

彭 军, 林 攀, 夏青松, 等. 塔北地区寒武系白云岩储层裂缝充填特征与有效性[J]. 地球科学与环境学报, 2019, 41(1): 40-53.

PENG Jun, LIN Pan, XIA Qing-song, et al. Effectiveness and Filling Characteristics of the Fractures of Cambrian Dolomite Reservoir in the Northern Tarim Basin, China[J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2019, 41(1): 40-53.

塔北地区寒武系白云岩储层裂缝 充填特征与有效性

彭 军¹, 林 攀¹, 夏青松¹, 李 斌¹, 韩浩东²

(1. 西南石油大学 地球科学与技术学院, 四川 成都 610500;

2. 中国地质调查局成都地质调查中心, 四川 成都 610081)

摘 要:塔里木盆地寒武系白云岩储层具有年代老、埋深大、成岩作用强烈的特征, 原生孔隙几乎被破坏殆尽, 有效裂缝的发育程度是决定储层优劣的关键因素。根据岩芯描述、薄片鉴定、FMI 成像测井、扫描电镜、阴极发光、电子探针以及流体包裹体分析等研究手段, 开展了塔里木盆地北部地区(简称“塔北地区”)寒武系白云岩储层的裂缝充填特征及有效性分析。塔北地区整体裂缝发育, 天山南地区与塔河地区裂缝在产状、线密度、形态以及充填特征上存在差异。天山南地区裂缝线密度与有效性均低于塔河地区, 充填矿物主要为自形白云石与石英, 其次为方解石、石膏与黄铁矿。充填白云石分为 3 期, 对应的温度区间分别为 70 °C~90 °C、90 °C~110 °C 及 110 °C 以上, 均为地层内的成岩流体成因; 充填石英分两期, 第一期为黏土矿物转化蚀变形成, 第二期可能为热液成因。塔河地区裂缝线密度高, 有效性较好, 溶蚀作用发育, 是有利的勘探地区, 其充填物以热液矿物组合形式出现, 主要为方解石, 其次为石膏、鞍状白云石、黏土矿物、沥青等, 重晶石以交代白云石的形式出现。充填方解石分为 4 期, 对应的温度区间分别为 70 °C~100 °C、100 °C~130 °C、130 °C~180 °C 及 180 °C 以上, 前 3 期充填为不同埋深时期地层内成岩流体成因, 最后一期充填为自下部运移而来的高温热液流体成因。

关键词:白云岩储层; 裂缝有效性; 裂缝充填特征; 流体包裹体; 温度; 成岩流体; 寒武系; 塔里木盆地
中图分类号: P618.13 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-6561(2019)01-0040-14

Effectiveness and Filling Characteristics of the Fractures of Cambrian Dolomite Reservoir in the Northern Tarim Basin, China

PENG Jun¹, LIN Pan¹, XIA Qing-song¹, LI Bin¹, HAN Hao-dong²

(1. School of Geoscience and Technology, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, Sichuan, China;

2. Chengdu Center, China Geological Survey, Chengdu 610081, Sichuan, China)

Abstract: The Cambrian dolomite reservoir in Tarim Basin is characterized by old age, deep burial and strong diagenesis, whose primary porosity is almost completely destroyed, and the development of effective fracture is the key to the quality of reservoir. Research on the effectiveness and filling characteristics of the fractures of Cambrian dolomite reservoir in the northern Tarim Basin is based on the core and thin-sections, formation microscanner image (FMI) logging, scanning electron microscope (SEM), cathode luminescence microscope (CLM),

收稿日期: 2018-10-11; 修回日期: 2018-12-04 投稿网址: <http://jese.chd.edu.cn/>

基金项目: 国家油气重大专项项目(2016ZX05005-004-006)

作者简介: 彭 军(1968-), 男, 四川仁寿人, 教授, 博士研究生导师, 理学博士, 博士后, E-mail: pengjun@swpu.edu.cn.

electron microprobe and fluid inclusion methods. The results indicate that the fracture is growing in the northern Tarim Basin, in which the fractures in the southern Tianshan area and Tahe area are different in occurrence, linear density, shapes and the filling characteristics. In the southern Tianshan area, the linear density and effectiveness of fractures are lower than those in Tahe area, and the filling minerals are dominated by idiomorphic dolomite and quartz, followed by calcite, gypsum and pyrite. Dolomite-filling is divided into three stages and the corresponding temperature ranges are 70 °C-90 °C, 90 °C-110 °C and more than 110 °C, which are caused by diagenetic fluid in strata; the quartz-filling is divided into two phases, the first is caused by the clay minerals alteration, and the second may be the hydrothermal genesis. Tahe area, in which the linear density and effectiveness of fractures are well and the dissolution develops, is a favorable exploration zone; the filling minerals are made of hydrothermal minerals, which are dominated by calcite and followed by gypsum, saddle dolomite, clay mineral, asphalt, etc., and the barite occurs in the form of metasomatic dolomite. Calcite-filling is four times in Tahe area and the corresponding temperature ranges are 70 °C-100 °C, 100 °C-130 °C, 130 °C-180 °C and more than 180 °C, among the first three periods are the genesis of diagenetic fluid in different buried depth, and the last one is caused by high temperature hydrothermal fluid from the lower migration.

Key words: dolomite reservoir; effectiveness of fracture; filling characteristic of fracture; fluid inclusion; temperature; diagenetic fluid; Cambrian; Tarim Basin

0 引 言

白云岩储层在世界范围内占很大比例,约占碳酸盐岩储层的 50%,尤其在深埋藏环境下,其所占比例更大^[1]。彭军等通过模拟地层埋藏演化过程中的溶蚀作用,分析了塔里木盆地寒武系碳酸盐岩溶蚀作用特征及控制因素^[2]。近年来,越来越多的学者意识到断层与裂缝活动及后期的溶蚀改造,对白云岩储层储集性能及渗流特征有着重要影响,甚至起着决定性作用,尤其是分布受主应力控制的构造裂缝,其更易形成规模性的网状通道。因此,开展构造裂缝的分布及精细研究,对储层特征及优质储层预测有着积极的指导意义^[3-6]。

目前,塔里木盆地北部地区(简称“塔北地区”)深部白云岩储层研究仍然较薄弱。已有的认识主要有:塔北地区碳酸盐岩储层发育,其中,裂缝型及裂缝-孔洞型储层是主要的储层类型,近年来在裂缝型及裂缝-孔洞型储层中均发现高产工业气流;塔北地区构造运动强烈,构造裂缝发育,有利于溶蚀作用的发生^[7],其断裂具有多期次、继承性发育的特点^[8-10],盆内下古生界碳酸盐岩地层中广泛分布与构造相关的热液白云岩储层^[11-13]。热液活动对油气成藏的影响已成为目前研究的热点^[14-17],主要集中在热液流体对碳酸盐岩储层的改造,包括碳酸盐岩储层孔洞与裂缝的扩溶以及热液矿物的充填,其中,

构造热液白云岩化作用多以鞍状白云石与自形白云石充填物的出现为特征^[11]。近年来塔里木盆地中部地区(简称“塔中地区”)和东部地区寒武系一下奥陶统均已发现热液白云岩储层^[18],而在塔北地区不仅发现热液作用的存在,且具有良好的构造条件,其中,有效裂缝沟通为后期白云岩储层改造提供有利条件^[19-20],这些与断层相关的构造热液白云岩储层往往是优质储层^[21-26]。本文通过对塔北地区寒武系深部白云岩储层的构造裂缝及其充填特征展开精细研究,分析研究区裂缝发育程度、充填方式及有效性,以期对深部白云岩储层被有效裂缝改造的程度与方式有进一步认识。

1 区域地质背景

塔北地区是塔里木盆地中勘探程度最高的地区之一,蕴藏着丰富的油气资源。塔北隆起夹于北部坳陷与库车坳陷之间,从西往东依次分布英买力凸起、哈拉哈塘坳陷、轮南凸起等二级构造单元,面积约为 54 000 km²(图 1),其下又分为塔河地区与天山南地区,塔河地区有塔深 1(TS1)井、于奇 6(YQ6)井钻遇寒武系,天山南地区有星火 2(XH2)井、大古 1(DG1)井钻遇寒武系。塔北隆起发育于加里东晚期—海西早期,于海西晚期定型,多期构造运动使其油气分布十分复杂^[27-29]。塔北地区寒武系地层在加里东早期—海西早期抬升并遭受暴露剥蚀,在岩溶作

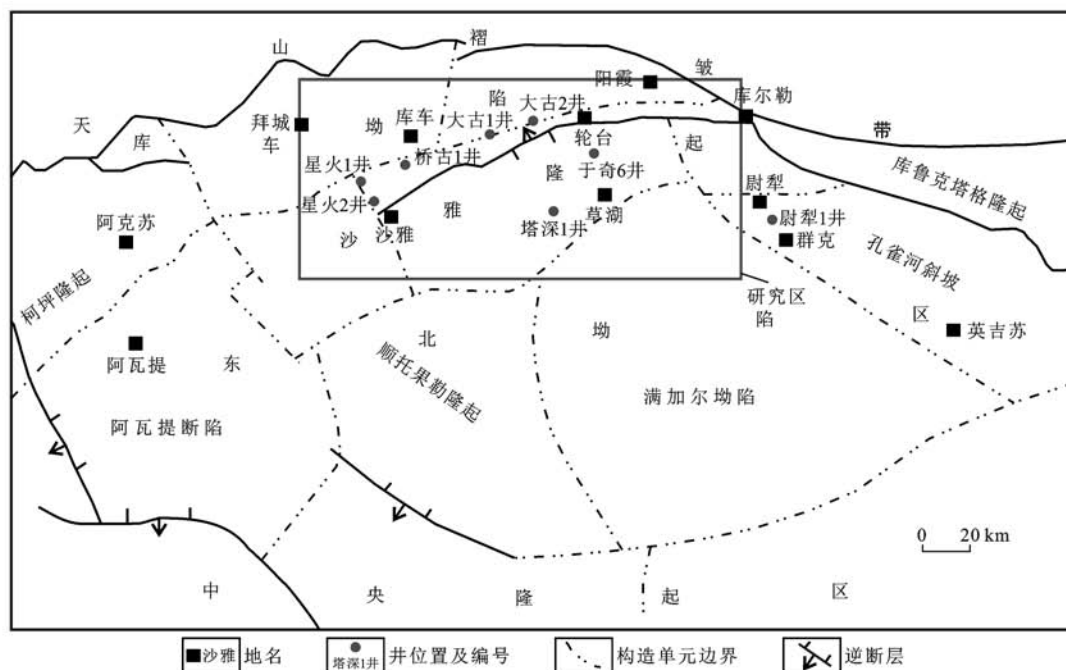


图1 塔北地区寒武系构造位置

Fig. 1 Location of Cambrian Structure in the Northern Tarim Basin

用下形成了良好的缝洞系统;海西晚期地层再次抬升,剧烈的伸展运动形成了大量的张性断裂以及火山活动,从而引起了塔北地区的构造热液活动,形成了塔北地区复杂多样的储集空间类型。

2 裂缝基本特征

裂缝为岩层沿着裂纹、裂隙、节理或任何一种面破碎而形成的间隙^[30]。按裂缝面与岩芯中线垂直面的夹角可将裂缝分为立缝、平缝、斜缝。根据岩芯观察及描述,对塔北地区寒武系地层取芯裂缝倾角特征进行了较为详细的统计(图2),结果表明各地区裂缝发育的优势倾角不尽相同。在天山南地区,裂缝为其主要储集空间,以立缝为主,平缝较为少见,立缝整体走向大致相同,缝旁常常伴生微裂缝甚至网状裂缝,少有溶蚀孔洞发育[图3(a)~(c)]。与天山南地区相比,塔河地区未充填的平缝更为发育,其次为立缝以及高角度斜缝[图3(d)~(i)],独立分布的斜缝基本表现为未充填状态,而与平缝共生时则被大量充填,偶见网状裂缝,大部分被方解石全充填。总体来看,塔河地区北部寒武系白云岩储层斜缝更为发育,且与裂缝伴生的溶蚀孔洞也更为发育,而在塔河地区南部溶蚀孔洞更多表现为独立分布,如TS1井[图3(e)、(g)、(h)]。

裂缝线密度反映了岩石遭受应力改造后的破裂程度,是表征裂缝发育程度最简便直接的参数,是指

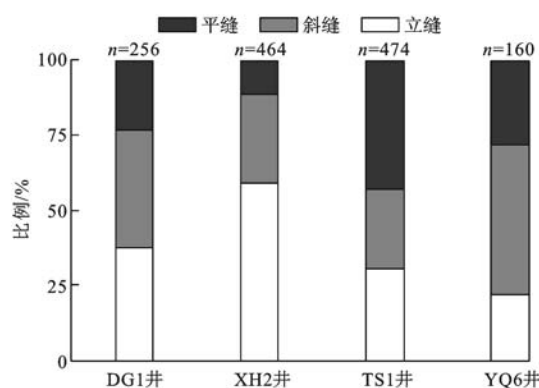


图2 塔北地区寒武系白云岩储层中裂缝类型统计直方图

Fig. 2 Statistical Histogram of Fracture Types of Cambrian Dolomite Reservoir in the Northern Tarim Basin

发育在某段岩芯上的裂缝总数(n)与该段岩芯长度(l)的比值^[31]。对塔河与天山南地区下丘里塔格群的裂缝线密度统计分析可以看出,塔北地区寒武系白云岩储层整体裂缝发育。其中,天山南地区裂缝分布在区域上很不均匀,裂缝线密度最低为22.48条 $\cdot m^{-1}$ (DG1井),最高达43.58条 $\cdot m^{-1}$ (XH2井),且多数为未充填裂缝;塔河地区储集空间类型多样,裂缝更为发育,裂缝有效性在区域上存在极大差别,如YQ6井裂缝线密度为33.58条 $\cdot m^{-1}$,但充填比例较高,TS1井裂缝线密度(32.45条 $\cdot m^{-1}$)虽然低于YQ6井与XH2井,但裂缝充填程度较低,裂缝有效性较好,且伴生大量溶蚀孔洞,储层储集性能得到明显改善。

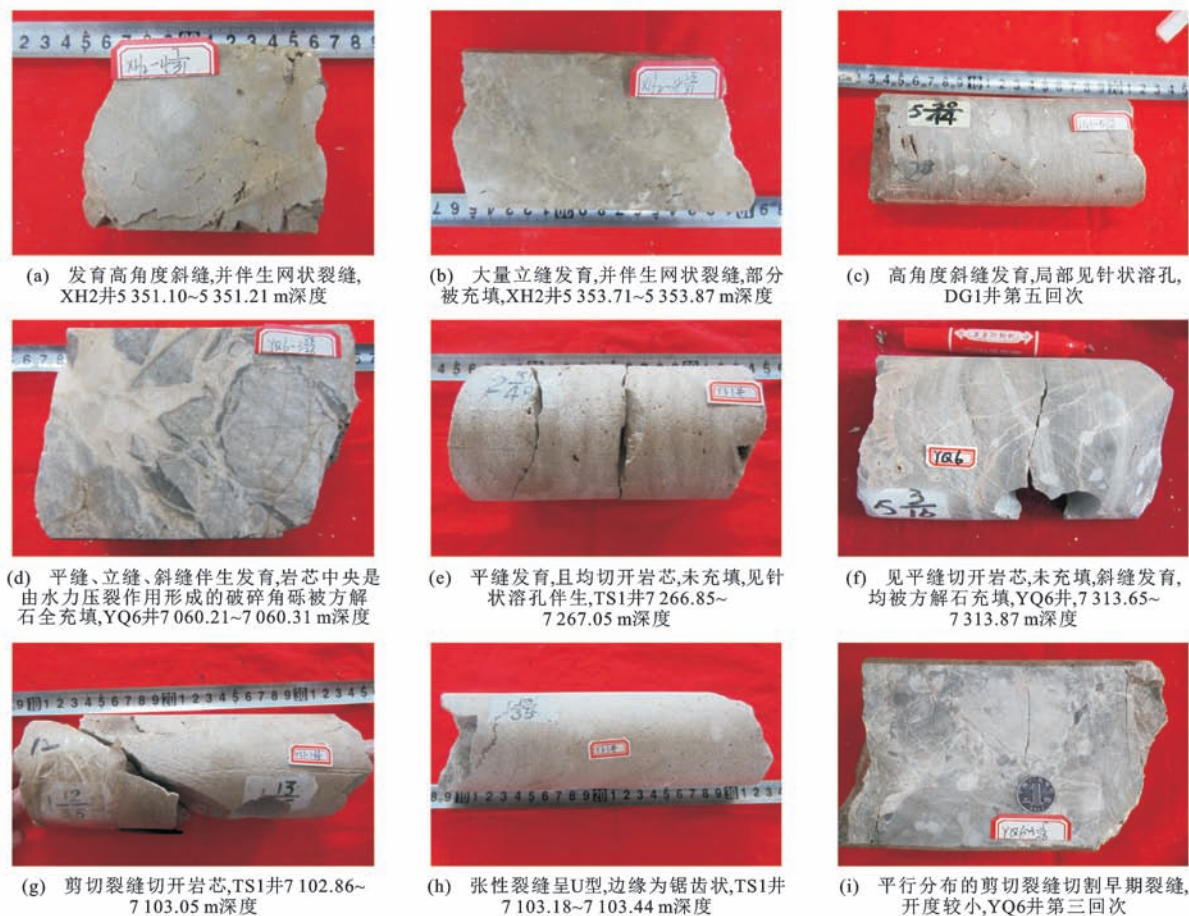


图3 塔北地区寒武系白云岩储层取芯段裂缝照片

Fig. 3 Fracture Photos of Coring of Cambrian Dolomite Reservoir in the Northern Tarim Basin

岩芯描述以及 FMI 成像测井解释成果揭示,岩芯寒武系白云岩储层裂缝分布表现为明显的纵向变化。塔河地区寒武系上部裂缝线密度较高,但多以开度 $0.1\sim 2.0\text{ mm}$ 的立缝为主,且缝洞之间连通性较差,随着深度增加,下部则以开度相对略大的斜缝以及平缝为主,且缝洞之间的连通性也随深度增加呈逐渐变好的趋势[图 4(a)];天山南地区裂缝纵向上的分布在区域上表现出很大差异性,如 XH2 井裂缝线密度随深度增加而大幅增加[图 4(b)],裂缝的开度和缝洞之间连通性也与裂缝线密度变化趋势呈明显一致性,在最后两次取芯中甚至出现因断裂发育而岩芯破碎的现象,而 DG1 井随深度增加裂缝线密度递减,储集空间呈逐渐减少的趋势[图 4(c)]。

通过 FMI 成像测井资料的分析可明确塔北地区寒武系地层裂缝产状,能够对裂缝进行更全面的表征。天山南地区发育单一及较集中的裂缝,主要为单一的高角度斜缝,断裂带可见不规则砾石,部分为断层伴生产物,裂缝及诱导裂缝的走向基本一致,呈 NW 向[图 5(a)]。塔河地区可见产状呈水平、斜

交、垂直层面等构造裂缝,最常见发育高角度平行斜缝,裂缝开度多在 $0.1\sim 3.5\text{ mm}$ 范围内变化,裂缝与诱导裂缝走向基本一致,呈 NE 向[图 5(b)]。一般张性裂缝较宽,多为几百微米到几毫米,缝壁不规则,延伸不远,长度多为数十厘米,常被方解石或白云石胶结物充填。剪切裂缝一般较平直,形状较规则,组系分明,延伸较远,裂缝宽度多小于 2 mm ,常被方解石充填。

根据地质构造方法,对不同组系裂缝的产状、切割关系、充填类型和溶蚀情况进行裂缝期次研究,并将裂缝分为 3 期。第一期为加里东期断裂体系,由于盆地受裂解、裂陷伸展构造作用,产生了 NWW 向、近 EW 向及 NEE 向的张性裂缝,在岩芯上裂缝多呈低开度锯齿状,缝长延伸较短,一般常呈闭合 U 型[图 3(h)],充填程度较低,少量被方解石充填,该期裂缝由于后期受到海西期构造运动的强烈改造,大部分已演化为剪切裂缝;第二期为海西期断裂体系,其在加里东期形成的 NW 向、NWW 向断裂上继承性发育,并新形成了 NW 向、近 EW 向、NE 向

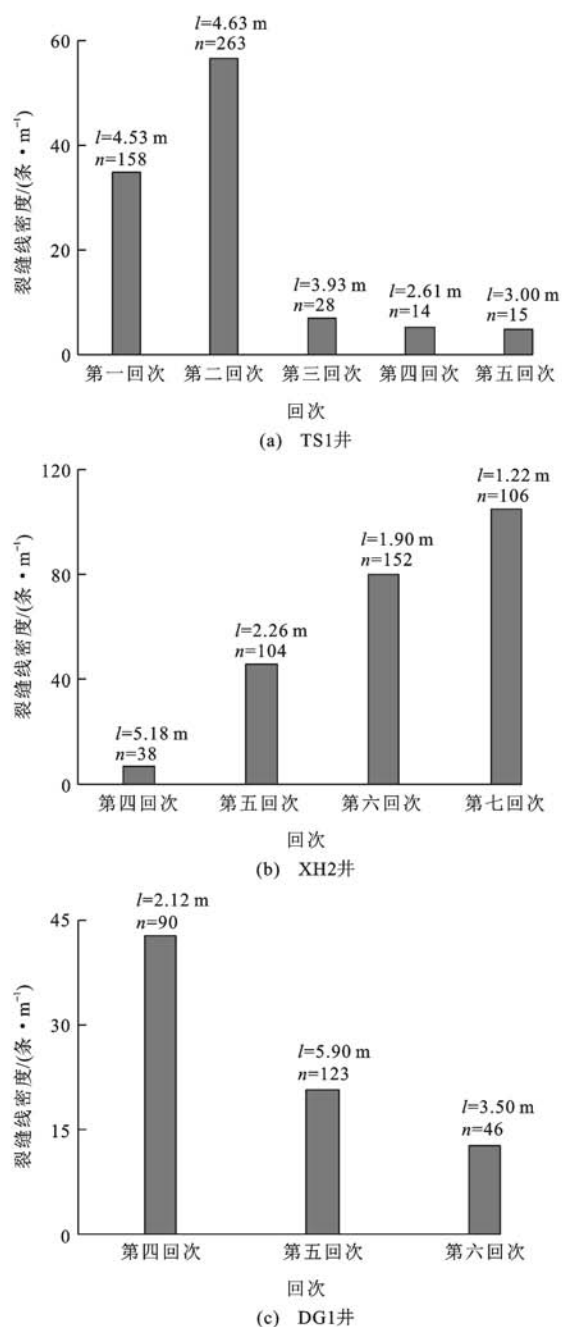


图4 塔北地区寒武系地层取芯段裂缝线密度随深度变化
Fig. 4 Variations of Fracture Linear Density of Coring with Depth of Cambrian Strata in the Northern Tarim Basin

压扭性断裂体系,部分在岩芯裂缝边缘呈凹凸状,为改造前期张性裂缝的证据,部分裂缝边缘光滑,缝长延伸远,开度大且常见切开岩芯或切割低开度裂缝,部分被方解石充填[图 3(g)],该时期为裂缝的主要形成时期,在 FMI 成像测井中拾取到的裂缝多呈 NW 向、NE 向,与该时期应力方向吻合;第三期为燕山期—喜山期断裂体系,主要形成了盆地西北缘和西南缘大规模的逆冲断裂和逆掩构造体系,来自 SW 向较强的挤压对 NW 向断裂强化或形成 NW

向断裂的派生断层,在岩芯上裂缝部分切开岩芯,并伴生开度较小、走向一致的小裂缝[图 3(i)]。

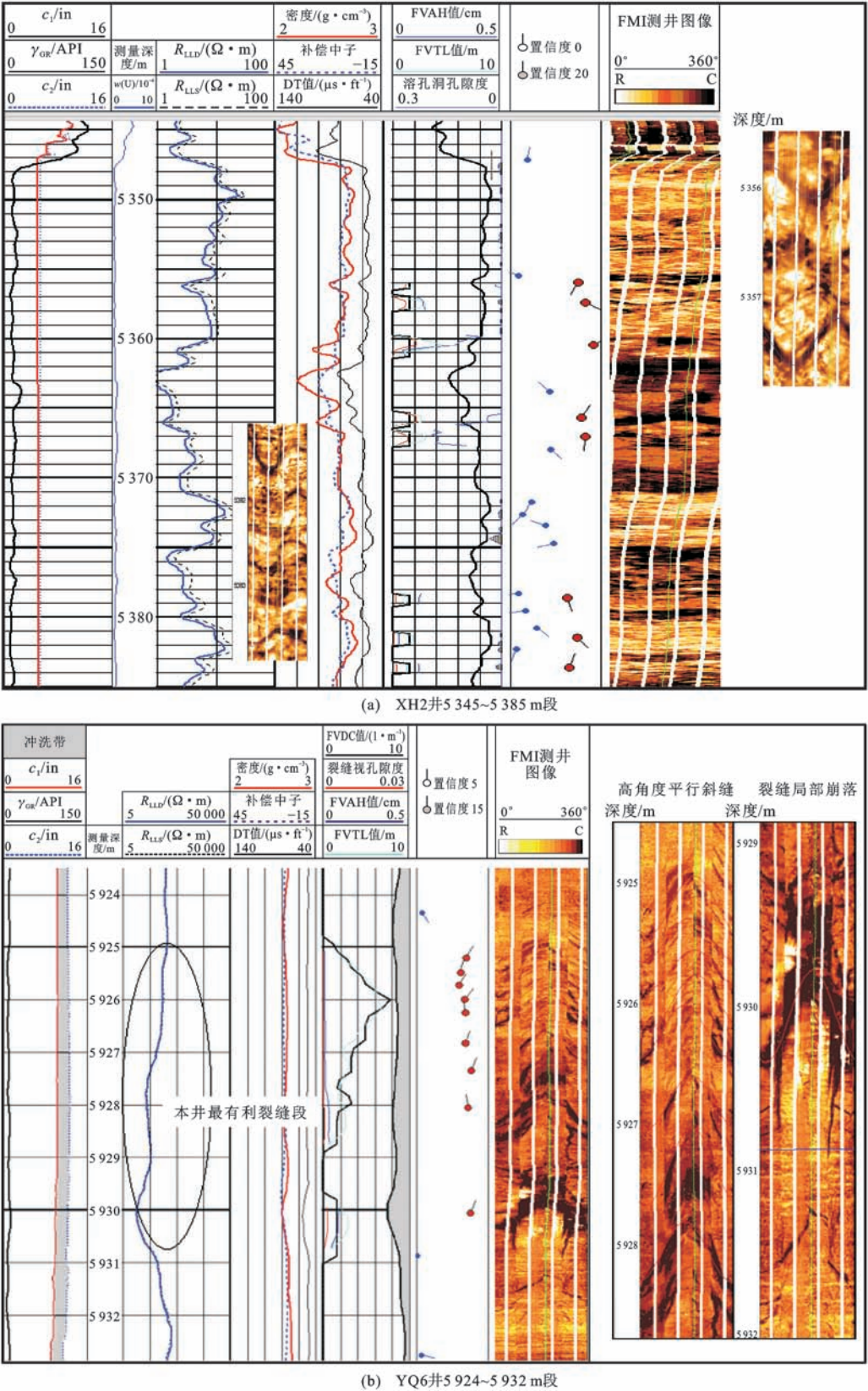
3 裂缝充填特征与有效性

3.1 充填特征

塔河地区与天山南地区的裂缝充填矿物及其产状在镜下具有各自不同的特点。

塔河地区充填矿物类型复杂,最显著的特征为热液矿物组合发育,如方解石-鞍状白云石、重晶石-石膏-石英,其中主要的充填矿物为方解石-鞍状白云石矿物组合,最常见的产出状态为裂缝边缘紧密生长呈刀尖状的鞍状白云石,巨晶方解石与之呈镶嵌接触,为典型的热液充填模式[图 6(a)]。鞍状白云石镜下可见波状消光,偶见次生加大边或雾心亮边结构;石英与重晶石相对少见,相较天山南地区石英充填物而言,石英未见两期充填,重晶石多与交代白云石的方解石共生[图 6(b)]。电子探针下,不同产状的方解石元素特征差异明显,可知方解石并非一次性充填[图 6(d)];充填裂缝的鞍状白云石与临近的基质白云石相比有明显的 Mn 富集[图 6(c)]。阴极发光图像中,充填方解石发橘黄色光,鞍状白云石见雾心亮边结构,晶粒边缘发亮红色光,内部为红色光[图 6(e)、(f)]。各类充填矿物遭受溶蚀的程度较天山南地区更高,说明塔河地区在成岩晚期仍遭受较强烈的流体溶蚀改造,从而形成较好的储集空间。

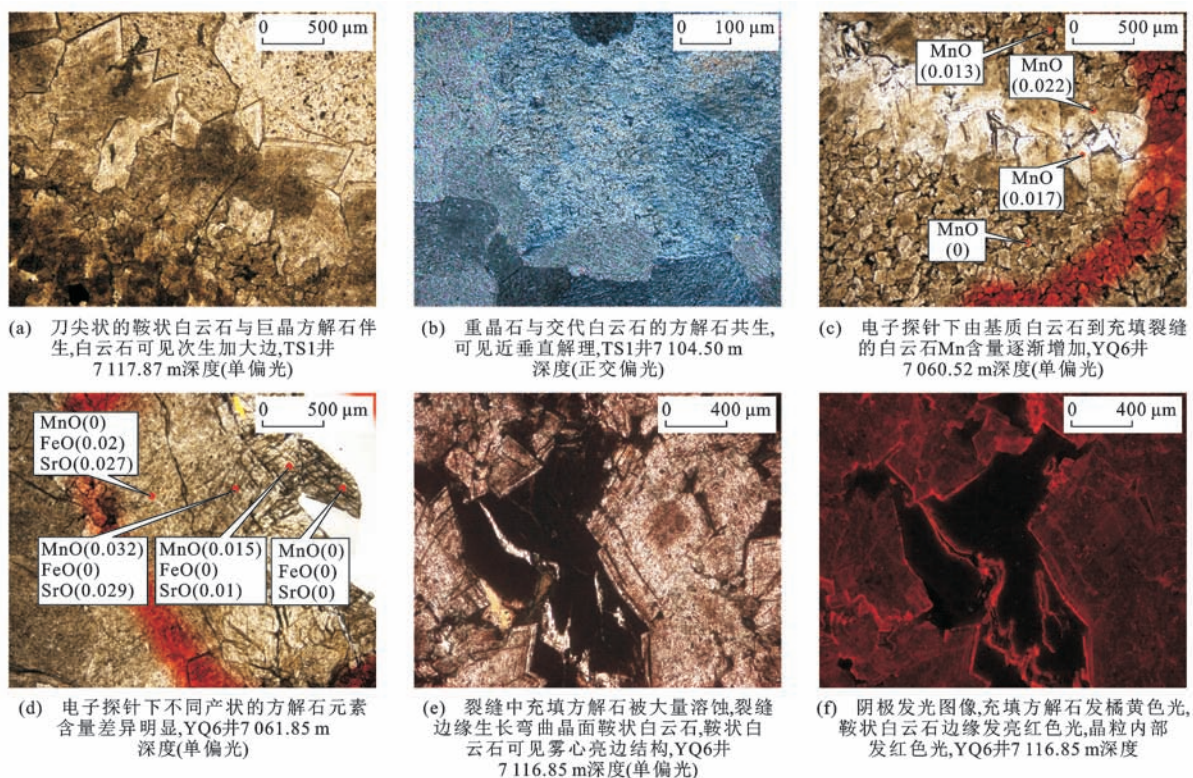
天山南地区裂缝多独立分布,成群分布时裂缝大部分未充填,该地区最显著的特征为大量白云石与石英充填裂缝。白云石多发育于被扩溶的裂缝边缘,呈自形粉—细晶[图 7(a)],扫描电镜下充填裂缝的白云石晶体呈标准菱面体,与塔河地区差异明显,鞍状白云石仅少量发育[图 7(b)]。石英可见两期充填,第一期石英多为细小隐晶质附着在缝缘,第二期石英晶粒粗大,充填于裂缝中央,在高倍镜下可见石英的生长纹[图 7(c)],扫描电镜下石英呈晶簇状充填于裂缝中,石英晶间缝中偶见丝状伊利石或黏土矿物溶蚀残余[图 7(d)~(f)]。电子探针下,由基质白云石到缝缘的自形白云石表现出明显的 Fe 富集、Mn 稀缺的特征[图 7(g)]。阴极发光图像中可见被粗大石英晶粒附着的白云石发亮红色光,表现为富 Mn、贫 Fe 的特征[图 7(h)、(i)]。充填矿物中偶见白云石与黄铁矿伴生的现象,黄铁矿在纵向上分布不均且产状上有所差别,上部多呈斑点状,中部呈大片的块状充填在白云石晶粒间,下部偶见黄铁矿充填裂缝,可能为热液流体自深部所带来。



c_1 为井径 1; c_2 为井径 2; γ_{GR} 为自然伽马; R_{LLD} 为深侧向电阻率; R_{LLS} 为浅侧向电阻率; DT 值为声波时差; FVAH 值为裂缝水力宽度; FVTL 值为裂缝长度; FVDC 值为裂缝密度; $w(U)$ 为铀含量(质量分数,下同)

图 5 塔北地区寒武系地层 FMI 成像测井裂缝特征

Fig. 5 Fracture Characteristics of FMI Images of Cambrian Strata in the Northern Tarim Basin



图(c)括号中的数字表示白云石元素含量,图(d)括号中的数字表示方解石元素含量

图 6 塔河地区寒武系白云岩储层裂缝充填特征

Fig. 6 Filling Characteristics of Fractures of Cambrian Dolomite Reservoir in Tahe Area

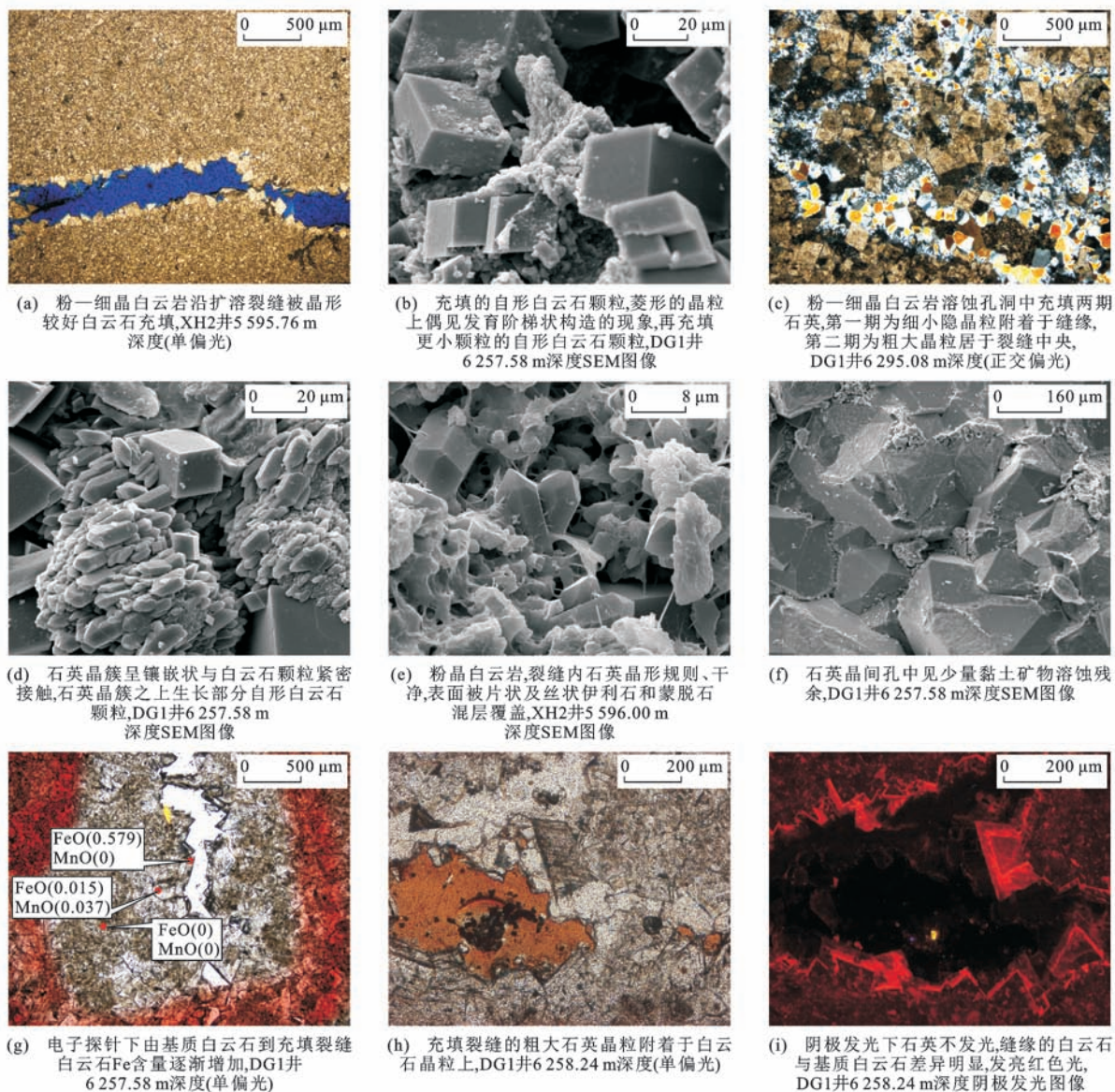
在充填作用较强的层位中,仍可见部分未充填的裂缝及充填矿物被溶蚀的现象,表明天山南地区在大规模的充填作用后又遭受了构造应力以及溶蚀流体的改造。

针对塔北地区复杂的充填特征,采用流体包裹体的方法对其进行更详细的分析。流体包裹体是随宿主矿物形成或演化而被捕获封存于主矿物晶格缺陷中的成岩流体,它记录和保存了主矿物生长或演化时的各种地球化学信息^[32]。本次研究对象为原生包裹体,原生包裹体是与主矿物同时形成的,是表征主矿物形成时流体物理化学条件的直接证据。

塔河地区与天南山地区寒武系白云岩储层裂缝中充填白云石、方解石的流体包裹体主要为两相水溶液包裹体。方解石中的流体包裹体气相体积分数为 15%~20% (25 °C 条件下),呈群体或串珠状分布,形状多为椭圆形或似圆状,大小范围为 10~18 μm [图 8(a)、(b)];白云石的流体包裹体大部分为液相, H_2O 所占比例大于 90%,多为独立分布,形状以长条状和不规则状为主,大小范围为 3~10 μm [图 8(c)]。

塔河地区的主要充填物为方解石,本次针对 YQ6 井裂缝中充填方解石进行分析,从中获取了

101 个气-液两相盐水包裹体均一温度及 38 个冰点温度。其中包裹体均一温度分布范围比较广,最低温度 71.2 °C,最高温度 228.0 °C,集中分布在 100 °C~160 °C 之间,峰值出现在 100 °C~110 °C 之间(表 1)。蔺军等在对塔河地区充填方解石进行研究时将其分为 3 期流体的产物^[33]。本次研究在分布范围更广的均一温度以及盐度差异的基础上对前人结论进行补充,将塔河地区寒武系白云岩储层裂缝中的充填方解石分为 4 期,分别对应的温度区间为 70 °C~100 °C、100 °C~130 °C、130 °C~180 °C 及 180 °C 以上(图 9),再依据其冰点温度计算每一期流体的盐度。第一期流体对应的盐度分布在 1.2%~1.6% NaCl 当量之间,平均值为 1.4% NaCl 当量;第二期流体对应的盐度分布在 5.71%~8.00% NaCl 当量之间,平均值为 6.86% NaCl 当量;第三期流体对应的盐度分布在 4.65%~8.00% NaCl 当量之间,平均值为 6.02% NaCl 当量;第四期流体对应的盐度分布在 5.71%~7.17% NaCl 当量之间,平均值为 6.62% NaCl 当量。根据不同期次流体温度与盐度的差异可以得知:第一期流体温度与盐度较低,推测为浅埋藏时期的成岩流体成因;第二期与第三期流体温度、盐度有一定升高,推测为中—深埋



图(g)括号中的数字表示白云石元素含量

图 7 天山南地区寒武系白云岩储层裂缝充填特征

Fig. 7 Filling Characteristics of Fractures of Cambrian Dolomite Reservoir in the Southern Tianshan Area

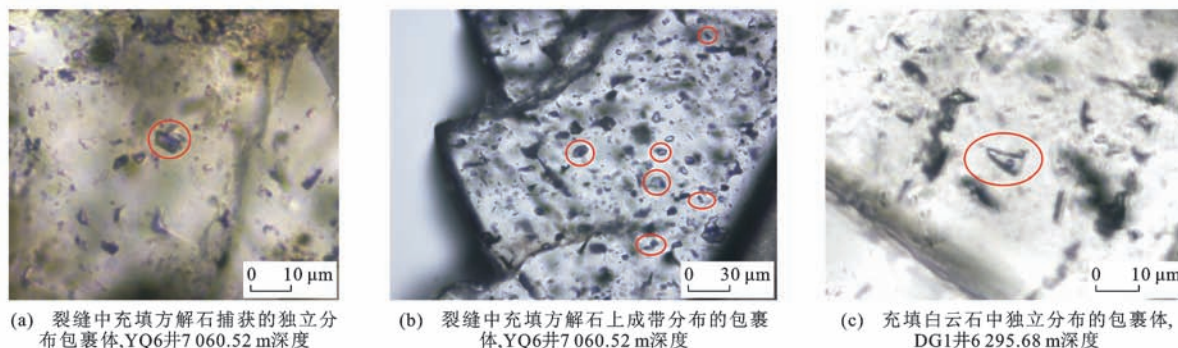


图 8 塔北地区寒武系白云岩储层裂缝中充填方解石和白云石的流体包裹体

Fig. 8 Fluid Inclusion of Calcite and Dolomite Fillings at Fractures of Cambrian Dolomite Reservoir in the Northern Tarim Basin

藏时期的成岩流体成因;第四期流体温度、盐度均属
于高值,推测流体性质为高温卤水。

天山南地区主要的充填矿物为白云石,对 DG1
井裂缝中充填白云石的流体包裹体进行了均一温度

表 1 塔北地区寒武系白云岩储层裂缝充填物的流体包裹体均一温度及冰点温度

Tab. 1 Homogenization and Freezing Temperatures of Fluid Inclusions of Fracture Fillings of Cambrian Dolomite Reservoir in the Northern Tarim Basin

样品编号	均一温度/℃	冰点温度/℃	样品编号	均一温度/℃	冰点温度/℃	样品编号	均一温度/℃	冰点温度/℃
YQ6-1	99.8		YQ6-38	149.8		YQ6-75	87.2	
YQ6-2		-3.1	YQ6-39	155.4	-1.3	YQ6-76	100.0	
YQ6-3	192.9		YQ6-40	151.7	-5.1	YQ6-77	115.7	
YQ6-4		-4.2	YQ6-41	88.9	-0.8	YQ6-78	106.6	
YQ6-5		-4.6	YQ6-42	84.5	-0.8	YQ6-79	105.4	
YQ6-6		-4.3	YQ6-43	73.2		YQ6-80	109.8	
YQ6-7	153.0	-3.6	YQ6-44	104.5		YQ6-81	148.1	
YQ6-8	213.5	-4.4	YQ6-45	96.9		YQ6-82	165.1	
YQ6-9	228.0	-3.5	YQ6-46	92.6		YQ6-83	98.1	
YQ6-10	211.1	-4.5	YQ6-47	106.1		YQ6-84	133.4	
YQ6-11	211.0	-4.1	YQ6-48	120.3		YQ6-85	152.9	
YQ6-12	157.0		YQ6-49	81.2		YQ6-86	207.9	
YQ6-13	146.0		YQ6-50	101.4		YQ6-87	116.4	-0.1
YQ6-14	85.3		YQ6-51	101.2		YQ6-88		-0.5
YQ6-15	141.5		YQ6-52	108.2		YQ6-89	106.8	-1.5
YQ6-16	153.1		YQ6-53	71.2		YQ6-90	99.1	-1.6
YQ6-17	168.1	-5.4	YQ6-54	113.1	0.6	YQ6-91	136.1	-4.8
YQ6-18		-4.3	YQ6-55	94.9		YQ6-92		-5.5
YQ6-19	136.1		YQ6-56	77.8		YQ6-93		-5.8
YQ6-20	125.7		YQ6-57	117.6		YQ6-94	129.1	-6.0
YQ6-21	110.0		YQ6-58	133.7	-2.8	YQ6-95		-49.1
YQ6-22	113.7		YQ6-59	120.1		YQ6-96	58.9	
YQ6-23	123.9	>0.0	YQ6-60	121.7	-3.5	YQ6-97	78.0	
YQ6-24	105.3		YQ6-61	168.6	-0.3	YQ6-98	87.2	
YQ6-25	102.1		YQ6-62	126.1		YQ6-99	112.6	
YQ6-26	124.5	-5.1	YQ6-63	154.2	-12.1	YQ6-100	116.7	
YQ6-27	109.3		YQ6-64	140.7		YQ6-101	>150.0	
YQ6-28	122.1		YQ6-65	142.1		DG1-1	98.1	-0.6
YQ6-29	139.8	-3.7	YQ6-66	172.9		DG1-2	130.6	-2.8
YQ6-30	137.5		YQ6-67	143.4	-10.2	DG1-3	87.7	-2.9
YQ6-31	95.9		YQ6-68	148.5		DG1-4	128.6	-3.6
YQ6-32	154.7	-3.4	YQ6-69	131.5		DG1-5	83.4	-3.8
YQ6-33	99.8		YQ6-70	106.6		DG1-6	72.6	
YQ6-34	106.4		YQ6-71	111.5		DG1-7	98.5	
YQ6-35	135.6		YQ6-72	152.8	-3.6	DG1-8	102.6	
YQ6-36	119.8		YQ6-73	102.7		DG1-9	107.1	
YQ6-37	81.1		YQ6-74	113.8		DG1-10	152.6	

注:样品编号以 YQ6 开头的样品来自 YQ6 井寒武系地层,以 DG1 开头的样品来自 DG1 井寒武系地层;样品 YQ6-1~YQ6-86 都来自 7 060.52 m 深度粉—细晶白云岩,赋存矿物为方解石,只有一个样品充填方解石边缘;样品 YQ6-87~YQ6-101 都来自 7 119.60 m 深度细晶白云岩,赋存矿物为方解石;样品 DG1-1~DG1-10 都来自 6 295.68 m 深度粉—细晶白云岩,赋存矿物为白云石。

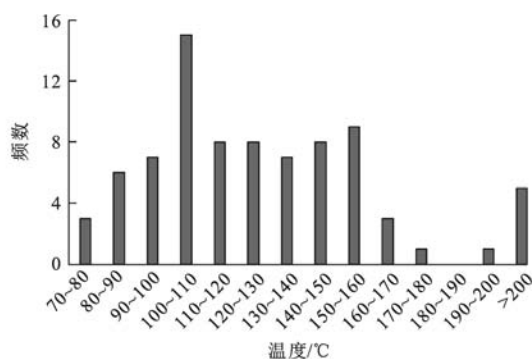


图 9 塔河地区寒武系白云岩储层裂缝中充填方解石的流体包裹体均一温度分布

Fig. 9 Distribution of Homogenization Temperatures of Fluid Inclusion of Calcite-filling at Fracture of Cambrian Dolomite Reservoir in Tahe Area

测定。结果显示,天山南地区充填白云石中的包裹体均一温度分布范围相较于塔河地区要窄很多,最低温度 72.6 °C,最高温度仅 152.6 °C。根据盐水包裹体均一温度统计,将天山南地区寒武系白云岩裂缝中的充填白云石分为 3 个温度区间,分别为 70 °C~90 °C、90 °C~110 °C 及 110 °C 以上,平均温度分别为 81.23 °C、102.73 °C、137.27 °C (图 10),反映了天山南地区寒武系白云岩裂缝中充填白云石形成于 3 个不同时期。

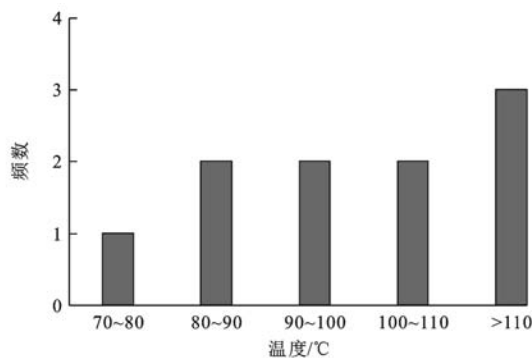


图 10 天山南地区寒武系白云岩储层裂缝中充填白云石的流体包裹体均一温度分布

Fig. 10 Distribution of Homogenization Temperatures of Fluid Inclusion of Dolomite-filling at Fracture of Cambrian Dolomite Reservoir in the Southern Tianshan Area

3.2 有效性

根据张鹏等对塔北地区寒武系地层的野外露头、岩芯薄片研究,认为在出现频率以及体积占比上,研究区次生孔隙占比接近 95%,原生孔隙占比不到 5%^[34]。因此,对塔北地区而言,后期的改造作用对于优质储层的形成至关重要,而保留下来的构造裂缝不仅自身是良好的储集空间,而且对白云岩内的各类孔隙有着重要的连通作用,是构造作用及

成岩作用后期改造的重要产物。在埋藏过程中,部分构造裂缝被成岩流体全充填,丧失了改造白云岩储层的功能,称为无效裂缝。未充填、半充填的裂缝仍可作为油气运移的通道和储集空间,这些裂缝被称为有效裂缝^[35]。在塔北地区裂缝线密度均较高的情况下,裂缝有效性是影响超深层白云岩储层储集性能的重要因素。

天山南地区和塔河地区在裂缝有效性上的表现差异较为明显。天山南地区的裂缝有效性相对于塔河地区整体较差,大量裂缝处于全充填的状态,半充填裂缝较少,且主要为石英与白云石充填,一般大量的硅质充填后难以再被晚期流体溶蚀,岩芯上较少的溶蚀孔洞也表明流体对白云石的改造作用并不理想[图 11(a)、(b)]。塔河地区裂缝主要为未充填或半充填,少量裂缝被方解石、鞍状白云石充填,薄片下清晰可见裂缝中充填矿物的溶蚀现象以及裂缝内大量溶蚀孔洞的发育,表明该地区曾发生强烈的后期溶蚀作用,因此,储层裂缝具有充填少、扩溶改造明显、缝洞连通性好的特点[图 11(c)、(d)]。通过对塔北地区寒武系白云岩储层岩芯裂缝充填情况的统计,可对裂缝有效性进行综合分析(图 12)。

4 讨 论

塔北地区共经历了 6 期较大的构造运动。刘迪研究认为在这 6 期构造运动中,发生于中泥盆世末的海西早期运动以及中二叠世末的海西晚期运动是最重要的两期构造运动,是形成大量裂缝的主要地质时期^[36]。而在海西晚期,强烈的拉张应力伴随有大规模的岩浆侵入活动和火山喷发作用,被认为是最主要的充填时期。

在这段地质时期,塔河地区被下渗的大气降水、地层水和从盆地深部自下而上运移的热液流体改造,形成了大量方解石与其他各类热液矿物充填裂缝。根据流体包裹体均一温度与盐度分析可知,方解石充填发生在 4 个不同的时期,其中前 3 期为不同埋藏时期地层内成岩流体成因,最后一期为自下部运移而来的 200 °C 高温热液流体成因。天山南地区充填裂缝的白云石多为自形细晶,鞍状白云石不发育,充填白云石中的流体包裹体均一温度普遍不高,证明该地区大量的充填白云石成岩流体与热液无关,而是地层内的成岩流体成因。天山南地区也发育大量充填石英,镜下观察到充填石英分为两期,产状差异明显,成因上也有区别。第一期为沿缝缘生长的细小隐晶质石英紧密附着于充填白云石上,

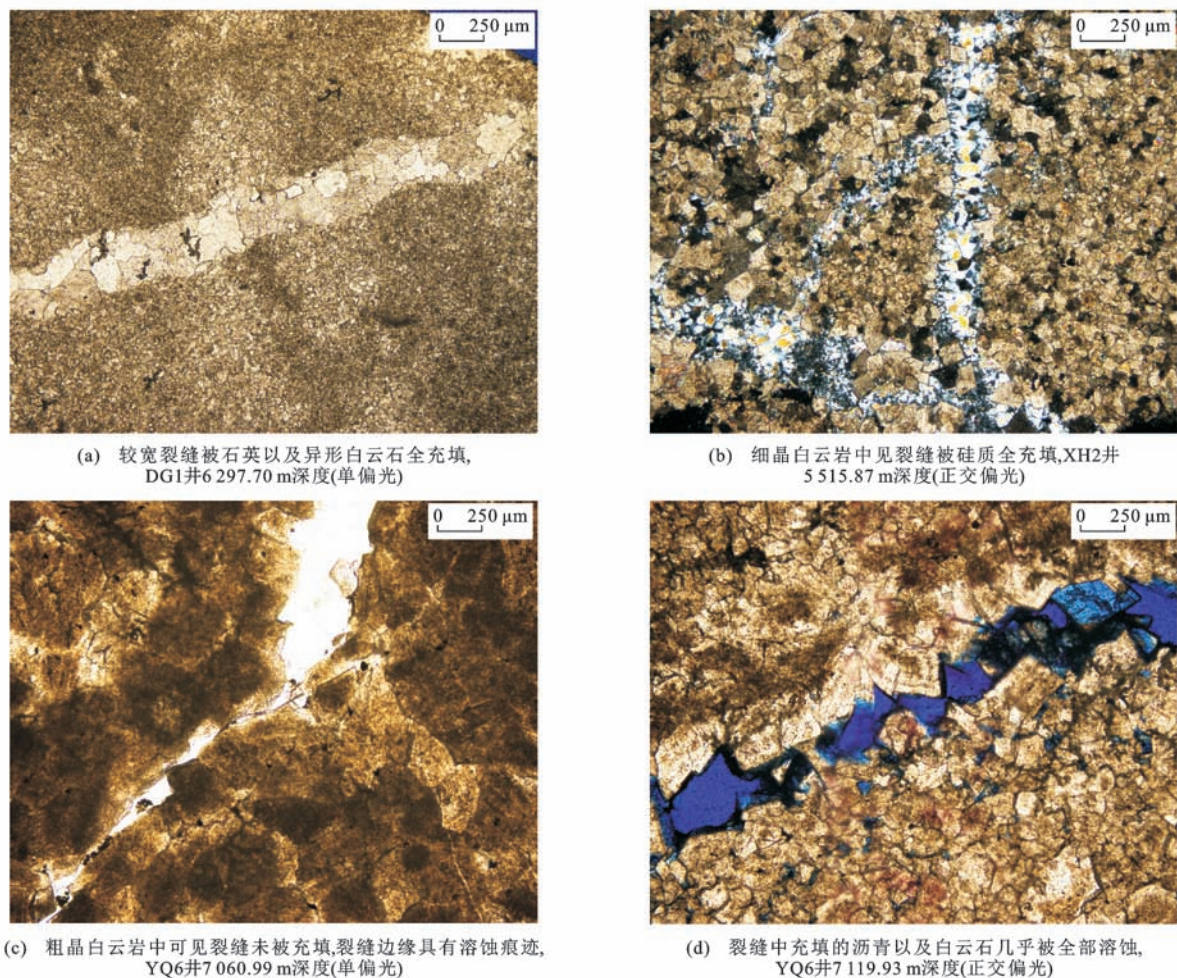


图 11 塔北地区寒武系白云岩储层裂缝充填情况的显微镜下特征

Fig. 11 Microscopic Features of Fracture Fillings of Cambrian Dolomite Reservoir in the Northern Tarim Basin

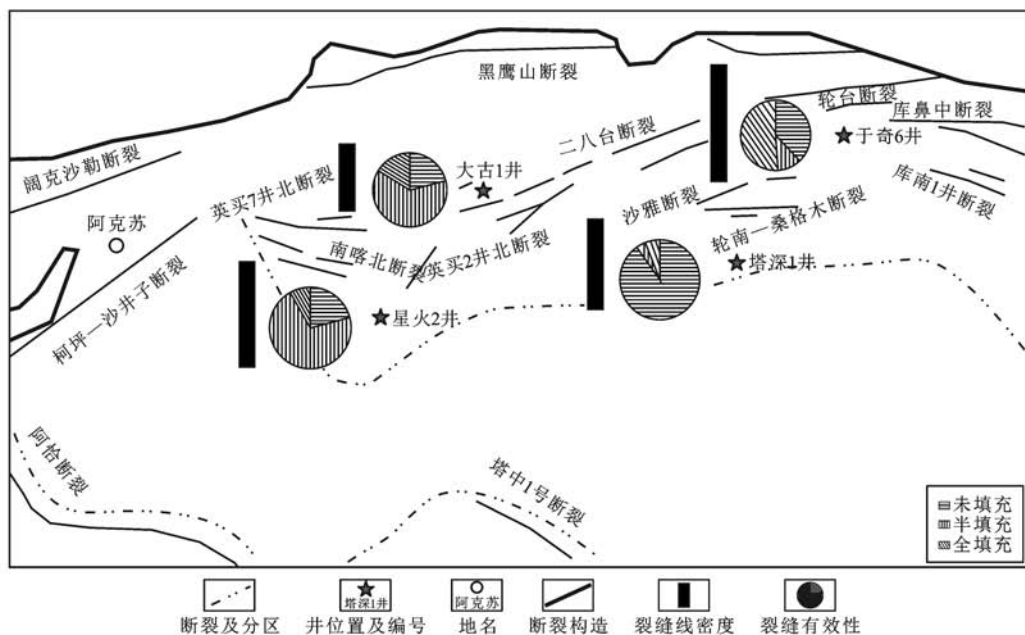


图 12 塔北地区寒武系白云岩储层裂缝有效性以及线密度分布

Fig. 12 Effectiveness and Distribution of Linear Density of Fracture of Cambrian Dolomite Reservoir in the Northern Tarim Basin

在扫描电镜下,细小的自生石英晶间孔中充填丝状伊利石以及黏土矿物的溶蚀残余,据此认为天山南地区表生作用强烈,导致大量黏土矿物充填缝洞,埋藏后黏土矿物在转化或是遭受溶蚀时释放氧化硅,为第一期充填石英的物质来源。肖冬生等在鄂尔多斯盆地地下石盒子组的研究中也提出相似的观点,认为黏土矿物的转化蚀变是自生石英的主要来源^[37]。后期地层被热液流体侵入,深部流体携带的大量硅质可能为第二期裂缝中较粗大的充填石英提供了硅源。综上所述,天山南地区充填石英分为两期:第一期来源于黏土矿物的转化与溶蚀后释放的硅沉淀析出;第二期来源于深部热液中携带的硅质充填。

5 结 语

(1)塔北地区寒武系白云岩储层整体裂缝发育。天山南地区主要发育单一分布的立缝或高角度斜缝,偶见派生网状裂缝,裂缝线密度及其纵向变化在不同井位上表现出较强的差异性;塔河地区比天山南地区更发育平缝,常见平缝切开岩芯,裂缝线密度整体较高,随深度增加均表现出物性变好的趋势。

(2)塔河地区方解石充填共分为4期,对应的温度区间分别为70℃~100℃、100℃~130℃、130℃~180℃及180℃以上,其中前3期为地层内成岩流体成因,最后一期为自下部运移而来的200℃高温热液流体成因。天山南地区的充填白云石可分为3期,对应的温度区间分别为70℃~90℃、90℃~110℃及110℃以上,其成岩流体均与深部热液无关,而是地层内的成岩流体成因;充填石英分为两期,第一期对黏土矿物转化蚀变来源,第二期可能为热液成因来源。

(3)塔河地区与天山南地区裂缝有效性差异明显。天山南地区由于大量石英的充填与较弱的后期溶蚀导致裂缝有效性较差;塔河地区裂缝线密度大且有效性好,发育未充填裂缝以及半充填裂缝,为有利的勘探地区,推测其原因为构造作用形成大量裂缝且未被全部充填,而后期主要的充填矿物被大量溶蚀后形成储集空间。

参 考 文 献 :

References :

- [1] 马 锋,杨柳明,顾家裕,等.世界白云岩油气田勘探综述[J].沉积学报,2011,29(5):1010-1021.
MA Feng, YANG Liu-ming, GU Jia-yu, et al. The Summary on Exploration of the Dolomite Oilfields in the World[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2011, 29

(5):1010-1021.

- [2] 彭 军,王雪龙,韩浩东,等.塔里木盆地寒武系碳酸盐岩溶蚀作用机理模拟实验[J].石油勘探与开发,2018,45(3):415-425.
PENG Jun, WANG Xue-long, HAN Hao-dong, et al. Simulation for the Dissolution Mechanism of Cambrian Carbonate Rocks in Tarim Basin, NW China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2018, 45(3): 415-425.
- [3] 倪新锋,杨海军,沈安江,等.塔北地区奥陶系灰岩段裂缝特征及其对岩溶储层的控制[J].石油学报,2010,31(6):933-940.
NI Xin-feng, YANG Hai-jun, SHEN An-jiang, et al. Characteristics of Ordovician Limestone Fractures in the Northern Tarim Basin and Their Controlling Effects on Karst Reservoirs[J]. Acta Petrolei Sinica, 2010, 31(6):933-940.
- [4] 吴国强,张丽娟,杨振周,等.塔里木盆地哈拉哈塘地区奥陶系储层古岩溶作用及其与裂缝的关系[J].石油实验地质,2017,39(6):790-796.
WU Guo-qiang, ZHANG Li-juan, YANG Zhen-zhou, et al. Paleo-karstification of the Ordovician Carbonate Reservoirs and the Relationship with Fractures in the Halahatang Area of Tarim Basin[J]. Petroleum Geology and Experiment, 2017, 39(6):790-796.
- [5] 石书缘,刘 伟,姜 华,等.塔北哈拉哈塘地区古生代断裂-裂缝系统特征及其与奥陶系岩溶储层关系[J].中南大学学报(自然科学版),2015,46(12):4568-4577.
SHI Shu-yuan, LIU Wei, JIANG Hua, et al. Characteristics of Paleocene Fault-fracture System and Their Relationship with Ordovician Paleokarst Reservoirs in Halahatang Area, North Tarim Basin[J]. Journal of Central South University(Science and Technology), 2015, 46(12):4568-4577.
- [6] 能 源,杨海军,邓兴梁.塔中古隆起碳酸盐岩断裂破碎带构造样式及其石油地质意义[J].石油勘探与开发,2018,45(1):40-50.
NENG Yuan, YANG Hai-jun, DENG Xing-liang. Structural Patterns of Fault Broken Zones in Carbonate Rocks and Their Influences on Petroleum Accumulation in Tazhong Paleo-uplift, Tarim Basin, NW China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2018, 45(1):40-50.
- [7] 彭 军,曹俊娇,李 斌,等.塔北与巴楚下丘里塔格群白云岩储层特征对比[J].西南石油大学学报(自然科学版),2018,40(2):1-14.
PENG Jun, CAO Jun-jiao, LI Bin, et al. Comparison of

- Dolomite Reservoir Characteristics Between the Northern Tarim Basin and Lower Qiulitage Group of Bachu[J]. Journal of Southwest Petroleum University (Science and Technology Edition), 2018, 40(2): 1-14.
- [8] 于峻川, 莫宣学, 董国臣, 等. 塔里木北部二叠纪长英质火山岩年代学及地球化学特征[J]. 岩石学报, 2011, 27(7): 2184-2194.
- YU Jun-chuan, MO Xuan-xue, DONG Guo-chen, et al. Felsic Volcanic Rocks from Northern Tarim, NW China; Zircon U-Pb Dating and Geochemical Characteristics[J]. Acta Petrologica Sinica, 2011, 27(7): 2184-2194.
- [9] 何春波, 汤良杰, 黄太柱, 等. 塔里木盆地塔中地区底辟构造与油气关系[J]. 大庆石油学院学报, 2009, 33(5): 5-10.
- HE Chun-bo, TANG Liang-jie, HUANG Tai-zhu, et al. Diapir Structure and Its Relationship with Petroleum Accumulation in Tazhong Area, Tarim Basin[J]. Journal of Daqing Petroleum Institute, 2009, 33(5): 5-10.
- [10] 王家豪, 庞雄, 王存武, 等. 珠江口盆地白云凹陷中央底辟带的发现及识别[J]. 地球科学, 2006, 31(2): 209-213.
- WANG Jia-hao, PANG Xiong, WANG Cun-wu, et al. Discovery and Recognition of the Central Diapiric Zone in Baiyun Depression, Pearl River Mouth Basin[J]. Earth Science, 2006, 31(2): 209-213.
- [11] 胡九珍, 刘树根, 冉启贵, 等. 塔东地区寒武系一下奥陶统成岩作用特征及对优质储层形成的影响[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 2009, 36(2): 138-146.
- HU Jiu-zhen, LIU Shu-gen, RAN Qi-gui, et al. Diagenetic Characteristics and Their Effect on the Formation of Good-quality Reservoirs of the Cambrian System to Lower Ordovician in the East of Tarim Basin, Xinjiang, China[J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science and Technology Edition), 2009, 36(2): 138-146.
- [12] 刘永福, 殷军, 孙雄伟, 等. 塔里木盆地东部寒武系沉积特征及优质白云岩储层成因[J]. 天然气地球科学, 2008, 19(1): 126-132.
- LIU Yong-fu, YIN Jun, SUN Xiong-wei, et al. Cambrian Sedimentary Characteristics and Origin of High-quality Dolomite Reservoirs in Eastern Tarim Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 2008, 19(1): 126-132.
- [13] 张聪, 于炳松, 樊太亮, 等. 塔里木盆地北部下奥陶统碳酸盐岩孔洞充填物特征及其成岩环境分析[J]. 地学前缘, 2008, 15(2): 100-108.
- ZHANG Cong, YU Bing-song, FAN Tai-liang, et al. The Characteristics of Cave Fillings of Carbonates in the Lower Ordovician and Their Diagenetic Environments in Northern Tarim Basin[J]. Earth Science Frontiers, 2008, 15(2): 100-108.
- [14] OGIESOBA O C, HART B S. Fault Imaging in Hydrothermal Dolomite Reservoirs: A Case Study[J]. Geophysics, 2009, 74(3): 71-82.
- [15] DIEHL S F, HOFSTRA A H, KOENIG A E, et al. Hydrothermal Zebra Dolomite in the Great Basin, Nevada: Attributes and Relation to Paleozoic Stratigraphy, Tectonics, and Ore Deposits[J]. Geosphere, 2010, 6(5): 663-690.
- [16] PEARCE M A, TIMMS N E, HOUGH R M, et al. Reaction Mechanism for the Replacement of Calcite by Dolomite and Siderite: Implications for Geochemistry, Microstructure and Porosity Evolution During Hydrothermal Mineralisation[J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 2013, 166(4): 995-1009.
- [17] WILLIAMS G E. Hydrothermal Alteration of Britain's Oldest Palaeosols: Saddle Dolomite and Smectite at the Lewisian-Torridon Group (Early Neoproterozoic) Unconformity, NW Scotland[J]. Scottish Journal of Geology, 2015, 51(1): 63-68.
- [18] 朱东亚, 金之钧, 胡文瑄. 塔中地区热液改造型白云岩储层[J]. 石油学报, 2009, 30(5): 698-704.
- ZHU Dong-ya, JIN Zhi-jun, HU Wen-xuan. Hydrothermal Alteration Dolomite Reservoir in Tazhong Area[J]. Acta Petrologica Sinica, 2009, 30(5): 698-704.
- [19] 张乐, 姜在兴, 郭振廷. 构造应力与油气成藏关系[J]. 天然气地球科学, 2007, 18(1): 32-36.
- ZHANG Le, JIANG Zai-xing, GUO Zhen-ting. Relationship Between Structural Stress and Hydrocarbon Bearing Pool Formation[J]. Natural Gas Geoscience, 2007, 18(1): 32-36.
- [20] 党犇, 赵虹, 付金华, 等. 鄂尔多斯盆地沉积盖层构造裂缝特征研究[J]. 天然气工业, 2005, 25(7): 14-16.
- DANG Ben, ZHAO Hong, FU Jin-hua, et al. Characteristics of Structural Fractures in Sedimentary Strata of E'erdusi Basin[J]. Natural Gas Industry, 2005, 25(7): 14-16.
- [21] 关雎, 李军, 郭秀丽. 塔中地区碳酸盐岩储集层测井评价[J]. 石油勘探与开发, 1998, 25(4): 84-86.
- GUAN Ju, LI Jun, GUO Xiu-li. Carbonate Reservoir Logging Evaluation for Tazhong Field[J]. Petroleum Exploration and Development, 1998, 25(4): 84-86.
- [22] 陈清华, 刘池阳, 王书香, 等. 碳酸盐岩缝洞系统研究现状与展望[J]. 石油与天然气地质, 2002, 23(2): 196-201.
- CHEN Qing-hua, LIU Chi-yang, WANG Shu-xiang,

- et al. Study on Carbonate Fracture-cavity System: Status and Prospects[J]. *Oil and Gas Geology*, 2002, 23(2): 196-201.
- [23] 王宏强. 鄂尔多斯中生代盆地构造应力场特征及其转换与沉积-构造格局[D]. 西安: 西北大学, 2001.
WANG Hong-qiang. Tectonic Stress Field Characteristics and Its Transition Laws and Tectonic-sedimentary Framework in Mesozoic Ordos Basin[D]. Xi'an: Northwest University, 2001.
- [24] 贾承造. 中国塔里木盆地构造特征与油气[M]. 北京: 石油工业出版社, 1997.
JIA Cheng-zao. Tectonic Characteristics and Petroleum in Tarim Basin, China[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1997.
- [25] LUCZAJ J A, HARRISON W B, WILLIAMS N S. Fractured Hydrothermal Dolomite Reservoirs in the Devonian Dundee Formation of the Central Michigan Basin[J]. *AAPG Bulletin*, 2006, 90(11): 1787-1801.
- [26] DAVIES G R, SMITH L B. Structurally Controlled Hydrothermal Dolomite Reservoir Facies: An Overview[J]. *AAPG Bulletin*, 2006, 90(11): 1641-1690.
- [27] 汤良杰, 漆立新, 邱海峻, 等. 塔里木盆地断裂构造分期差异活动及其变形机理[J]. *岩石学报*, 2012, 28(8): 2569-2583.
TANG Liang-jie, QI Li-xin, QIU Hai-jun, et al. Poly-phase Differential Fault Movement and Hydrocarbon Accumulation of the Tarim Basin, NW China[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2012, 28(8): 2569-2583.
- [28] 陈楚铭, 卢华复, 王国强, 等. 塔里木盆地塔北隆起叠加构造分析[J]. *高校地质学报*, 1998, 4(3): 55-63.
CHEN Chu-ming, LU Hua-fu, WANG Guo-qiang, et al. Analyses of Superimposed Structures in the North Tarim Uplift, Tarim Basin[J]. *Geological Journal of China Universities*, 1998, 4(3): 55-63.
- [29] 何登发, 贾承造, 李德生, 等. 塔里木多旋回叠合盆地的形成与演化[J]. *石油与天然气地质*, 2005, 26(1): 64-77.
HE Deng-fa, JIA Cheng-zao, LI De-sheng, et al. Formation and Evolution of Polycyclic Superimposed Tarim Basin[J]. *Oil and Gas Geology*, 2005, 26(1): 64-77.
- [30] 秦启荣, 苏培东. 构造裂缝类型划分与预测[J]. *天然气工业*, 2006, 26(10): 33-36.
QIN Qi-rong, SU Pei-dong. Classification and Prediction of Structural Fractures Types[J]. *Natural Gas Industry*, 2006, 26(10): 33-36.
- [31] VAN GOLF-RACHT T D. 裂缝油藏工程基础[M]. 陈钟祥, 金玲年, 秦同洛, 译. 北京: 石油工业出版社, 1989.
VAN GOLF-RACHT T D. Fundamentals of Fractured Reservoir Engineering[M]. Translated by CHEN Zhong-xiang, JIN Ling-nian, QIN Tong-luo. Beijing: Petroleum Industry Press, 1989.
- [32] 朱井泉, 吴仕强, 王国学, 等. 塔里木盆地寒武—奥陶系主要白云岩类型及孔隙发育特征[J]. *地学前缘*, 2008, 15(2): 67-79.
ZHU Jing-quan, WU Shi-qiang, WANG Guo-xue, et al. Types and Porosity Characteristics of the Cambrian-Ordovician Dolostones in Tarim Basin[J]. *Earth Science Frontiers*, 2008, 15(2): 67-79.
- [33] 蔺 军, 周芳芳, 袁国芬. 塔河地区寒武系储层深埋藏白云石化特征[J]. *石油与天然气地质*, 2010, 31(1): 13-21.
LIN Jun, ZHOU Fang-fang, YUAN Guo-fen. Features of Deep-burial Dolomitization of the Cambrian Reservoirs in Tahe Region[J]. *Oil and Gas Geology*, 2010, 31(1): 13-21.
- [34] 张 鹏, 侯贵廷, 潘文庆, 等. 塔里木盆地寒武系白云岩构造裂缝发育特征[J]. *海相油气地质*, 2014, 19(3): 51-56.
ZHANG Peng, HOU Gui-ting, PAN Wen-qing, et al. Development Characteristics of Structural Fractures in Cambrian Dolostone, Tarim Basin[J]. *Marine Origin Petroleum Geology*, 2014, 19(3): 51-56.
- [35] 张 鹏, 侯贵廷, 潘文庆, 等. 塔里木盆地震旦—寒武系白云岩储层构造裂缝有效性研究[J]. *北京大学学报(自然科学版)*, 2013, 49(6): 993-1001.
ZHANG Peng, HOU Gui-ting, PAN Wen-qing, et al. Research on the Effectiveness of Fractures in Sinian-Cambrian Dolomite Reservoir in Tarim Basin[J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 2013, 49(6): 993-1001.
- [36] 刘 迪. 塔里木盆地深层寒武系储层特征及形成机理研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2013.
LIU Di. Study on Characteristics and Formation Mechanism of Deep Cambrian Reservoirs in Tarim Basin[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2013.
- [37] 肖冬生, 付 强. 鄂尔多斯盆地北部杭锦旗区块下石盒子组自生石英形成机制[J]. *岩石矿物学杂志*, 2011, 30(1): 113-120.
XIAO Dong-sheng, FU Qiang. The Genetic Mechanism of Authigenic Quartz in Lower Shihezi Formation of Hanggin Banner, Northern Ordos Basin[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 2011, 30(1): 113-120.