

# 温度对油砂力学性质的影响规律研究

高彦芳<sup>1,2</sup>, 陈 勉<sup>1,2</sup>, 林伯韬<sup>1,2</sup>, 金 衍<sup>1,2</sup>, 陈 森<sup>3</sup>, 于会永<sup>3</sup>

(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) 石油工程学院, 北京 102249;  
3. 新疆油田工程技术研究院, 新疆 克拉玛依 834000)

**摘要:** 油砂储层天然沥青含量及黏度极高, 热力开采过程中的高温环境对油藏应力场和变形量的影响非常大, 目前多采用高温高压条件下的三轴试验模拟真实热力开采条件下的储层岩石变形特征。为了掌握储层岩石在与热力开采过程相一致的应力/温度路径下的应力-应变关系及力学性能参数, 统计分析加拿大 Athabasca 和 Cold Lake、委内瑞拉 Faja、我国克拉玛依油砂的力学性质随温度的演化规律, 并从微观角度解释温度对不同地区油砂宏观力学参数影响规律的异同。研究发现, 不同地区油砂的力学性质受温度的影响程度存在明显差异, 其中 Cold Lake 和克拉玛依油砂的力学性质受温度影响较大。根据温度对标准化力学参数的统计规律分析, 发现高温下油砂力学性质的演化存在 3 种模式, 其主要取决于泥质/沥青的含量、矿物颗粒的压碎/重排列程度、天然沥青的黏度、胶结物及胶结类型等因素。研究可以为油砂热力开采过程中的储层地质力学理论分析和数值模拟提供参考。

**关键词:** 岩石力学; 油砂; 温度; 压力; 力学性质; 微观结构

**中图分类号:** TU 45

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000 - 6915(2018)11 - 2520 - 16

## Thermal influences on mechanical properties of oil sands

GAO Yanfang<sup>1,2</sup>, CHEN Mian<sup>1,2</sup>, LIN Botao<sup>1,2</sup>, JIN Yan<sup>1,2</sup>, CHEN Sen<sup>3</sup>, YU Huiyong<sup>3</sup>

(1. State Key Laboratory of Petroleum Resources and Prospecting, China University of Petroleum, Beijing 102249, China;

2. College of Petroleum Engineering, China University of Petroleum, Beijing 102249, China;

3. Oil Production Technology Research Institute, PetroChina Xinjiang Oilfield Company, Karamay, Xinjiang 834000, China)

**Abstract:** Oil sand reservoir is filled with the rich viscous bitumen, so the high temperature can make a significant influence on the reservoir stress/deformation in thermal recovery. High-temperature and high-pressure triaxial compression test is usually used for the modeling of reservoir deformation. To acquire the stress-strain response as well as the mechanical properties under the stress/temperature conditions corresponding to thermal operations, the effects of temperature on mechanical properties of oil sands in Athabasca, Cold Lake, Faja(Venezuela), and Karamay were studied. The microstructure of different oil sands was investigated to interpret the temperature-induced mechanical properties. It was concluded that the thermal effects on different oil sands differ greatly and that oil sands in Cold Lake and Karamay are more thermosensitive. According to the statistical analysis for normalized parameters under varying temperatures, it was found that the thermomechanical response for different oil sands can be divided into three patterns, determined by factors like the content of fine or bitumen, the degree of mineral grain crushing/rearrangement, the viscosity of bitumen and the cements and cementation types.

**收稿日期:** 2018 - 06 - 05; **修回日期:** 2018 - 07 - 23

**基金项目:** 国家青年科学基金资助项目(51404281)

Supported by the National Science Foundation for Young Scientists of China(Grant No. 51404281)

**作者简介:** 高彦芳(1991 - ), 男, 2015 年毕业于中国石油大学(北京)石油工程专业, 现为博士研究生, 主要从事石油工程岩石力学方面的研究工作。

E-mail: yanfang\_gao@163.com. 通讯作者: 陈 勉(1962 - ), 博士, 现任教授、博士生导师。E-mail: chenmian@vip.163.com

**DOI:** 10.13722/j.cnki.jrme.2018.0635

**Key words:** rock mechanics; oil sand; temperature; pressure; mechanical properties; microstructure

## 1 引言

稠油、超稠油和沥青等非常规油气资源主要分布在加拿大西部和委内瑞拉东部盆地的砂岩储层中<sup>[1]</sup>。我国超稠油资源非常丰富, 其中新疆准噶尔盆地西北边缘地区浅部地层的超稠油储量最大, 约有 3.6 亿吨。新疆风城超稠油具有极高的黏度, 其在低于 80 °C 的储层温度下是无法流动的<sup>[2]</sup>。这种在原始油藏条件下表现为固态或近似固态的特超稠油也被称为天然沥青, 原始储层环境下其黏度在几十万~几千万 MPa·s 范围<sup>[3]</sup>, 是无法通过二次采油或提高采收率技术开采的<sup>[4]</sup>。目前新疆风城超稠油油田主要采用蒸汽辅助重力泄油(steam assisted gravity drainage, SAGD)的生产方式开采沥青<sup>[5]</sup>, 开采过程中注入的高温高压蒸汽可以将储层温度加热到 250 °C 以上, 有效改善稠油的流动能力。

SAGD 生产过程中的储层地质力学问题一直是油田工程师非常关心的问题。一方面, 采用地质力学手段可以有效改善 SAGD 不同生产阶段地层流体的渗流能力和地层的传热能力, 提高原油流动速度和储层传热效率; 另一方面, 储层尤其是近井壁附近地层的应力-变形分析可以为储层段的生产管柱疲劳破坏、井筒出砂、压裂增产等环节提供不可或缺的基础力学依据。油砂作为一种富含天然沥青的未胶结疏松砂岩, 高温环境对其力学行为的影响不容忽视<sup>[6-8]</sup>。在热力开采过程中, 油砂孔隙中沥青的黏度随着储层温度增加逐渐降低, 原先不流动的固态沥青熔化为液态, 与孔隙水形成油水两相流, 更有利于孔隙流体的排出<sup>[9]</sup>。沥青黏度的降低也会导致颗粒之间的胶结强度降低<sup>[10]</sup>, 在复杂应力状态下, 油砂颗粒可能会发生弹性接触、滑动(剪胀)、滚动和压碎等多种现象<sup>[11]</sup>, 从而使油藏应力和变形场发生动态演化。SAGD 开采过程中储层实际上同时发生 4 种现象, 即骨架变形、流体渗流、热传递和蒸汽及沥青的相变, 温度在这 4 种现象中都起到非常关键的作用。

油砂是一种具有内嵌互锁结构的独特密砂, 其砂粒呈角砾状, 且棱角轮廓明显, 它与一般的密砂和砂岩在矿物组分、微观结构和力学特性等方面存在较大差异<sup>[12-13]</sup>。油砂粒间充填大量的沥青和黏土混杂胶结物, 由于这些胶结物对温度的敏感性极强, 这使得油砂的力学特性受温度的影响非常大。大量

三轴剪切试验发现, 油砂高温下的力学行为与砂岩、土等存在较大差异<sup>[14-16]</sup>。因此, 国内外学者一般将油砂作为一种介于岩石和土之间的特殊介质来研究。

虽然不同地区油砂在矿物及黏土含量、骨架微观结构、稠油黏度等方面有所差异, 但是它们也具有统一的共性, 如疏松的骨架结构、角砾状颗粒相互嵌入的互锁结构、高黏度沥青的强胶结作用等。在样本数足够多的情况下, 不同地区油砂的力学性能随温度的变化应该是存在一定统计规律的。本文调研了加拿大 Athabasca 和 Cold Lake、委内瑞拉 Faja、我国克拉玛依油砂的高温高压三轴试验, 统计分析了不同地区油砂力学性质随温度的演化规律, 并从微观角度解释了温度对不同地区油砂宏观力学参数影响规律的异同。本研究可以为油砂热力开采过程中的储层地质力学理论分析和数值模拟提供参考。

## 2 国内外油砂力学参数对比分析

为了模拟热力开采过程中的油砂储层地质力学响应, 国内外学者通过大量的高温高压三轴排水剪切试验研究储层实际应力和温度路径下的油砂强度和应力-变形关系。目前, 关于围压对油砂力学行为影响的研究较多, 近几十篇文献讨论了 2 种及以上不同围压下的油砂力学行为, 如 K. M. Kosar 等<sup>[9, 13, 17-22]</sup>研究了加拿大 Athabasca 油砂在 1~7 MPa 有效围压下的应力-应变演化规律, K. M. Kosar 等<sup>[9, 11, 21]</sup>研究了加拿大 Cold Lake 油砂在 1~8 MPa 有效围压和小于 0.75 MPa 低有效围压下的力学行为, S. C. Blair 等<sup>[10]</sup>研究了委内瑞拉 Faja 油砂及其泥页岩盖层的力学性质, 高彦芳等<sup>[6-8, 15-18]</sup>研究了我国克拉玛依油砂在 0.5~5 MPa 有效围压下的应力-应变响应。然而, 关于温度对油砂力学行为影响的研究极少, 仅有几篇文献讨论了 2 种及以上不同温度下的油砂力学行为。高彦芳等<sup>[6-11, 15-19]</sup>通过对油砂样品在多种压力和温度下的三轴力学试验, 分析了各自油砂样品的力学性能随温度的变化规律。这些油砂样品来自加拿大 Athabasca 和 Cold Lake、委内瑞拉 Faja、我国克拉玛依等地区, 但是由于试验样品数量少, 且不同地区油砂的组构存在差异, 导致国内外学者在试验结果及机制解释方面存在明显分歧, 如 B. Lin 等<sup>[8-10, 15]</sup>虽然都认为温度对油砂力学行为影响很大, 但是 K. M. Kosar<sup>[9]</sup>将原

因解释为高温下油砂颗粒发生压碎和重排列，以及低渗透的泥页岩薄夹层阻碍了孔隙压力的消散速率，S. C. Blair 等<sup>[10]</sup>解释为油砂泥页岩成分良好的压缩性能，以及沥青黏度大大降低有利于孔隙流体的排出，B. Lin 等<sup>[8, 15]</sup>则认为是泥质和沥青混杂胶结物的温度敏感性较强引起的。J. G. Agar 等<sup>[17-18]</sup>则认为温度对油砂力学行为的影响可以忽略，指出虽然高温环境下沥青黏度降低和骨架力学扰动有利于孔隙压力的消散，但是温度对力学行为的影响不大。

加拿大 Alberta(Athabasca 和 Cold Lake)、委内瑞拉 Faja 以及我国新疆克拉玛依是世界油砂资源的 3 大重要产地之一。这 3 个地区的油砂油藏参数及其对比如表 1<sup>[8, 23]</sup>所示。调研发现，国内外约有 6 篇文献记载了不同温度下油砂三轴排水剪切试验得到的应力 - 应变曲线。这些试验所使用的油砂样品的基础物理和力学性质如表 2 所示。这些基础物理和力学性质包括取样地点、埋深、岩性描述、初始孔隙度、密度、弹性模量、泊松比、剪切强度。文献中记载的各个试验的详细操作参数如表 3 所示。这些试验参数包括试验设备、井下取心保存及运输技术、室内取心技术、试样尺寸、扰动系数、温度、B 系数、有效围压、最大固结压力、应变/应力加载速率、最大轴向应变、温度加载速率。通过不同围压和温度下的三轴排水剪切试验，获取其轴向应变 - 偏应力及轴向应变 - 体应变曲线(某些较早的文献没有记载轴向应变 - 体应变曲线)，初步分析温度对其力学行为的影响，并结合微观结构图像解释其机制。

### 2.1 委内瑞拉 Faja 油砂试验

1987 年，美国 Lawrence Livermore 国家实验室的 Blair 研究团队采用取自委内瑞拉 Faja 地区的油砂和富含沥青的泥页岩盖层，通过高温高压下的三

轴排水剪切试验研究了压力和温度对两类油砂样品力学性质的影响规律<sup>[10]</sup>。Blair 试验的测试温度为 23 °C，125 °C，250 °C，围压为 0.1~300 MPa，孔隙压力始终保持为围压的 1/2，其中当围压为 0.1 MPa 时，认为此时油砂处于单轴压缩状态。Faja 油砂单轴压缩试验稳定性较差，应力 - 应变曲线没有明显规律。Faja 油砂的抗压强度不超过 2 MPa，125 °C 下的强度最低仅为 0.25 MPa。在 5~25 MPa 的有效围压下，当轴向应变小于 10%时，Faja 油砂一直处于强化阶段，且高温下的强化程度较大。Faja 泥页岩单轴压缩试验表现出明显的应变软化特征，具有稳定的残余强度，但是由于不同试样之间的非均质性较强，很难比较温度对其力学性质的影响。三轴压缩时，Faja 泥页岩高温下的刚度和剪切强度明显高于常温。

如图 1 所示，Faja 油砂的单轴压缩强度随温度的增加而降低，这是因为高温下孔隙中沥青的黏度大大降低，胶结作用减弱，在无侧压的情况下极易发生破坏；当围压较高时，高温下骨架变形使孔隙中黏度较低的原油排出，颗粒与颗粒之间的直接接触使强度增加。

高围压下，含油斑的 Faja 泥页岩夹层在高温下的剪切强度为常温下的 2 倍，这是因为高温下的泥页岩压缩性能较好，导致密度增加，孔隙度降低，同时沥青黏度大大降低，这些因素都有利于孔隙流体的排出和颗粒之间的接触。

### 2.2 加拿大 Athabasca 油砂试验

1984 年，Alberta 大学的 J. G. Agar 等<sup>[17-18]</sup>采用取自加拿大 Athabasca 地区 McMurray 地层油砂，进行高温高压下的三轴排水剪切试验研究。Agar 试验的测试温度为 20 °C，125 °C，200 °C，有效围压为 4~8 MPa。围压为 4 MPa 时，125 °C 下的刚度、剪

表 1 加拿大、委内瑞拉和我国油砂油藏参数及其对比<sup>[8, 23]</sup>

Table 1 Parameters of reservoir properties for oil sands in Canada, Venezuela and China<sup>[8, 23]</sup>

国家	主要产地	沉积盆地	沉积环境	沉积相	构造特征	地质年代	主要产层	埋深/m	储层厚度/m	主要矿物组成				孔隙度/%	沥青黏度 (20 °C) / (MPa · s)	含油饱和度/%	渗透率/mD	垂直/水平应力比
										石英/%	凝灰岩/%	长石/%	泥质/%					
加拿大	Alberta, Athabasca	加拿大西部沉积盆地	海相、陆相	河流、河口湾	逆冲断裂, 向斜	中白垩纪	McMurray	150~550	17~70	>95	<2	少量	<0.5	33~35	5×10 <sup>5</sup> ~10 <sup>6</sup>	75~80	5 000~10 000	0.5~1
	Alberta, Cold Lake	加拿大西部沉积盆地	海相、陆相	分流河道、潮汐水道	逆冲断裂, 向斜	中白垩纪	Clearwater	450~550	10~40	15~40	<20	25~35	4~6	32~33	7×10 <sup>5</sup> ~10 <sup>6</sup>	50~70	2 000~4 000	0.15~0.5
委内瑞拉	Faja del Orinoco	东委内瑞拉盆地	陆相、海相	河流、海洋边缘	向斜	第三纪	Oficina	350~1 000	8~45	>95	-	-	<0.5	27~32	4×10 <sup>3</sup> ~5×10 <sup>3</sup>	88~90	2 000~15 000	-
我国	克拉玛依风城	准噶尔盆地	陆相	辫状河流	断褶带, 背斜	侏罗系	齐古组、八道湾组	190~450	10~42	27.8	31.9	18.6	2.5~9.6	28~35	>10 <sup>6</sup>	50~75	927~3 748	0.5~0.7

表 2 调研文献中油砂试验样品的基础物理和力学参数  
Table 2 Parameters of physico-mechanical properties for oil sands in studied literatures

国别	研究区块	埋深/m	岩性描述	初始孔隙度/%	密度/(g·cm <sup>-3</sup> )	弹性模量/MPa	泊松比	剪切强度/MPa	参考文献
委内瑞拉	Faja	976~979	灰色, 细颗粒岩石, 带有黑色富油质夹层	-	2.03	314~381 (23 °C)	-	5.4~5.7 (23 °C)	S. C. Blair 等 <sup>[10]</sup>
		999~1000	黑色, 富油质, 含油量 80%	-	1.88	35~67 (23 °C)	-	0.99~1.35 (23 °C)	
		1008~1009	黑色, 富油质	-	1.95	57~133 (125 °C)	-	0.35 (125 °C)	
		-	细-中粒径, 均匀级配, 泥质含量 0.5%~2.4%, 含水量 1.2%~3.6%, 含油量 14.5%~19%, 泥质含量 36%~72%(主要为泥质胶结物和碎屑), 沥青含量 6%~13%, 水含量 4%~7%, 固体含量 83%~87%, 初始饱和度 95%	33.4~35.9	2.050~2.092	2200(4)	-	17(4)	
加拿大	Athabasca, McMurray Formation	295	中粒, 均匀级配, 富油质, 泥质含量约 5%, 沥青含量 15%, 孔隙压力 2 200 kPa	27.9~35.4	1.99~2.12	244(1)	0.24(1)	2.99(1)	K. M. Kosar 等 <sup>[9, 19]</sup>
		220	中粒, 油质, 含海绿石, 沥青含量 12%, 泥质含量 5%~20%, 孔隙压力 800 kPa	41.9~42.5	1.85~1.89	616(2.5)	0.11(2.5)	8.5(2.5)	
	Northern Athabasca Clearwater Formation	152~161	中粒, 油质, 含海绿石, 沥青含量 12%, 泥质含量 5%~20%, 孔隙压力 800 kPa	40.1~45.7	1.77~1.91	666(1)	0.33(1)	4.8(1)	
		445	细粒, 泥质含量 9%~49%, 沥青含量 4.5%~10.7%, 含水量 16%	40.4~43.8	1.82~1.90	777(1)	0.34(1)	5.85(1)	
	Northern Cold Lake Clearwater Formation	460	均质细粒, 沥青含量 10%~12%, 泥质含量 6%~10%	45.1~49.2	1.66~1.78	311(1)	0.40(1)	3.19(1)	
		490	细粒, 夹杂泥岩和碎屑, 泥质含量 15%, 沥青含量 8%	41.2	1.87	1390(7)	0.12(7)	8.04(7)	
	Cold Lake	475	粉质细粒, 沥青含量 8%, 夹杂泥岩和碎屑, 泥质含量 30%	39.8	1.94	1339(7)	0.27(7)	9.07(7)	
		450	未胶结砂, 含油饱和度 70%, 储层温度 13 °C, 原油黏度 200 Pa·s	32~35	-	200(1)	0.4(1)	4.7(1)	
中国	克拉玛依, 风城油田, Jurassic Qigu formation	430~460	石英含量 29%~69%, 颗粒之间有沥青胶结物	-	1.92~2.02	200.5(0.5)	0.43(0.5)	2.72(0.5)	李存宝等 <sup>[15]</sup>
		303~304	普通油砂, 含水量 1.6%, 含油量 8.5%, 泥质含量 8.2%	0.33/0.17	-	663(0.5)	0.4(0.5)	3.9(0.5)	高彦芳等 <sup>[6-8]</sup>
		380	泥质油砂, 含水量 2.1%, 泥质含量 21.5%, 含油量 9.1%	0.33/0.16	-	282(0.5)	0.2(0.5)	1.6(0.5)	
		264	油质油砂, 含水量 1.2%, 含油量 13.7%, 泥质含量 6.7%	0.37/0.13	-	673(0.5)	0.4(0.5)	6.3(0.5)	

注: 由于油砂骨架非常疏松, 难以进行单轴压缩试验, 一般施加≥0.5 MPa 的有效围压, 并根据该围压下的应力-应变曲线计算弹性模量和泊松比, 括号中的值为试验温度或有效围压, 默认温度和有效围压分别为 20 °C 和 0.05 MPa; 剪切强度为三轴剪切试验中对应的最大剪应力(最大偏应力)。

表 3 调研文献中的油砂三轴试验参数  
Table 3 Parameters of triaxial experiments in studied literatures

来源	试验设备	井下取心、保存及运输	室内取心	试样尺寸(长度×直径)/(mm×mm)	扰动系数/%	温度/°C	B 系数	有效围压/MPa	最大固结压力/MPa	应变/应力加载速率	最大轴向应变	温度加载速率/(°C·h <sup>-1</sup> )
S. C. Blair 等 <sup>[10]</sup>	高温三轴压缩试验装置, 最大工作围压>300 MPa, 温度>250 °C	井下部分冷冻取心, 长度 0.5~1 m, -20 °C 冰箱储存	自主设计沙箱, 旋转取心工具	标准圆柱 50.8×25.4	-	23, 125, 250	-	0.05~150	-	-	0.1	-
J. G. Agar 等 <sup>[17-18]</sup>	高温三轴压缩试验装置, 最大工作围压 30 MPa, 温度 300 °C	井下冷冻取心, 直径 100 mm, 密封, 干冰包裹, -20 °C 冰箱储存	冷冻条件下取心钻机取心	标准圆柱 150×75	1~8.8	20, 125, 200	0.77~0.88	4~8	80 kPa/min	0.02	-	-
K. M. Kosar 等 <sup>[9, 19]</sup>	高温高压土工试验装置, 最大工作围压 27 MPa, 温度 315 °C, 轴压 440 kN	井下取心筒取心, 包括不旋转内筒和 PVC 衬套, 密封, 干冰包裹, -20 °C~-25 °C 下存储和运输	冷冻条件下取心钻机取心	标准圆柱 100×50	6.4~31.2	20, 125, 225	0.32~1	1~7	2~3	5×10 <sup>-7</sup> s <sup>-1</sup>	0.1	-
R. C. K. Wong 等 <sup>[11]</sup>	标准三轴试验设备, 最大工作压力 70 MPa, 高温 300 °C, 孔压敏感度 3 kPa, 轴压 2 200 kN	传统双管取心筒, 内置 PVC 衬套, 内径为 89 mm, PVC 衬套切割成 1 m 长, 密封, 冷冻, 储存	土工方法取样, 修剪	标准圆柱 175×89	-	20, 65, 110, 200	0.7~1	1~8	2~18	-	0.04	-
李存宝等 <sup>[15]</sup>	MTS 815 Flex Test GT 岩石力学试验系统	冬天进行井下取心, 干冰包裹, -10 °C 冷冻运输、储存	冰冻状态下机床加工	标准圆柱 200×100	-	20, 75, 125	-	0.5~5	1~10	0.03 mm/min	0.1	6
高彦芳等 <sup>[6-8]</sup>	GCTS RTR - 1500 高温高压岩石三轴仪	冬天进行井下取心, 温度为 -20 °C, 干冰包裹, -20 °C 运输、储存	液氮取心/薄壁圆筒取心	标准圆柱 76×38	-	20, 45, 70	0.86~0.92	0.5~5	5	0.03 mm/min	0.09	10

注: 由于液氮取心的效率较低, 借鉴土力学中土样的取心手段, 采用自主发明的薄壁圆筒取心法进行取心, 大大提高了取心效率, 且扰动系数基本不变<sup>[24-25]</sup>; 根据加载方式的不同, 轴向载荷的加载方式分为应力加载、应变加载和位移加载 3 种, 单位分别为 kPa/min, min<sup>-1</sup> 和 mm/min, 调研文献中出现了这 3 种加载方式。

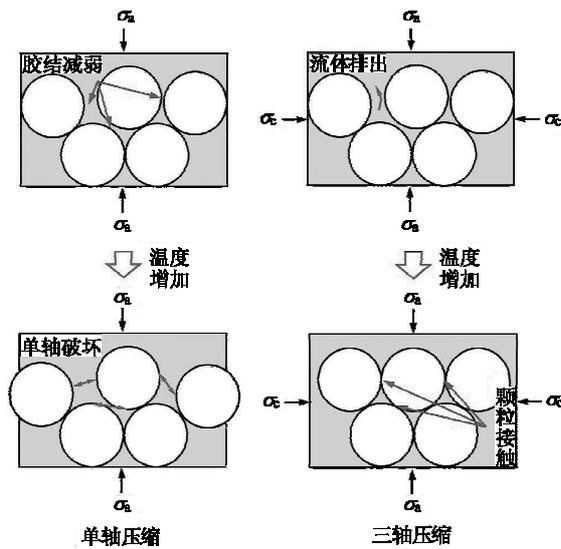


图1 单轴和三轴压缩试验中温度对油砂强度的影响机制  
 Fig.1 Microstructure interpretations for effects of temperature on strength of oil sands under uniaxial and triaxial drained compression conditions

胀量和剪切强度比 20 °C 下的大；200 °C 下的剪切强度最小，但是刚度略大于 20 °C。8 MPa 下 20 °C 和 200 °C 下的应力 - 应变行为比较相似，但是发现剪胀比剪切屈服率先出现。J. G. Agar 等<sup>[17-18]</sup>对油砂试样进行了电镜扫描试验，发现原始地层条件下 Athabasca 油砂具有相互嵌入的互锁结构(见图 2)，温度增加使孔隙中的沥青和水排出后，重压实使颗粒与颗粒之间呈切线接触，互锁结构明显遭到破坏。J. G. Agar 等<sup>[17-18]</sup>试验的油砂含油量高，泥质含量低，砂粒级配均匀，高温下的剪切强度和应力 - 应变行为取决于高温下矿物颗粒的强度和颗粒破碎及重排列的程度。由于高温下石英颗粒比黏土抵抗破碎的能力强，因此高温对低泥质 Athabasca 油砂的力学性质影响不大。

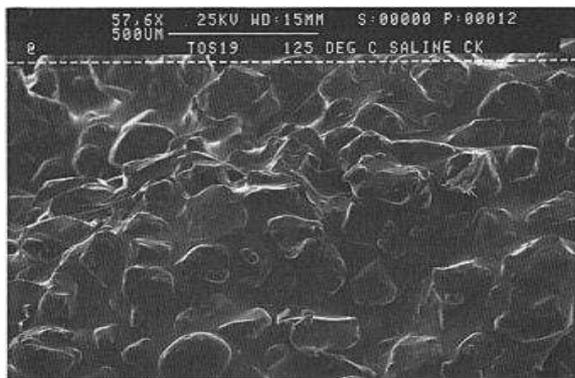


图2 高含油、低泥质 McMurray 油砂原始微观结构  
 Fig.2 Undisturbed microstructure of high quality, low fines McMurray oil sands

1989年，Alberta 大学的 K. M. Kosar<sup>[9]</sup>采用取

自加拿大 Athabasca 地区 UTF 地层的油砂，进行一系列高温高压下的三轴排水剪切试验研究。Kosar 试验的测试温度为 20 °C，125 °C，225 °C，有效围压为 1~7 MPa。所有试样均发生应变软化和体积剪胀现象，温度增加明显增加了油砂的初始刚度、剪切强度和剪胀量。这是因为 UTF 地层富泥质油砂含大量不连续泥页岩薄夹层，这些泥质成分的热固结增加了油砂的强度和初始刚度。低渗透的泥页岩薄夹层会严重阻碍孔隙流体的排出，而储层加热会明显增加孔隙压力，若孔隙压力消散速率低于温度引起的孔隙压力增加速率，就会导致油砂的有效应力和剪切强度降低(见图 3)。显然，对于 UTF 地层油砂而言，孔隙压力的消散相对顺利，泥质成分的热固结效应竞争能力比阻碍孔隙消散强，这可能是因为试验的加载速率非常小的原因(仅为  $5 \times 10^{-7} \text{ s}^{-1}$ )。

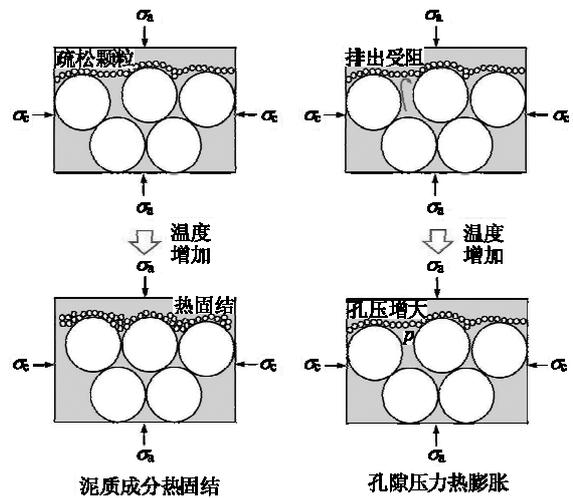


图3 温度对含泥页岩薄夹层的油砂强度的影响机制  
 Fig.3 Microstructure interpretations for effects of temperature on strength of high fines oil sands

### 2.3 加拿大 Cold Lake 油砂试验

1989年，Alberta 大学的 K. M. Kosar<sup>[9]</sup>采用取自加拿大 Cold Lake 地区 Clearwater 地层 3 个位置的油砂，进行一系列高温高压下的三轴排水剪切试验研究。Kosar 试验的测试温度为 20 °C，125 °C，225 °C，有效围压为 1~7 MPa。取样地点 1 处的油砂只有在低有效围压下(1 MPa)发生剪胀现象，且高温下的剪切强度小，剪胀体积较大。4 MPa 有效围压下虽然发生应变软化现象，但是体积一直在减小，且温度增加使剪切强度减小。取样地点 2/3 处的油砂在 4~7 MPa 的有效围压下没有出现应变软化和剪胀现象，温度对其力学参数的影响不大。图 4 为 Cold Lake 取样地点 1 处的原状油砂的电镜扫描图像，可

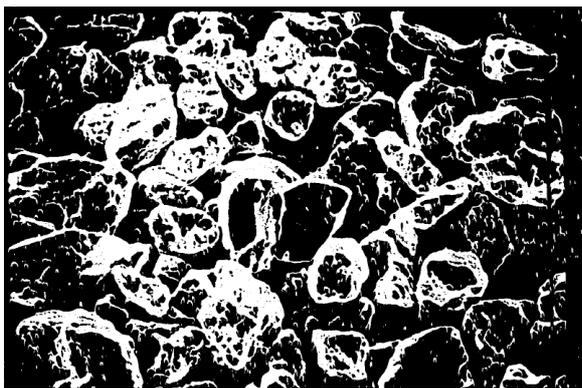


图 4 Cold Lake Clearwater 地层取样地点 1 油砂原始微观结构  
Fig.4 Undisturbed microstructure of oil sands in Cold Lake location No.1 oil sands

知颗粒接触关系主要为相切(点)接触和线接触(tangential and long contacts)2 种类型, Athabasca 油砂中经常出现的互锁式接触并没有体现。Cold Lake 油砂颗粒多而饱满, 颗粒之间的接触非常充分。高温条件下, 颗粒发生很大程度的压碎、重排列, 而且破碎的碎屑填充在大颗粒之间。高温下 Cold Lake 油砂的剪切强度不仅取决于高温下矿物颗粒的强度, 还取决于高温下颗粒压碎和颗粒重排列的程度, 因为 Cold Lake 油砂包含高温高压下极易发生物理破坏的矿物组分。高温下颗粒破碎程度较大可能是造成其剪切强度减小的原因。

1993 年, Calgary 大学的 R. C. K. Wong 等<sup>[11]</sup>采用取自加拿大 Cold Lake 地区 Esso Leming 试验区的油砂, 进行一系列高温高压下的循环加载三轴排水剪切试验。采用同一块岩芯在不同温度下进行循环加载试验, 避免了试验非均质性对油砂力学参数测试结果的影响。R. C. K. Wong 等<sup>[11]</sup>试验的测试温度为 20 °C, 65 °C, 110 °C, 200 °C, 有效围压为 1~8 MPa。围压为 1 MPa 时, 油砂在多种温度下均出现了明显的应变软化现象, 114 °C 下的应变软化是 23 °C 下的延续, 加热到 195 °C 后油砂的残余强度略有增加。围压为 4.5 MPa 时, 加热到 102 °C 对油砂强度的影响较小, 但是温度增加到 200 °C 时的强度增加了 3 MPa 左右。21 °C 下的重加载曲线证明强度的永久性增加, 说明高温高压环境产生的热压缩导致强度增加。相同有效围压下, 温度增加使弹性模量增加。由于孔隙流体的热膨胀, 体应变曲线规律性不明显, 总体上看温度对体积应变的影响不是很明显。

R. C. K. Wong 等<sup>[11]</sup>认为 Cold Lake 油砂颗粒在高温高压下的接触关系分为 4 种——接触弹性变

形、剪胀、旋转和压碎, 这 4 种颗粒接触模式决定了油砂三轴压缩过程中的力学性质的演化规律。温度对力学参数影响的微观机制主要体现在 2 个方面: 其一, 高温降低沥青的黏度, 使颗粒之间的接触更加充分, 接触弹性变形变大, 剪胀潜力增加, 颗粒旋转程度加大; 其二, 高温直接影响颗粒的稳定性, 使颗粒发生压碎。

#### 2.4 我国新疆克拉玛依风城油砂试验

2015 年, 李存宝等<sup>[15]</sup>采用取自新疆克拉玛依风城油田的油砂, 进行高温高压下的三轴排水剪切试验。试验温度为 20 °C, 75 °C, 125 °C, 有效围压为 0.5~5 MPa。当有效围压为 0.5 MPa 时, 克拉玛依油砂发生明显应变软化和剪胀扩容, 70 °C 时的刚度、剪切强度和残余强度最大, 20 °C 时的剪胀量最大。当有效围压为 5 MPa 时, 油砂也出现应变软化和剪胀现象, 但是加载结束时的总体积仍然是减小的; 高温下的弹性模量、剪切强度和残余剪切强度较大, 但是高温不利于油砂的剪胀。克拉玛依油砂岩样的颗粒之间存在大量沥青胶结物, 温度升高会导致颗粒之间的胶结强度变弱直至消失, 颗粒之间充分接触, 从而使油砂的刚度、剪切强度明显增大。

2016 年, B. Lin 等<sup>[8]</sup>采用取自新疆克拉玛依风城油田齐古组地层的油砂, 进行高温高压下的三轴排水剪切试验。试验温度为 20 °C, 45 °C, 70 °C, 有效围压为 0.5~5 MPa。克拉玛依油砂在 0.5 MPa 的低围压下发生应变软化和剪胀, 且 20 °C 下的初始刚度、剪切强度和剪胀量均大于 70 °C。5 MPa 有效围压下, 油砂一直处于应变强化阶段, 只发生剪缩。图 5 为该试验所用油砂岩心的电镜扫描图像, 由图可知, 油砂疏松程度高, 颗粒与颗粒之间的接触点、接触面稀少, 角砾状的油砂颗粒棱角分明,

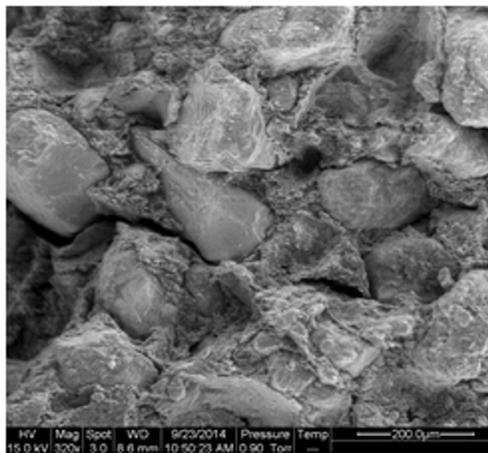


图 5 克拉玛依油砂原始微观结构  
Fig.5 Undisturbed microstructure of oil sands in Karamay

粒间充填大量的沥青和黏土混合物。高温下，粒间充填的沥青因黏度降低而被排出，黏土胶结物的结构遭到破坏，胶结强度变弱，同时颗粒之间距离变近，但是泥质成分的存在不至于使颗粒充分接触，因此高温下的刚度、剪切强度变低。温度升高，油砂基质的塑性增强，导致砂粒迅速充填由于剪胀致使的体积扩容部分，使剪胀量降低。

### 3 温度对油砂力学参数的影响规律

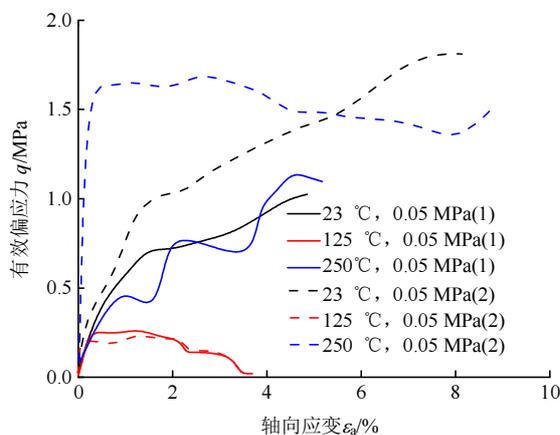
节 2 详细给出了国内外学者针对不同地区油砂进行三轴剪切试验的试验条件(温度和有效围压)、基本力学参数变化趋势及油砂微观结构特征分析。作为本研究的基础资料，本文给出了不同温度下 Athabasca, Cold Lake, Faja 和 克拉玛依油砂试验的典型轴向应变 - 偏应力及轴向应变 - 体应变曲线，以此统计分析得到不同围压和温度下的油砂力学参数。

#### 3.1 典型轴向应变 - 偏应力及轴向应变 - 体应变曲线

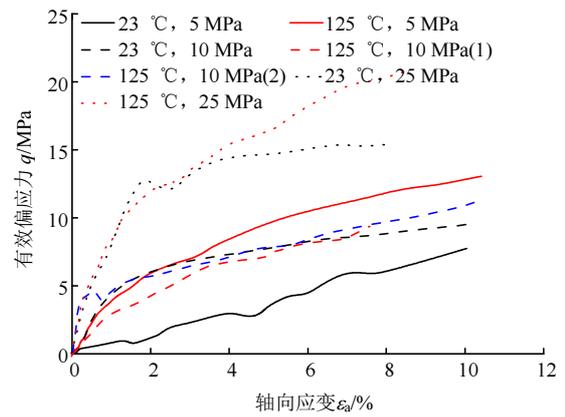
图 6, 7 为 S. C. Blair 等<sup>[10]</sup>分别采用委内瑞拉 Faja 油砂及其泥页岩夹层岩心进行三轴剪切试验得到的轴向应变 - 偏应力曲线(图例中第 1 个数字表示温度，第 2 个数字表示有效围压，括号中的数字表示同种温度和压力条件下，针对多个油砂试样的不同测试结果，下同)。

图 8 为 J. G. Agar<sup>[17]</sup>针对 Athabasca 地区 McMurray 地层油砂岩心进行三轴剪切试验得到的轴向应变 - 偏应力及轴向应变 - 体应变曲线。

图 9 为 K. M. Kosar<sup>[9]</sup>采用加拿大 Athabasca 地区 UTF 地层油砂进行三轴剪切试验得到的轴向应变 - 偏应力及轴向应变 - 体应变曲线。



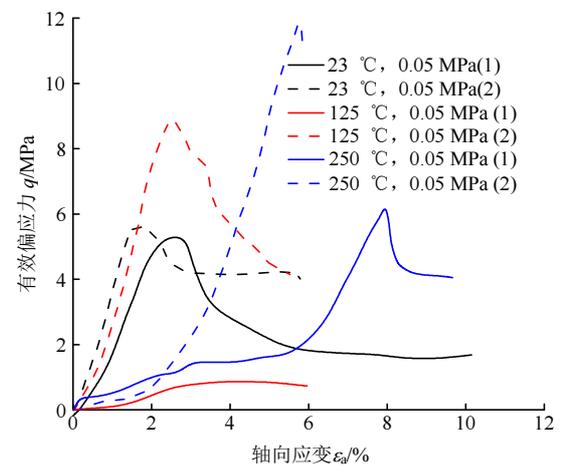
(a) 单轴压缩



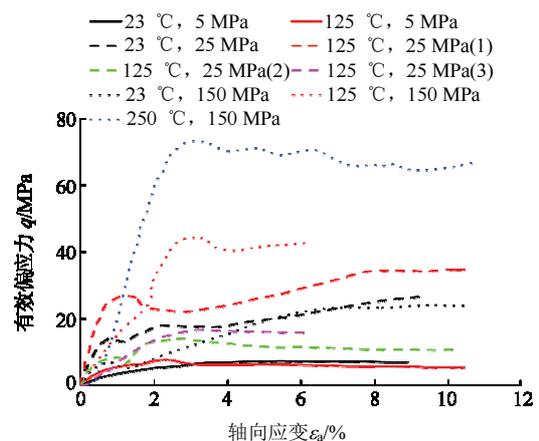
(b) 三轴压缩时的轴向应变 - 有效偏应力曲线

图 6 委内瑞拉 Faja 油砂在单轴压缩和三轴压缩时的轴向应变 - 有效偏应力曲线<sup>[10]</sup>

Fig.6 Curves of axial strain vs. effective deviatoric stress for Faja oil sands under uniaxial compression and triaxial compression<sup>[10]</sup>



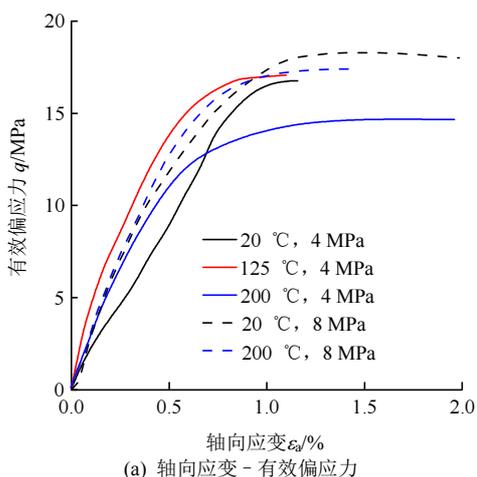
(a) 单轴压缩



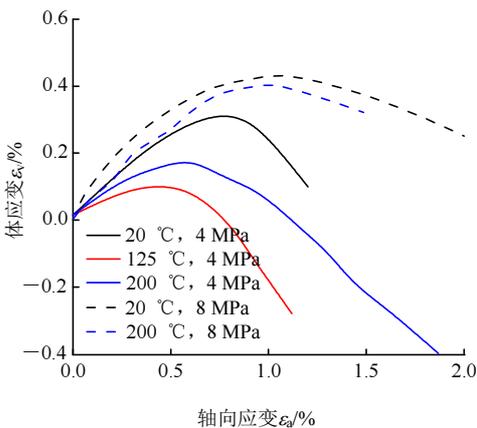
(b) 三轴压缩时的轴向应变 - 有效偏应力关系

图 7 委内瑞拉 Faja 油砂盖层在单轴压缩和三轴压缩时的轴向应变 - 有效偏应力关系<sup>[10]</sup>

Fig.7 Curves of axial strain vs. effective deviatoric stress for bitumen-rich Faja shale caprock under uniaxial compression, and triaxial compression<sup>[10]</sup>



(a) 轴向应变 - 有效偏应力

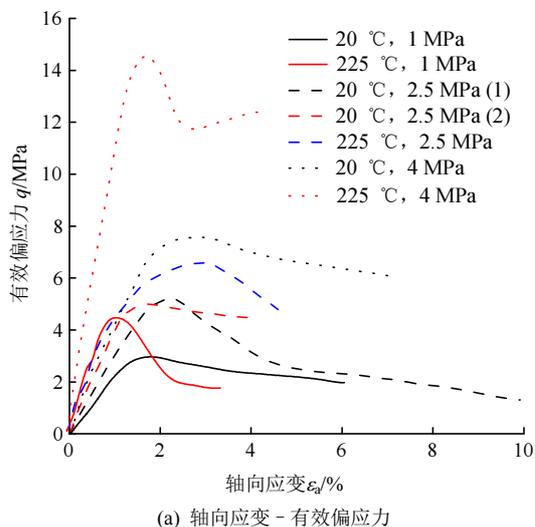


(b) 轴向应变 - 体应变的关系

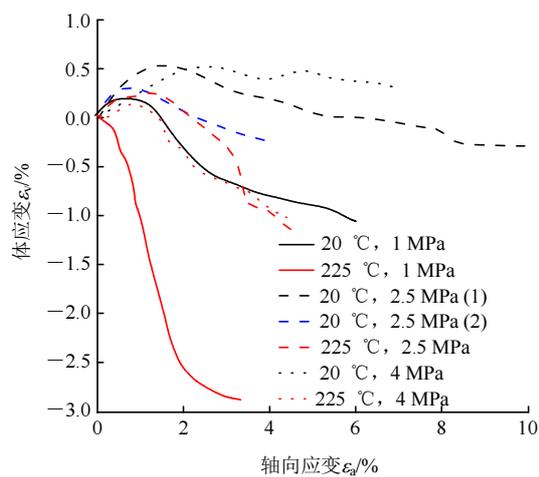
图 8 Athabasca McMurray 地层油砂三轴压缩时轴向应变 - 有效偏应力和轴向应变 - 体应变的关系<sup>[17]</sup>

Fig.8 Relationships between axial strain vs. effective deviatoric stress, and axial strain vs. volumetric strain for Athabasca McMurray Formation oil sands<sup>[17]</sup>

图 10, 11 为 K. M. Kosar<sup>[9]</sup>分别采用 Cold Lake 地区 Clearwater 地层取样地点 1(深度 445 m)、取样地点 2/3(深度 460/490 m)油砂进行试验得到的轴向应变 - 偏应力及轴向应变 - 体应变曲线。



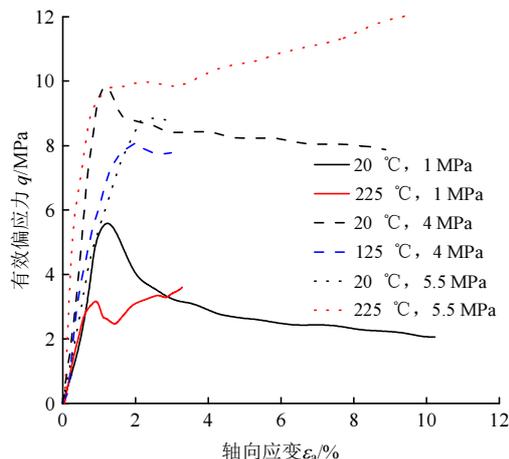
(a) 轴向应变 - 有效偏应力



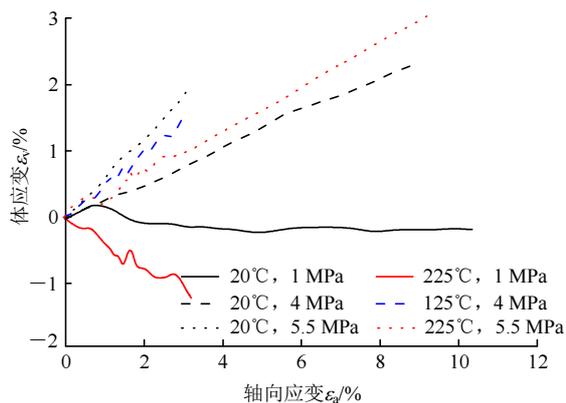
(b) 轴向应变 - 体应变的关系

图 9 Athabasca UTF 油砂三轴压缩时轴向应变 - 有效偏应力和轴向应变 - 体应变的关系<sup>[9]</sup>

Fig.9 Relationships between axial strain vs. effective deviatoric stress, and axial strain vs. volumetric strain for Athabasca UTF oil sands<sup>[9]</sup>



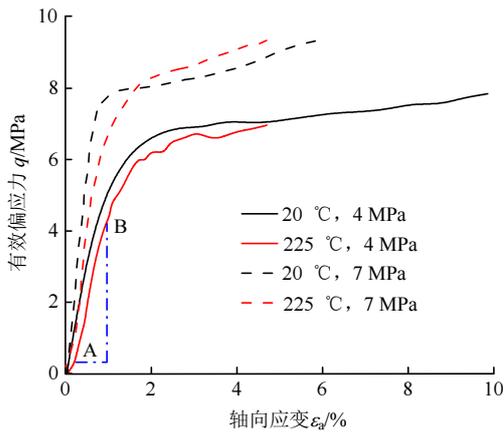
(a) 轴向应变 - 有效偏应力



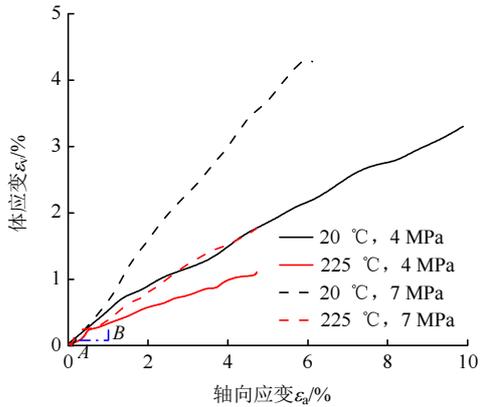
(b) 轴向应变 - 体应变的关系

图 10 Cold Lake Clearwater Formation 取样地点 1 油砂三轴压缩轴向应变 - 有效偏应力和轴向应变 - 体应变的关系<sup>[9]</sup>

Fig.10 Relationships between axial strain vs. effective deviatoric stress, and axial strain vs. volumetric strain for Cold Lake location No.1 oil sands<sup>[9]</sup>



(a) 轴向应变 - 有效偏应力



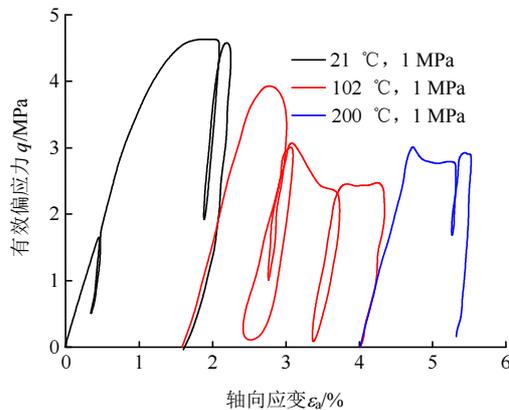
(b) 轴向应变 - 体应变的关系

图 11 Cold Lake Clearwater Formation 取样地点 2/3 油砂三轴压缩轴向应变 - 有效偏应力和轴向应变 - 体应变的关系<sup>[9]</sup>

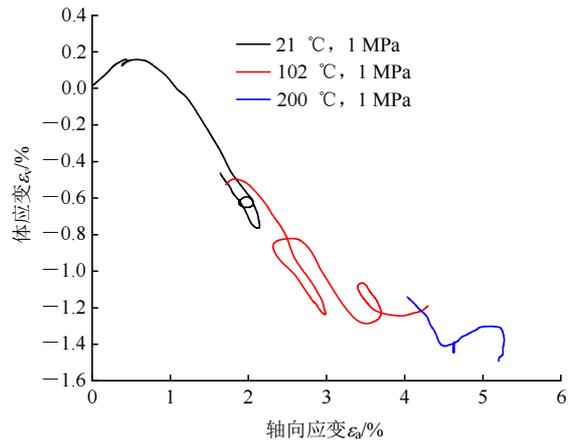
Fig.11 Relationships between axial strain vs. effective deviatoric stress, and axial strain vs. volumetric strain for Cold Lake location No.2 and No.3 oil sands<sup>[9]</sup>

图 12, 13 为 R. C. H. Wong<sup>[11]</sup>采用 Cold Lake 油砂分别在 1 和 4.5 MPa 有效围压下进行循环加载时的轴向应变 - 偏应力及轴向应变 - 体应变曲线。

图 14 为李存宝等<sup>[15]</sup>采用克拉玛依油砂进行三



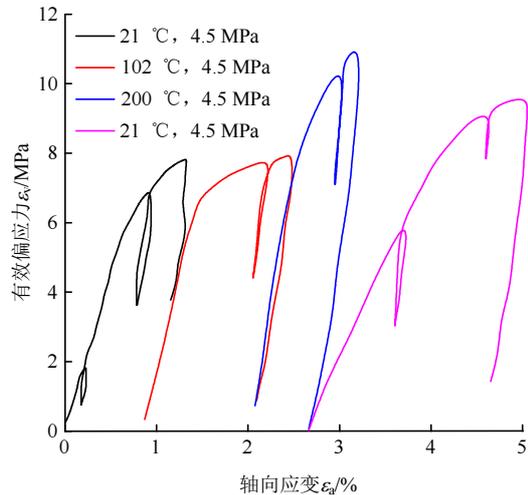
(a) 轴向应变 - 有效偏应力和



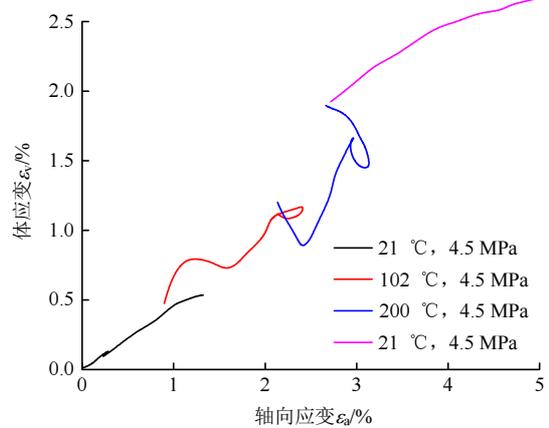
(b) 轴向应变 - 体应变的关系(有效围压 1 MPa)

图 12 加拿大 Cold Lake 油砂循环加载时轴向应变 - 有效偏应力和轴向应变 - 体应变的关系(有效围压 1 MPa)<sup>[11]</sup>

Fig.12 Relationships between axial strain vs. effective deviatoric stress, and axial strain vs. volumetric strain for Cold Lake oil sands(effective confining pressure 1 MPa)<sup>[11]</sup>



(a) 轴向应变 - 有效偏应力



(b) 轴向应变 - 体应变的关系(有效围压 4.5 MPa)

图 13 加拿大 Cold Lake 油砂循环加载时轴向应变 - 有效偏应力和轴向应变 - 体应变的关系(有效围压 4.5 MPa)<sup>[11]</sup>

Fig.13 Relationships between axial strain vs. effective deviatoric stress, and axial strain vs. volumetric strain for Cold Lake oil sands(effective confining pressure 4.5 MPa)<sup>[11]</sup>

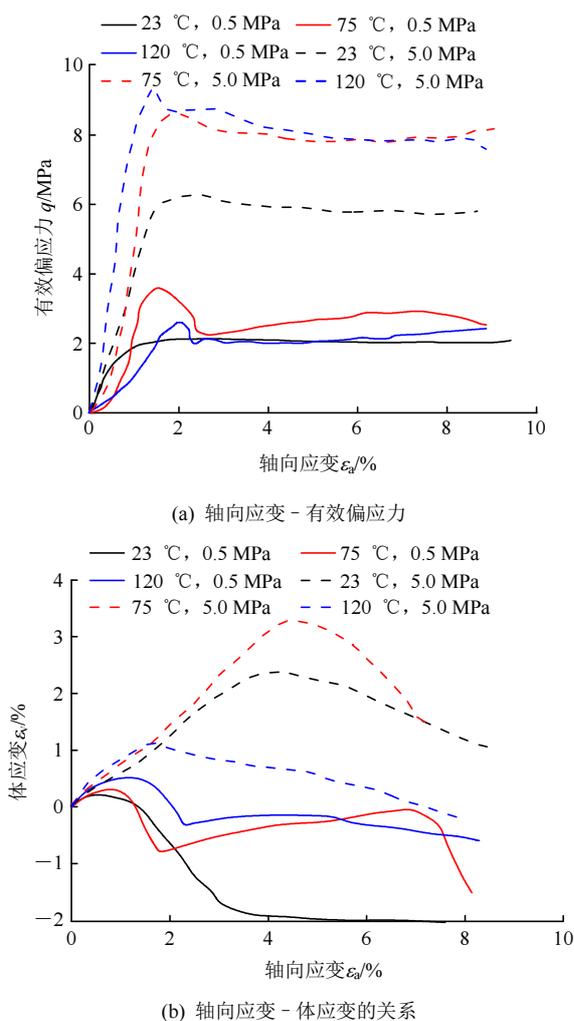


图 14 新疆克拉玛依油砂三轴压缩时轴向应变 - 有效偏应力和轴向应变 - 体应变的关系<sup>[15]</sup>

Fig.14 Relationships between axial strain vs. effective deviatoric stress, and axial strain vs. volumetric strain for Karamay oil sands<sup>[15]</sup>

轴试验得到的轴向应变 - 偏应力及轴向应变 - 体应变曲线。

图 15 为林伯韬等<sup>[8]</sup>采用克拉玛依油砂进行三轴试验得到的轴向应变 - 偏应力及轴向应变 - 体应变曲线。

通过调研高彦芳等<sup>[6-11, 15-19]</sup>中的轴向应变 - 偏应力及轴向应变 - 体应变曲线可以计算得到油砂试验常见的力学参数, 如弹性模量、泊松比、剪切强度、残余剪切强度、内摩擦角、黏聚力、剪胀量等。S. Helwany<sup>[26]</sup>给出了通过试验确定这些力学参数的方法。李存宝等<sup>[15]</sup>通过试验证明了油砂的弹性模量、剪切强度和残余剪切强度( $G$ )与有效围压( $\sigma_c$ )呈线性正相关关系, 而泊松比( $\nu$ )与有效围压呈线性负相关关系。为了消除围压的干扰, 只研究温度对力学性质的影响, 采用 H. Tian 等<sup>[27]</sup>的方法, 本文将

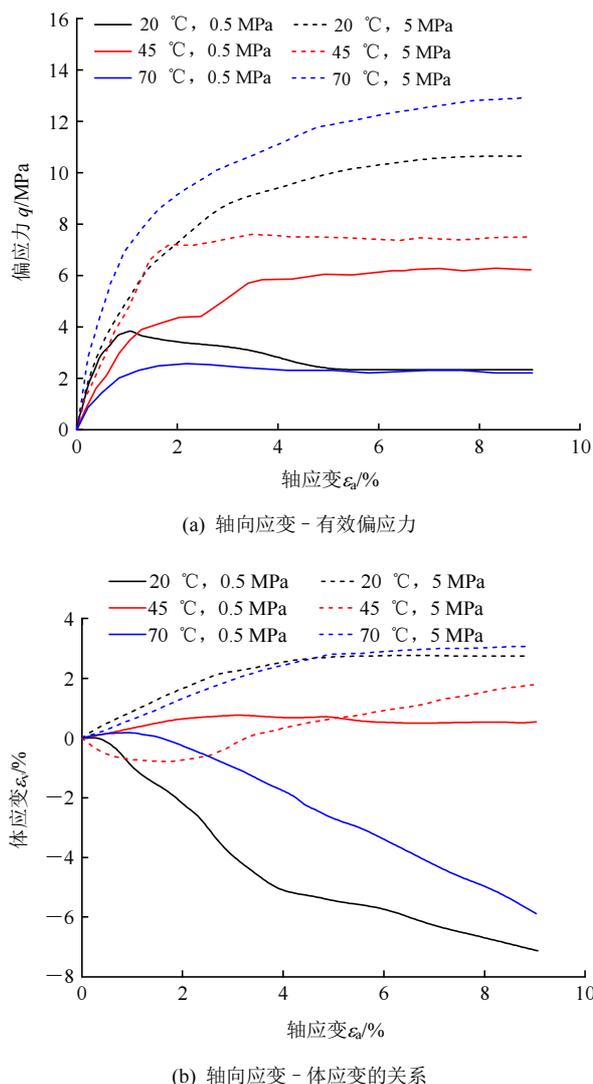


图 15 新疆克拉玛依油砂三轴压缩时轴向应变 - 有效偏应力和轴向应变 - 体应变的关系<sup>[8]</sup>

Fig.15 Relationships between axial strain vs. effective deviatoric stress, and axial strain vs. volumetric strain for Karamay oil sands<sup>[8]</sup>

弹性模量、剪切强度和残余剪切强度除以有效围压, 泊松比乘以有效围压, 以此作为标准化力学参数  $G'$  和  $\nu'$ , 计算式为

$$G' = \frac{G}{\sigma_c} \tag{1}$$

$$\nu' = \nu \sigma_c \tag{2}$$

### 3.2 弹性模量

油砂骨架疏松, 单轴压缩试验很难进行, 因此单轴压缩状态下的弹性模量无法获得<sup>[28]</sup>。弹性模量分为切线弹性模量和割线弹性模量<sup>[29]</sup>, 根据油砂本构模型选择的差异, 不同学者采用不同形式的弹性模量。例如, 采用 Duncan-Chang 模型的文献使用

的是初始弹性模量(切线模量)<sup>[17-18, 20]</sup>, 而采用 Drucker-Prager 本构的文献使用直线段的割线弹性模量<sup>[15, 28]</sup>。本文采用有围压条件下的弹性模量, 采用如下公式计算某一有效围压 $\sigma_c$ 条件下的弹性模量 $E_c$ :

$$E_c = \frac{(\sigma_a)_B - (\sigma_a)_A}{(\varepsilon_a)_B - (\varepsilon_a)_A} = \frac{(q_B + \sigma_c) - (q_A + \sigma_c)}{(\varepsilon_a)_B - (\varepsilon_a)_A} = \frac{q_B - q_A}{(\varepsilon_a)_B - (\varepsilon_a)_A} \quad (3)$$

式中:  $(\sigma_a)_A$ 和 $(\sigma_a)_B$ 分别为A和B点对应的有效轴向应力(MPa);  $q_A$ 和 $q_B$ 分别为A和B点对应的有效偏应力(MPa);  $(\varepsilon_a)_A$ 和 $(\varepsilon_a)_B$ 分别为A和B点对应的轴向应变。根据式(3)和轴向应变-有效偏应力曲线就可以求得试验围压和温度下的弹性模量。本文以图11(a)为例, 计算得到Cold Lake油砂在4 MPa有效围压和225 °C下的弹性模量为630 MPa。

油砂的弹性模量是与围压和温度有相关的<sup>[9-11, 15, 18-19]</sup>。图16为由R. C. K. Wong等<sup>[11]</sup>的应力-应变曲线得到的弹性模量与围压和温度的二元函数关系, 这种图版方法可以估算不同地区油砂在某一围压和温度下的弹性模量。

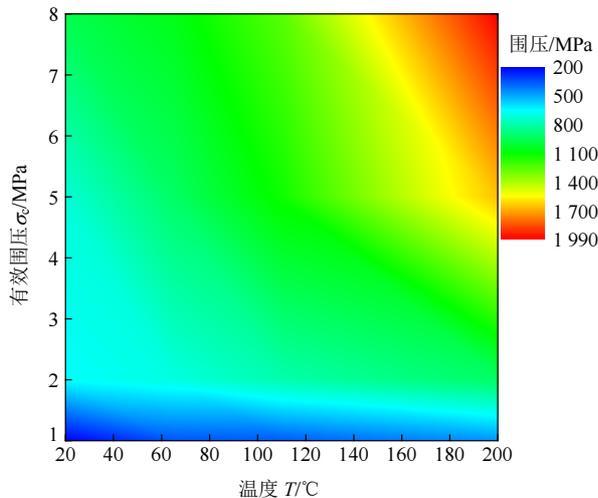


图16 Cold Lake油砂弹性模量与围压和温度的关系图版  
Fig.16 Relationship between elastic modulus and effective confining pressure and temperature

油砂无法进行单轴压缩试验, S. C. Blair等<sup>[10]</sup>尝试在0.05 MPa的有效围压下进行压缩试验, 但是试样在压缩早期就发生屈服, 无法获取有价值的数值。本文将油砂在不同围压下的标准化弹性模量与温度的关系绘制在同一张图中, 以观察温度对油砂弹性模量的统计规律。针对没有明显弹性段的轴向应力-偏应力曲线, 本文没有进行弹性模量的计算; 给出相同温度和围压下的多个弹性模量的, 取其平

均值处理。图17为油砂的标准化弹性模量与温度的关系。图例中第1个字母代表作者(B为S. C. Blair, A为J. G. Agar, K为K. M. Kosar, W为R. C. K. Wong, Li为李存宝, Lin为B. Lin), 第2个字母代表油砂取样地点(F为Faja, A为Athabasca, C为Cold Lake, K为克拉玛依), 第3个数字代表测试的有效围压(MPa), 第4个字母代表加载(L)或卸载(U)。由图17中可知, 在热力开采的温度范围内(20 °C~250 °C), 油砂储层弹性模量的变化在0.5~2.5倍。其中K. M. Kosar<sup>[9]</sup>针对Athabasca油砂在4 MPa有效围压下的弹性模量随温度增加的幅度最大, 225 °C时的弹性模量变为常温下的2.5倍多; B. Lin等<sup>[8]</sup>针对克拉玛依油砂在0.5 MPa有效围压下的弹性模量随温度减小的幅度最大, 70 °C时的弹性模量仅为常温下的1/2。总体来看, 弹性模量随温度变化的规律主要分为单调增加、单调减小和先增加后减小3种。针对不同地区油砂的23个高温试验中, 有15个试验呈现出第1种模式, 5个试验呈现出第2种模式, 而第3种模式只有在3个试验中出现。由此可知, 油砂弹性模量随温度增加而增加是主要模式, 这说明大部分油砂在高温下流体更易排出, 颗粒之间的接触更加充分。第2种模式主要发生在Kosar试验中的Cold Lake油砂, 因为该油砂包含高温高压下极易发生物理破坏的矿物组分, 高温下颗粒破碎程度较大可能是造成其弹性模量减小的主要原因; 实际上Wong试验中的Cold Lake油砂全部呈现出第1种模式, 这说明虽然2批样品取自同一地区, 但是由于取样位置的不同(见表2), Cold Lake油砂展现出严重的非均质性特征。第3种模式主要发生在低有效围压(0.05~0.5 MPa)情况下, 此时存在

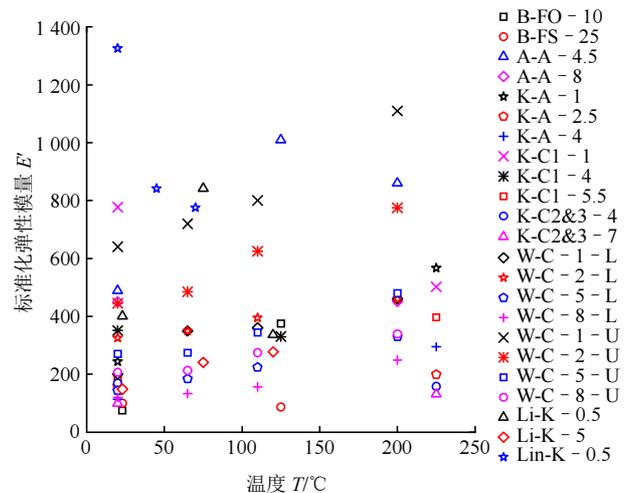


图17 标准化油砂弹性模量与温度的关系  
Fig.17 Relationship between normalized elastic modulus and temperature

一个临界温度<sup>[6-7]</sup>。如图 6, 7 和 14 所示, Faja 及克拉玛依油砂分别在 0.05 和 0.5 MPa 的低有效围压下, 其弹性模量先随温度增加而增加, 达到某一温度后, 弹性模量又随温度增加而降低。在临界温度之前, 油砂孔隙流体排出, 颗粒充分接触, 弹性模量增加; 在临界温度之后, 由于没有围压的固结, 温度引起的孔隙压力增加, 使颗粒在周向上发生张性拉伸, 弹性模量降低。

### 3.3 泊松比

泊松比是反映材料横向变形的弹性常数, 与弹性模量一样, 本文采用有围压下的泊松比。采用如下公式计算某一有效围压 $\sigma_c$ 条件下的泊松比 $\nu_c$ :

$$\nu_c = \frac{(\varepsilon_r)_B - (\varepsilon_r)_A}{(\varepsilon_a)_B - (\varepsilon_a)_A} = \frac{1}{2} \frac{[(\varepsilon_a)_B - (\varepsilon_v)_B] - [(\varepsilon_a)_A - (\varepsilon_v)_A]}{(\varepsilon_a)_B - (\varepsilon_a)_A} = \frac{1}{2} \left[ 1 - \frac{(\varepsilon_v)_B - (\varepsilon_v)_A}{(\varepsilon_a)_B - (\varepsilon_a)_A} \right] \quad (4)$$

式中:  $(\varepsilon_r)_A$  和  $(\varepsilon_r)_B$  分别为 A 和 B 点对应的径向应变,  $(\varepsilon_a)_A$  和  $(\varepsilon_a)_B$  分别为 A 和 B 点对应的体积应变(本文中的体积应变为正值时表示压缩, 因此体积应变可以表示为  $\varepsilon_v = \varepsilon_a - 2\varepsilon_r$ )。根据式(4)和轴向应变 - 体应变曲线就可以求得试验围压和温度下的泊松比。本文以图 11(b)为例, 计算得到 4 MPa 有效围压和 225 °C 下 Cold Lake 油砂的泊松比为 0.25。

在稠油热力开采过程中, 在稳定的注汽压力下, 近井地带的温度可以达到 250 °C 以上。储层压力和温度不同, 油砂泊松比会发生变化<sup>[9]</sup>, 可以采用图 16 的方法将泊松比表示为温度和围压的二元函数, 此处不再绘制。目前, 油砂泊松比和温度的关系讨论较少。高温下的泊松比测试非常困难, 这是因为孔隙流体的热膨胀可能会造成测试结果不可靠<sup>[11]</sup>。由于 S. C. Blair 等<sup>[10]</sup>没有给出轴向应变 - 体应变曲线, R. C. K. Wong 等<sup>[11]</sup>试验得到的轴向应变 - 体应变曲线没有规律性, B. Lin 等<sup>[28]</sup>认为温度对泊松比的影响可以忽略, 因此不同温度下的泊松比数据点比较少。图 18 为油砂标准化泊松比和温度的关系。由图可知, 在热力开采的温度范围内, 泊松比的变化在 0.25~2.75 倍范围。其中 K. M. Kosar<sup>[9]</sup>针对 Cold Lake 油砂在 5.5 MPa 有效围压下的泊松比随温度增加的幅度最大, 225 °C 时的泊松比变为常温下的 2.75 倍; K. M. Kosar<sup>[9]</sup>针对 Athabasca 油砂在 4 MPa 有效围压下的泊松比随温度减小的幅度最大, 225 °C 时的泊松比仅为常温下的 1/4。总体来看, 泊松比随温度变化的规律主要分为单调减小和单调增加 2 种, 其中以第 1 种模式为主。Athabasca

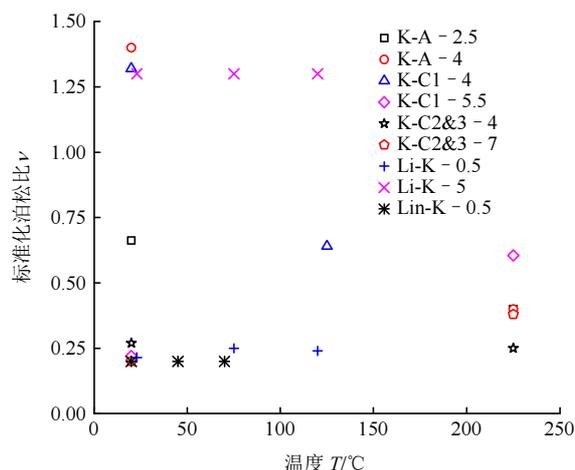


图 18 标准化油砂泊松比与温度的关系

Fig.18 Relationship between normalized Poisson's ratio and temperature

油砂的泊松比随温度增加而降低, 说明油砂中的泥质成分发生热固结, 再加上 Athabasca 油砂颗粒之间的互锁结构, 使油砂在高温下更加致密。泊松比随温度增加的油砂只有 Cold Lake 油砂, 这是因为高温条件下 Cold Lake 油砂颗粒发生很大程度的压碎、重排列, 使破坏后的颗粒呈饼状, 从而增加了横向上变形能力。温度对克拉玛依油砂泊松比的影响不大, 这是因为克拉玛依油砂为颗粒之间的接触较少, 粒间充填大量的沥青和黏土混合物, 温度导致沥青黏度降低, 但是泥质成分的存在使颗粒之间仍存在很强的胶结能力, 因此, 颗粒横向变形的能力变化很小。

### 3.4 剪切强度

油砂的剪切强度是指油砂在三轴排水剪切试验中可以承受的最大有效剪应力<sup>[18]</sup>。在油砂三轴试验中, 有效剪应力为有效轴向应力和有效围压之差, 有效应力等于总应力与孔隙压力之差<sup>[30]</sup>。油砂的剪切强度与围压和温度有关。K. M. Kosar 等<sup>[9-11, 15]</sup>表明, 围压对油砂剪切强度的影响与土类似, 即在相同的温度下, 油砂的剪切强度随着有效围压的增加而增加, 但是温度对油砂剪切强度的影响讨论较少。图 19 为油砂标准化剪切强度和温度的关系。由图可知, 在热力开采的温度范围内, 剪切强度的变化在 0.25~3 范围。其中 S. C. Blair 等<sup>[10]</sup>针对富含油斑的 Faja 泥页岩在 150 MPa 有效围压下的泊松比随温度增加的幅度最大, 250 °C 时的剪切模量变为常温下的 3 倍; K. M. Kosar<sup>[9]</sup>针对 Cold Lake 油砂在 1 MPa 有效围压下的剪切强度随温度减小的幅度最大, 225 °C 时的剪切强度仅为常温下的 1/2。总体来看,

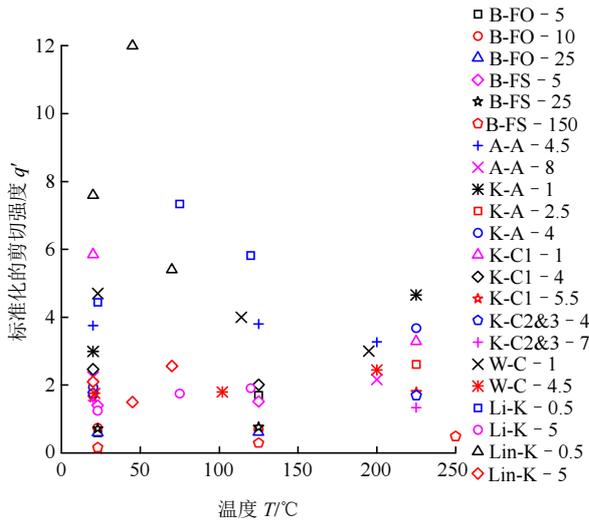


图 19 标准化油砂剪切强度与温度的关系

Fig.19 Relationship between normalized shear strength and temperature

剪切强度随温度变化的规律主要分为单调增加、单调减小、先增加后减小和先减小后增加 4 种。在所有统计的油砂高温试验中，第 1 和第 2 种模式共占了 20 例，第 3 和 4 种模式各占 1 例，这说明大多数油砂随温度增加其剪切强度是单调变化的，不存在临界温度。第 3, 4 种模式主要发生在克拉玛依油砂中，当有效围压较低时，克拉玛依油砂剪切模量随温度的变化呈现第 3 种模式；当有效围压较高时，呈现第 4 种模式。Faja 油砂和 Athabasca 油砂剪切强度随温度变化的模式主要为模式 1，是因为这 2 种油砂高温下的颗粒可以充分接触，稳定性较强，而且泥质成分发生热固结。Cold Lake 油砂剪切强度随温度变化的模式则主要为模式 2，这是由于该油砂在高温下颗粒极不稳定，极易发生破碎及重排列，而且泥质含量少，孔隙排水能力显著升高。高温下克拉玛依油砂剪切强度随温度变化的模式取决于孔隙流体的排出程度：当孔隙压力的消散速率不及温度引起的孔隙压力增加速率时，有效应力降低，剪切强度降低；当孔隙流体充分排出时，颗粒与颗粒呈点状或线状接触，剪切强度增加。第 3, 4 种模式存在临界温度的原因是上述 2 种作用相互竞争的结果。

### 3.5 残余剪切强度

油砂的残余剪切强度是指轴向应变逐渐增大而剪切应力趋于稳定时的有效剪应力<sup>[15, 17-18]</sup>。由于有的油砂试样泥质成分高，有的试验围压较大，有的试验轴向加载量小，导致试验中没有出现残余阶段，因此记录不同温度下残余剪切强度的试验很少。油

砂标准化残余强度与温度的关系如图 20 所示。由图中可知，在 20 °C~250 °C 温度范围，残余剪切强度的变化在 0.8~2 倍范围。其中 K. M. Kosar<sup>[9]</sup>针对 Athabasca 油砂在 4 MPa 有效围压下的残余剪切强度随温度增加的幅度最大，225 °C 时的残余剪切模量变为常温下的 2 倍；B. Lin 等<sup>[8]</sup>针对克拉玛依油砂在 0.5 MPa 有效围压下的残余剪切强度随温度减小的幅度最大，70 °C 时的残余剪切强度仅为常温下的 0.8 倍。总体来看，标准化残余剪切强度随温度变化的规律主要分为单调增加、单调减小和先增加后减小 3 种。与温度对剪切强度的影响规律类似，Athabasca 油砂和 Cold Lake 油砂的残余剪切强度随温度变化的模式为前 2 种，第 3 种模式只发生在克拉玛依油砂中。

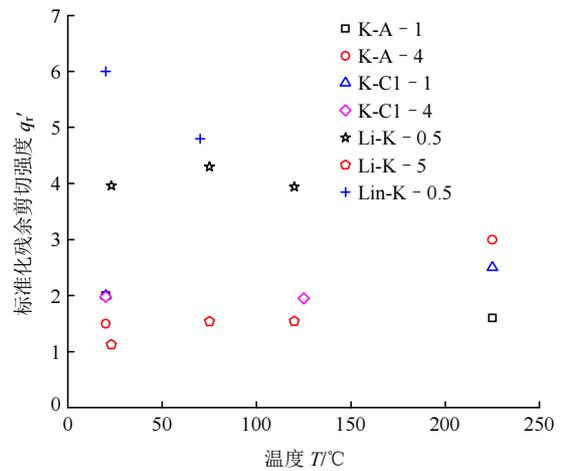


图 20 标准化油砂残余剪切强度与温度的关系

Fig.20 Relationship between normalized residual shear strength and temperature

### 3.6 其他力学参数的变化

除了节 3.2~3.5 讨论的常见力学参数外，根据使用本构模型的不同，可以选择性的计算所需的力学参数，如 Mohr-Coulomb, Drucker-Prager 等油砂常用本构模型都需要计算内摩擦角、黏聚力、剪胀量等参数。但是由于这些参数的计算需要一系列的多组试验，文献中很少给出这些参数随温度的变化规律。

油砂的内摩擦角、黏聚力与围压和温度有关。J. G. Agar 等<sup>[17-18, 31]</sup>认为油砂的内摩擦角和有效围压在半对数坐标中是直线关系，并给出相应的经验公式。J. G. Agar 等<sup>[17-18]</sup>认为有效围压为 4 MPa 时，温度从 20 °C 到 125 °C，Athabasca 油砂的内摩擦角变化不大，到 200 °C 时内摩擦角降低；有效围压为 8 MPa 时，温度从 20 °C 到 200 °C，内摩擦角明显变

大。B. Lin 等<sup>[32-33]</sup>认为温度从 20 °C 到 70 °C 时, 克拉玛依油砂的内摩擦角从 43° 减小为 40° 左右, 黏聚力从 1.22 MPa 减小为 0.93 MPa。S. C. Blair 等<sup>[10]</sup>给出了委内瑞拉 Faja 油砂不同温度下 M-C 屈服面, 认为从 20 °C 到 125 °C, 该油砂的内摩擦角略微增加, 而黏聚力略微降低; 含油斑的 Faja 泥页岩夹层在高温下的内摩擦角随温度增加而增加。油砂的剪胀量是与围压和温度有关的。高彦芳等<sup>[6-8, 15]</sup>认为, 克拉玛依油砂在低围压下的剪胀量更大, 但是升高温度会降低剪胀量。J. G. Agar 等<sup>[17-18]</sup>认为, 当有效围压为 4 MPa 时, 温度从 20 °C 增加到 125 °C, Athabasca 油砂剪胀量增加; 当有效围压为 8 MPa 时, 温度增加会抑制体积压缩量。

## 4 讨 论

根据温度对标准化力学参数的统计规律分析, 发现高温下油砂力学性质的演化存在 3 种类型——单调增加、先增加后减小和单调减小(见图 21)。由以上的分析可知, 其主要取决于泥质/沥青的含量、矿物颗粒的压碎/重排列程度、天然沥青的黏度、胶结物及胶结类型等因素。

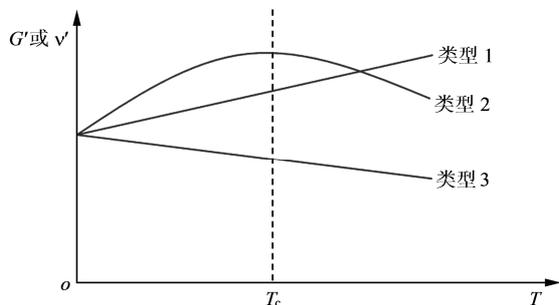


图 21 标准化力学参数随温度的演化模式

Fig.21 Types of variation of normalized mechanical parameters of oil sands under varying temperature

对于沥青含量高的贫泥质 Athabasca 油砂, 其剪切强度和变形行为受温度的影响不大, 但是含不连续泥页岩薄夹层的富泥质 Athabasca 油砂在高温下具有更高的剪切强度和变形刚度(类型 1)。虽然低渗透的泥页岩薄夹层严重阻碍了孔隙流体的排出, 使孔隙压力消散速率低于温度引起的孔隙压力增加速率, 但是泥质成分的热固结作用更强, 剪切强度增大。

对于 Cold Lake 油砂, 高温下的剪切强度不仅取决于高温下矿物颗粒的强度, 还取决于高温下颗

粒压碎和颗粒重排列的程度。因为 Cold Lake 油砂包含高温高压下极易发生物理破坏的矿物组分, 因此其高温下的强度降低(类型 3)。

对于 Faja 油砂, 其单轴压缩强度随温度的增加而降低(类型 3), 这是因为高温下孔隙中沥青的黏度大大降低, 胶结作用减弱而极易发生破坏; 三轴压缩强度与孔隙流体的排出有关, 高温时沥青黏度降低, 骨架发生力学扰动, 使孔隙流体的排出略有改善, 但是升高温度对 Faja 油砂的三轴压缩强度影响不大。高围压下, 含油斑的 Faja 泥页岩夹层在高温下的剪切强度为常温下的 2 倍(类型 1), 内摩擦角随温度增加而增加, 这是因为高温下的泥页岩压缩性能较好, 高温导致密度增加, 孔隙度降低, 沥青黏度大大降低, 这些因素都有利于孔隙流体的排出和颗粒之间的接触。

对于新疆风城油砂, 由于历史上未经历冰川作用、质地疏松、砂粒松散分布于沥青-黏土混合胶结基质中, 剪胀角仅为加拿大海相油砂的 1/2 甚至更小, 且物性非均质性强, 因此克拉玛依油砂高温下的力学性质与国外油砂有很大的区别。克拉玛依油砂的力学性质随温度的变化存在一个临界温度(类型 2), 这是因为高温下克拉玛依油砂刚度和剪切强度随温度变化的模式取决于孔隙流体的排出程度: 当孔隙压力的消散速率不及温度引起的孔隙压力增加速率时, 有效应力降低, 剪切强度降低; 当孔隙流体充分排出时, 颗粒与颗粒呈点状或线状接触, 刚度和剪切强度增加。

综上所述, 对于泥质含量高、沥青含量低、互锁结构明显的油砂, 其高温下的力学参数演化模式一般为类型 1; 对于天然沥青黏度高、胶结物质为沥青和黏土混合物、胶结方式为基底式或孔隙式胶结的油砂, 其高温下的力学参数演化模式一般为类型 2; 对于石英含量高、高温下矿物颗粒压缩和重排列程度高的油砂, 其高温下的力学参数演化模式一般为类型 3。

## 5 结 论

(1) 针对加拿大 Athabasca 油砂和 Cold Lake 油砂、委内瑞拉 Faja 油砂、我国新疆克拉玛依油砂, 统计文献中记载的高温高压三轴排水剪切试验曲线, 计算其弹性模量、泊松比、剪切强度、残余剪切强度等力学参数。

(2) 采用标准化的力学参数反映不同地区油砂

温度对力学参数的影响,发现在热力开采的温度范围内(20 ℃~250 ℃),油砂力学参数变化范围为0.25~3倍,由此可见油砂力学性质的温度敏感性很强。

(3) 通过对比油砂的宏观力学性质与微观结构图像,油砂力学参数随温度的演化规律分为单调增加、先增加后减小和单调减小3种模式,其主要取决于泥质/沥青的含量、矿物颗粒的压碎/重排列程度、天然沥青的黏度、胶结物及胶结类型等因素。

(4) 对于泥质含量高、沥青含量低、互锁结构明显的油砂,其高温下的力学参数演化模式一般为类型1;对于天然沥青黏度高、胶结物质为沥青和黏土混合物、胶结方式为基底式或孔隙式胶结的油砂,其高温下的力学参数演化模式一般为类型2;对于石英含量高、高温下矿物颗粒压缩和重排列程度高的油砂,其高温下的力学参数演化模式一般为类型3。

**致谢:** 感谢中国岩石力学与工程学会青年人才托举的支持,同时感谢新疆油田工程技术研究院提供样品和现场资料。

### 参考文献(References):

- [1] DOAN D H, DELAGE P, NAUROY J F, et al. Microstructural characterization of a Canadian oil sand[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2012, 49: 1 212 - 1 220.
- [2] YUAN X, DOU S, ZHANG J, et al. Consideration of geomechanics for in-situ bitumen recovery in Xinjiang, China[C]// Proceedings of the SPE Heavy Oil Conference. Calgary, Alberta, Canada: [s.n.], 2013: SPE 165414.
- [3] CARRIGY M A. The physical and chemical nature of a typical tar sand: bulk properties and behavior[C]// Proceedings of the Seventh World Petroleum Congress. Mexico: [s.n.], 1967: WPC - 12256.
- [4] SPEIGHT J G. The chemistry and technology of petroleum, fifth edition[M]. Boca Raton: CRC Press, 2014: 17.
- [5] 高彦芳, 陈 勉, 林伯韬, 等. SAGD 井挤液扩容水力波及范围模型[J]. 新疆石油地质, 2018, 39(2): 202 - 208.(GAO Yanfang, CHEN Mian, LIN Botao, et al. An analytical model for water swept area in SAGD wells[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2018, 39(2): 202 - 208.(in Chinese))
- [6] 高彦芳, 陈 勉, 林伯韬, 等. 稠油油藏 SAGD 微压裂阶段储层压缩系数研究——以新疆风城陆相储层重 1 区齐古组为例[J]. 石油科学通报, 2017, 2(2): 240 - 250.(GAO Yanfang, CHEN Mian, LIN Botao, et al. Study on compressibility during micro-fracturing in continental ultra-heavy oil sand reservoirs-taking the Qigu formation of Xinjiang Fengcheng oilfield Z1 Block for instance[J]. Petroleum Science Bulletin, 2017, 2(2): 240 - 250.(in Chinese))
- [7] GAO Y, CHEN M, LIN B, et al. Experimental investigation on compressibility of Karamay oil sands under water injection[C]// Proceedings of the 51st US Rock Mechanics/Geomechanics Symposium. San Francisco, California, USA: [s.n.], 2017: ARMA 17 - 597.
- [8] LIN B, JIN Y, PANG H, et al. Experimental investigation on dilation mechanics of land-facies Karamay oil sand reservoirs under water injection[J]. Rock mechanics and Rock Engineering, 2016, 49(4): 1 425 - 1 439.
- [9] KOSAR K M. Geotechnical properties of oil sands and related strata[Ph. D. Thesis][D]. Alberta: University of Alberta, 1989.
- [10] BLAIR S C, SWEENEY J J, RALPH W R, et al. Mechanical properties of heavy oil-sand and shale as a function of pressure and temperature[R]. Livermore: Lawrence Livermore National Laboratory, 1987.
- [11] WONG R C K, BARR W E, KRY P R. Stress-strain response of Cold Lake oil sands[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1993, 30: 220 - 235.
- [12] DUSSEAUULT M B, MORGENSTERN N R. Locked sands[J]. Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology, 1979, 12(2): 117 - 131.
- [13] DUSSEAUULT M B, MORGENSTERN N R. Shear strength of Athabasca oil sands[J]. Canadian Geomechanical Journal, 1978, 15: 216 - 238.
- [14] WONG R C K. Strength of two structured soils in triaxial compression[J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 2001, 25: 131 - 153.
- [15] 李存宝, 谢凌志, 陈 森, 等. 油砂力学及热学性质的试验研究[J]. 岩土力学, 2015, 36(8): 2 298 - 2 306.(LI Cunbao, XIE Lingzhi, CHEN Sen, et al. Experimental research on mechanical and thermal properties of oil sand[J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, 36(8): 2 298 - 2 306.(in Chinese))
- [16] 林伯韬, 陈 森, 潘竟军, 等. 风城陆相超稠油油砂微压裂扩容机制实验研究[J]. 石油钻采工艺, 2016, 38(3): 359 - 364.(LIN Botao, CHEN Sen, PAN Jingjun, et al. Experimental study on dilation mechanism of micro-fracturing in continental ultra-heavy oil sand reservoir, Fengcheng Oilfield[J]. Oil Drilling and Production

- Technology, 2016, 38(3): 359 - 364.(in Chinese)
- [17] AGAR J G. Geotechnical behavior of oil sands at elevated temperatures and pressures[Ph. D. Thesis][D]. Alberta: University of Alberta, 1984.
- [18] AGAR J G, MORGENSTERN N R, SCOTT J D. Shear strength and stress-strain behavior of Athabasca oil sand at elevated temperatures and pressures[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1987, 24: 1 - 10.
- [19] WAN R G, CHAN D H, KOSAR K M. A constitutive model for the effective stress-strain behavior of oil sands[J]. Journal of Canadian Petroleum Technology, 1991, 30(4): 89 - 98.
- [20] SETTARIA A, ITO Y, FUKUSHIMA N, et al. Geotechnical aspects of recovery processes in oil sands[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1993, 30: 22 - 33.
- [21] WONG R C K. Mobilized strength components of Athabasca oil sand in triaxial compression[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1999, 36: 718 - 735.
- [22] YALE D P, MAYER T, WANG J. Geomechanics of oil sands under injection[C]// Proceedings of the 44th US Rock Mechanics Symposium and 5th US-Canada Rock Mechanics Symposium. Salt Lake City, UT: [s.n.], 2010: ARMA 10 - 257.
- [23] DUSSEAULT M B. Comparing Venezuelan and Canadian heavy oil and tar sands[C]// Proceedings of Canadian International Petroleum Conference. Calgary, Alberta, Canada: [s.n.], 2001: PETSOC - 2001 - 061.
- [24] 林伯韬, 高彦芳, 金 衍, 等. 一种油砂岩芯的取芯装置[P]. 中国: CN105201437, 2017 - 06 - 23.(LIN Botao, GAO Yanfang, JIN Yan, et al. Coring device for oil sandy core[P]. China: CN105201437, 2017 - 06 - 23.(in Chinese))
- [25] 林伯韬, 高彦芳, 金 衍, 等. 一种油砂岩芯的取芯方法[P]. 中国: CN105158014, 2017 - 06 - 23.(LIN Botao, GAO Yanfang, JIN Yan, et al. Method for taking oil sand rock core[P]. China: CN105158014, 2017 - 06 - 23.(in Chinese))
- [26] HELWANY S. Applied soil mechanics with ABAQUS applications[M]. Hoboken: John Wiley and Sons, Inc., 2007: 61 - 67.
- [27] TIAN H, KEMPKA T, YU S, et al. Mechanical properties of sandstones exposed to high temperature[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2016, 49: 321 - 327.
- [28] LIN B, JIN Y, CHEN S L. A criterion for evaluating the efficiency of water injection in oil sand reservoirs[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2017, 149: 322 - 330.
- [29] FJAR E, HOLT R M, HORSRUD P, et al. Petroleum related rock mechanics[M]. 2nd ed. Amsterdam: Elsevier, 2008: 43.
- [30] 高彦芳, 陈 勉, 林伯韬, 等. 多相非饱和多重孔隙介质的有效应力定律[J]. 工程力学, 2018(待刊).(GAO Yanfang, CHEN Mian, LIN Botao, et al. A generalized effective stress law for multi-porosity media unsaturated with multiphase fluids[J]. Engineering Mechanics, 2018(to be pressed).(in Chinese))
- [31] LI P, CHALATURNYK R J. Geomechanical model of oil sands[C]// Proceedings of the SPE International Thermal Operations and Heavy Oil Symposium. Calgary, Alberta, Canada: [s.n.], 2005: SPE - 97949 - MS.
- [32] LIN B, CHEN S, JIN Y. Evaluation of reservoir deformation induced by water injection in SAGD wells considering formation anisotropy, heterogeneity and thermal effect[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2017, 157: 767 - 779.
- [33] GAO Y, CHEN M, LIN B, et al. Modeling of reservoir deformation upon preheating in SAGD wells considering phase change of bitumen[C]// Proceedings of the 52ed US Rock Mechanics/ Geomechanics Symposium. Seattle, Washington, USA: [s.n.], 2018: ARMA 18 - 031.