

部分水解聚丙烯酰胺溶液在孔喉模型中 机械降解的主控因素

赵胜绪^{1,2},岳湘安^{1,2},张立娟^{1,2},韦杰迈^{1,2},凌卿^{1,2},刘凯^{1,2}

(1.中国石油大学(北京)油气资源与探测国家重点实验室,北京 102249;

2.中国石油大学(北京)石油工程教育部重点实验室,北京 102249)

摘要:为明确驱油用部分水解聚丙烯酰胺溶液在孔喉模型中机械降解的主控因素,开展部分水解聚丙烯酰胺溶液在孔喉模型中的机械降解实验,分析其流速、质量浓度及储层孔喉比和地层水总矿化度等因素对其机械降解的影响。实验结果表明:部分水解聚丙烯酰胺溶液在孔喉模型中机械降解的主控因素为流速和孔喉比,其质量浓度和地层水总矿化度对部分水解聚丙烯酰胺在孔喉模型中机械降解的影响不明显;部分水解聚丙烯酰胺溶液在孔喉模型中机械降解导致的粘度损失率随流速增加而增加,且存在临界流速和极限流速2个机械降解流速特征值;部分水解聚丙烯酰胺溶液通过串联孔喉模型时,机械降解主要发生在前4个孔喉模型,说明部分水解聚丙烯酰胺溶液在油藏中发生机械降解的关键部位是近井地带。

关键词:部分水解聚丙烯酰胺 聚合物驱 机械降解 孔喉模型 粘度

中图分类号:TE357.46⁺1

文献标识码:A

Main controlling factors of mechanical degradation of HPAM in pore-throat model

ZHAO Shengxu^{1,2}, YUE Xiang'an^{1,2}, ZHANG Lijuan^{1,2}, WEI Jiemai^{1,2}, LING Qing^{1,2}, LIU Kai^{1,2}

(1.State Key Laboratory of Petroleum Resources and Prospecting, China University of Petroleum(Beijing),

Beijing City, 102249, China; 2.Key Laboratory of Petroleum Engineering, Ministry of Education,

China University of Petroleum(Beijing), Beijing City, 102249, China)

Abstract: In order to know the main controlling factors of mechanical degradation of partially hydrolyzed polyacrylamide (HPAM) in pore-throat model, the mechanical degradation experiments of partially hydrolyzed polyacrylamide (HPAM) for polymer flooding in the pore-throat model were carried out, and the effect of flow rate, concentration, pore-throat ratio and other factors on the mechanical degradation was studied. The experimental results show that the main factors of mechanical degradation of HPAM in the pore-throat model are flow rate and pore-throat ratio, and the concentration and total salinity of formation water have little influence on the mechanical degradation of HPAM. The apparent viscosity loss caused by the mechanical degradation of HPAM in the pore throat increases with the flow rate, and there is a "critical flow rate" that the polymer molecules begin to degrade rapidly, and a "limit flow rate" at which the degradation reaches the limit. When the HPAM passes through the tandem pore-throat model, the mechanical degradation occurs mainly in the first four pore-throat models, which indicates that the key position of the mechanical degradation of HPAM in the reservoirs is the near borehole zone.

Key words: HPAM; polymer flooding; mechanical degradation; pore-throat model; viscosity

收稿日期:2018-07-26。

作者简介:赵胜绪(1992—),男,河南南阳人,在读硕士研究生,从事提高采收率与采油化学研究。联系电话:18810603866, E-mail:zxs20110821@163.com。

通讯作者:岳湘安(1957—),男,北京人,教授,博导。联系电话:(010)89733960, E-mail:yuexa@139.com。

基金项目:国家科技重大专项“低渗-致密油藏高效提高采收率新技术”(2017ZX05009-004),国家自然科学基金项目“致密油储层提高采收率关键理论与方法研究”(51334007)。

聚合物驱是提高采收率的重要技术,已在大庆、胜利、河南等油田广泛应用^[1-2]。聚合物溶液到达油藏深部的流变性是决定聚合物驱开发效果的关键,而聚合物溶液在由注入设备流经井筒,以高流速通过炮眼及近井地带的过程中,机械降解导致的聚合物溶液粘度损失率为10%~60%^[3-6]。中外科研人员多采用天然岩心、人造岩心和填砂管等多孔介质模型对此进行了诸多研究^[7-12],并逐渐意识到采用多孔介质模型研究聚合物机械降解问题,存在重复性差和多因素相互干扰(如滞留、稀释)等问题,从而对实验结果产生影响^[7-8]。另外,无法从孔隙尺度研究聚合物机械降解机理及孔隙结构等对聚合物机械降解的影响。为此,开展了部分水解聚丙烯酰胺(HPAM)溶液在孔喉模型中的机械降解实验^[11-12],研究其流速、质量浓度及储层孔喉比等因素在孔喉模型中的机械降解规律,并用串联孔喉模型模拟聚合物通过多个孔喉模型在实际油层中的机械降解特性,以深化对聚合物机械降解机理的认识。

1 实验器材与方法

1.1 实验器材

实验装置由常州市易用科技公司生产的恒速恒压泵和高压中间容器等组成(图1)。

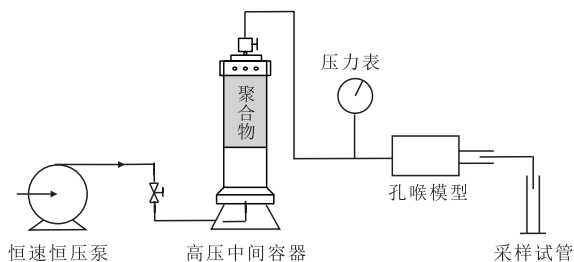


图1 实验装置

Fig.1 Experimental device

实验用聚合物为部分水解聚丙烯酰胺,其特性粘数为2 510 mL/g,固含量为90.02%;实验用水为蒸馏水和3种总矿化度不同的地层水,其离子组成和总矿化度如表1所示。

表1 地层水离子组成和总矿化度
Table1 Ion composition of the formation water and its total salinity mg/L

编号	Na ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻	总矿化度
1	2 521	324	12	4 335	97	154	7 443
2	6 179	1 087	93	11 656	0	113	19 128
3	11 946	702	174	20 047	0	0	32 868

自制孔喉模型参数包括:孔隙长度均为20 mm,孔隙直径均为3 000 μm,喉道长度均为35 mm,喉道直径分别为50,100,200,300和500 μm,对应的孔喉比分别为60,30,20,10和6。进行主控因素分析时,除了地层水总矿化度对HPAM溶液在孔喉模型中机械降解的影响实验外,其他因素影响实验均采用总矿化度为32 868 mg/L的地层水;另外,除了研究HPAM溶液在串联孔喉模型中的机械降解时采用多个孔喉模型,其余实验均采用单个孔喉模型。

1.2 实验方法

在温度为25 ℃、剪切速率为7.2 s⁻¹条件下,用赛默飞世尔科技公司生产的HAKKE RS6000旋转流变仪测定HPAM溶液的初始和机械降解的粘度。

HPAM溶液在孔喉模型中机械降解具体实验步骤包括:①制作孔喉模型,配制质量浓度为2 200 mg/L的HPAM溶液,并测定初始粘度。②以恒速恒压泵为动力源,将中间容器中的HPAM溶液通过管线泵入孔喉模型,在孔喉模型出口端采集聚合物溶液样品,并测定其机械降解后的粘度。③改变HPAM溶液的流速和质量浓度、孔喉模型的规格和数量及地层水总矿化度,重复步骤①—②。

2 实验结果与分析

2.1 机械降解的主控因素

2.1.1 流速

HPAM溶液由近井地带向油藏深部运移的过程中,流速变化较大,可跨越3—4个数量级。在油藏深部的流速较低,一般为10⁻⁵ m/s,而在井筒、炮眼及近井地带的流速非常高,达10 m/s,尤其在单井注采强度比较大的海上油田^[13-14]。为此,选取流速为0.001~100 m/s。

由HPAM溶液粘度损失率与流速的关系(图2)可知,HPAM溶液粘度损失率随流速增加而增加,且存在2个机械降解流速特征值。当流速为2 m/s时,聚合物分子开始急剧降解,此时的流速为临界流速(v_0);当流速为40 m/s时,聚合物分子机械降解速度达到极限,此时的流速为极限流速(v_l)。当流速低于临界流速时,HPAM溶液在孔喉模型中流动受到的应力小于分子链断裂的极限应力,机械降解不显著,HPAM溶液粘度损失率小于15%,机械降解程度随流速增加而缓慢增加;当流速高于临界流速时,HPAM溶液在孔喉模型中流动受到的应力大于分子链断裂的极限应力,机械降解程度加剧,HPAM溶液粘度损失率急剧上升;当流速高于极限流速时,机

械降解程度接近极限,趋于定值,当粘度损失率约为90%后,机械降解程度缓慢增加。因此,可用临界流速来表征HPAM溶液的抗机械降解性能,临界流速越高,表明其抗机械降解性能越好。

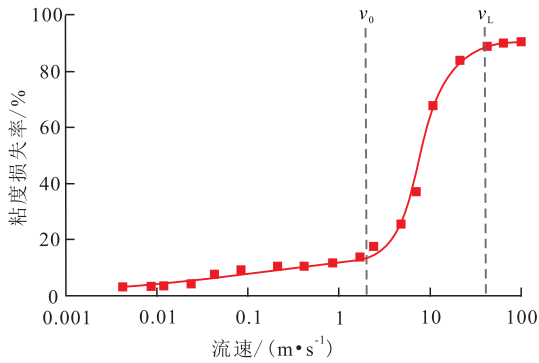


图2 粘度损失率与流速的关系

Fig.2 Apparent viscosity loss versus flow rate of HPAM

2.1.2 孔喉比

储层孔隙半径跨度较大,从常规尺度到微纳米尺度,储层孔喉比分布范围较宽^[15]。由中国某油田平均渗透率为500 mD的典型储层孔喉比频率分布(图3)可知,该储层的孔喉比主要为5~40,选取孔喉比分别为6,10,20,30和60。由HPAM溶液粘度损失率与孔喉比关系(图4)可知,在相同流速条件下,HPAM溶液粘度损失率随孔喉比增加而增加,且流速越高,HPAM溶液粘度损失率随孔喉比的上升速

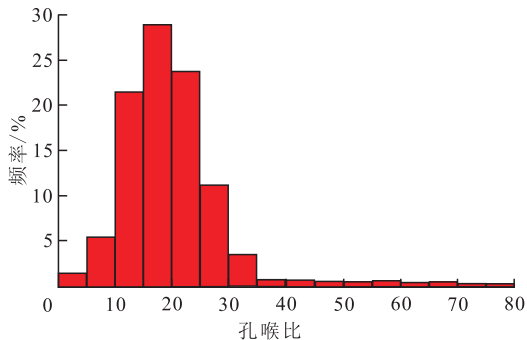


图3 某油田典型储层孔喉比频率分布

Fig.3 Pore-throat ratio distribution of 500 mD reservoir in a certain oilfield

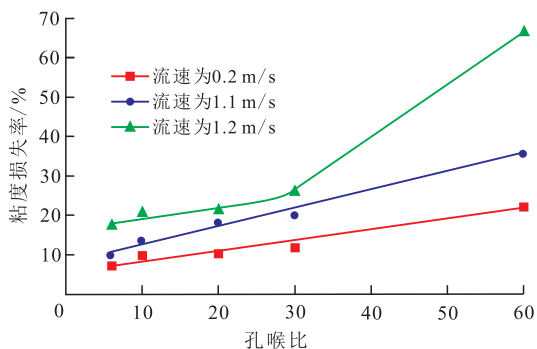


图4 粘度损失率与孔喉比的关系

Fig.4 Apparent viscosity loss versus pore-throat ratio

度越快,即孔喉比对HPAM溶液在孔喉模型中机械降解的影响越显著。

2.1.3 质量浓度及地层水总矿化度

随着中国原油对外依存度的不断升高,常规油藏的开采已经不能满足对原油日益增长的需求,因此,加大对高温、高盐和低渗透—特低渗透等特种油气藏的开采力度是解决中国石油供需矛盾的重要途径^[16-18]。其中,高盐油藏不仅对聚合物的耐盐性能提出了更高的要求,同时也要保证聚合物溶液具有很好的抗机械降解性能。所以,除了流速和孔喉比,还需研究HPAM溶液质量浓度及地层水总矿化度对HPAM在孔喉模型中机械降解的影响。由HPAM溶液质量浓度与粘度损失率关系(图5)可知,随HPAM溶液质量浓度增加,其粘度损失率先增加,后趋于稳定。当HPAM溶液质量浓度小于1 500 mg/L时,粘度损失率随质量浓度增加而增加;当HPAM溶液质量浓度大于1 500 mg/L时,HPAM溶液粘度损失率基本稳定。不同流速条件下,HPAM溶液粘度损失率随其质量浓度的变化规律相近。总体而言,HPAM溶液质量浓度在孔喉模型中机械降解的影响不显著。

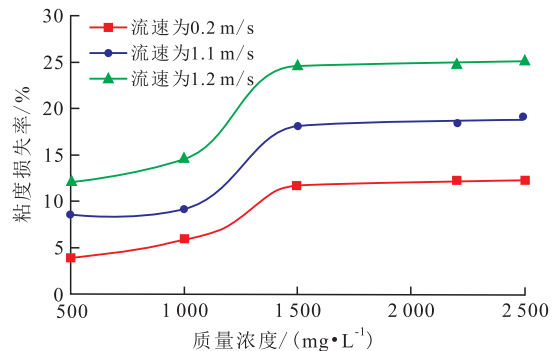


图5 粘度损失率与HPAM溶液质量浓度的关系

Fig.5 Apparent viscosity loss versus concentration of HPAM

由地层水矿化度与粘度损失率的关系(图6)可知,相同流速条件下,不同总矿化度地层水配制的HPAM溶液粘度损失率相差不大,且不同流速条件

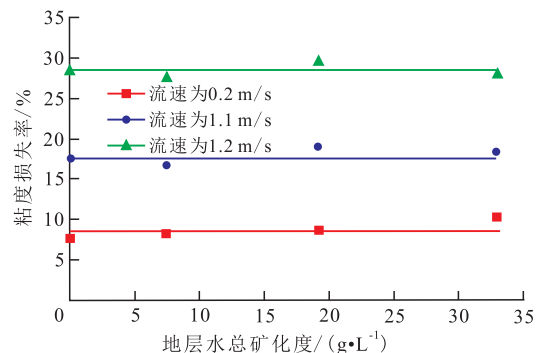


图6 粘度损失率与地层水总矿化度的关系

Fig.6 Apparent viscosity loss versus salinity of formation water

下,HPAM溶液粘度损失率随地层水矿化度的变化规律相似,即地层水总矿化度对HPAM溶液在孔喉模型中机械降解的影响不明显,且小于HPAM溶液质量浓度的影响程度。

2.2 HPAM在串联孔喉模型中的机械降解行为

利用串联孔喉模型模拟聚合物通过多个孔喉模型在实际油层中的机械降解行为及其规律。由HPAM溶液通过孔喉模型机械降解导致的粘度损失率随串联孔喉模型数目变化(图7)可知,HPAM溶液粘度损失率随串联孔喉模型数目的增加而增加,且最终趋于稳定。在不同流速条件下,HPAM溶液粘度损失率随孔喉比的变化规律相似,即HPAM溶液通过串联孔喉模型的机械降解在第4个孔喉模型基本达到稳定。据此推断,HPAM溶液在油藏中发生机械降解的关键部位是近井地带。

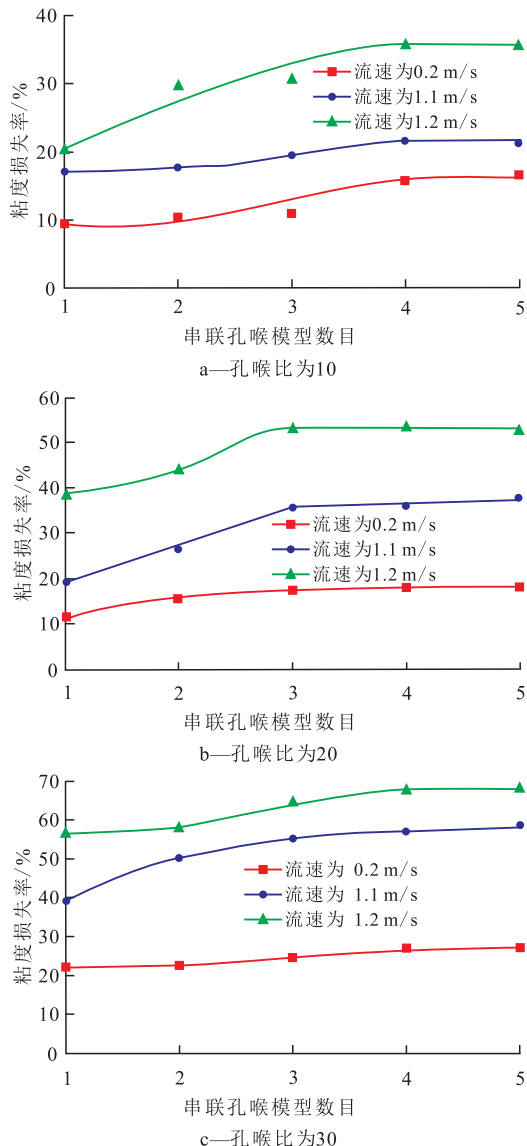


图7 粘度损失率与串联孔喉模型数目关系

Fig.7 Apparent viscosity loss versus the number of pore-throat model in series

3 结论

HPAM溶液在孔喉模型中发生机械降解的主控因素是流速和孔喉比。HPAM溶液在孔喉模型中机械降解导致的粘度损失率随流速增加而增加,且存在临界流速和极限流速2个机械降解流速特征值,临界流速可用来表征聚合物的抗机械降解性能。HPAM溶液在孔喉模型中机械降解导致的粘度损失率随孔喉比的增加而增加,且流速越高,孔喉比对HPAM溶液在孔喉模型中机械降解的影响越显著。HPAM溶液通过串联孔喉模型发生机械降解导致的粘度损失率随串联孔喉模型数目的增加而增加,且在孔喉模型数目为4时趋于稳定。由此推断,HPAM在油藏中发生机械降解的关键部位是近井地带。在实际油藏中,可以通过近井油层改造,缓解HPAM在近井地带的机械降解。

参考文献:

- [1] 张帮亮,龙禹霏,龙志勤,等.HPAM南海海水溶液磁处理增粘条件优化及性能评价[J].油气地质与采收率,2017,24(5):93-98.
ZHANG Bangliang, LONG Yufei, LONG Zhiqin, et al.Thickening condition optimization and performance evaluation of HPAM solutions formulated with seawater from the South China Sea by magnetic treatment[J].Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2017, 24(5):93-98.
- [2] 张颖苹.稠油油藏聚合物驱剖面反转现象室内实验[J].特种油气藏,2016,23(6):111-114.
ZHANG Yingping.Laboratory experiment of profile inversion regulation in heavy-oil reservoir with polymer flooding[J].Special Oil & Gas Reservoirs, 2016, 23(6):111-114.
- [3] 钱思平.配注工艺对聚合物溶液的降解研究[D].北京:中国地质大学(北京),2006.
QIAN Siping.Study of polymer solution degradation caused by the process of making up and injecting polymer solution[D].Beijing: China University of Geosciences(Beijing), 2006.
- [4] 邓卫国.化学驱射孔炮眼聚合物粘度损失研究[J].特种油气藏,2008,15(增刊):69-71.
DENG Weiguo.Study on polymer viscosity loss in perforation hole during chemical flooding[J].Special Oil & Gas Reservoirs, 2008, 15(Supplement):69-71.
- [5] 叶仲斌,彭杨,施雷庭,等.多孔介质剪切作用对聚合物溶液粘弹性及驱油效果的影响[J].油气地质与采收率,2008,15(5):59-62.
YE Zhongbin, PENG Yang, SHI Leiting, et al.The influence of shear action in porous medium on viscoelasticity and oil displacement efficiency of polymer[J].Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2008, 15(5):59-62.

- [6] 杨海陵.聚合物溶液经近井地带性能变化及其对驱油效能的影响[D].成都:西南石油大学,2012.
YANG Hailing.Performance of polymer solution through near wellbore and their impact on performance of flooding[D].Chengdu:Southwest Petroleum University,2012.
- [7] 卢祥国,闫文华,宋合龙,等.聚合物溶液流经多孔介质时剪切降解的实验研究[J].油田化学,1995,12(4):375-378.
LU Xiangguo, YAN Wenhua, SONG Helong, et al.An experimental study on shear degradation of HPAM solutions flowing through porous media[J].Oilfield Chemistry, 1995, 12(4):375-378.
- [8] 邵振波,周吉生,孙刚,等.部分水解聚丙烯酰胺驱油过程中机械降解研究——分子量、粘度及相关参数的变化[J].油田化学,2005,22(1):72-77.
SHAO Zhenbo, ZHOU Jisheng, SUN Gang, et al.Studies on mechanical degradation of partially hydrolyzed polyacrylamide in course of polymer flooding: Changes in relative molecular mass, viscosity and related parameters[J].Oilfield Chemistry, 2005, 22(1):72-77.
- [9] 刘德新,赵修太,邱广敏.驱油用聚丙烯酰胺降解研究进展[J].高分子材料科学与工程,2008,24(9):27-31.
LIU Dexin, ZHAO Xiutai, QIU Guangmin.Review on the degradation of polyacrylamide used for flooding[J].Polymer Materials Science & Engineering, 2008, 24(9):27-31.
- [10] DUPAS A, HENAUT I, ROUSSEAU D, et al.Impact of polymer mechanical degradation on shear and extensional viscosities: toward better injectivity forecasts in polymer flooding operations [C].Woodlands: SPE International Symposium on Oilfield Chemistry, 2013: 1-11.
- [11] ZAITOUN A, MAKAKOU P, BLIN N, et al.Shear stability of EOR polymers[J].SPEJ, 2012, 17(2):335-339.
- [12] 谭鑫.岩心中聚合物溶液性质变化的影响因素及规律[D].北京:中国石油大学(北京),2017.
TAN Xin.Influencing factors and laws of polymer solution properties in cores[D].Beijing:China University of Petroleum(Beijing), 2017.
- [13] 王婷婷,卢祥国,陈阳,等.渤海油田大尺寸优势通道封堵剂性能评价[J].油气地质与采收率,2017,24(6):103-107.
WANG Tingting, LU Xiangguo, CHEN Yang, et al.Performance evaluation of plugging agent for large-size preferential channels in Bohai Oilfield[J].Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2017, 24(6):103-107.
- [14] 李强,梁守成,吕鑫,等.交联聚合物溶液成胶动态特征及其机理[J].大庆石油地质与开发,2017,36(4):87-94
LI Qiang, LIANG Shoucheng, LÜ Xin, et al.Gelling dynamic characteristics and their mechanisms of the crosslinking polymer solution [J].Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2017, 36(4):87-94.
- [15] 赵习,刘波,郭荣涛,等.储层表征技术及应用进展[J].石油实验地质,2017,39(2):287-294.
ZHAO Xi, LIU Bo, GUO Rongtao, et al.Reservoir characterization and its application to development [J].Petroleum Geology & Experiment, 2017, 39(2):287-294.
- [16] 侯启军,何海清,李建忠,等.中国石油天然气股份有限公司近期油气勘探进展及前景展望[J].中国石油勘探,2018,23(1):1-13.
HOU Qijun, HE Haiqing, LI Jianzhong, et al.Recent progress and prospect of oil and gas exploration by PetroChina Company Limited[J].China Petroleum Exploration, 2018, 23(1):1-13.
- [17] 王毅,陈洪,叶仲斌,等.疏水缔合聚合物对不同结构甜菜碱溶液动态界面张力的影响[J].油气地质与采收率,2018,25(1):122-126.
WANG Yi, CHEN Hong, YE Zhongbin, et al.Effect of hydrophobically associating polymer on the dynamic interfacial tensions of betaine solutions with different structures [J].Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2018, 25(1):122-126.
- [18] 李洪生.河南双河油田弱碱三元复合驱矿场试验效果[J].大庆石油地质与开发,2017,36(6):115-120.
LI Hongsheng.Field test results of the weak base ASP in Henan Shuanghe Oilfield[J].Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2017, 36(6):115-120.

编辑 单体珍

更正说明

本刊2018年第5期发表的“烟道气驱油过程中N80钢的腐蚀规律实验研究”一文中,作者单位“中国石油大学(华东)胜利学院”有误,现更正为“中国石油大学胜利学院 化学工程学院”,对应的英文“Shengli College, China University of Petroleum (East China)”更正为“School of Chemical Engineering, Shengli College China University of Petroleum”。