中图分类号 TE357

文献标识码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2012.24.002

Influencing Factors of Nitrogen Foam Plugging Performance Under Reservoir Condition

YANG Zhaopeng¹, GAO Shusheng^{1,2}, WANG Yining³, KE Wenqi⁴, LU Yan⁵, WANG Zhongbin⁶

1. Institute of Porous Flow and Fluid Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Langfang 065007, Hebei Province, China
2. PetroChina Research Institute of Petroleum Exploration & Development-Langfang, Langfang 065007, Hebei Province, China
3. Key Laboratory of Petroleum Engineering of Ministry of Education, China University of Petroleum, Beijing 102249, China
4. Petroleum Exploration and Production Research Institute, Sinopec, Beijing 100083, China
5. China National Oil and Gas Exploration and Development Corporation, Beijing 100034, China
6. Islands Oil Production Plant, Shengli Oilfield, Sinopec, Dongying 257231, Shandong Province, China

Abstract The plugging performance of the foam is strongly affected by the environment pressure. The back pressure is set to 10 MPa to simulate the environment pressure of the foam, in order to study the influencing factors of the plugging performance of the foam under the reservoir pressure. The nitrogen is chosen as the gas phase medium. The influencing factors studied in this paper include the reservoir pressure, the gas liquid ratio, the permeability, the oil saturation and the dip angle. It is shown that the plugging performance of the nitrogen foam is affected by the reservoir pressure. The greater the reservoir pressure is, the smaller the resistance effect will be. Within

收稿日期: 2012-06-15; 修回日期: 2012-07-03

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973计划)项目(2006CB705800)

作者简介: 杨朝蓬, 博士研究生, 研究方向为油气渗流机制与提高采收率, 电子信箱: yangzhaopeng2006@126.com

a certain range, the higher the gas liquid ratio of foam is, the better the plugging performance will be. The pore structure of the reservoir affects the generation of the foam, so that the higher the permeability is, the higher the plugging ability of the foam will be. Under the condition of a low oil saturation, the foam still has a certain plugging effect. But because the plugging period of a valid foam is very short, the nitrogen foam can only have a temporary plugging effect in the low oil saturation reservoir. The nitrogen foam is better distributed in the angle reservoir, where the plugging resistance of the nitrogen foam is higher. In the meantime, it is indicated that the plugging performance of the foam is better in the vertical direction.

Keywords nitrogen foam; plugging performance; reservoir pressure; oil saturation; dip angle

0 引言

氮气泡沫体系作为多相流体具有较高的视黏度,可以改善流度比,增大储层流动阻力,选择性封堵调剖能力强,遇水稳定遇油破灭,对储层伤害小等优点,因此氮气泡沫堵水有望成为为进一步改善储层开发效果的有效接替技术^[1-5]。泡沫体系的封堵性研究是泡沫研究的核心问题之一,研究认为,泡沫所在的环境压力、温度、泡沫质量、化学剂性质和多孔介质的毛细管力都影响着泡沫的封堵性能及在孔隙介质中的运移^[6]。近期研究发现,泡沫封堵性能和有效期受环境影响较大,在体相中的泡沫与储层多孔介质中的泡沫,其稳定性差异很大,除了储层的孔隙结构影响泡沫体系的分散和泡沫的质量,泡沫生成的环境压力对泡沫性能影响也很大^[7-13]。而以往的文献对泡沫的封堵性能实验研究大多在没有设置回压或者回压远低于实际储层压力的条件下进行^[14-16]。目前在储层压力下对影响氮气泡沫体系封堵性因素的研究还很少,本文通过设置回压阀模拟实际储层压力,对影响多孔介质中泡沫封堵性能和稳定性能的因素进行了实验研究。

1 实验设备及材料

实验设备包括长岩心夹持器、电子天平(精度为0.0002g)、压力表、压力传感器、平流泵、回压阀、高压手动泵等。实验材料包括发泡剂、氯化钠、氯化钾及氯化钙。根据某油田区块的实际储层压力,设置回压,实验温度设为45℃,地层水矿化度为1.7g/L;使用发泡剂A,其浓度为0.6%;使用天然露头砂压制的长岩心模拟储层,长岩心特征参数为4.5cm×4.5cm×80cm,孔隙体积146mL,孔隙度9%;气测渗透率 $(500-3000) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。

2 储层压力对泡沫封堵强度的影响

为了研究多孔介质中不同环境压力对泡沫封堵能力的影响,分别在加回压10MPa与不加回压情况下,采用不同的注入速度(3.5,2.8,2.1m/d)按照0.2PV:0.1PV(PV,岩心孔隙体积)的气液比交替注入氮气和起泡剂溶液,测量不同压力下泡沫产生的封堵压差,研究氮气泡沫体系在地层压力条件下与大气压力条件下的封堵特性。长岩心夹持器上从泡沫注入端至出口端依次布置3个测压点,实验过程中注入端及测压点上的压力由压力传感器实时记录,实验结果如图1所示。

从图1可见,在注入速度相同的情况下,泡沫在不加回

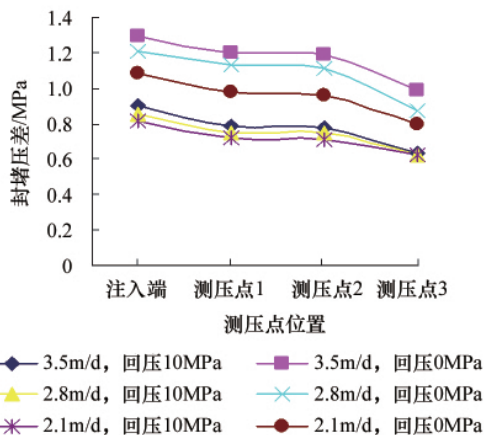


图1 储层压力对泡沫封堵性能的影响

Fig. 1 Influence of reservoir pressure on plugging performance

压的长岩心内产生的封堵压差大于加回压产生的封堵压差。另外,由实验可知较高的注入速度可以使泡沫产生的封堵压力更高。Du等^[17]也发现了该现象,并指出随着泡沫生成环境压力的增加,封堵压差下降是由于气体溶解到液相中的结果。本文认为泡沫质量一定时,压力越大,泡沫半径越小,从而泡沫体积变小,最终泡沫更容易通过多孔介质中的孔隙和喉道,减弱泡沫产生的阻力效应。因此,对泡沫封堵性能的评价实验需要在模拟实际储层压力的条件下进行。

3 气液比对泡沫性能的影响

泡沫特征值(泡沫质量)是表征泡沫体系的重要参数之一,定义为在一定温度和压力下,泡沫流体中气体体积与泡沫体积之比。从泡沫破裂的机制上分析,气液量影响着泡沫的排液速度和气体的扩散速度,影响泡沫的稳定性。而且,气体在泡沫中所占的体积也影响泡沫在孔隙喉道中产生的封堵作用,因此,泡沫体系的气液比是评价泡沫封堵性的重要指标。通过对气液比影响泡沫封堵能力的研究,可以优选出最佳的气液比,使泡沫封堵能力最强^[4-5]。

设计8组不同气液比的实验,气液比分别为0.025:0.1(PV);0.05:0.1(PV);0.1:0.1(PV);0.2:0.1(PV);0.3:0.1(PV);0.4:0.1(PV);0.5:0.1(PV);0.6:0.1(PV)。

实验采用气液交替注入方式,注入速度为3.2m/d,实验用

岩心渗透率为 $600 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。以氮气和地层水交替注入时的压差作为基础压差,以氮气和起泡剂溶液交替注入时的压差作为工作压差,工作压差与基础压差之比作为阻力因子。实验结果如图 2 所示。

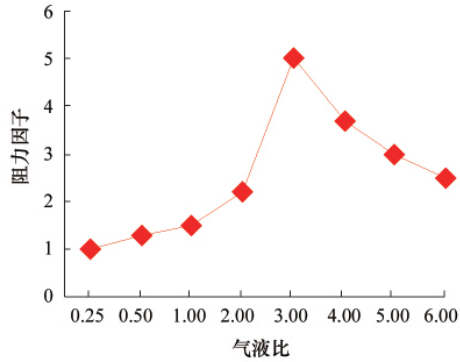


图 2 气液比与阻力因子关系曲线
Fig. 2 Relationship between gas liquid ratio and resistance factor

由图 2 可知,随着气液比的增加,在多孔介质中生成的泡沫质量也随之增加,从而泡沫的视黏度升高,阻力因子也增加。气液比较小时,阻力因子几乎为 1,泡沫液相中的表面活性剂由于被吸附产生消耗,即气-起泡剂溶液交替注入没有增加封堵效果;随着气液比的增加,泡沫产生的阻力因子逐渐增加,当气液比为 0.3:0.1(PV)时阻力因子达到最大。当气液比继续增加时,由于气体体积过大,造成泡沫快速破裂,封堵作用减弱。因此,在一定的储层压力下,存在最佳的气液比,此时泡沫产生的封堵性能最强。

4 渗透率对泡沫渗流阻力的影响

当泡沫暴露在空气中时,泡沫的生成与聚并几乎不受环境空间的限制,而当泡沫在储层多孔介质中生成时,储层的孔隙喉道会影响泡沫的存在形态,例如泡沫的大小,分散、聚并情况等。渗透率作为表征孔隙结构的特征参数之一,影响着泡沫的封堵能力。

选取 7 块不同渗透率的长岩心,同样在回压 10MPa 下,以 0.3:0.1(PV)的气液比向岩心中交替注入泡沫,测试每块岩心注入泡沫后的阻力因子,实验结果如图 3 所示。

由图 3 可以看出,随着泡沫所在岩心的渗透率的增加,泡沫产生的阻力因子逐渐增加。泡沫在毛细管里流动时,它的视黏度随毛细管直径的增大而增大,泡沫之所以具有这一特性,是因为泡沫在孔道中几乎占据所有孔道截面,流动时,泡沫表面与孔道壁摩擦而产生流动阻力,孔道直径大,其摩擦接触面积大,因而阻力大,由于泡沫具有非牛顿流体的特性,因此泡沫在多孔介质中运动时,其有效黏度随着孔隙渗透率、泡沫剪切速度的不同而不同。从而泡沫更倾向于封堵渗透率高的储层,因此泡沫在一定地层压力下同样具有堵大不堵小的选择性封堵性能。

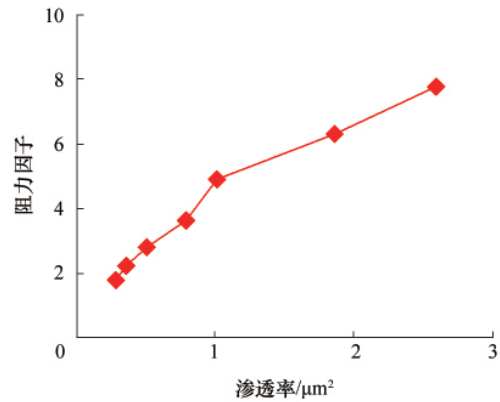


图 3 渗透率与阻力因子的关系
Fig. 3 Relationship between permeability and resistance factor

5 含油饱和度对泡沫渗流阻力的影响

油的存在可以降低甚至破坏泡沫的稳定性。泡沫驱油实验表明^[4,18-21],泡沫的形成与岩心渗透率和含油饱和度密切相关,含油饱和度在 30%以上时,不能有效形成泡沫;随着含油饱和度的降低,对于高渗层,泡沫可以在相对较高的含油饱和度条件下(15%)形成,而低渗层中泡沫仅能在较低的含油饱和度下(8%)形成。实验按照 0.3:0.1(PV)的气液比,对不同含油饱和度的长岩心交替注入起泡剂溶液和氮气,然后用地层水进行驱替,计算水测封堵效率,将封堵率高于 80%的时间作为封堵时间,h。泡沫在多孔介质中的水测封堵效率可定义为

$$\eta = \frac{K_w - K_{dw}}{K_w} \times 100\%$$

式中, K_w 为岩心段未封堵时的水测渗透率, $10^{-3} \mu\text{m}^2$; K_{dw} 为岩心被泡沫封堵后的水测渗透率, $10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。统计实验结果如图 4 所示。

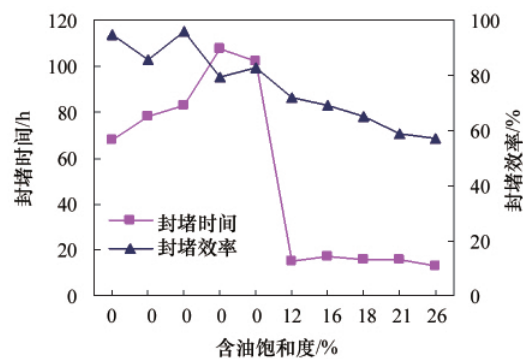


图 4 含油饱和度对封堵时间和封堵效率的影响
Fig. 4 Influence of oil saturation on plugging time and plugging efficiency

从图 4 可以看出,在含油饱和度为 0 的 5 组实验中,泡沫的封堵效率均在 80%以上,封堵时间大于 98h,泡沫起到了很

好的封堵作用;在含油饱和度较低(12%—26%)时,泡沫在不同含油饱和度的多孔介质中的封堵效率最低也达到了60%,随着含油饱和度的增加,泡沫的封堵效率逐渐降低,但是仍然会产生一定的有效封堵作用。但是由于油的存在,泡沫的封堵时间远小于泡沫在不含油的多孔介质中的封堵时间。因此,在含油饱和度较低的情况下,泡沫仅会产生暂堵作用。在对油水层同时进行封堵时,可以利用泡沫对油的暂时封堵特点,选择性地封堵出水层,而不影响油层的正常生产。

6 倾角对多孔介质中泡沫体系的封堵性能影响

为了研究储层的倾角对泡沫封堵效果的影响,将岩心夹持器分别设置为倾角为0和90°进行实验。此组实验用的岩心渗透率为 $2600 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,回压设置为10MPa,发泡压差分别为0.6MPa和1MPa(即注入压力分别为10.6MPa和11MPa),注入气液比为0.3:0.1(PV),在不同倾角下发泡,气体测量发泡后5min时长岩心的渗透率值。泡沫在多孔介质中的气测封堵效率定义为

$$\eta = \frac{K_g - K_{dg}}{K_g} \times 100\%$$

式中, K_g 为岩心段未封堵时气测渗透率, $10^{-3} \mu\text{m}^2$; K_{dg} 为岩心段封堵后气测渗透率, $10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。

表1所示为倾角为0和90°时,对封堵效率的影响。从表1中可以分析得到,倾角对封堵效果具有一定的影响,而且发泡压差越大,注入速度越大,则倾角对阻力的影响也越大。这是由于泡沫是一种不稳定流体,泡沫在多孔介质内运移时不断破裂又重新生成新的泡沫,由于气体和液体存在密度差,气相会自动上升,而液相在重力作用下会下降,因此泡沫在垂向上的分布存在一定程度的差异,由于这种差异,泡沫在水平放置的岩心夹持器中的封堵效率要低于垂直放置的岩心夹持器。同时从表1中可以看出注入压差越大,注入速度越高,泡沫产生的封堵效率越高。

表1 倾角对封堵效率的影响

Table 1 Influence of dip angle on plugging efficiency

发泡压差 /MPa	倾角 /($^{\circ}$)	K_g / $10^{-3} \mu\text{m}^2$	K_{dg} / $10^{-3} \mu\text{m}^2$	$\eta/\%$
0.6	0	2600	420	83.85
	90	2600	150	94.23
1	0	2600	270	89.62
	90	2600	120	95.38

7 结论

本文通过对储层压力下影响氮气泡沫封堵性能的影响因素进行室内实验,分析了储层压力、气液比、渗透率、含油饱和度和地层倾角对氮气泡沫封堵性能的影响,结论如下。

(1) 生成泡沫的环境压力增大,泡沫体积变小,更容易通

过孔喉,泡沫产生的阻力效应降低;同时也说明,实验在不加回压的情况下对泡沫封堵性能进行的评价比实际储层压力下泡沫的封堵性能评价更乐观。

(2) 气液比影响到多孔介质中泡沫质量,一定泡沫质量范围内,泡沫质量越高,封堵效果越好。实验优选的最佳气液比为0.3:0.1(PV)。多孔介质的孔隙结构影响泡沫的生成与体积大小,从而渗透率影响生成泡沫的阻力效应,储层的渗透率越高,生产泡沫的封堵能力越强。

(3) 泡沫对油非常敏感,在含油饱和度较低的情况下,油的存在不影响泡沫的封堵能力,但是会大幅度减弱泡沫的稳定性,降低泡沫的有效期,使泡沫对低含油饱和度储层形成暂时的封堵。因此,泡沫具有堵水不堵油的选择性封堵特性。

(4) 气液的密度差会造成泡沫在多孔介质中的分布不均匀,泡沫在存在倾角的储层中的封堵作用要更强。

参考文献 (References)

- [1] Tsau J S, Yaghoobi H, Grigg R B. Smart foam to improve oil recovery in heterogeneous porous media [C]. SPE/DOE Improved Oil Recovery Symposium, Tulsa, Oklahoma, USA, April 19–22, 1998.
- [2] Zhu T, Strycker A, Raible C J, Vineyard. Foams for mobility control and improved sweep efficiency in gas flooding [C]. SPE/DOE Improved Oil Recovery Symposium, Tulsa, Oklahoma, USA, April 19–22, 1998.
- [3] Turta A T, Singhal A K. Field foam applications in enhanced oil recovery projects: Screening and design aspects [C]. SPE International Oil and Gas Conference and Exhibition in China, Beijing, November 2–6, 1998.
- [4] 李兆敏. 泡沫流体在油气开采中的应用 [M]. 北京: 石油工业出版社, 2010.
Li Zhaomin. The application of foam fluid in oil and gas production [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2010.
- [5] 王增林. 强化泡沫驱提高原油采收率技术 [M]. 北京: 中国科学技术出版社, 2007: 44–46.
Wang Zenlin. EOR technology of enhanced foam flooding [M]. Beijing: China Science Press, 2007: 44–46.
- [6] Singh G, Hirasaki G J, Mille C. Dynamics of foam films in constricted pores [J]. *AIChE Journal*, 1997, 43(12): 3241–3252.
- [7] 岳湘安, 王尤富, 王克亮. 提高石油采收率基础 [M]. 北京: 石油工业出版社, 2007.
Yue Xiang'an, Wang Youfu, Wang Keliang. Enhanced oil recovery foundation [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2007.
- [8] 郭万奎, 廖广志, 邵振波, 等. 注气提高采收率技术 [M]. 北京: 石油工业出版社, 2003.
Guo Wankui, Liang Guangzhi, Shao Zhenbo, et al. Gas injection technology in enhanced oil recovery [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2003.
- [9] 赵仁保, 岳湘安, 柯文奇, 等. 氮气泡沫体系稳定性的影响因素研究 [J]. 石油学报, 2009, 30(1): 84–87.
Zhao Renbao, Yue Xiang'an, Ke Wenqi, et al. *Acta Petrolei Sinica*, 2009, 30(1): 84–87.
- [10] Dickson T. Foam generation and propagation in heterogeneous porous media [D]. Houston: Rice University, 2001.
- [11] 刘新光, 程林松, 庞占喜. 多孔介质中稳定泡沫的封堵性能试验研究 [J]. 石油天然气学报, 2008, 30(4): 129–132.
Liu Xinguang, Chen Linsong, Pang Zhanxi, *Journal of Oil and Gas*

- Technology*, 2008, 30(4): 129–132.
- [12] Shi J X. Simulation and experimental studies of foam for enhanced oil recovery[D]. Austin: The University of Texas at Austin, 1996.
- [13] 王其伟, 郭平, 周国华, 等. 泡沫体系封堵性能影响因素实验研究[J]. 特种油气藏, 2003, 10(3): 79–81.
Wang Qiwei, Guo Ping, Zhou Guohua, et al. *Special Oil & Gas Reservoirs*, 2003, 10(3): 79–81.
- [14] 刘合, 叶鹏, 刘岩, 等. 注氮气泡沫控制水窜技术在油田高含水期的应用[J]. 石油学报, 2010, 31(1): 91–95.
Liu He, Ye Peng, Liu Yan, et al. *Acta Petrolei Sinica*, 2010, 31(1): 91–95.
- [15] 李爱芬, 陈凯. 泡沫体系注入方式优化及可视化研究[J]. 西安石油大学学报: 自然科学版, 2011, 26(5): 49–52.
Li Aifen, Chen Kai. *Journal of Xi'an Shiyou University: Natural Science Edition*, 2011, 26(5): 49–52.
- [16] 周国华, 曹绪龙, 王其伟, 等. 交替式注入泡沫复合驱实验研究[J]. 西南石油大学学报, 2007, 29(3): 94–96.
Zhou Guohua, Cao Xulong, Wang Qiwei, et al. *Journal of Southwest Petroleum University*, 2007, 29(3): 94–96.
- [17] Du D, Zitha P L J, Uijttenhout M G H. Carbon dioxide foam rheology in porous media: A CT scan study[J]. *SPE Journal*, 2007, 12(2): 245–252.
- [18] 刘中春, 侯吉瑞, 岳湘安, 等. 泡沫复合驱微观驱油特性分析[J]. 石油大学学报: 自然科学版, 2003, 27(1): 49–53.
Liu Zhongchun, Hou Jimui, Yue Xiang'an, et al. *Journal of the University of Petroleum China: Natural Science Edition*, 2003, 27(1): 49–53.
- [19] 万里平, 孟英峰, 赵晓东. 泡沫流体稳定性机理研究 [J]. 新疆石油学院学报, 2003, 15(1): 70–73.
Wan Liping, Meng Yingfeng, Zhao Xiaodong. *Journal of Xinjiang Petroleum Institute*, 2003, 15(1): 70–73.
- [20] 陈国, 廖广志, 牛金刚. 多孔介质中泡沫流动等效数学模型 [J]. 大庆石油地质与开发, 2001, 25(2): 72–75.
Chen Guo, Liao Guangzhi, Niu Jingang. *Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing*, 2001, 25(2): 72–75.
- [21] 程林松, 肖双爱. 稠油油藏蒸汽泡沫驱油数值模拟方法[J]. 计算物理, 2003, 20(5): 463–466.
Chen Linsong, Xiao Shuang'ai. *Chinese Journal of Computation Physics*, 2003, 20(5): 463–466.

(责任编辑 胡少卿, 朱宇)

· 学术动态 ·



“‘第九届国际锌和锌合金镀层钢板大会’暨 ‘第二届亚太涂镀层大会’联合会议”征文

由中国金属学会主办, 中国腐蚀与防护学会、先进金属材料涂镀国家工程实验室协办的“第九届国际锌和锌合金镀层钢板大会”暨“第二届亚太涂镀层大会”联合会议将于 2013 年 9 月 23—27 日在北京市举行。

征稿范围: 1) 新的镀层生产线与技术; 2) 镀锌工艺技术; 3) 用于环境保护的涂镀层技术; 4) 镀层钢板在汽车工业中的应用; 5) 镀层钢板在建筑行业中的应用; 6) 镀层钢板在家电工业中的应用; 7) 连接和成型; 8) 电镀、热镀、合金化镀层钢板和先进钢铁材料; 9) 转化涂层与预涂层钢板; 10) 腐蚀机理监测与寿命预测; 11) 表面和组织结构分析; 12) 设计师、建筑师和其他特殊用的镀锌产品。

摘要截稿日期: 2013 年 2 月 15 日

全文截稿日期: 2013 年 5 月 1 日

联系电话: 010-65211206

电子邮箱: galvatech2013@csm.org.cn

通信地址: 北京东四西大街 46 号中国金属学会国际部(100711)

会议网站: http://www.csm.org.cn/news/show_news.aspx?newsId=6041