

供给型大尺度溶洞弹性开采实验

常宝华¹, 熊伟², 高树生², 刘华勋², 张静楠¹

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

摘要 大尺度溶洞是塔河油田缝洞型油藏的重要油气储集空间, 是相对较简单的油藏类型之一, 并普遍存在供给能量。对有供给能量的大尺度溶洞油藏弹性开采情况进行实验模拟, 建立了存在两种能量供给形式的物理模型: 充填溶洞模型、基质窜流供给模型。通过改变实验中溶洞充填程度、基质渗流能力、采油速度的大小分析各影响因素对模型的压力、能量补给的影响。结果表明, 对于存在充填的溶洞模型, 采油速度主要影响了充填物底部与溶洞内压力差, 充填物渗透率主要影响了溶洞内的能量补给速度; 对于存在基质供给的溶洞模型, 单对数坐标下压力变化前期呈直线递减, 后期表现出不同的递减幅度, 基质的渗流能力直接影响其窜流供液能力, 累积产量与累积压降关系曲线前期呈直线, 后期存在明显的上翘段, 表明存在明显的基质窜流供给段。

关键词 溶洞; 缝洞型油藏; 弹性开采; 能量供给

中图分类号 TE342, TE344

文献标识码 A

文章编号 1000-7857(2010)17-0021-05

Experimental Study of Elastic Production in Supply-type Large-scale Cavity Reservoir

CHANG Baohua¹, XIONG Wei², GAO Shusheng², LIU Huaxun², ZHANG Jingnan¹

1. Institute of Porous Flow and Fluid Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Langfang 065007, Hebei Province, China
2. Langfang Branch, Research Institute of Petroleum Exploitation and Development, China National Petroleum Corporation, Langfang 065007, Hebei Province, China

Abstract The large-scale vug is a kind of important oil and gas reservoir space in the Tahe oilfield, of relatively simple reservoir types and with abundant energy supply. In this paper, experimental simulations are carried out for the large-scale cave elastic reservoir. Physical models of two different energy supply forms are established, that is, the filled cave model and the matrix supply and flowing model. Experiments for different degrees of cave filling, different matrix permeability and different oil production rates are carried out. The results show that for the filled cavity model, the oil production rate mainly affects the pressure difference between the bottom of filling and the inside of caves. The permeability of filling mainly affects the speed of energy supplies. For the cavity model with substrate supply, the pressure assumes a linear variation in a single logarithmic coordinate in the early period, and then decreases with different rates in the later period, and the permeability of the substrate directly affects its liquid flow channeling ability. The relation curves of the cumulative production and the cumulative pressure drop are linear in the early period, and then assume an obvious upturned segment in the later period, which apparently shows that the substrate channeling supply section exists.

Keywords vuggy; fractured-cavity reservoir; flexible mining; energy supply

0 引言

塔河油田作为典型的缝洞型碳酸盐岩油藏, 具有溶洞发育复杂、非均质性极强、储集体空间分布不连续、油水关系复

杂、开采难度大、产量压力递减快等特点^[1-5]。目前已认识到大型溶洞是主要的储集空间, 裂缝为主要的流通通道, 基质渗透率相对较低, 以弹性衰竭开采为主, 部分实施注水开

收稿日期: 2010-05-20; 修回日期: 2010-08-10

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973计划)项目(2006CB202404)

作者简介: 常宝华, 硕士研究生, 研究方向为油气藏开发, 电子信箱: shidabaohua@126.com.cn; 熊伟(通信作者), 高级工程师, 研究方向为油气藏开发, 电子信箱: xiongwei69@petrochina.com.cn

况^[6-8]。随着塔河油田地下储层认识的不断深入,对于缝洞单元的划分逐渐清晰,存在单井或多井钻遇大尺度的溶洞并获得高产流油情况,说明部分溶洞具有不同程度的能量供给,之前的研究主要针对缝洞系统划分和数值模拟研究^[9-10],彭小龙等^[11]针对缝洞系统的特征进行了数值模拟研究,程倩等^[12]对无供给的溶洞进行了实验模拟,针对存在供给情况溶洞的实验研究相对较少。本文针对大尺度溶洞的弹性开采,进行物理模拟实验,分析压力递减变化规律及影响因素,为深入认识该类型油藏的开采特征提供基础。

1 物理模型

针对塔河油田和塔里木油田的典型供给型溶洞缝洞油藏,设计了充填溶洞模型和基质窜流供给模型,通过室内实验模拟该类型缝洞油藏的弹性开采过程,对开采时的压力变

化特征进行分析。

1.1 充填溶洞模型

大尺度的充填溶洞模型,即油井钻遇大尺度溶洞,溶洞底部存在洞壁垮塌物或原始沉积物的充填,形成存在充填物的缝洞体。该类型的缝洞体在塔河油田和塔里木油田均有分布,通过钻具放空判断是否钻遇溶洞,简化模型如图 1 所示,忽略溶洞本身的可压缩性。

1.2 基质窜流供给模型

大尺度基质供给溶洞模型,即油井钻遇大尺度溶洞,溶洞周围的基岩具有一定的渗流能力,当溶洞内压力下降时,周围基质向溶洞供液,形成基质供给的缝洞体,该类型缝洞体在塔里木盆地奥陶系储层的表层岩溶带中分布较广,简化模型如图 2 所示,溶洞半径为 r_c ,油藏边界为有限大封闭边界,边界半径为 r_e ,忽略溶洞本身的可压缩性。

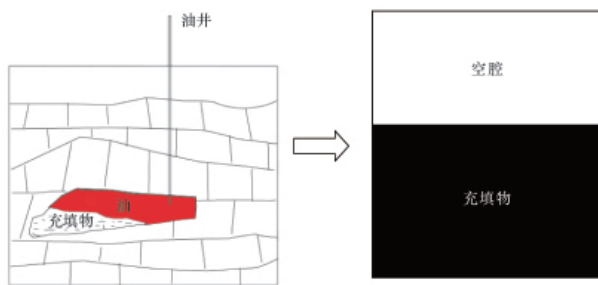


图 1 充填溶洞模型简化示意

Fig. 1 Simplified schematic diagram of the filled cavity model

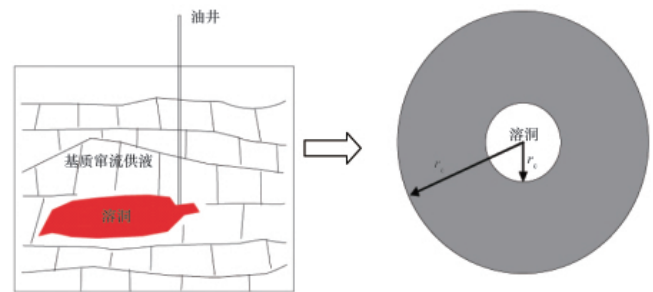


图 2 基质窜流供给模型简化示意

Fig. 2 Simplified schematic diagram of the matrix supply model

2 实验流程

1) 充填溶洞模型实验流程。用直径 10cm、容积 $V=1L$ 的中间容器模拟溶洞空腔部分,用直径 10cm 的全直径岩心模拟(实验前将岩心饱和水)充填介质,中间容器与全直径岩心串联模拟充填溶洞模型;使用数据采集程序分别采集溶洞空腔、充填岩心末端的压力(图 3);假定 ISCO 泵流量为模型的

产量。更换不同气测渗透率、孔隙度、长度的岩心,模拟不同充填介质、充填程度下的充填-溶洞的弹性开采室内实验模型,并考查其定产量弹性开采情况,实验岩心基本参数如表 1 所示。

表 1 充填溶洞模型实验基本参数

Table 1 Basic parameters of the filled cavity model

岩心号	充填程度/%	孔隙度/%	气测渗透率 / $(10^{-3}\mu\text{m}^2)$	充填孔隙体积/mL
1	61.1	15.9	1.420	249.7
2	61.1	13.4	0.098	210.5

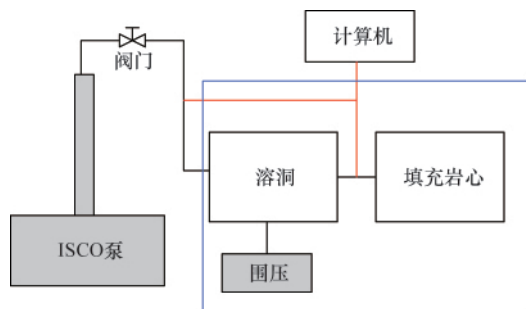


图 3 充填溶洞模型实验流程图

Fig. 3 Experimental flow chart of the filled cavity model

2) 基质窜流供给模型实验流程。用直径为 10cm 的全直径岩心模拟基质,在岩心上打出体积为 56mL 的空腔,将岩心的外边界进行封闭处理;采用定制开关控制采油速度模拟油嘴大小;假定 ISCO 泵流量为模型的产量;使用数据采集程序采集岩心出口端的压力(图 4)。通过更换不同物性的岩心来模拟不同窜流能力的基质,室内实验考查有基质窜流情况溶洞弹性开采的情况。实验岩心基本参数如表 2 所示。

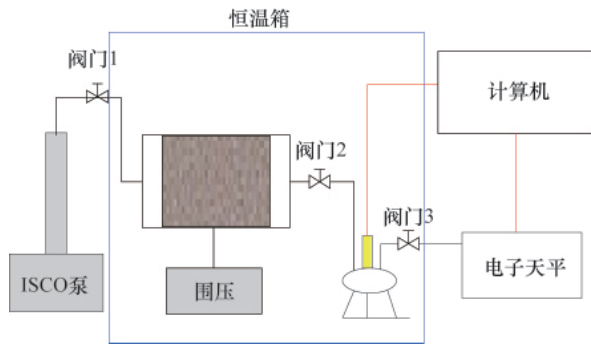


图4 基质窜流供给模型实验流程图

Fig. 4 Experimental flow chart of the substrate channeling model

表2 基质窜流供给模型实验基本参数

Table 2 Basic parameters of the matrix supply model

岩心号	岩心长度/cm	岩心孔隙体积/mL	水测渗透率 / (10 ⁻³ μm ²)	溶洞体积 / mL
SA-05-1	10	90.36	0.340	56
SA-10-2	10	45.35	0.013	56

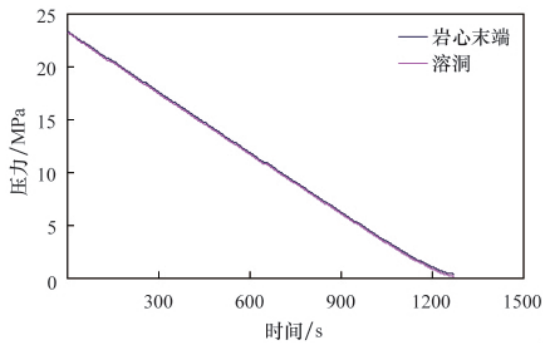
3 结果与分析

3.1 充填溶洞模型实验结果

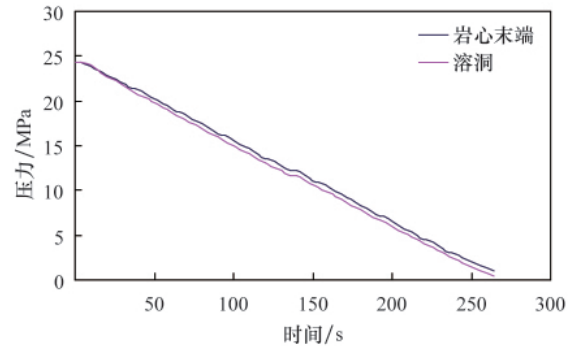
采用充填溶洞模型实验流程对气测渗透率为 1.42×10^{-3} 、 $0.098 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 的两块充填岩心进行实验,记录实验过程中的压力变化。其中气测渗透率为 $1.42 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 的1号岩心压力变化如图5(a)~(b)所示,在充填岩心的渗透率较大情况下,油井产量越小,充填岩心末端与溶洞内压差越小;产量越大,充填岩心末端与溶洞内压差越大。结果表明,充填岩心与溶洞内压差越小,溶洞的能量补给越快。

气测渗透率为 $0.098 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 的2号岩心压力变化如图5(c)~(d)所示,在充填岩心的渗透率较小情况下,油井产量越小,充填岩心末端与溶洞内压差越小;产量越大,充填岩心末端与溶洞内压差越大,形成明显的压力“剪刀差”;后期达到拟稳态流动,压力下降趋势接近,溶洞压力和充填物内部压力接近,表明充填物能及时向溶洞供液,充填物的孔隙体积和溶洞融为一体。

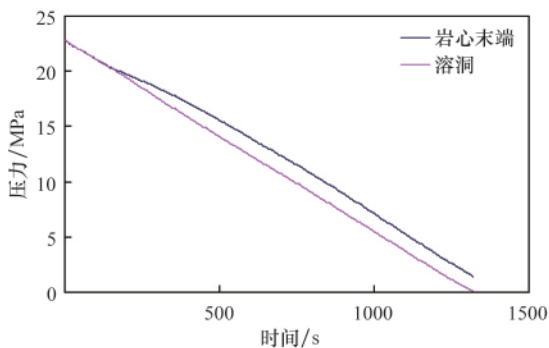
对比1、2号充填岩心实验结果发现,充填介质的渗透率直接影响了溶洞的能量补给,渗透率越大,充填岩心末端与溶洞压差越小,说明溶洞能量补给越快;渗透率越小,压差越大,能量补给慢。



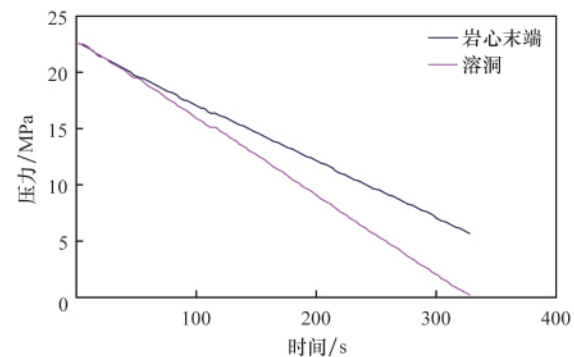
(a) 1号岩心,产量1mL/min
(a) 1# core, 1mL/min



(b) 1号岩心,产量5mL/min
(b) 1# core, 5mL/min



(c) 2号岩心,产量为1mL/min
(c) 2# core, 1mL/min



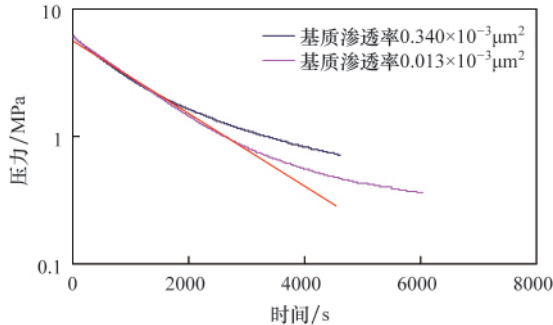
(d) 2号岩心,产量为5mL/min
(d) 2# core, 5mL/min

图5 充填溶洞模型压力变化曲线

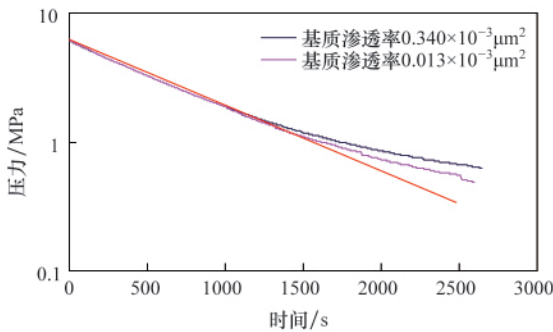
Fig. 5 Pressure curve of filled cavity model

3.2 基质窜流溶洞模型实验结果

采用基质窜流溶洞模型实验流程对水测渗透率为 0.340×10^{-3} 、 $0.013 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 两块岩心进行实验,记录两块岩心的压力变化(图6)。由图6可得,在单对数坐标下,两块基质岩心压力变化前期呈直线递减,后期递减幅度变缓,渗透率大的较渗透率小的压力递减幅度小;油嘴较小时,压力递减幅度较大;油嘴较大时,压力递减幅度较小。结果表明,基质渗流能力直接影响其窜流供液能力,基质渗流能力越强,窜流供液能力越强,溶洞压力递减越慢;反之,压力递减越快。



(a) 较小油嘴
(a) Smaller choke size



(b) 较大油嘴
(b) Larger choke size

图6 油嘴不同时压力曲线

Fig. 6 Pressure curve for different choke sizes

为了更进一步探讨不同油嘴控制条件对压力的影响,对水测渗透率为 $0.340 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 的 SA-05-1 号岩心压力曲线进行分析(图7)。由图7可得,油嘴较大时,压力递减趋势较快;反之,压力递减较慢。结果表明,在单井钻遇该类油藏时,油嘴大小对油藏压力变化的影响较大。图8为小油嘴情况下 SA-05-1 岩心的压力拟合曲线,可以看出,存在基质供给时与不存在基质供给时的大尺度溶洞弹性开采不同,不符合典型的压力单指数递减规律。图9为小油嘴情况下 SA-05-1 岩心的累积产量与累积压降关系曲线,可以看出,存在基质供给时的大尺度溶洞弹性开采时,累积产量与累积压降曲线前期呈线性变化,斜率为累积产量与累积压降之比,即单位压降下的弹性采出量对于溶洞体积大小的估算具有一定的指导意义^[13];后期存在明显的上翘段,表明存在明显窜流供给,上翘幅度表明了供给能量的大小。

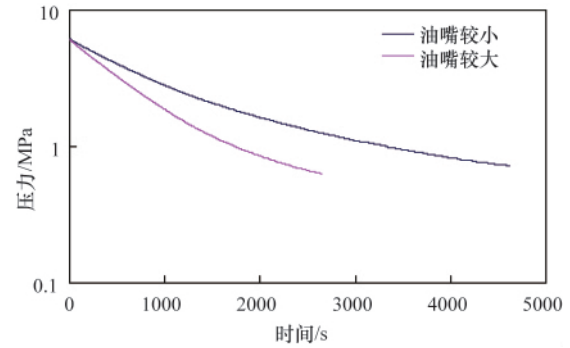


图7 SA-05-1 压力曲线
Fig. 7 SA-05-1 pressure curve

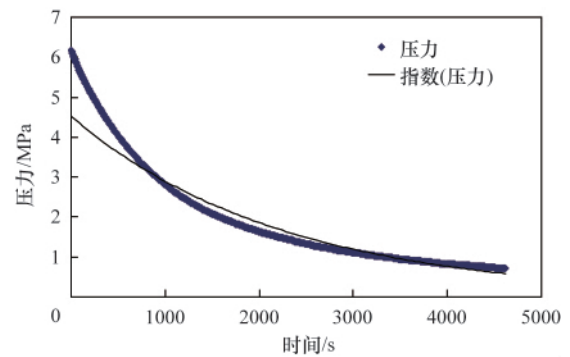


图8 小油嘴情况下 SA-05-1 压力拟合曲线
Fig. 8 SA-05-1 pressure fitting curve of smaller choke size

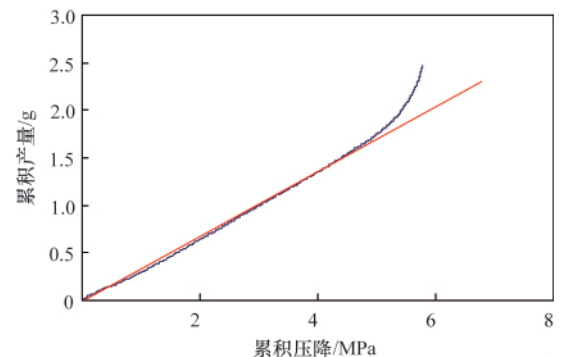


图9 小油嘴情况下 SA-05-1 累积产量与累积压降关系
Fig. 9 SA-05-1 small choke size cumulative production and cumulative pressure drop curve

4 结论

1) 对于存在充填的溶洞弹性开采时,开采速度影响充填岩心底部与溶洞内压力差,溶洞压力和充填物内部压力接近,表明充填物能及时向溶洞供液,充填物的孔隙体积和溶洞融为一体,且充填物的渗透率对溶洞的能量供给影响较大,充填物渗透率越大,对溶洞的能量供给越充足。

2) 存在基质供给的大尺度溶洞弹性开采时,在单对数坐标下,压力变化曲线前期呈直线递减,后期递减幅度不同。基

研究论文 (Articles)

质的渗流能力直接影响其窜流供液能力,基质的渗流能力越强,窜流能力越强,溶洞内压力递减越慢;反之,压力递减越快。

3) 存在基质供给的大尺度溶洞弹性开采时,累积产量与累积压降关系曲线前期呈直线,斜率为累积产量与累积压降之比,后期存在明显的上翘段,体现出明显存在窜流供给,上翘幅度体现供给能量的大小。

参考文献 (References)

[1] 张希明, 杨坚, 杨秋来, 等. 塔河缝洞型碳酸盐岩油藏描述及储量评估技术[J]. 石油学报, 2004, 25(1): 13-19.
Zhang Ximing, Yang Jian, Yang Qiulai, et al. *Acta Petrolei Sinica*, 2004, 25(1): 13-19.

[2] Abdassah D, Enshaghi I. Triple-porosity systems for representing naturally fractured reservoirs [J]. *SPE Formation Evaluation*, 1986, 1(2): 113-127.

[3] 张希明. 新疆塔河油田下奥陶统碳酸盐岩缝洞型油气藏特征[J]. 石油勘探与开发, 2001, 28(5): 17-22.
Zhang Ximing. *Petroleum Exploration and Development*, 2001, 28(5): 17-22.

[4] 陈志海, 戴勇, 郎兆新. 缝洞性碳酸盐岩油藏储渗模式及其开采特征[J]. 石油勘探与开发, 2005, 32(3): 101-105.
Chen Zhihai, Dai Yong, Lang Zhaoxin. *Petroleum Exploration and Development*, 2005, 32(3): 101-105.

[5] 林忠民. 塔河油田奥陶系碳酸盐岩储层特征及成藏条件[J]. 石油学报, 2002, 23(3): 23-26.
Lin Zhongmin. *Acta Petrolei Sinica*, 2002, 23(3): 23-26.

[6] 周兴熙. 再论网络状油气藏与轮南潜山勘探对策[J]. 石油勘探与开发,

2002, 29(4): 4-7.
Zhou Xingxi. *Petroleum Exploration and Development*, 2002, 29(4): 4-7.

[7] 阎相宾. 塔河油田奥陶系碳酸盐岩储层特征 [J]. 石油与天然气地质, 2002, 23(3): 262-266.
Yan Xiangbin. *Oil & Gas Geology*, 2002, 23(3): 262-266.

[8] 李国政, 王辉, 丁勇. 塔河油田奥陶系碳酸盐岩油气藏石油地质条件 [J]. 新疆石油地质, 2002, 23(6): 493-495.
Li Guozheng, Wang Hui, Ding Yong. *Xinjiang Petroleum Geology*, 2002, 23(6): 493-495.

[9] 班凡生, 高树生, 熊伟, 等. 裂缝-孔隙型双重介质油藏流体窜流规律 [J]. 辽宁工程技术大学学报: 自然科学版, 2008, 27(5): 677-679.
Ban Fansheng, Gao Shusheng, Xiong Wei, et al. *Journal of Liaoning Technical University: Natural Science Edition*, 2008, 27(5): 677-679.

[10] 柏松章. 碳酸盐岩潜山油田开发[M]. 北京: 石油工业出版社, 1996.
Bai Songzhang. *Development of carbonate buried hill reservoir [M]*. Beijing: Petroleum Industry Press, 1996.

[11] 彭小龙, 刘学利, 杜志敏. 缝洞双重介质数值模型及渗流特征研究[J]. 西南石油大学学报: 自然科学版, 2009, 31(1): 61-64.
Peng Xiaolong, Liu Xueli, Du Zhimin. *Journal of Southwest Petroleum University: Science & Technology Edition*, 2009, 31(1): 61-64.

[12] 程倩, 熊伟, 高树生, 等. 单缝洞系统弹性开采的试验研究[J]. 石油钻探技术, 2009, 37(3): 88-90.
Cheng Qian, Xiong Wei, Gao Shusheng, et al. *Petroleum Drilling Techniques*, 2009, 37(3): 88-90.

[13] 修乃岭, 熊伟, 班凡生, 等. 缝洞型油藏裂缝-溶洞中流体运动特征研究[J]. 重庆科技学院学报: 自然科学版, 2007, 9(2): 14-16.
Xiu Nailing, Xiong Wei, Ban Fansheng, et al. *Journal of Chongqing University of Science and Technology: Natural Sciences Edition*, 2007, 9(2): 14-16.

(责任编辑 刘志远)

本期完词填空答案

	朝						
	花	木	兰			携	
七	夕		舟	曲		天	
	拾		催			子	龙
		草	发	号	施	令	
		如				诸	
	轻	烟	散	入	五	侯	家
	轨				笔		

本期九宫填数答案

2	8	1	7	9	6	4	5	3
3	5	6	1	4	2	7	9	8
9	4	7	3	5	8	2	1	6
7	2	3	5	1	4	6	8	9
1	9	8	2	6	3	5	7	4
5	6	4	9	8	7	3	2	1
8	3	2	6	7	9	1	4	5
4	7	5	8	3	1	9	6	2
6	1	9	4	2	5	8	3	7
						2	8	3
						9	1	6
						5	7	4
						6	2	8
						7	3	5
						4	9	1
						6	5	7
						8	4	3
						9	2	1
						7	3	5
						4	9	1
						6	5	7
						8	4	3
						9	2	1
						7	3	5
						4	9	1
						6	5	7
						8	4	3
						9	2	1