

文章编号:1673-064X(2011)04-0028-05

二氧化碳非混相驱油藏沥青质沉淀规律研究

何岩峰, 李 栋, 胡 杰, 郭立春

(常州大学 石油工程学院, 江苏 常州 213016)

摘要:为研究二氧化碳驱油藏原油沥青质沉淀量预测方法,设计了二氧化碳非混相驱沥青质沉淀动态岩心驱替实验装置,采用正交实验分析方法研究了非混相驱条件下驱替压力、温度、岩心初始渗透率、原油中的沥青质含量和驱替速度等因素对驱替后岩心中原油沥青质沉淀量的影响,分析了作用机理,回归出了二氧化碳非混相驱过程中原油沥青质沉淀量预测公式并用实验结果进行了验证.验证结果表明,该预测公式可直接用于二氧化碳非混相驱原油沥青质沉淀量预测.

关键词:二氧化碳驱油; 沥青质沉淀; 沥青质沉淀预测

中图分类号:TE357.45 **文献标识码:**A

近年来国内外开展的二氧化碳驱提高原油采收率生产实践表明,在地层压力和温度下^[1-9]注入的二氧化碳可能引起原油中的沥青质沉淀析出并降低地层渗透率,影响油田开发效果.一些国内外学者曾就二氧化碳驱油藏沥青质沉淀规律进行过探索性的研究,主要对沥青质沉淀初始点和沉淀量进行了研究,这些研究大多在高压容器内进行,与油藏岩石中原油渗流状况差异较大.如 Srivastava 等^[1]以二氧化碳为沉淀剂通过静态滴定,研究了原油中沥青质的初始沉淀点及温度、压力对原油溶液中沥青质沉淀的影响.胡玉峰等^[2]利用高压实验装置研究了静态环境下不同油样和二氧化碳浓度对沥青质沉淀的影响. Fisher 等^[3]使用影像分析法,研究了溶剂与原油不同混合比时,混合物流动过程中沥青质沉淀初始点和发生发展的过程. Satoru 等^[4]对中东原油注二氧化碳时产生的沥青质沉淀利用红外线光色散技术进行了静态和动态研究.贾英等^[9]通过岩心驱替实验研究了不同温度、压力和二氧化碳浓度下的沥青质沉淀对采收率的影响.通过文献调研可知,前人对于二氧化碳驱沥青质沉淀规律的研究,所考虑的因

素只限于温度、压力和二氧化碳的浓度,且室内实验条件与二氧化碳驱现场的真实条件偏差较大,其规律代表性不强.本文设计了用于油藏二氧化碳驱沥青质沉淀规律研究的岩心驱替实验装置,采用正交实验方法详细研究了二氧化碳驱过程中的原油沥青质沉淀规律,并根据实验结果分析了各因素对沥青质沉淀的作用机理,得到了二氧化碳驱油藏岩石中沥青质沉淀量预测公式.

1 二氧化碳非混相驱沥青质沉淀规律实验研究

1.1 实验原理

采用空气测出岩心的渗透率后,用已知沥青质含量的稠油驱替饱和水后的岩心,再将岩心在设定温度压力下老化,然后使用二氧化碳在一定的温度、压力、驱替速度下驱替岩心中的流体,计量流量并收集产出流体样本,分析驱替前后岩心中原油沥青质组分含量的变化,用间接的方法计算出驱替后岩心中沉淀出的沥青质质量,并研究各影响因素与岩心中原油沥青质沉淀量之间的关系和机理.本实验未

收稿日期: 2010-12-15

基金项目: 中国石油科技创新基金研究项目“CO₂驱油藏原油沥青质沉淀影响因素研究”(编号: 2008D-5006-02-07).

作者简介: 何岩峰(1973-),男,博士,副教授,主要从事采油工程与低渗油藏渗流机理研究. E-mail: heyangfeng@sohu.com

达到混相驱条件, 为非混相驱实验。

1.2 实验方法

前人研究结果^[142]表明, 压力、温度、原油中沥青质原始含量等因素都会影响原油中沥青质沉淀量, 而驱替速度、初始地层渗透率等因素会影响二氧化碳与地层流体的传质时间和传质速度及在岩石孔道壁面的接触时间, 显然也会影响最终岩心孔道壁面上的沥青质沉淀量。考虑到影响因素较多, 每种因素的变化范围较大, 为提高实验的效率, 选用正交实验方法优化实验组数。

1.2.1 实验因素的确定 根据文献调研和现场生产实践, 确定驱替压力、地层温度、原油中沥青质原始含量、驱替速度和岩心的初始渗透率为正交实验方法的实验因素。

1.2.2 正交表的确定 正交表是正交实验方法的关键, 选择正交表要根据因素多少及实验工作量的大小来确定。本实验有 5 个因素, 由于单组实验的时间长达 48 ~ 72 h, 实验条件苛刻, 实验步骤复杂, 所以在综合考虑了实验时间、实验设备寿命、实验复杂程度和实验结果准确性的前提下, 本文选择 $L_{16}(4^5)$ 正交表作为实验依据^[13-14]。

1.2.3 水平数的确定 为了研究沥青质原始含量对二氧化碳驱沥青质沉淀的影响, 确定 4 种初始沥青质质量分数为 0.542%、0.678%、0.813%、0.949% 的原油样品。为了研究初始渗透率对沥青质沉淀量的影响, 同时考虑到高黏度的原油在岩心中驱替压差和实验过程的稳定性, 选取初始渗透率为 $0.003\ 55\ \mu\text{m}^2$ 、 $0.012\ 57\ \mu\text{m}^2$ 、 $0.018\ 84\ \mu\text{m}^2$ 、 $0.019\ 19\ \mu\text{m}^2$ 的 4 个岩心样品。考虑到驱替速度太大会导致气体很快突破, 而速度太慢又会使实验时间过长, 所以驱替速度设定为 0.10 mL/min、0.12 mL/min、0.14 mL/min、0.16 mL/min 4 个水平。考虑到实验设备的额定压力为 25 MPa, 选取 12 MPa、14 MPa、16 MPa、18 MPa 4 个压力水平。为模拟真实地层条件, 选取温度为 50 °C、60 °C、70 °C、80 °C 4 个水平进行实验。

1.3 实验设备

根据实验的原理和目的, 考虑岩心驱替实验装置的基本原理和对排出液体流量计量及采样的需要, 设计制造了一套沥青质沉淀规律岩心驱替模拟实验装置。该装置主要由平流泵、手摇泵、岩心夹持器、回压调节系统、压差计、压力传感器、恒温箱等组成。装置采用密闭流程以防止油气组分的变化。使用

计算机采集和保存数据。由于设备条件限制, 本装置主要用于非混相驱的实验研究。实验设备流程见图 1。

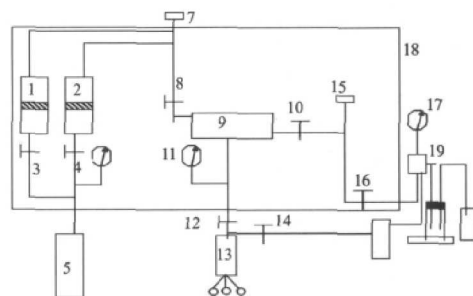


图 1 驱替实验设备图

Fig. 1 The equipment for displacement experiment

1、2-中间容器; 3、4、8、10、12、14、16-阀门; 5-平流泵;

6、11、17-压力表; 7-压力计; 9-岩心夹持器;

13-手动高压泵; 18-恒温箱; 19-回压阀

1.4 实验步骤

(1) 将岩样切割加工成直径 25 mm、长 150 mm 的标准岩心柱。经过预处理将岩样洗油、烘干。测量岩样实测质量、直径、长度等数据。

(2) 将岩心放入岩心饱和仪, 抽空岩心, 注入蒸馏水, 在实验压力下充分饱和 24 h。

(3) 用待测油样驱替岩心中的地层水以建立地层原始油水分布, 油驱直到岩心出口产液不含水为止, 在实验温度下老化 12 h。

(4) 将加压后的二氧化碳以平流泵驱动, 在实验温度和压力下驱替老化后的岩心, 进行二氧化碳驱模拟实验。

(5) 以 0.2 PV 为一个单位时间记录注入压力、注入压差、注入速度、环压和回压等数据, 并收集各个记录时刻岩心末端排出的油样和气样, 计量气体流量。注入二氧化碳量为 1.2 PV 时, 结束驱替。

(6) 将甲苯和石油醚按照 4:1 体积比例混合, 用平流泵驱替混合液清洗岩心, 直至回压阀出口处的液体清澈为止。用氮气吹洗至不产出液体, 取出岩心, 在真空烘箱中烘干, 测量其空气渗透率的变化。

2 实验结果及分析

实验结果见表 1。表 1 中沥青质相对沉淀量的计算公式为

岩心中沥青质沉淀量 = (原油中原始沥青质含量 - 驱替后油样中沥青质含量) / 原油中原始沥青质含量。 (1)

表1 实验结果
Tab.1 The experiment results

原油原始 沥青质 含量/%	温度 /℃	驱替 压力 /MPa	驱替 速度 /(mL·min ⁻¹)	初始岩心 渗透率 /(10 ⁻³ μm ²)	岩心中 沥青质 沉淀量/%
0.542 3	50	12	0.10	3.55	64.61
0.542 3	60	16	0.16	12.57	21.85
0.542 3	70	18	0.12	18.84	25.50
0.542 3	80	14	0.14	19.19	41.16
0.677 8	50	14	0.12	12.57	87.22
0.677 8	60	18	0.14	3.55	51.74
0.677 8	70	16	0.10	19.19	94.61
0.677 8	80	12	0.16	18.84	71.85
0.813 4	50	16	0.14	18.84	56.88
0.813 4	60	12	0.12	19.19	69.10
0.813 4	70	14	0.16	3.55	44.60
0.813 4	80	18	0.10	12.57	45.93
0.948 9	50	18	0.16	19.19	90.45
0.948 9	60	14	0.10	18.84	87.74
0.948 9	70	12	0.14	12.57	60.98
0.948 9	80	16	0.12	3.55	75.16

2.1 各因素对岩心中沥青质沉淀量的影响

通过对表1正交实验进行数学分析,可以得到

各影响因素的极差 R ,并可用极差大小分析各影响因素的主次顺序(表2).从表2中可以看出:原油中原始沥青质含量对岩心中沥青质沉淀量的影响最大,其次是岩心渗透率、温度和驱替速度,而驱替压力对岩心中沥青质沉淀量的影响最小.这说明稠油油藏和低渗透油藏应用二氧化碳驱时,油井产能受到沥青质沉淀量的影响可能性最大,所以必须得到描述沥青质沉淀量规律的表达式以便尽量减小沥青质沉淀对最终开发效果的影响.

表2 影响因素的主次关系
Tab.2 The effect degree of factors

影响因素	温度	驱替压力	注入速度	原始沥青质含量	渗透率
极差	0.136	0.072	0.145	0.538	0.156

2.2 各因素对岩心中沥青质沉淀量的影响

从图2各影响因素与原油沥青质沉淀量关系图可以看出二氧化碳非混相驱的特点:

(1)图2(a)说明岩心中原始沥青质的沉淀量随着原油中沥青质初始含量的增加而增加,即呈单增的关系.这是因为在二氧化碳驱时,由于原油中溶

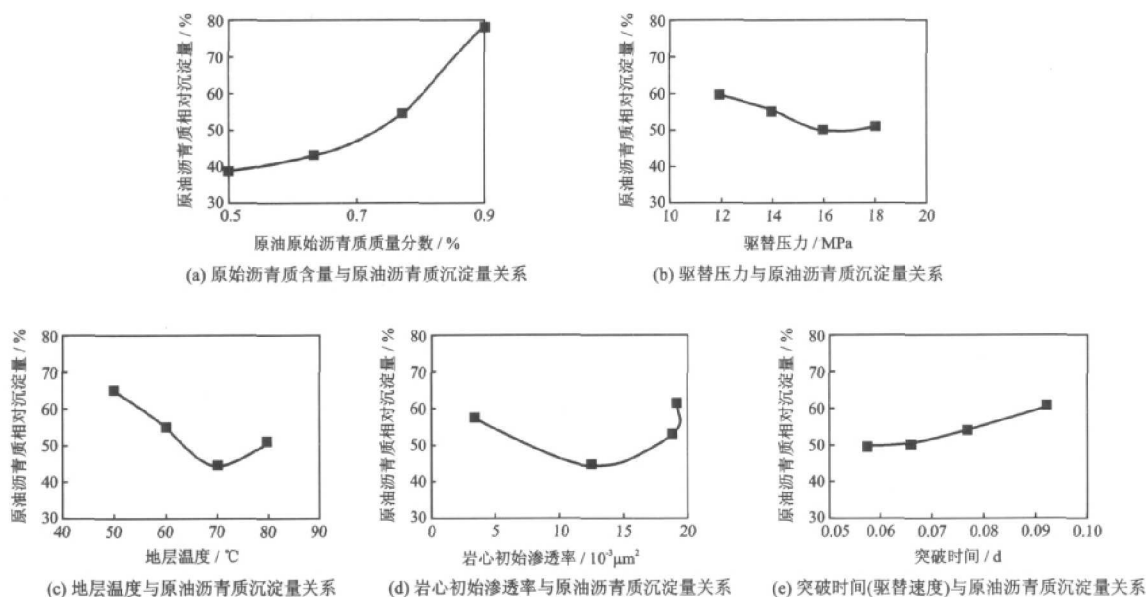


图2 各影响因素与原油沥青质沉淀量关系

Fig.2 The relationships between the asphaltene deposition in crude oil and influencing factors

解了二氧化碳,原油体积膨胀,密度变小.随着原油密度的降低,原油中原始的沥青质浓度越大,沥青质与原油之间的密度差异越大,导致高分子量的沥青质越有可能从原油中析出.

(2)图2(b)说明岩心中原油沥青质的沉淀量随着驱替压力的增加先减少而后增加.这是因为在本实验的非混相驱条件下,一方面原油密度随压力

增加而增大,沥青质的密度和原油平均密度更加接近,沥青质更易于溶解,使沥青质沉淀程度减小.另一方面,沥青质胶团之间的距离随压力升高而缩小,胶团之间更容易发生聚并,导致沥青质更容易沉淀.沥青质沉淀量是这2个因素共同作用的结果,低压时前一方面占主导地位,高压时后一方面占主导地位.

(3) 图 2(c) 说明温度与原油沥青质沉淀量之间的关系, 原油沥青质沉淀量随地层温度的升高呈先减后增的关系。一方面, 体系温度升高有利于沥青质本身在油中的溶解; 另一方面, 沥青质胶团间的相互作用随体系温度的升高而减弱, 导致沥青质表面部分胶质分子解吸, 从而易于发生聚集和絮凝, 增加沉淀量^[11-12]。本实验条件下 70℃ 之前第一个方面占主导地位, 而 70℃ 之后第二个因素占主导地位, 沥青质沉淀量也是这 2 个因素共同作用的结果。

(4) 图 2(d) 说明岩心中原油沥青质的沉淀量随着初始的岩心渗透率的增加先减少, 然后又增加。这是因为本次实验采用的岩心均为低渗岩心, 对于岩心渗透率相对较大的低渗岩心, 其孔喉壁面对沥青质作用力小, 地层流体流速相对较大, 沥青质不易析出沉积。而渗透率较大的岩心, 其孔隙度也较大, 孔道中原油总量较大, 同等析出率下岩心中原油可以析出的沥青质总质量也较多。岩心中的沉淀量是这 2 方面因素综合作用的结果。

(5) 图 2(e) 表明了沥青质沉淀量与驱替速度之间的关系, 呈单增关系。驱替速度越小, 原油与二氧化碳反应越充分, 岩心中原油沥青质的沉淀量越大。

3 沥青质沉淀量随各影响因素的变化规律回归公式

根据表 1 中的实验结果, 可利用多元线性回归分析^[14-15]得出各因素对沥青质沉淀量的综合影响计算公式

$$y = 60.580 - 0.439t - 1.266p - 1.457\bar{v} + 97.589x - 0.513k. \quad (2)$$

式中: x , y 分别为原油中沥青质原始含量和岩心中沥青质沉淀量, %; k 为岩心初始绝对渗透率, $10^{-3} \mu\text{m}^2$; t 为温度, °C; p 为井底注气压力, MPa; \bar{v} 为采油速度, $1/\text{d}$, $\bar{v} = q/V\phi$, 其中 q 为驱替速度, m^3/d , V 为油藏岩石体积, m^3 , ϕ 为油藏孔隙度。

为验证计算公式的准确性, 进行了 4 组实验。表 3 列出了不同温度、压力、沥青质原始含量、驱替速度及岩心渗透率等条件下的 4 组实验数据和用公式 (2) 预测的结果。4 组实验与使用公式 (2) 的预测误差均在 15% 之内, 实验结果与模型计算结果符合率较高。因此, 实验结果得出的经验公式准确性较高, 可以用于预测二氧化碳非混相驱条件下油藏岩心中

的沥青质析出沉淀量。

表 3 实验值与计算值对比
Tab. 3 The comparison of experimental results with calculating results

温度 / °C	压力 / MPa	沥青质原始含量 / %	驱替速度 / d^{-1}	岩心渗透率 / $10^{-3} \mu\text{m}^2$	实测沥青质沉淀量 / %	计算沥青质沉淀量 / %	相对误差 / %
50	11	0.54	15	10	58.71	50.61	-12.17
60	12	0.95	10	20	89.23	86.83	7.60
70	13	0.68	9	18	60.5	57.21	-11.03
80	14	0.81	11	15	52.89	63.35	5.85

4 结 论

(1) 实验结果揭示出非混相驱条件下沥青质沉淀量的影响因素, 原油中原始沥青质含量对岩心中沥青质沉淀量的影响最大; 岩心中沥青质的沉淀量随着原油中沥青质的初始含量的增加和驱替速度的下降而增加, 随着驱替压力、地层温度、岩心初始渗透率的升高先减少后增加。

(2) 本文得到的非混相驱时岩心中沥青质沉淀量预测公式, 计算结果与实验结果的对比证明该公式计算精度较高, 可用于二氧化碳非混相驱油藏沥青质沉淀量的预测和产能预测。

参 考 文 献:

- [1] Srivatava R K, Huang S S, DONG Ming-zhe. Asphaltene deposition during CO_2 flooding [J]. SPE Production & Facilities, 1999, 14(4): 235-245.
- [2] 胡玉峰, 杨兰英, 郭天民. 高压注气条件下沥青质沉淀的实验研究 [J]. 化工学报, 2002, 53(2): 212-215.
HU Yu-feng, YANG Lan-ying, GUO Tian-min. Experimental studies on asphaltene precipitation under high pressure gas injection [J]. Journal of Chemical Industry and Engineering, 2002, 53(2): 212-215.
- [3] Douglas Fisher, Nintoku Yazawa, Hemanta Sara, et al. A new method to characterize the size and shape dynamics of asphaltene deposition process in CO_2 miscible flooding [C]. SPE 84893-MS.
- [4] Satoru Takahashi, Yoshihisa Hayashi, Shunya Takahashi, et al. Characteristics and impact of asphaltene precipitation during CO_2 injection in sandstone and carbonate cores: an investigative analysis through laboratory tests and compositional simulation [C]. SPE 84895-MS.
- [5] 贾英, 孙雷, 孙良田等. 向油藏中注 CO_2 时引起的沥青质沉淀研究 [J]. 新疆石油地质, 2006, 27(5): 581-585.
JIA Ying, SUN Lei, SUN Liang-tian, et al. A study of asphaltene deposition caused by CO_2 injection in reservoirs [J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2006, 27(5): 581-585.

- [6] Monger T G, Trujillo D E. Organic deposition during CO₂ and rich gas flooding [C]. SPE 18063-PA.
- [7] Crocker M E, Marchin L M. Wettability and adsorption characteristics of crude oil asphaltene and polar fractions [C]. SPE 14885-PA.
- [8] 李向良. 大芦湖油田樊 124 断块 CO₂ 混相驱过程中沥青质沉淀实验研究 [J]. 中国石油大学学报: 自然科学版, 2006, 30(2): 64-68.
LI Xiang-liang. Experimental studies on asphaltene precipitation with CO₂ miscible flooding in Fan 124 block of Dalu-hu oil field [J]. Journal of China University of Petroleum: Natural Science Edition, 2006, 30(2): 64-68.
- [9] Qamar M Malik, Islam M R. CO₂ injection in the Weyburn field of Canada: optimization of enhanced oil recovery and greenhouse gas storage with horizontal wells [C]. SPE 59327-MS.
- [10] 胡玉峰, 杨兰英, 林雄森, 等. 原油正构烷烃沥青质聚沉机理研究及沉淀量测定 [J]. 石油勘探与开发, 2000, 27(5): 109-113.
HU Yu-feng, YANG Lan-ying, LIN Xiong-sen, et al. Study on asphaltene of normal paraffin hydrocarbons sedimentation mechanism and measurement of deposition [J]. Petroleum exploration and development, 2000, 27(5): 109-113.
- [11] 田建锋, 陈振林. 石油沥青质的吸附、沉淀机理及其影响因素 [J]. 海相油气地质, 2005, 10(3): 37-42.
TIAN Jian-feng, CHEN Zhen-lin. Adsorption and precipitation mechanism of petroleum asphaltene and its influence factors [J]. Marine Petroleum Geology, 2005, 10(3): 37-42.
- [12] 吴贵生. 实验设计与数据处理 [M]. 北京: 冶金工业出版社, 1997.
WU Gui-sheng. Experimental Design and Data Processing [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1997.
- [13] 马希文. 正交设计的数学理论 [M]. 北京: 人民教育出版社, 1981.
MA Xi-wen. The Mathematical Theory of Orthogonal Design [M]. Beijing: Peoples Education Press, 1981.
- [14] 周自玮. 利用 Excel 内部函数 LINEST 进行多元回归和多项式回归分析 [J]. 草业与畜牧, 2007(8): 49-52.
ZHOU Zi-wei. Analysis of multiple and polynomial regression procedure by inner function LINEST of Excel [J]. Prataculture & Animal Husbandry, 2007(8): 49-52.
- [15] 邵碧雄, 叶左局. 利用 Excel 软件进行多元回归与多项式回归分析 [J]. 广东奶业, 2006(2): 11-15.
SHAO Bi-xiong, YE Zuo-ju. Analysis of multiple and polynomial regression procedure by excel [J]. Guangdong Dairy Production, 2006(2): 11-15.

责任编辑: 贺元旦

(上接第 27 页)

- [2] 王战永, 陈义才, 何逢阳, 等. 鄂尔多斯盆地堡子湾地区延长组长 6 段储层特征研究 [J]. 中国西部科技, 2010, 29(10): 19-21.
WANG Zhan-yong, CHEN Yi-cai, HE Feng-yang, et al. Research of reservoir characteristics of Chang 6, Baoziwan area, Ordos Basin [J]. Science and Technology of West China, 2010, 29(10): 19-21.
- [3] 窦伟坦, 田景春, 王峰, 等. 鄂尔多斯盆地长 6 油层组储集砂岩成岩作用及其对储层性质的影响 [J]. 成都理工大学学报: 自然科学版, 2009, 36(2): 153-159.
DOU Wei-tan, TIAN Jing-chun, WANG Feng, et al. Diagenesis of reservoir sandstone and its effect on reservoir nature of Chang 6 reservoir group, Ordos Basin [J]. Chengdu University of Technology: Natural Science, 2009, 36(2): 153-159.
- [4] 温德顺, 陈章顺, 卜广平, 等. 堡子湾油田胡 150 胡 153 区长 4+5 储层特征及主控因素 [J]. 西安石油大学学报: 自然科学版, 2010, 25(3): 30-33.
WEN De-shun, CHEN Zhang-shun, PU Guang-ping, et al. Reservoir characteristic and major controlling factors of Chang 4+5 in Hu150 and H135 area of Baoziwan Oilfield [J]. Journal of Xi'an Shiyou University: Natural Science Edition, 2010, 25(3): 30-33.
- [5] 申芳, 任亮, 李罡, 等. 鄂尔多斯盆地堡子湾地区长 2₁ 储层特征及其影响因素 [J]. 辽宁化工, 2010, 39(10): 1090-1092.
SHEN Fang, REN Liang, LI Gang, et al. Reservoir stratum and its influencing factor of Chang 2₁, Baoziwan area, Ordos Basin [J]. Liaoning Chemical Industry, 2010, 39(10): 1090-1092.
- [6] 孙肇才, 谢秋元. 叠合盆地的发展特征及其含油性: 以鄂尔多斯盆地为例 [J]. 石油实验地质, 1980(1): 13-21.
SUN Zhao-cai, XIE Qiu-yuan. Development characteristic and its oiliness of superposed basin: Take Ordos Basin for example [J]. Exper Petrol Geol, 1980(1): 13-21.

责任编辑: 王 辉