

· 专题一:石油矿业安全领域学科发展(石油与天然气工程) ·

液氮射流破岩及压裂研究进展

黄中伟^{1*} 武晓光^{1*} 谢紫霄¹ 杨睿月¹
张世昆² 张宏源³ 邹文超¹

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. 中国石油集团工程技术研究院,北京 102206
3. 中国石化石油工程技术研究院,北京 100101

[摘要] 液氮低温致裂效果显著,在非常规及深部油气储层改造及钻井提速方面展现了良好的应用潜力,为常规水基工作液所带来的耗水量大、储层伤害和环境污染等问题提供了解决思路。本文系统地总结了液氮在钻井和压裂中应用所涉及的关键科学问题,包括液氮井筒流动传热规律、管材低温力学特性、岩石低温致裂特性、液氮射流破岩特征和液氮压裂造缝机理五大方面,综述了液氮辅助破岩和压裂的基本理论和研究进展,剖析了技术的主要难点和瓶颈,为后续的基础研究和工程应用提出了建议。本文可为形成非常规油气储层钻井提速和储层高效改造新方法提供理论依据。

[关键词] 钻井;压裂;液氮;射流;破岩

随着石油工程技术的发展,我国大部分常规油气藏已进入开采后期,深层及非常规油气逐渐成为未来陆上油气勘探开发的重点领域^[1]。深部储层具有埋深大、岩石硬度高、研磨性强、可钻性差等特点,相较于浅部地层环境更加复杂、施工难度大,钻井钻速低、周期长、成本高等问题突出^[2],亟须发展适用于深井硬岩地层的高效破岩手段。同时,对于非常规油气储层,由于其孔隙度小、渗透率低的特点,普遍需要采取水力压裂等储层改造手段,以实现其高效经济开发。然而,近年来水力压裂耗水量巨大、储层伤害和环境污染等问题日益凸显,人们开始寻求无水压裂方法以替代常规水力压裂技术。液氮作为石油工程中的一种重要工作流体,在深层钻井提速以及非常规储层高效清洁改造方面发挥了不可替代的作用,形成了多种以液氮为工质的高效钻井及压裂技术,在石油工程领域展现出了良好的应用前景。

围绕钻井提速及安全钻进,先后出现了氮气欠平衡钻井、低温氮钻井和高压液氮射流辅助钻井等技术^[3]。在此基础上,针对深部储层岩石强度高、可



黄中伟 博士,中国石油大学(北京)教授,博士生导师,国家杰出青年科学基金获得者。主要从事油气钻完井及地热能开发等研究工作,主持教育部“高等学校学科创新引智基地”(111计划)等国家级项目。先后入选中组部高层次人才特殊支持计划(万人计划)领军人才、教育部“新世纪优秀人才支持计划”、科技部“中青年科技创新领军人才”等。曾获国家技术发明奖二等奖和国家科技进步奖二等奖各1项。



武晓光 博士,中国石油大学(北京)地球科学学院博士后,一直从事新型射流钻完井及地热能开采技术研究,承担和参与多项国家自然科学基金项目、重点研发计划项目、博新计划项目等。入选国家博士后创新人才支持计划和中国石油大学(北京)青年拔尖人才。以第一/通讯作者发表学术论文14篇,其中Top期刊论文6篇,在中深层地热能开发理论和技术研究方面取得成果,获省部级科技一等奖2项。

钻性差的难题,作者结合高压射流研究,提出了高压液氮射流辅助深钻提速的新方法^[4]。该方法耦合了高速射流冲击和液氮低温致裂的双重作用机制,通

收稿日期:2021-07-25;修回日期:2021-09-16

* 通信作者,Email:huangzw@cup.edu.cn,wuxg@cup.edu.cn
本文受到国家自然科学基金项目(51725404)资助。

过在井底调制形成高压液氮射流,降低深部硬岩的破碎门限,辅助钻头提高破岩效率。

在储层改造方面,近年来水力压裂耗水量巨大、环境污染、储层伤害等问题日益凸显,部分国家和地区已开始不同程度限制水力压裂的应用。为解决上述难题,液态/超临界二氧化碳(CO₂)压裂、液化石油气(LPG)压裂、氮气/液氮压裂技术等多种无水压裂技术应运而生。相对于 LPG、CO₂ 等无水压裂方法,氮的性能稳定、来源广泛、施工安全系数更高,更适合作为水基压裂液的替代流体,在无水压裂领域得到了广泛的关注与应用。以氮为主要压裂工质,形成了氮气压裂、液氮伴注压裂等多种无水或少水压裂技术。在氮气压裂基础上,人们开始尝试直接使用液氮作为压裂液的储层改造工艺,即液氮压裂技术。该技术通过采用适当的地面设备和工艺,将液氮以常规排量和超低温状态泵注至井底,在地层中形成裂缝网的一种方法。早在 20 世纪 90 年代,就有学者提出利用液氮对煤层进行改造的技术思路^[5],并于在页岩、煤岩、致密砂岩等储层中进行了现场应用^[6,7]。液氮与储层完全配伍,不存在水敏以及水锁伤害,可望从根本上解决水力压裂存在的储层伤害和环境污染等问题。不同于氮气压裂,由于液氮的超低温特性,与地层岩石接触过程中,对岩石产生强烈的“冷冲击”,造成岩石温度瞬间急剧降低,诱发热应力和液氮膨胀增压效应,诱导岩石内部初始裂隙的扩展或在岩石内部形成新的破裂,提升储层的改造体积,形成大规模的复杂裂缝网络^[8,9]。

综上,液氮在高效破岩和储层改造方面具有良好的应用前景,本文围绕液氮在钻完井工程中应用的五大关键科学问题:(1)液氮井筒流动传热特征(液氮能否输运至井底);(2)管材低温力学性能(管柱能否承受液氮低温);(3)液氮冷却下岩石物性变化(液氮能否劣化岩石);(4)液氮射流破岩机理(能否高效破岩成孔);(5)液氮压裂裂缝扩展特征(液氮造缝效果如何),系统地总结了液氮射流高效压裂和钻井提速的技术原理和研究进展,剖析了技术的主要难点与未来攻关方向,为形成液氮钻井及压裂系列技术提供理论基础。

1 井筒内液氮流动传热

利用管柱将液氮安全高效地输送至井底,并保持低温状态,是实现液氮低温致裂、提高破岩和压裂效果的前提。与常规工作液不同,液氮本身的超低温特性及可压缩性,使其在井筒内的输运过程更为

复杂。液氮与井筒地层之间存在巨大温差,注入井内后将发生剧烈的传质传热效应。研究液氮在圆管内的流动换热规律,可为液氮施工中井筒温度分布计算、施工参数及工艺的优化设计提供基础。

液氮压裂通常采用“油套同注”的施工方式,通过具有良好耐低温和隔热特性的玻璃纤维管(Fiberglass)向井下注入液氮,同时油套环空注入高压氮气,利用氮气热导率低的特性,隔绝地层与压裂管柱间的热传导,同时防止井底液氮沿环空上返,对上部固井造成损伤^[10]。图 1 为“油套同注”压裂模式下井内流体流动换热的物理模型,采用 Grundmann 等研究中的页岩储层液氮压裂现场施工参数及相关地层参数^[6],对井筒内液氮流动传热过程进行了计算,参数见表 1。

基于上述物理模型,计算得到了液氮压裂过程中井底流体温度变化曲线,如图 2 所示。随着液氮的持续注入,流体与管柱之间的温差逐渐降低,管柱的冷却速率随之降低,井底流体温度降低速率逐渐减慢。在本模型计算条件下,注入 2 h 后,井底流体温度降至 -127.0 °C。可以发现,“油套同注”压裂模式预冷

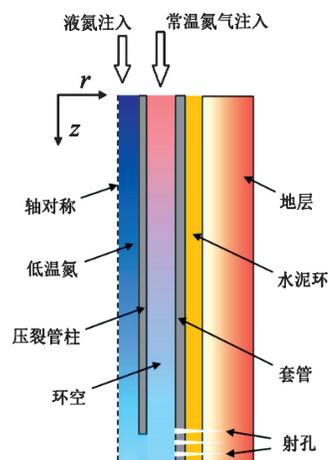


图 1 “油套同注”压裂模式示意图^[11]

表 1 流动传热计算模型参数^[6]

参数	单位	值	参数	单位	值
井深	m	1 000	环空注入排量	m ³ /min	0.7
地表温度	°C	15	环空注入温度	°C	15
地温梯度	°C/100m	3	井底出口压力	MPa	15
压裂管柱内径	mm	50.64	管柱密度	kg/m ³	7850
压裂管柱外径	mm	60.30	管柱导热系数	W/(m·°C)	44.5
套管内径	mm	101.60	管柱比热容	J/(kg·°C)	475
套管外径	mm	114.30	地层密度	kg/m ³	2 600
液氮注入排量	m ³ /min	1.6	地层导热系数	W/(m·°C)	2.09
液氮注入温度	°C	-183.15	地层比热容	J/(kg·°C)	850

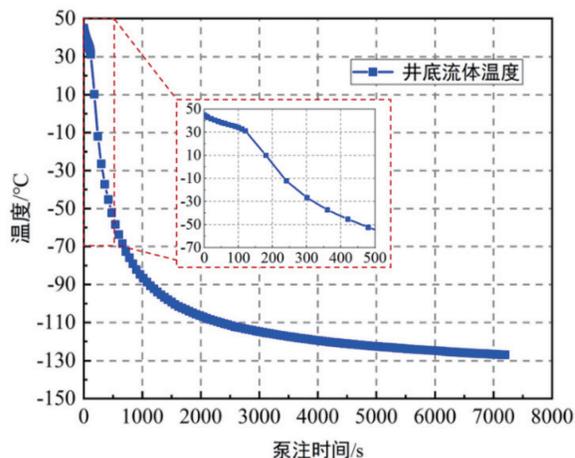


图2 井底流体温度随时间变化规律^[11]

耗时较长,难以高效地将液氮输送至井底并保持低温状态。液氮在井筒内流动过程中,其温度主要受两方面因素控制:(1)数千米压裂管柱的本身所含热量;(2)由环空流体在压裂管柱外表面形成的对流换热作用,要实现液氮压裂过程中液氮的高效输送,必须克服这两方面因素的影响。因此,建议后续在施工工艺和管柱材质方面寻求突破,探索采用双层隔热管柱的施工思路,进一步提升管柱的隔热能力和液氮的输送效率。

2 管材低温力学特性

揭示液氮低温对管柱力学性能的影响,对于探究常规生产管柱能否用于液氮压裂具有重要意义。

作者前期对液氮处理前后的不同钢级(J55、N80、P110)油管和套管,开展了单轴静力拉伸实验、夏比冲击实验和裂纹尖端张开位移等实验研究,对比了液氮处理前后试件的抗拉强度、屈服强度、冲击韧性和断裂韧性的变化,为液氮压裂管柱的选型和设计提供依据。如图3所示,在实时低温条件下,各类管柱试件表现出明显的脆性断裂特征(图3a),而室温条件下试件拉伸后则出现了明显的缩颈和塑性变形(图3b),说明此时试件表现为塑性破坏特征。对试件断口进行扫描电镜观察,结果如图4所示。液氮温度下,试件断口中存在大量的河流花样及舌状花样,与宏观脆性断裂形貌特征相吻合。材料发生塑性变形时,其内部会产生诸多细小的孔洞,叫做韧窝。对于液氮处理后回复至室温测试的试件,拉伸断口中形成了许多大小不一的韧窝,进一步证明其明显的韧性断裂特征,与实时低温下试件的破坏形式区别显著。

实时液氮低温条件下管柱的力学强度和冲击韧性测试结果如图5所示,可以看出,管柱试件的拉/压强度和屈服强度增大,冲击功和冲击韧性降低,说明管柱脆性增强。施工过程中应尽量避免剧烈的振动,防止对管柱造成脆断。液氮冷却处理后回复至室温的试件,其强度和韧性则与处理前一致,管柱试件未发生力学劣化,在回复室温后可以继续正常使用。此外,低温循环次数对试件的抗拉强度、屈服强度、冲击韧性和断裂韧性基本无影响。



图3 液氮低温下(a)及回复室温后(b)的试件冲击破坏断口^[12]

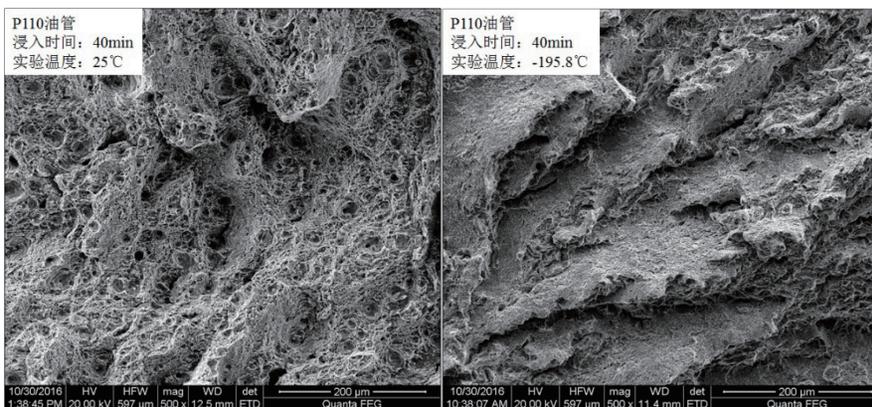
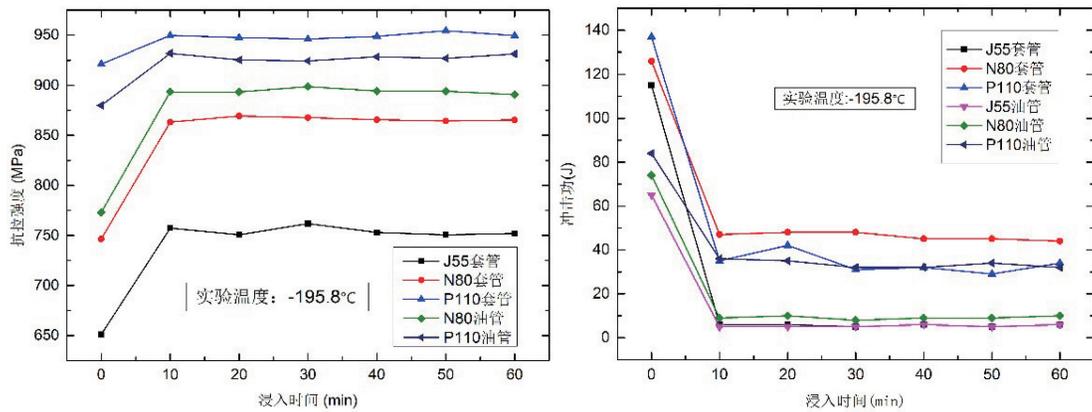


图4 液氮低温下(左)及恢复室温(右)试件冲击断口^[12]

图 5 实时低温下管柱试件抗拉强度(左)和冲击功(右)^[12]

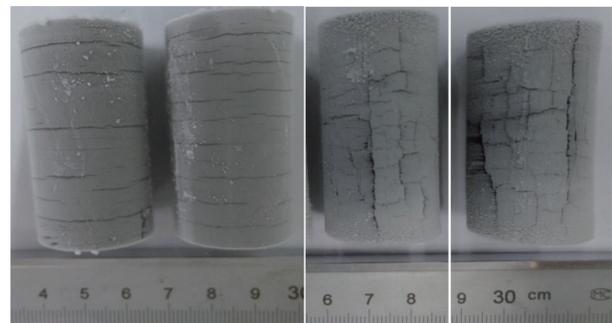
3 岩石低温致裂

液氮是一种超低温流体,无色无臭,无腐蚀性,具有极强的化学惰性,密度和粘度均低于水。大气压力下液氮的沸点约为 -196°C ,可对岩石形成强烈的“冷冲击”作用,诱导岩石内部形成高温梯度 and 强热应力,造成岩石矿物颗粒之间变形失配和孔隙流体冻结膨胀,造成岩石损伤劣化。液氮对岩石的致裂特性,可以显著改变岩石的孔渗结构及物理力学特性^[13],是液氮进行高效破岩和储层改造的基础。

3.1 岩石物性变化

为探索液氮在非常规油气储层改造中应用的可行性,学者针对液氮冷却下两种岩石的损伤特征开展了研究^[14-18]。如图 6 所示,在液氮的低温作用下,岩样表面出现了大量的热应力裂缝,在液氮冷却煤岩过程中甚至可听见明显的破裂声响,证明液氮对两种岩石具有显著的致裂作用。页岩和煤岩发育有层理与节理等天然弱面,对于低温下热力裂缝的开启和扩展起引导作用,岩样优先沿层理和节理面发生宏观开裂。

岩石液氮冷却下发生开裂,伴随着显著的物理和力学特性变化。通常,液氮冷冲击作用后岩石强度、杨氏模量等力学特性劣化,声波波速下降,孔隙度和渗透率显著提升。根据前期实验结果^[14],液氮冷却后煤岩渗透率提升 93.55%,纵波波速降低 10.43%,单轴压缩强度和峰值应变最高降幅分别可达 33.74%和 20.61%。页岩的物理和力学性质变化规律与煤岩基本一致,但受层理方向影响显著^[16]。垂直层理方向的页岩波速降幅为 4.14%~4.95%,而平行层理方向的岩样波速降幅为 2.69%~3.53%。在渗透率方面,垂直层理方向的页岩渗

图 6 液氮冷却后的页岩(左)及煤岩(右)表面形貌^[18]

透率增幅为 4.86%~15.14%,而平行于层理方向的页岩渗透率增幅为 11.55%~177.27%,平均增长幅度大于垂直层理方向的岩样。页岩在液氮低温作用下优先沿层理面开裂,垂直层理方向页岩岩样的损伤程度要显著大于平行层理方向的岩样。

3.2 微观损伤机制

液氮冷却产生的热应力是造成岩石开裂的根本原因,热应力的产生主要包含两种机制^[19]:(1)产生温度梯度;(2)相邻矿物颗粒变形失配。液氮与岩石接触会发生剧烈的传质传热作用,在岩石内部形成极高的温度梯度,造成岩石不同部分的收缩变形差异,形成宏观的热应力。岩石是一种由不同矿物颗粒组成的混合物,各矿物颗粒间热物性和力学性质差异显著,因此,液氮冷却过程会引起相邻矿物颗粒的变形不匹配,进而在矿物颗粒之间形成局部的热应力作用。一旦热应力超过颗粒的胶结强度,矿物颗粒之间的胶结就会发生破坏,形成晶间开裂,如图 7 所示。同样,对于个别的结晶型矿物颗粒(如石英),其颗粒本身不同晶轴方向上的热物性差异,会引起颗粒自身的变形失配,形成穿晶断裂破坏。相比于穿晶断裂,晶间开裂的裂缝数目更多、尺寸更大,是液氮冷却下岩石损伤的主要微观机制^[20]。

综上,热应力作用下的岩石矿物颗粒发生断裂,诱导形成微裂隙,提高了岩石内部的裂缝密度。同时,在液氮的冷却下,岩石的孔隙结构产生损伤,促使裂缝进一步扩展,进而形成复杂的裂缝网络,改善了岩石内部的渗流通道,从而提高了裂缝的导流能力。

3.3 影响因素分析

液氮对不同岩性岩石的致裂效果具有差异。砂岩颗粒尺寸较大,且不同颗粒之间存在大量原生裂隙,因此在液氮冷却作用下,砂岩对热变形具有更强的容纳能力^[22],降低了热应力的尺度,难以诱导开裂产生,整体上砂岩的孔隙数量和体积会随岩石的收缩而减少,因此砂岩的孔隙结构变化特征主要表现为孔隙体积和数量降低。而大理石内部颗粒排列致密,不存在原生裂隙或尺度十分微小,颗粒间一旦产生微小变形,就会诱发极强的热应力和微观破裂,所以孔隙变化形式以微孔隙(微裂隙)扩展为主。虽然煤岩和页岩基质致密,但由于内部层理等原生弱面比较发育,且层理胶结强度较低,因此,液氮冷却下煤岩和页岩会形成较大程度的孔渗变化。

岩石含水饱和度是影响液氮低温致裂效果的重要因素之一^[23]。岩心饱水可加剧液氮冷却下岩石的损伤,经过液氮冷却处理,饱水岩石的孔隙尺度和数量增幅均显著高于干燥岩石,饱水砂岩表面甚至形成肉眼可见的宏观开裂,如图8所示。其主要原

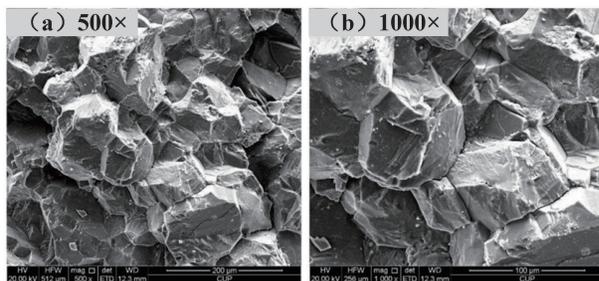


图7 低温液氮浸泡干燥大理石^[18, 21]



图8 液氮冷却饱水砂岩^[21]

因是,液氮冷却可造成岩石内孔隙水发生水—冰相变膨胀,冰冻前缘向岩心内部逐渐推进,对内部孔隙水挤压,提高孔隙压力,引起岩石破裂。

冷却循环次数是影响液氮致裂岩石效果的另一个重要因素^[24-27]。液氮冷却循环有助于加剧岩石损伤,提升岩石渗透率增幅和力学劣化程度。在干燥状态下,岩石经受循环热—冷处理,在岩石内部引起交变的热应力,造成岩石损伤积累和疲劳破坏。不同于干燥岩石,饱水岩石液氮循环冷却下的损伤主要源自于冻—融循环作用。岩石的力学强度和弹性模量与冻—融循环次数呈负相关,较高的含水量更利于加剧冻融循环下的岩石损伤。此外,液氮低温致裂效果还与岩石初始温度有关。对于 $150\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 600\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的岩石,液氮冷却下岩石强度降幅较水冷高约 $11\%\sim 18\%$ ^[28]。随岩石初始温度升高,液氮冷却引起的物性劣化加剧。随热—冷循环次数增加,高温花岗岩的物性劣化程度加剧,但劣化速率逐渐降低,约10次循环后物性趋于平稳,200 $^{\circ}\text{C}$ 花岗岩的最终强度衰减幅度可达35%左右。具有较高温度和较小粒度的高温花岗岩,液氮循环冷却下物性衰减更快,物性劣化程度更高。

4 液氮射流破岩

液氮射流是一种新型高效的破岩成孔方法,在辅助钻井提速及喷射压裂方面具有良好的应用前景。液氮射流结合了高速冲击及低温致裂的双重作用机制,破岩特征与传统水射流具有显著区别。本节针对液氮射流流场、热应力和破岩成孔特征三个方面进行介绍,阐明射流冲击和低温致裂的耦合破岩机理,揭示液氮射流破岩的可行性与高效性,为形成液氮射流破岩新方法提供理论支撑。

4.1 射流流场特征

液氮的物性受温度和压力影响显著,井底高围压条件下其流场结构与传统水射流具有差异。基于数值模拟方法,Cai等建立了围压下液氮射流流体力学模型^[29],模型引入了NIST真实气体状态方程,来考虑温度和压力对液氮物性的影响。在相同喷嘴压降和喷嘴直径条件下,对液氮射流和水射流流场进行了数值模拟,对比分析了两种射流的速度场和压力场特征。结果表明,相对于水射流,液氮射流的初始速度高,等速核更长,能量衰减更少,聚集性更强,如图9所示。在压力场方面,由于液氮的粘度要小于水,液氮射流在流动过程中粘滞力较小,克服粘滞力做功所消耗的动能较小,因此其轴线上的动压

和总压高于水射流。

4.2 破岩成孔特征

(1) 液氮射流

冲击射流是单相对流换热中最为高效的一种强化传热方式,可以有效提升液氮-岩石间的对流换热效率和岩石内热应力尺度。液氮射流冲击引起的热应力,可有效劣化岩石的力学特性,降低岩石的临界破碎压力。前期针对液氮射流破岩进行了系统的实验研究,并与常规水射流进行了对比,结果如图 10 所示。可以看出,不同于水射流的规则孔眼,液氮射流成孔形状不规则,但破岩体积显著高于水射流。在相同压力条件下,液氮射流的破岩体积平均为水射流的 18.34 倍^[30]。液氮喷射后,岩石表面冲击坑周围形成了网状的交叉裂纹,这些热力裂纹的形成,可显著降低岩石的力学强度,提高岩石的破碎效率。此外,不同于水射流,液氮射流冲击下岩石以大块体积破碎为主要特征,破岩比能较水射流低 90.8%。此外,岩石初始温度对液氮射流的破岩效果具有影响,随岩石初始温度升高,液氮射流的破岩体积和深度随之增大。在给定的射流压力条件下,岩石初始温度需达到一定阈值后才能形成大块的体积破碎。根据前期液氮射流冲击高温花岗岩的实验

结果^[8],在 25 MPa 射流压力条件下,花岗岩形成体积破碎的临界温度在 150 °C~260 °C 范围内。

液氮射流冲击传热引起的热应力,是提高岩石破碎效率的重要机制。Zhang 等开展了液氮射流冲击岩石的数值模拟研究^[31],重点分析了液氮射流冲击下岩石内热应力的分布特征,发现液氮射流形成的热应力以拉应力为主要形式,拉应力尺度最大可达数十兆帕,远远高于岩石的抗拉强度。Wu 等建立了液氮射流冲击高温岩石的热流固多场耦合模型^[32],进一步分析了热应力和射流冲击的耦合作用,对比了液氮射流和水射流冲击下岩石的力学响应差异。研究表明,液氮射流冲击下岩石呈拉-剪混合的破坏模式,岩石表面的拉应力和剪应力均显著高于水射流,且随岩石初始温度升高,液氮冲击下岩石表面的应力幅值更高,说明热应力对射流冲击具有辅助作用。此外,Zhang 等开展了低压液氮射流冲击高温花岗岩的实验^[33, 34],由于实验射流压力较低(<3 MPa),射流冲击力破岩作用可以忽略,从而单纯考察液氮射流下热应力对岩石损伤的影响。实验结果如图 11 所示,冲击后岩石未形成宏观破碎,但表面产生了大量的“冷冲击”裂纹,岩石初始温度越高,热力裂缝数目越多,实验结果与数值模拟相吻合。

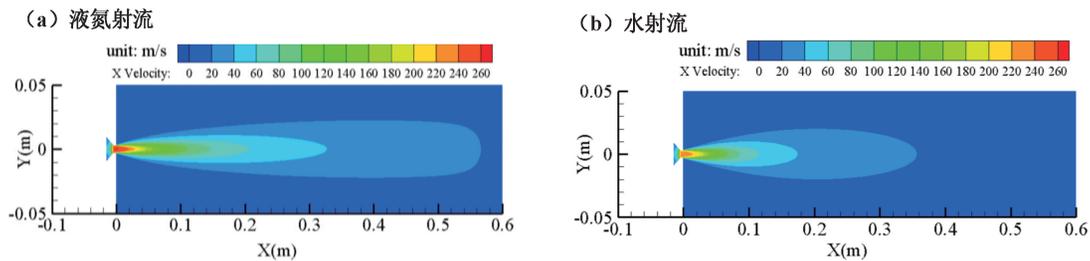


图 9 液氮射流 (a) 和水射流 (b) 喷嘴附近速度分布^[29]

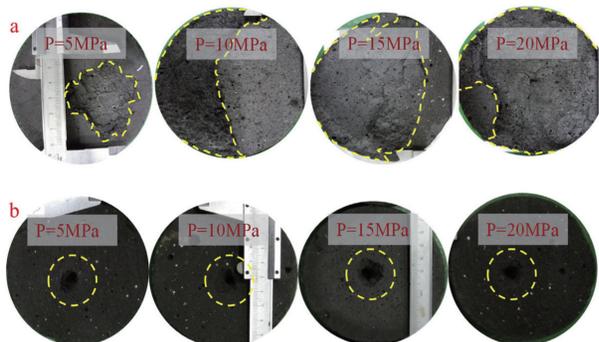


图 10 液氮射流 (a) 和水射流 (b) 冲击下岩石的破碎特征 (喷距为 2 cm)^[30]

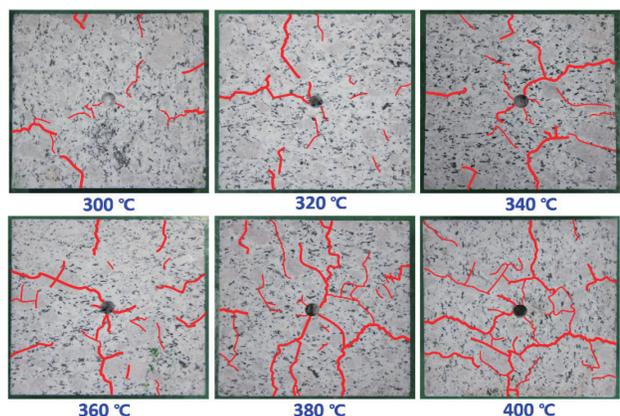


图 11 不同温度岩石经历液氮射流冲击后表面开裂情况 (喷距为 1 mm)^[34]

(2) 液氮磨料射流

为进一步提升液氮射流的冲蚀能力,在传统磨料水射流理论上,进一步提出了液氮磨料射流方法。方法耦合了射流冲击、水楔、低温致裂和磨料切削等多种作用机制,有望进一步提高液氮射流破碎硬岩的能力。为揭示液氮射流携带磨料粒子的可行性,Cai等人建立了液氮磨料射流的两相流模型^[29],通过采用离散相模型跟踪磨料粒子在流场中的运动,其中流体相和离散相分别采用时均的N-S方程和拉格朗日方程求解,计算分析了液氮磨料射流的参数影响规律。磨料颗粒在流场中的运动轨迹具有随机性,为了更准确地模拟粒子的分布状态,Zhang等人利用离散随机轨道模型对粒子的分布进行表征,模拟对比了液氮射流、超临界二氧化碳射流和水射流携带磨料颗粒的能力^[34]。结果表明,相比于超临界二氧化碳和水射流,液氮射流可将磨料粒子加速到更高的速度,因此有望实现更好的破岩效果。

在实验方面,作者团队研制并加工了液氮射流磨料添加装置,实现了液氮射流磨料前混和磨料后混两种混砂模式。基于该套装置,配合高压液氮射流实验系统,开展了液氮磨料射流破岩实验研究。研究表明,与磨料水射流相比,液氮磨料射流形成的射孔尺寸更大,但孔眼规则度相对较差。在射流冲击、热应力和高速颗粒的共同作用下,岩石靶件更容易破碎成大块。相对于后混磨料射流方法,前混液氮磨料的射流破岩效果更加显著。随着喷嘴压降的增大,液氮磨料射流对岩石的破碎效果增强,当喷嘴压降超过25 MPa时,岩石被彻底劈裂,如图12所示。

为对比分析岩石表面的破碎形貌特征,对破碎坑进行了三维形貌进行观测^[36],结果如图13所示,图中渲染颜色表示测量表面高度。可以看出,随着

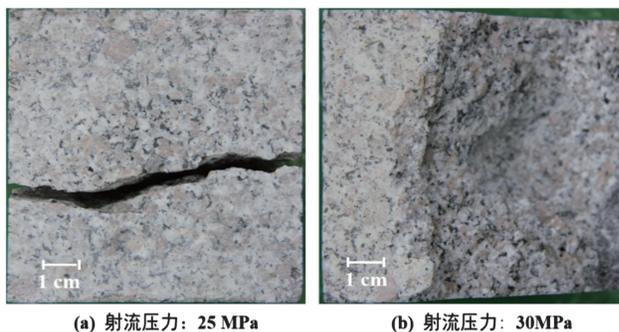


图12 液氮磨料射流冲击作用下高温花岗岩破碎形态(喷嘴距为10 mm)^[35]

岩石温度升高,孔眼表面粗糙度增大,孔眼壁面部分区域出现90°直角断裂(图13a),形成了明显的拉伸剥落破碎特征。而当岩石温度较低时(常温),液氮磨料射流形成的孔眼壁面相对比较平整,如图13b所示。对比液氮磨料射流和磨料水射流的冲蚀形貌(图13c),磨料水射流冲蚀孔眼壁面相对平整,磨料打磨效果更好,壁面粗糙度明显低于液氮磨料射流形成的冲蚀面。

5 液氮压裂

液氮压裂是一种高效的无水压裂方法,一方面液氮低温致裂作用可显著劣化岩石的力学强度,降低储层的起裂压力;另一方面,液氮可诱导岩石产生热力裂缝,在高压和低温的共同作用下使裂缝张开,增加储层的连通性和复杂度。液氮压裂始于20世纪90年代,近年来随着储层改造和环保要求的提高,液氮压裂技术引起了学者的广泛关注。采用室内实验和数值模拟等手段,有学者针对液氮的储层改造能力进行了研究。针对水泥、砂岩和页岩岩样,国内外学者开展了无围压条件和真三轴条件下的液氮压裂实验,分析了压裂裂缝起裂和扩展规律,同时还建立了相应的液氮压裂数值模型,讨论了热应力

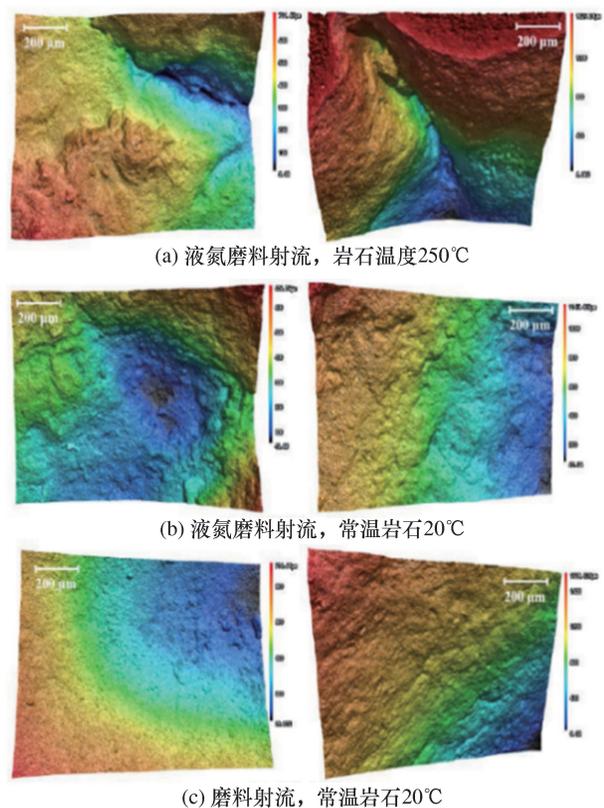


图13 磨料射流冲蚀坑三维形貌扫描结果^[36]

对人工裂缝起裂扩展的影响。实验研究结果表明^[37, 38],液氮可以显著降低岩石的破裂压力,实验中岩石的起裂压力最大降幅达 40%。根据数值模拟结果,液氮压裂形成的热应力改变了井周的应力分布状态,在井周诱导产生了原生裂缝,这是液氮降低储层破裂压力的主要原因。

近年来,高温干热岩等清洁地热能源受到了越来越广泛的关注。然而,由于干热岩储层高温高压的特点,常规水力压裂面临着起裂压裂高、压裂缝网单一等问题,无法高效地形成复杂连通缝网,易形成热突破,影响地热开采寿命。由于液氮与干热岩温差巨大(超过 350℃),低温热应力和致裂效果相对于常规储层更为显著。为探索液氮压裂在干热岩储层中的应用潜力,作者团队前期设计研发了高温岩石真三轴液氮压裂实验系统,并针对高温花岗岩开展了一系列的实验研究^[39],实验结果如图 14 所示。当岩样初始温度较低或承受较高的三轴应力时,液氮压裂易形成沿最大水平主应力方向的单一主裂缝。随着岩样初始温度升高,岩石表面裂缝分布趋于明显,分支裂缝增多,裂缝导流能力明显高于清水压裂。在较低的三轴应力状态下,热应力会诱导主裂缝发生偏转、形成分支,增加裂缝的复杂度。

此外,液氮在缝内的膨胀增压作用促进裂缝扩展,使得液氮压裂形成的裂缝较清水压裂裂缝更长,导流能力更高,约为清水压裂的 10~77 倍^[39]。常温常压下 1 立方米的液氮可以膨胀生成 696 立方米的纯气态氮。液氮压裂过程中,井筒周围的岩石一方面会受到液氮的超低温冷却作用形成微裂隙,改善储层的导流能力;另一方面,液氮在压裂地层的过程中不断汽化膨胀,产生大量的氮气,导致地层压力升高。当该压力超过裂缝的延伸压力时,压裂形成的主裂缝继续向前扩展,增加主裂缝的延伸长度,进一步提高液氮压裂对储层的改造效果。基于此,李

子丰提出了一种“液化氮气在油气层内汽化压裂方法”的压裂新工艺^[40],该工艺利用液氮在储层中的汽化膨胀机理,进而提高缝内流体压力,使岩石在超低温和高压力的耦合作用下,形成复杂裂缝网络。此外,液氮汽化压裂技术也可指导页岩气、煤层气等低渗油藏的开发。徐红芳^[41]建立了液氮汽化压裂过程中的井筒温度场分布数值模型。模拟结果表明,大排量注入液氮,可有效提高储层的改造效果。此外,Cai 等人通过开展室内试验^[27],研究了页岩的液氮汽化压裂效果,如图 15 所示,液氮于岩样内部汽化增压,使岩样表面产生了明显的宏观开裂,且裂缝呈网络状分布。

可以看出,利用液氮作为压裂液进行储层改造,是低温损伤、热冲击以及汽化膨胀增压多重耦合作用下的结果。低温损伤和热冲击劣化储层的力学性质,辅助降低储层的起裂压力,诱导形成次级裂缝;液氮的汽化膨胀在储层内具有自增压效应,驱使裂缝进一步扩展,进而形成复杂的裂缝网络。

6 前景与挑战

高压液氮射流技术耦合了低温冷冲击与高压射流冲击的双重作用,可显著提高井底岩石的破碎效率。对于深部干热岩储层,低温液氮与高温岩石较大的温差可大幅提升冷冲击对岩石强度的劣化作用,因此具有广泛的应用前景。笔者团队提出了液氮射流辅助钻井提速新方法,以低温液氮作为钻井流体,采用双层隔热钻柱,通过井底增压装置调节形成高压液氮射流辅助破岩。通过双层钻柱的内管与外管间环空中注入空气,并于井底钻柱侧向出口流出,对返流的氮及井壁进行回温,防止井壁岩石过冷引起失稳坍塌。该方法有效提高了管柱的隔热能力,同时实现对井壁的有效保护,维持井壁

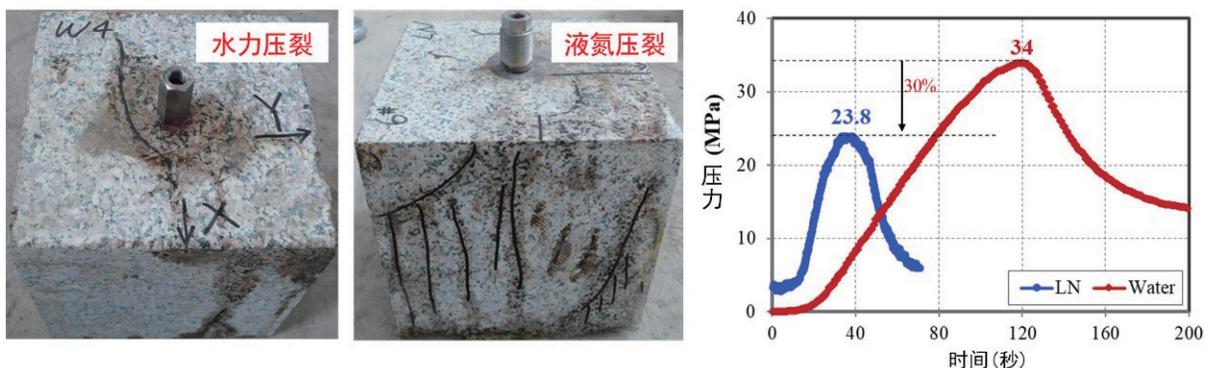


图 14 液氮和清水压裂造缝特征和起裂压力对比^[39]



图 15 液氮汽化膨胀作用下的页岩^[27]



图 16 液氮压裂用的井口^[6]

稳定。

液氮压裂技术始 20 世纪 90 年代,在北美非常规油气储层中已成功现场应用。McDaniel 和 Grundmann 等人采用玻璃钢油管 and 不锈钢井口等装置(如图 16 所示),成功将液氮压裂技术应用到了油气储层中^[6, 7]。与邻井氮气压裂相比,液氮压裂井的增产率高出约 8%。上述成功的现场试验表明,在合理的工艺设计和执行方案下,将液氮作为压裂液具备可行性。虽然早在 20 世纪 90 年代液氮压裂就开展了现场应用,但技术并不成熟,携带支撑剂困难、液氮注入成本高、施工工艺难等问题尚未得到有效的解决。同时,由于大规模水力压裂的成功,导致液氮压裂技术研究被逐渐搁置。近些年,随着人们环保意识的增强,液氮压裂等无水压裂技术又重新走入人们视野。

近年来,在传统的液氮压裂技术基础上,进一步提出了液氮循环冷却增透、液氮喷射压裂一体化、液氮脉动压裂等新型液氮压裂工艺^[8, 18],应用领域也

逐渐从非常规油气扩展到地热能等清洁地质能源开发领域。学者们针对液氮压裂方法中的基础科学问题开展了广泛的机理研究,极大地推动了液氮压裂技术的发展及工业化进程。笔者团队提出了“管柱遇冷+局部封隔压裂”的液氮压裂新模式^[11],通过分离管柱遇冷及液氮压裂过程,大幅提高冷冲击致裂岩体的效果,进而降低深部储层的压裂难度,具体工艺流程如图 17 所示。

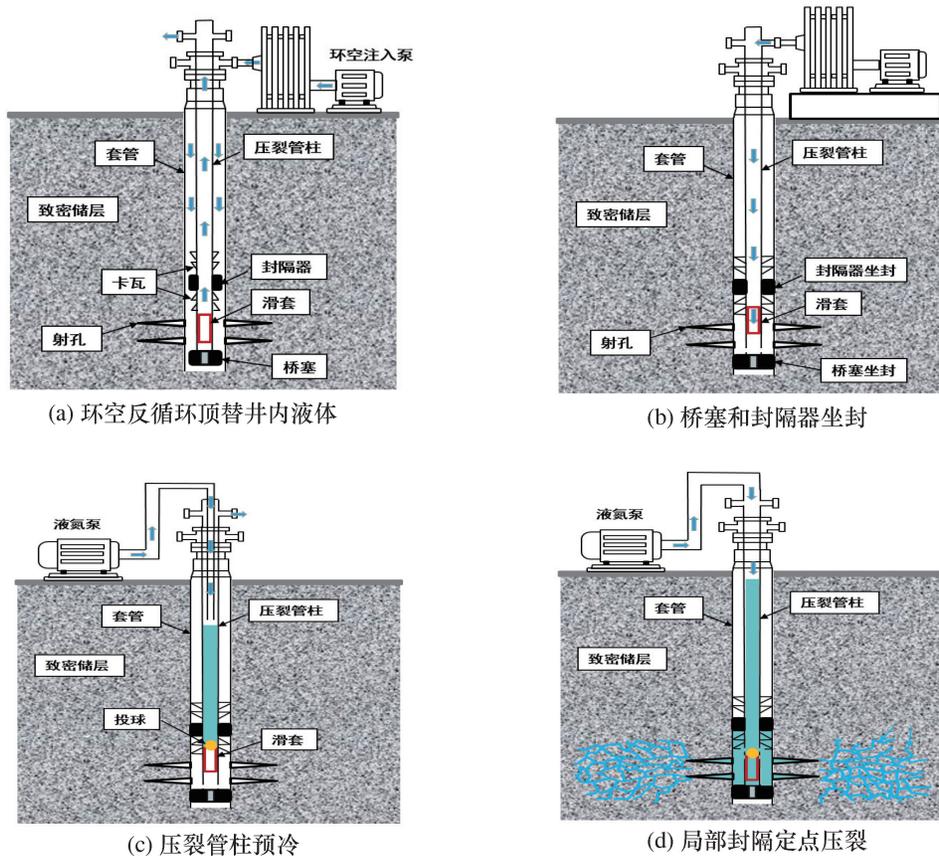
然而不同于传统的水力压裂方法,液体胶塞和机械封隔器在液氮超低温条件下难以正常工作,因此难以满足液氮分段压裂的施工需求。液氮喷射压裂技术,将水力喷射压裂与液氮压裂方法相结合,利用射流增压和自封隔原理实现裂缝定点起裂和井筒分段改造,无需封隔器、桥塞等机械封隔装置,克服了液氮压裂盲目性的缺点,为液氮分段压裂施工提供了新思路。针对岩石导热率低、液氮“冷冲击”范围有限的问题,作者提出了径向井液氮压裂的施工思路,通过径向分支井眼扩大液氮的低温致裂范围,从而大幅提升储层改造效果。此外,为进一步提升液氮压裂效果,提出了将液氮压裂与脉动压裂相结合的新思路,综合利用液氮低温致裂和交变载荷下岩石疲劳损伤效应,提升储层岩石的改造程度,大幅改善储层的连通性和渗透率。虽然液氮在高效破岩和储层改造方面表现出了良好的应用前景,但其大规模工业化应用仍面临诸多难点与挑战,主要包括:

(1) 管柱安全性

液氮低温条件下管材脆性特征明显,其冲击韧性降低,对冲击动载的承受能力下降。然而,钻井过程中井下管柱受力条件复杂,管柱同时承受扭动、冲击等多种动载作用,使得管柱脆断的风险大幅提高。相比之下,液氮压裂过程中管柱受载则相对缓和,以静态载荷为主,一般不会产生扭冲、振动等复杂动载工况,因此施工安全性相对较高。

(2) 支撑剂添加

由于液氮粘度较低,在携带支撑剂方面遇到挑战,容易造成近井脱砂和砂堵等复杂难题。为解决这一问题,一方面建议采用低密度、高强度支撑剂,同时在液氮压裂液中添加可降解纤维,提升液氮的携岩效率;另一方面建议从储层特征和裂缝起裂机理入手,通过一定的施工工艺设计,使地层形成张一剪结合的开裂模式,利用液氮低温热应力和膨胀增压作用,降低缝面的垂向应力,使裂缝发生剪切滑移和不整合自支撑,从而提升裂缝的导流能力。

图 17 “管柱预冷+局部封隔压裂”施工流程示意图^[1]

(3) 施工成本

对于液氮压裂, 尽管前人通过“油套同注”的方式成功实现了现场作业, 但存在着液氮消耗量大、需要使用特制的玻璃纤维管柱及不锈钢井口等问题, 大大提高了该技术的施工成本, 一定程度上制约了该技术的大规模推广。建议后续从施工工艺和管柱材质两方面入手, 优化液氮注入工艺, 同时寻求更加廉价、隔热性能更加优良的管柱(建议采用双层隔热管柱), 从而减少管柱预冷的液氮消耗量, 降低施工成本。

7 结 论

(1) 液氮低温致裂效果显著, 可显著劣化岩石的力学特性, 提升岩石的渗透率。热应力是干燥岩石液氮低温致裂的主要诱因, 孔隙水冻胀是饱水岩石致裂的主要机制。增加液氮循环次数和岩石初始温度, 有助于加剧液氮的致裂效果, 强化岩石损伤。

(2) 液氮射流是一种高效的射流破岩方法, 相同压力条件下液氮射流速度高于水射流, 其破岩体积平均是常规水射流的 18.24 倍, 破岩比能较水射

流低 90.8%, 在钻井提速和喷射压裂方面展现了良好的应用前景。

(3) 液氮超低温条件下, 管柱力学强度增大、冲击韧性减弱, 管柱更容易发生脆断, 施工过程中应尽量避免剧烈振动。经历液氮冷却的试件, 回复至室温后力学特性未发生劣化, 浸入时间和循环次数对试件的力学性质基本无影响。

(4) 液氮压裂是一种高效的无水压裂方法, 可有效降低岩石的破裂压力, 提升压裂缝网的复杂度和连通性, 在非常规油气和干热岩储层改造方面具有良好的应用潜力。

参 考 文 献

- [1] 邹才能, 潘松圻, 赵群. 论中国“能源独立”战略的内涵、挑战及意义. 石油勘探与开发, 2020, 47(2): 416—426.
- [2] 穆龙新, 陈亚强, 许安著, 等. 中国石油海外油气田开发技术进展与发展方向. 石油勘探与开发, 2020, 47(1): 120—128.
- [3] 罗成波, 孟英峰, 李皋, 等. 氮气钻井井底岩爆机理及动态过程演化. 天然气工业, 2019, 39(7): 99—105.
- [4] Maguire QJ. Cryogenic Drilling Method. 2008.

- [5] Wilson DR, Siebert RM, Lively P, et al. Cryogenic coal bed gas well stimulation method. 1995.
- [6] Grundmann SR, Rodvelt GD, Dials GA, et al. Cryogenic Nitrogen as a Hydraulic Fracturing Fluid in the Devonian Shale All Days. Pittsburgh, Pennsylvania. SPE, 1998.
- [7] McDaniel BW, Grundmann SR, Kendrick WD, et al. Field applications of cryogenic nitrogen as a hydraulic fracturing fluid. *Journal of Petroleum Technology*. 1998, 50(3): 38—39.
- [8] 黄中伟, 武晓光, 李冉, 等. 高压液氮射流提高深井钻速机理. *石油勘探与开发*, 2019, 46(4): 768—775.
- [9] 任韶然, 范志坤, 张亮, 等. 液氮对煤岩的冷冲击作用机制及试验研究. *岩石力学与工程学报*, 2013, 32(S2): 3790—3794.
- [10] Zhang HY, Huang ZW, Zhang SK, et al. Improving heat extraction performance of an enhanced geothermal system utilizing cryogenic fracturing. *Geothermics*, 2020, 85: 101816.
- [11] 张宏源. 液氮压裂井筒换热规律研究. 北京: 中国石油大学(北京), 2020.
- [12] 晏鹏森. 液氮对生产管柱力学性能影响规律的实验研究. 北京: 中国石油大学(北京), 2018.
- [13] 蔡承政, 李根生, 黄中伟, 等. 液氮冻结条件下岩石孔隙结构损伤试验研究. *岩土力学*, 2014, 35(4): 965—971.
- [14] Cai CZ, Gao F, Li GS, et al. Evaluation of coal damage and cracking characteristics due to liquid nitrogen cooling on the basis of the energy evolution laws. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2016, 29: 30—36.
- [15] Cai C, Wang XC, Yuan XH, et al. Experimental investigation on perforation of shale with ultra-high pressure abrasive water jet: Shape, mechanism and sensitivity. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2019, 67: 196—213.
- [16] 杨兆中, 张云鹏, 贾敏, 等. 低温对煤岩渗透性影响试验研究. *岩土力学*, 2017, 38(2): 354—360.
- [17] 蔡承政, 李根生, 黄中伟, 等. 液氮对页岩的致裂效应及在压裂中应用分析. *中国石油大学学报(自然科学版)*, 2016, 40(1): 79—85.
- [18] 蔡承政. 液氮低温致裂岩石机理与射流流场研究. 北京: 中国石油大学(北京), 2015.
- [19] 郭晓康. 液氮半溶浸煤致裂增透试验研究. 石家庄: 河北科技大学, 2016.
- [20] Wu XG, Huang ZW, Li R, et al. Investigation on the damage of high-temperature shale subjected to liquid nitrogen cooling. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2018, 57: 284—294.
- [21] Cai CZ, Li GS, Huang ZW, et al. Experimental study of the effect of liquid nitrogen cooling on rock pore structure. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2014, 21: 507—517.
- [22] Wu XG, Huang ZW, Zhang SK, et al. Damage analysis of high-temperature rocks subjected to LN₂ thermal shock. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2019, 52(8): 2585—2603.
- [23] 张春会, 郭晓康, 李和万, 等. 液氮溶浸对饱水煤裂隙扩展的影响研究. *煤炭科学技术*, 2016, 44(6): 99—105.
- [24] 李和万, 王来贵, 张豪, 等. 循环冷加载条件下受载煤样结构损伤规律. *煤炭学报*, 2017, 42(9): 2345—2352.
- [25] Wu XG, Huang ZW, Cheng Z, et al. Effects of cyclic heating and LN₂-cooling on the physical and mechanical properties of granite. *Applied Thermal Engineering*, 2019, 156: 99—110.
- [26] 翟成, 徐吉钊. 液氮循环致裂技术强化煤层气抽采的研究与应用展望. *工矿自动化*, 2020, 46(10): 1—8.
- [27] Cai CZ, Huang ZW, Li GS, et al. Feasibility of reservoir fracturing stimulation with liquid nitrogen jet. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2016, 144: 59—65.
- [28] Wu XG, Huang ZW, Song HY, et al. Variations of physical and mechanical properties of heated granite after rapid cooling with liquid nitrogen. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2019, 52(7): 2123—2139.
- [29] Cai C, Li G, Huang Z, et al. Velocity distribution characteristics and parametric sensitivity analysis of liquid nitrogen jet. *Engineering Review*. 2017, 37(1): 1—10.
- [30] Wu XG, Huang ZW, Li GS, et al. Experiment on coal breaking with cryogenic nitrogen jet. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2018, 169: 405—415.
- [31] Zhang SK, Huang ZW, Li GS, et al. Numerical analysis of transient conjugate heat transfer and thermal stress distribution in geothermal drilling with high-pressure liquid nitrogen jet. *Applied Thermal Engineering*, 2018, 129: 1348—1357.
- [32] Wu XG, Huang ZW, Zhao HQ, et al. A transient fluid-thermo-structural coupling study of high-velocity LN₂ jet impingement on rocks. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2019, 123: 104061.
- [33] Zhang SK, Huang ZW, Zhang HY, et al. Experimental study of thermal-crack characteristics on hot dry rock impacted by liquid nitrogen jet. *Geothermics*, 2018, 76: 253—260.
- [34] Zhang SK, Huang ZW, Huang PP, et al. Numerical and experimental analysis of hot dry rock fracturing stimulation with high-pressure abrasive liquid nitrogen jet. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2018, 163: 156—165.

- [35] Zhang SK, Huang ZW, Wang HZ, et al. Experimental study on the rock-breaking characteristics of abrasive liquid nitrogen jet for hot dry rock. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2019, 181: 106166.
- [36] 张世昆. 液氮磨料射流破碎高温花岗岩机制研究. 北京: 中国石油大学(北京), 2020.
- [37] Cha MS, Yin XL, Kneafsey T, et al. Cryogenic fracturing for reservoir stimulation -Laboratory studies. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2014, 124: 436—450.
- [38] Alqatahni NB, Cha MS, Yao BW, et al. Experimental Investigation of Cryogenic Fracturing of Rock Specimens Under True Triaxial Confining Stresses. *All Days*. Vienna, Austria. SPE, 2016.
- [39] Yang RY, Hong CY, Liu W, et al. Non-contaminating cryogenic fluid access to high-temperature resources: Liquid nitrogen fracturing in a lab-scale Enhanced Geothermal System. *Renewable Energy*, 2021, 165: 125—138.
- [40] 李子丰. 液化氮气在油气层内气液压裂方法.
- [41] 徐红芳. 适用于页岩气开发的液化氮气汽化压裂技术. 秦皇岛: 燕山大学, 2013.

Theory and Research Progress of Liquid Nitrogen Fracturing and Rock Breaking

Huang Zhongwei^{1*} Wu Xiaoguang^{1*} Xie Zixiao¹ Yang Ruiyue¹
 Zhang Shikun² Zhang Hongyuan³ Zou Wenchao¹

1. State Key Laboratory of Petroleum Resources and Prospecting, China University of Petroleum-Beijing, Beijing 102249
2. China Petroleum Engineering Technology Research Institute, Beijing 102206
3. Sinopec Research Institute of Petroleum Engineering, Beijing 100101

Abstract Liquid nitrogen shows great potential in reservoir stimulation and drilling rate improvement of unconventional reservoirs due to its remarkable cryogenic cracking effect, which could provide new insight to address issues such as large water consumption, reservoir damage and environmental risks accompanied with water-based working fluid. This paper systematically summarized five key scientific problems involved in liquid nitrogen fracturing and drilling, including cryogenic cracking of rock, liquid nitrogen flow and heat transfer in a wellbore, rock-breaking performances of liquid nitrogen jets, mechanical behaviors of the working tube at low temperature, and fracture propagation mechanism of liquid nitrogen fracturing. The basic theory and research progress of liquid nitrogen applied in fracturing and rock breaking are reviewed, and main bottlenecks and technical difficulties are analyzed. Some suggestions in research and engineering applications are provided for future work. This paper helps readers understand the theory and research progress of liquid nitrogen in rock breaking and stimulation, and provide basic theoretical guidance to the novel drilling and fracturing methods in unconventional reservoir development.

Keywords drilling; fracturing; liquid nitrogen; jet; breaking rock

(责任编辑 张强)

* Corresponding Author, Email: huangzw@cup.edu.cn, wuxg@cup.edu.cn