

文章编号: 1009-3850(2007)01-0086-06

大港枣园油田火山岩裂缝性储层特征及其控制因素

杨立民¹, 邹才能², 冉启全²

(1. 中国石油大学, 北京 102249; 2. 中国石油勘探开发研究院, 北京 100081)

摘要: 大港枣园火山岩裂缝性稠油油藏, 储层的复杂性和非均质性是导致其开采难度大的关键因素。岩心、薄片、CT 扫描、压汞、测井和生产动态等资料研究表明, 枣园火山岩为玄武岩类, 可细分为气孔玄武岩、致密玄武岩、火山角砾岩和凝灰岩; 岩相可划分为溢流相和爆发相 2 个亚相和气孔玄武岩、致密玄武岩、凝灰岩、火山角砾岩等 4 个微相; 储集空间类型多样, 既有孔隙, 又有气孔和裂缝, 储集空间划分为 3 大类和 12 种类型, 可以组合成 5 种储渗配置关系, 并以裂缝-孔隙型和大孔大缝-小孔小缝复合型储集渗流模式为主要的储渗模式。根据岩性、缝洞发育程度、物性高低和储量大小, 本文对基质和裂缝的有效性进行了评价和分类。构造作用和岩相是火山岩裂缝性储层发育的主要控制因素。

关键词: 大港枣园油田; 火山岩; 裂缝; 储层; 控制因素

中图分类号: TE122.2⁺22

文献标识码: A

我国东部和中西部油田存在大量的火山岩油气藏, 随着这些油气藏的相继发现和投入开发, 特别是大庆深层火山岩气藏的发现, 火山岩油气藏的研究更加引起人们的关注^[1~3]。大港枣园火山岩裂缝性稠油油藏构造位置处在黄骅坳陷自来屯构造、李天木断层下降盘(图 1), 为东南高、西北低的单斜, 构造形态比较简单。火山岩储层发育段为古近系沙河街组三段, 储层埋深 1470~1695m, 由爆发相、溢流相和角砾岩相组成, 岩性为玄武岩、凝灰岩和火山角砾岩。该油藏为裂缝型双重介质稠油油藏, 属于复杂、特殊类型的岩性油藏。该油藏岩性复杂, 岩相变化大; 裂缝、孔洞发育, 储集空间与渗流特征复杂; 非均质性极为严重; 原油粘度大, 流动性差。该油藏储层的复杂性和非均质性是导致其开采难度大的关键因素。因此, 搞清这种复杂、特殊类型油藏的储层特征及其控制因素, 是有效开发该油藏的基础, 也是目前亟待解决的技术难题。

1 岩性与岩相特征

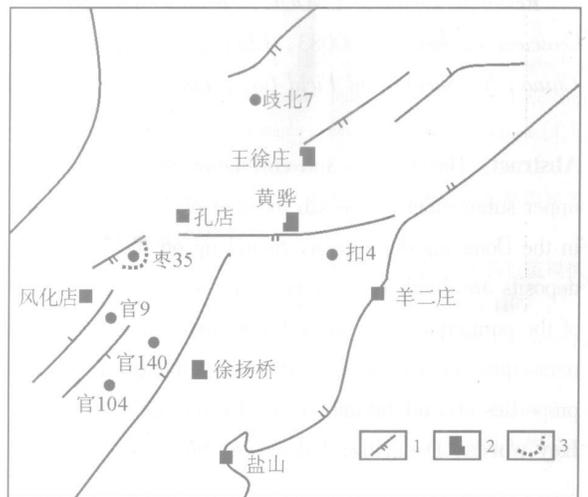


图 1 枣 35 断块位置图

Fig. 1 Location of the Zao-35 block

火山岩的岩性岩相控制储层裂缝、孔洞的发育, 是造成储集空间类型复杂、储层非均质性严重的主要因素。

岩石矿物成分统计结果表明, 枣 35 块火山岩 $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$ 含量为 4.2% ~ 4.7%, SiO_2 含量为 44% ~ 53%, 按火山岩分类表^[9], 为基性岩类碱性橄榄玄武岩族。

根据枣 66、枣 78、枣 63-1、军 21-23 等 4 口取心井 96 块薄片资料和岩心观察, 岩石类型有熔岩、火山碎屑岩及正常沉积岩。其中火山碎屑岩包括凝灰岩、火山角砾岩; 熔岩包括气孔玄武岩、致密玄武岩类。岩性与电性相关分析结果表明, 不同的岩性有其显著的电性特征, 采用多参数图版法和神经网络技术建立了岩性识别模式, 通过该模式实现了用电性资料对非取芯井岩性的识别(表 1)。

表 1 枣 35 块火山岩岩性识别标准

Table 1 The criteria for the recognition of the volcanic rocks in the Zao-35 block

岩性	声波时差 ($\mu\text{s}/\text{m}$)	密度 (g/cm^3)	中子 (%)	伽玛 (API)	电阻率 ($\Omega \cdot \text{m}$)
致密玄武岩	< 250	> 2.6	< 28	> 50	> 5
气孔玄武岩	250 ~ 317	2.3 ~ 2.6	28 ~ 39	< 50	2 ~ 5
火山角砾岩	> 317	1.8 ~ 2.4	> 39	< 30	< 3
凝灰岩	> 317	1.7 ~ 2.2	> 39	30 ~ 50	< 3
沉积岩	> 380	1.8 ~ 2.3	> 38	> 50	< 3

在岩性识别结果的基础上, 根据岩性、结构、构造等特征及其纵向变化特点, 建立了火山岩岩相模式^[7], 并将火山岩相划分为两个亚相(即溢流相和爆发相)和 4 个微相(即气孔玄武岩、致密玄武岩、凝灰岩、和火山角砾岩微相)(表 2)。

凝灰岩微相以凝灰岩为主, 火山碎屑颗粒细, 粒径小于 2mm, 具凝灰结构, 岩屑成分为玄武质, 平面上一般分布在距火山口较远的位置; 火山角砾岩微相以火山角砾岩为主, 颗粒粗大, 粒径大于 2mm, 平面上一般距火山口较近, 通常围绕火山口分布, 火山角砾间孔及气孔发育; 气孔玄武岩微相: 岩性以气孔

玄武岩为主, 也包括部分充填不完全的杏仁状玄武岩, 气孔玄武岩分布在溢流相的顶、底; 致密玄武岩微相以致密玄武岩为主, 也包括部分被充填的杏仁状玄武岩, 致密玄武岩一般分布在溢流相的中间部位。

2 储集空间类型及其特征

火山岩储集空间类型多样, 既有孔隙, 又有气孔和裂缝, 其孔隙结构极为复杂。孔隙和气孔分布分散, 相互之间不能沟通, 只有当裂缝发育, 孔、洞、缝交织在一起时才能构成油气的储集空间。利用岩心观察、岩矿鉴定和薄片资料, 根据孔、洞、缝的成因和规模, 可将枣 35 块火山岩储集空间划分为三大类^[8]和 12 种类型(表 3)。

3 储渗配置关系与储渗模式

储集空间中的流体渗流需要一定的渗流通道。火山岩渗流通道比较复杂, 既有孔隙喉道, 也有裂缝甚至串珠状气孔。储集空间与渗流通道之间的配置关系有多种类型^[9, 10], 可分为 5 类(表 4)。根据储集空间与渗流通道间的配置关系, 可以归纳为两种主要的储渗模式, 从而为数值模拟提供依据^[11]:

(1) 裂缝-孔隙型储集渗流模式(图 2): 基质粒间孔为主要储集空间, 微裂缝为主要渗流通道, 爆发相的火山碎屑岩属于这种储渗模式。

(2) 大孔大缝-小孔小缝复合型储集渗流模式(图 3): 小气孔与小缝组成基质系统, 大孔洞与大缝为裂缝系统, 形成大孔大缝-小孔小缝复合型双重介质模型, 溢流相的气孔玄武岩属于这种储渗模式。

4 储层有效性评价与储层分类

4.1 储层的有效性评价

运用薄片资料、岩芯物性分析、压汞分析、测井解释、CT 扫描、核磁共振等技术对火山岩基质和裂缝的有效性进行了综合评价(表 5)。

表 2 枣 35 块火山岩岩相特征

Table 2 Description of the volcanic lithofacies in the Zao-35 block

相	亚相	微相	岩石名称	结构构造
火成岩相	爆发相	凝灰岩微相	凝灰岩	凝灰结构为主, 岩屑主要为玄武岩屑, 晶屑主要是基性斜长石, 填隙物为火山尘
		火山角砾岩微相	火山角砾岩	火山角砾结构, 角砾主要是玄武岩屑, 含量 70% ~ 90%
	溢流相	气孔玄武岩微相	气孔玄武岩	气孔构造, 孔径 < 1mm ~ 数厘米, 孔隙度 > 20%
		致密玄武岩微相	致密玄武岩	斑晶结构, 基质间粒结构或交织结构

表3 枣35断块火山岩储集空间分类表

Table 3 Classification of the reservoir spaces of the volcanic rocks in the Zao-35 block

储集空间类型		岩性	成因	特点	含油气性	
孔隙型	原生	粒间孔	火山碎屑岩	碎屑颗粒相互支撑	孔隙小数量多	一般
		晶间孔	玄武岩	矿物结晶	分布于玄武岩	不含油
		晶内孔	玄武岩	晶屑及斑晶溶蚀	晶屑斑晶内	不含油
	次生	砾间孔	火山角砾岩	火山角砾相互支撑	分布于火山角砾岩	含油性好
气孔型	溶蚀孔	各类火山岩	淋滤溶蚀	沿孔缝带发育	含油性好	
	气孔	玄武岩	冷凝时气体逃逸	溢流相顶底发育	含油性好	
	杏仁孔	玄武岩	未填满的气孔		含油较差	
裂缝型	成岩缝	杏仁体内孔	玄武岩	充填矿物溶蚀		不含油
		收缩缝	熔岩	冷却收缩	熔岩顶底发育	含油性好
		自碎缝	火山角砾岩	流动摩擦、隐爆		含油性好
	构造缝	火山角砾岩	角砾岩间的缝		含油性好	
	构造缝	各类火山岩	构造应力作用	近断层处发育	一般被充填	

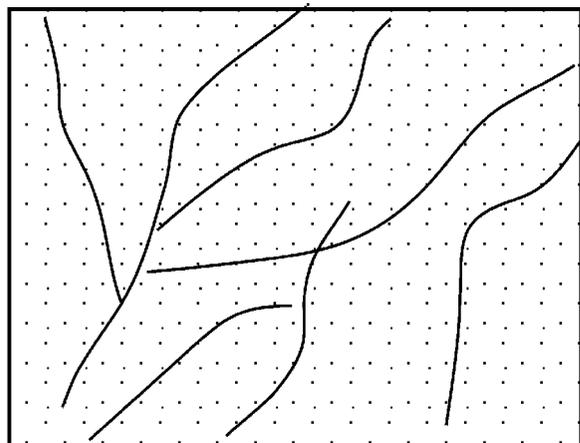


图2 裂缝-孔隙型储渗模式

Fig. 2 The crack-porosity type reservoir permeability model

表4 枣35断块火山岩储渗配置关系特征

Table 4 The reservoir-permeability associations in the volcanic rocks in the Zao-35 block

储渗配置关系	储集空间	渗流通道	储层岩石类型
孔隙-裂缝型	各种孔隙	裂缝、喉道	火山碎屑岩
气孔-裂缝型	大小气孔	裂缝	气孔玄武岩
裂缝型	裂缝	裂缝	致密玄武岩 火山碎屑岩
孔隙型	孔隙	喉道	火山碎屑岩
气孔型	气孔	串珠状气孔	气孔玄武岩

1. 基质的有效性

火山碎屑岩: 储集空间主要是粒(砾)间孔, 火山角砾岩和凝灰岩的基质孔隙度分别为27.1%和23.9%, 基质渗透率分别为 $110.1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 和68.6

表5 枣35断块火山岩储层物性参数

Table 5 Physical parameters for the volcanic reservoirs in the Zao-35 block

岩性	基质孔隙度 / %	缝洞(孔)孔隙度 / %	基质渗透率 / md	缝洞(孔)渗透率 / md	裂缝指数	基质饱和度 / %	缝洞(孔)饱和度 / %
火山角砾岩	27.1	1.9	110.1	628.8	2.3	41.0	70.0
凝灰岩	23.9	1.2	68.6	393.4	2.0	31.0	60.0
气孔玄武岩	22.7	4.4	116.4	3315.9	2.7	54.0	85.0

$\times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。根据压汞分析, 火山碎屑岩平均最大进汞饱和度为32.9%, 即基质孔隙的有效率为32.9%, 因此火山角砾岩和凝灰岩基质的有效孔隙度分别为8.3%和7.5%。

气孔玄武岩: 储集空间主要是气孔, 基质孔隙度为22.7%, 基质渗透率为 $116.4 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。由于气孔玄武岩基质孔隙度中有5%左右的无效晶间孔, 因此气孔玄武岩基质的有效孔隙度为17.8%。

根据岩芯分析、毛管压力法、CT扫描和测井解释综合确定凝灰岩、火山角砾岩和气孔玄武岩的基质含油饱和度分别为31.0%、41.0%和54.0%。

2. 裂缝的有效性

除致密玄武岩中的裂缝为无效的充填缝外, 凝灰岩、火山角砾岩和气孔玄武岩中的裂缝均为有效缝。凝灰岩、火山角砾岩和气孔玄武岩的缝洞(孔)孔隙度分别为1.2%、1.9%和4.4%; 缝洞(孔)渗透率分别为393.4%、628.8%和3315.9%; 缝洞(孔)含油饱和度分别为60.0%、70.0%和85.0%。

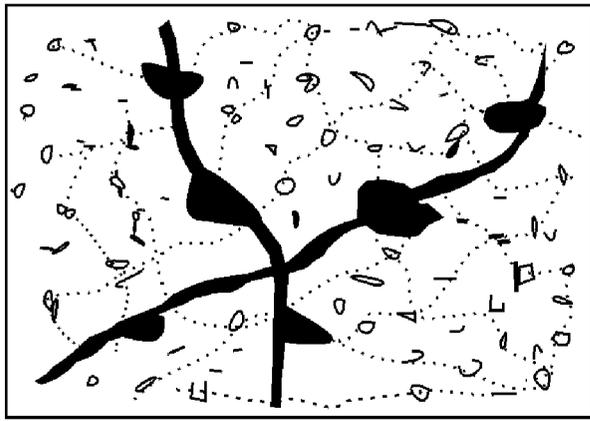


图3 7大孔大缝-小孔小缝复合型储渗模式

Fig. 4 The composite macropore-macrocrack and micropore-microcrack type reservoir permeability model

3. 储量

根据储量计算结果,从岩性分类来看:气孔玄武岩中的储量最大,占64.5%;而凝灰岩和火山角砾岩中的储量较少,分别只有为18.9%和16.6%。从储集空间类型来看:基质中的储量占绝对优势,占81.0%;而缝洞中的储量少,只有19.0%。

从缝洞发育程度、物性高低和储量大小可以看出,不论是气孔玄武岩,还是火山角砾岩和凝灰岩,其基质为高孔低渗,而裂缝为低孔高渗,但作为储层来讲,均是有效的。

4.2 储层分类评价

根据储集空间类型和储渗配置关系(表4),火山岩储层可划分为孔隙-裂缝型、气孔-裂缝型、裂缝型、孔隙型和气孔型储层5种类型,根据岩性可划分为气孔玄武岩、火山角砾岩和凝灰岩储层3种类型。

综合考虑火山岩储层的岩性、物性和储集空间类型,可将枣35块火山岩储层划分为以下3类(表6)。

I类储层:属大孔大缝-小孔小缝复合型储层,岩性为气孔玄武岩,小气孔与小缝组成基质系统,大孔洞与大缝为裂缝系统。储层孔隙度大于30%,渗透率大于1500md,饱和度在50%以上。该类储层属于高孔、特高渗储层,储层厚度193.7m,占火山岩储层总厚度642.3m的30.2%。

II类储层:属裂缝-孔隙型储层和部分裂缝-气孔型储层,岩性有火山角砾岩、气孔玄武岩和凝灰岩,基质孔隙为主要储集空间,微裂缝为主要渗流通道。储层孔隙度20%~30%,渗透率500~1500md,饱和度35%~50%。该类储层属于高孔、中高渗储层,储层厚度339.6m,占52.8%。

表6 储层物性分类标准表

Table 6 Types of the volcanic reservoirs based on physical properties

指标	储层分类		
	I	II	III
裂缝孔隙度 φ_f (%)	> 5	2~5	< 2
裂缝指数 M	> 3	2~3	< 2
裂缝渗透率 K_f (md)	> 1400	450~1400	< 450
总孔隙度 φ_t (%)	> 30	20~30	< 20
总渗透率 K_t (md)	> 1500	500~1500	< 500
总含油饱和度 S_{ot} (%)	> 50	35~50	< 35
岩性	气孔玄武岩	火山角砾岩、气孔玄武岩、凝灰岩	凝灰岩

II类储层:主要为孔隙型储层,岩性为凝灰岩,基质孔隙为主要储集空间,微裂缝不发育,喉道为渗流通道,孔隙连通性差。储层孔隙度小于20%,渗透率小于500md,饱和度小于350%。该类储层属于高孔、低渗储层,储层厚度109m,占17.0%。

从枣35块10口生产井射开I类储层厚度与油井产量之间的关系(图4)可以看出,随I类储层厚度大,单井产量有增加的趋势,在15~30m之间单井产量最高。

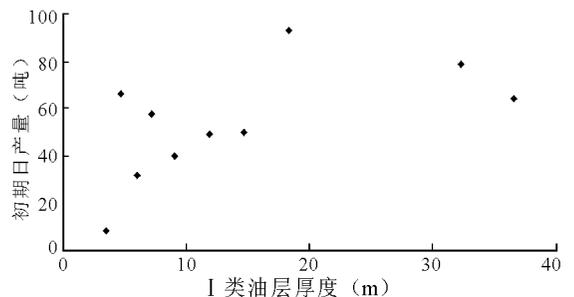


图4 I类油层厚度与初期产量的关系

Fig. 4 Relationship between the thickness and early production of the I-type oil reservoirs

5 火山岩储层发育的控制因素

枣35块火山岩油藏是比较典型的双重介质油藏,储集空间类型包括裂缝、气孔和基质孔隙。控制枣35块火山岩储层发育的因素主要为火山岩相和构造作用。

5.1 岩相是储层发育的主要控制因素

火山岩(微)相既是火山岩储集空间类型、发育程度的主要控制因素,同时也是裂缝发育及其分布

规律的控制因素。

1. 岩相对孔洞发育程度的控制作用

溢流相玄武岩中气孔发育程度受微相控制十分明显。在火山-次喷溢形成的岩流单元中,顶底部的气孔玄武岩微相,气孔发育,并且顶部气孔玄武岩带比底部更发育;而中部的致密玄武岩微相只发育无效的少量晶间孔。

爆发相火山角砾岩的储集空间类型主要包括砾间孔、粒间孔和少量气孔。由于火山角砾岩颗粒粗大,因此粒(砾)间孔相对发育,气孔则主要存在于气孔玄武岩碎裂形成的角砾中。凝灰岩由于颗粒细小,仅发育各种微孔,主要是粒间孔,还有一些岩石蚀变形成的溶蚀孔等。总体而言,气孔玄武岩微相孔洞最为发育,其次是火山角砾岩微相,而凝灰岩微相一般仅发育微孔。

2. 岩相对成岩缝发育程度的控制作用

从岩心观察得知,在溢流相中气孔玄武岩微相与致密玄武岩微相的裂缝发育存在明显差别。致密玄武岩中一般发育高角度缝,裂缝宽度大、密度小、延伸方向较平直,且通常被充填;而气孔玄武岩微相一般发育网状缝,裂缝宽度小、密度大、延伸方向不规则,通常充填物较少。

爆发相的裂缝发育程度与微相的关系也很密切,火山角砾岩是火山喷发时喷出的块状碎屑,颗粒粗大且形状不规则,因此存在原生的砾间缝,砾间缝实际上是火山角砾岩中的原生弱面,这些原生弱面很容易被后期的应力作用改造,形成具有一定延伸方向的裂缝,从而沟通各种孔隙形成油气渗流通道。凝灰岩与火山角砾岩比起来颗粒就要细得多,岩石整体上也相对均匀,但是由于其内部结构疏松,强度很低,因此也容易产生破裂,只是形成的裂缝都是细小、均匀的微细裂缝而已。

另外,不同微相之间的交界面,特别是不同冷凝周期之间的界面,也是一个原生弱面,沿此界面容易发育裂缝。

根据岩心观察,不同岩性裂缝发育程度不同:气孔玄武岩裂缝发育程度最高,裂缝发育指数为2.66,裂缝密度为4.96条/m;火山角砾岩和凝灰岩的裂缝发育程度次之,裂缝发育指数分别为2.26和1.99,裂缝密度分别为4.07条/m和3.87条/m。

5.2 构造作用对裂缝的控制作用

构造作用形成裂缝,也是火山岩储层发育的重要因素。对于气孔玄武岩、火山角砾岩和凝灰岩,构造作用形成的裂缝,提高了气孔、孔隙间的连通程

度。对于致密玄武岩,构造作用形成的裂缝可形成单纯的裂缝型储层,但该区由于充填严重已为无效储层。

构造裂缝尽管在数量上比成岩缝要少,但规模较大,一般发育为高角度缝,裂缝宽度大、延伸远。裂缝发育的主要方向为北东向,其次是北西向,与断层分布规律一致,说明构造应力控制裂缝发育的主要方向。

6 结 论

(1) 枣35块火山岩为玄武岩类,可细分为4种岩性(即气孔玄武岩、致密玄武岩、火山角砾岩、凝灰岩);根据岩性及其分布特征,按火山岩岩相模式,将火山岩相划分为两个亚相和4个微相。

(2) 该区火山岩储集空间类型多样,既有孔隙,又有气孔和裂缝,根据孔、洞、缝的成因和规模,将火山岩储集空间划分为3大类和12种类型,可以组合成5种储渗配置关系,并提炼了两种主要的储渗模式。

(3) 从缝洞发育程度、物性高低和储量大小来看,不论是气孔玄武岩,还是火山角砾岩和凝灰岩,其基质为高孔低渗,而裂缝为低孔高渗,作为储层来讲,均是有效的。

(4) 火山岩储层发育的主要控制因素是岩相,而构造作用和岩相共同控制着构造缝的发育与分布。

参考文献:

- [1] 周总瑛, 张抗. 中国油田开发现状与前景分析[J]. 石油勘探与开发, 2004, 31(1): 84-87.
- [2] 杨金龙, 罗静兰. 塔河地区二叠系火山岩储集层特征[J]. 石油勘探与开发, 2004, 31(4): 44-47.
- [3] 王金友, 张世奇, 赵俊青, 等. 渤海湾盆地惠民凹陷临商地区火山岩储层特征[J]. 石油实验地质, 2003, 25(3): 264-268.
- [4] 马乾, 鄂俊杰, 李文华, 等. 黄骅拗陷北堡地区深层火山岩储层评价[J]. 石油与天然气地质, 2000, 21(4): 337-340.
- [5] 王宏斌, 王璞璋, 陈弘, 等. 中国东部中生代火山-碎屑-凝灰岩储层研究综述[J]. 世界地质, 1997, 16(3): 34-41.
- [6] 王德滋, 周新民. 火山岩岩石学[M]. 北京: 科学出版社, 1982.
- [7] 王华崇, 冉启全. 大港枣园油田火山岩岩相[J]. 石油勘探与开发, 2004, 31(5): 21-24.
- [8] 董冬. 火山岩储层中的一种重要储集空间——气孔[J]. 石油勘探与开发, 1991, (1): 89-93.
- [9] Jack Allan, S Qing Sun. 裂缝性油气藏采收率: 100个裂缝性油气田实例的经验总结[J]. 石油勘探与开发, 2003, 30(6): 129-135.
- [10] 杨红梅, 汪满福. 青西油田下白垩统下沟组泥云岩储集层特征

[J]. 石油勘探与开发, 2004, 31(6): 47-50.

采油机理数值模拟研究[J]. 石油勘探与开发, 2004, 31(4): 105

[11] 王毅忠, 袁士义. 以大港油田枣35块火山岩裂缝性稠油油藏

- 107.

The Zaoyuan Oil Field, Dagang, Tianjin: Crack-type volcanic reservoirs and their controlling factors

YANG Li-min¹, ZOU Cai-neng², RAN Qi-quan²

(1. *China University of Petroleum, Beijing 102249, China*; 2. *Research Institute of Petroleum Exploration and Development, PetroChina, Beijing 100081, China*)

Abstract: The complexity and heterogeneity of crack-type volcanic reservoirs are considered to be key factors controlling the exploitation of the Zaoyuan Oil Field in Dagang, Tianjin. The data on boreholes, thin sections, CT scanning electron photomicrographs, mercury-injection method, well logs and production regimes show that the Zaoyuan volcanic rocks are assigned to basalts, which may be subdivided into vesicular basalt, dense basalt, volcanic breccias and tuff. The lithofacies may be subdivided into two subfacies including the flood and explosion subfacies, and four microfacies including the vesicular basalt, dense basalt, volcanic breccia and tuff microfacies. The reservoir spaces include three types and twelve subtypes, which may be grouped into five reservoir-permeability associations represented by the reservoir-permeability models for the crack-porosity type and composite macropore-macrocrack and micropore-microcrack type. The assessment and classification are further made on the validity of the matrix and cracks on the basis of lithology, crack and pore space development, physical property and reserves. The main controlling factors for the crack-type volcanic reservoirs include tectonism and lithofacies.

Key words: Zaoyuan Oil Field in Dagang; volcanic rock; crack; reservoir; controlling factor