

# 连续管钻井完井技术研究进展及发展趋势

李根生<sup>\*</sup>, 宋先知, 黄中伟, 田守增, 史怀忠, 王海柱, 盛茂

油气资源与探测国家重点实验室(中国石油大学(北京)), 北京 102249

<sup>\*</sup> 通信作者, ligs@cup.edu.cn

收稿日期: 2016-05-06

国家自然科学基金创新研究群体项目(No.51521063)和重点项目(No.51230006 & No. U1562212)

**摘要** 连续管钻井完井技术是上世纪90年代初迅速发展起来的新技术,它具有作业效率高、成本低、安全可靠等优点。本文回顾世界连续管技术的发展概况,分析国内外连续管钻井和完井的技术现状;阐述连续管寿命及可靠性、变形伸长量、管内流体摩擦压降、钻井携岩和水平井冲砂洗井等连续管钻井完井相关基础理论研究进展;探讨连续管超临界CO<sub>2</sub>钻井、连续管非接触式破岩钻井、连续管无水压裂、连续管无限级压裂和连续管钻井与压裂改造一体化等前沿技术可行性与发展趋势;最后,展望连续管钻井和完井技术的发展前景。

**关键词** 连续管; 钻井; 完井; 工艺技术; 基础理论; 研究进展; 发展趋势

## 0 引言

连续管技术最早可以追溯到1944年6月盟军于“诺曼底登陆”之前进行的跨越英吉利海峡的管线工程(Pipe Lines Under The Ocean, PLUTO)。1962年,世界上首台连续管作业机研制成功,主要用于油井冲砂解堵作业。上世纪90年代初,连续管钻井技术在美国和加拿大取得试验成功,逐渐应用于老井加深、开窗侧钻斜井或水平井、欠平衡钻井、微小井眼钻井等。同时,连续管技术在陆上、海洋以及非常规油气的压裂酸化等完井增产领域也得到了迅速发展。与传统钻井完井技术相比,连续管作业设备体积小、操作简便、自动化程度高、动迁性能好;连续管无接头、无变径、强度大、承压高,能够动态密封和在井内连续起下,极大缩短了作业周期,减轻了劳动强度,降低了开采成本,其费用可节约25%~40%。因此,在油田修井、完井、测井、钻井等作业中得到广泛应用,在油气行业被誉为“万能作业设备”<sup>[1]</sup>。

## 1 国内外连续管钻井完井技术现状

自连续管技术发展以来,作业机数量不断增加,连续管技术应用的领域也越来越广泛,从冲砂洗井、酸化解堵、注氮气举、测井射孔、修套投捞等常规作业拓展到老井侧钻/加深、浅层气钻井、微小井眼钻井、欠平衡钻井、多分支井钻井以及完井、压裂增产多个领域。

### 1.1 连续管作业机发展概况

1962年,美国加利福尼亚石油公司(California Oil Company)和波恩石油工具公司(Bowen Tools)联合研制了第1台连续管作业机,其目的是解除井筒中的砂堵<sup>[2]</sup>。随后经过50多年的发展,连续管作业机型式多样,可分为常规型和复合型2种型式,其中常规型主要有拖车式、车装式、撬装式3种型式,前2种主要用于陆地上,撬装式主要用于海上。2015年,Schlumberger公司使用连续管最大作业井深已达到

引用格式: 李根生, 宋先知, 黄中伟, 田守增, 史怀忠, 王海柱, 盛茂. 连续管钻井完井技术研究进展及发展趋势. 石油科学通报, 2016, 01: 81-90

LI Gensheng, SONG Xianzhi, HUANG Zhongwei, TIAN Shouceng, SHI Huaizhong, WANG Haizhu, SHENG Mao. Research progress and prospects of well drilling and completion with coiled tubing. Petroleum Science Bulletin, 2016, 01: 81-90. doi: 10.3969/j.issn.2096-1693.2016.01.006

8 824 m; 2012年, Xtreme公司使用连续管最大钻井深度已达到6 045 m。

自20世纪末以来,世界上连续管作业机数量总体逐渐增加(如图1所示)。据国际连续油管协会(International Coiled Tubing Association, ICoTA)统计,2013年全球连续管作业机数量为1 963台,2015年达到2 096台,2016有所下降,为1 951台。其中,美国连续管作业机所占比例最多,2016年占全球总量的27%。全球范围内各大石油服务公司中,Schlumberger、Halliburton和Baker Hughes 3大油服公司拥有连续管作业机最多,其中Schlumberger公司拥有269台连续管作业机。

我国于1977年引进了首台连续管作业机,前期主要进行冲砂、洗井、解堵等常规作业。2007年我国研制成功第一台具有自主知识产权的LG180/38连续管作业机,并在大港油田的6口井中进行了冲砂洗井、解堵和堵漏作业的8井次现场试验,作业方便快捷,取得了良好的增产效果<sup>[3]</sup>。截至2016年,我国拥有连续管作业机数量达到78台,其中杰瑞公司13台,大港油田8台。目前,我国可以自主生产车装、撬装、拖挂式连续管作业机。杰瑞公司研制的注入头最大拉力可以达到725 kN,车装式连续管作业机可以达到 $\Phi 44.5$  mm连续管7 000 m,拖挂式连续管作业机可以达到 $\Phi 44.5$  mm连续管7 500 m,撬装式连续管作业机

可以达到 $\Phi 44.5$  mm连续管5 500 m。

## 1.2 连续管钻井技术现状

上世纪90年代,美国Oryx公司首先采用连续管钻井技术实现了老井中侧钻水平井,法国Elf公司利用连续管技术进行了老井加深,标志着连续管钻井技术步入实际工业应用水平<sup>[4]</sup>。

连续管钻井作业占用场地少,适用于地面受限制地区和海上平台;钻微小井眼降低钻井成本;过油管钻井,可以实现边钻边采;欠平衡钻井过程中边喷边钻,降低钻井液漏失、地层污染,并且提高机械钻速;减少设备和人力投入;作业过程中无需接单根,连续循环泥浆,大大缩短作业周期<sup>[5]</sup>。因此,连续管钻井技术作为一种成本低、效率高、安全可靠的钻井新技术,成为钻井领域的技术热点,在全球得到了迅速的发展。

近年来,国外连续管钻井装备向个性化、多功能化、智能化方向发展,随着新型连续管钻机和高强度大直径连续管的研制与应用,连续管的使用寿命和抗腐蚀性得到了大幅提高<sup>[6-9]</sup>。美国HydraRig公司研制的复合型连续管钻机还装备有钻台、井架、天车、游车、液压大钳等钻井设备,完全采用自动控制技术、传感技术和数据采集系统来监控整套装备,可以实现自动司钻的功能。加拿大Dreco公司开发出专用于沙

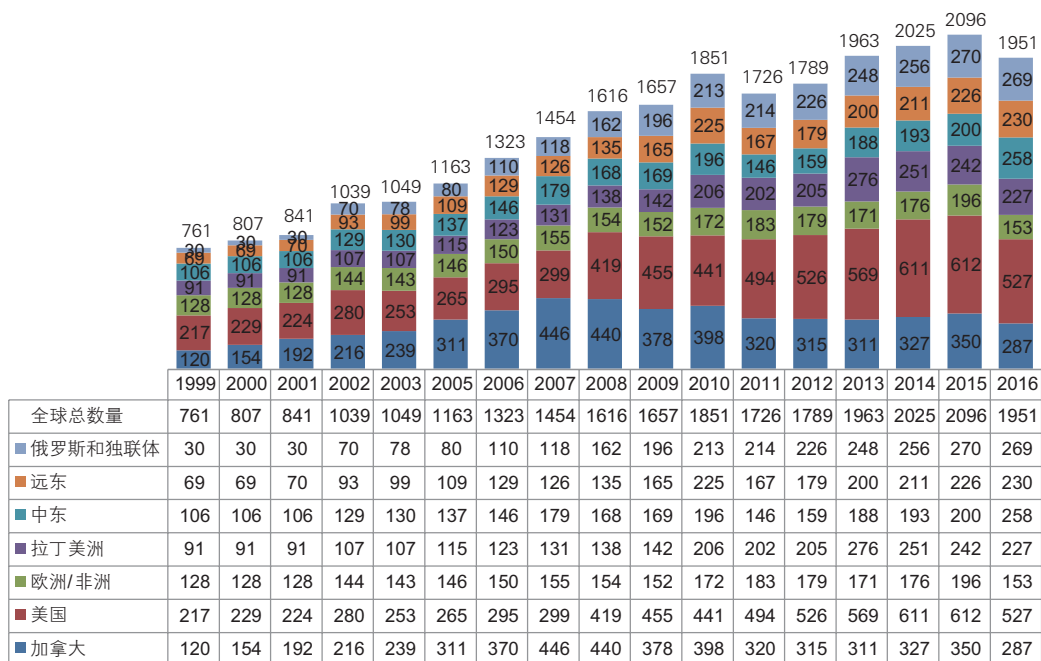


图1 全球连续管作业机数量 (www.icota.com, 2016)

Fig. 1 Worldwide coiled tubing unit count (www.icota.com, 2016)

漠或极地的连续管钻机,各部件封装在防撞框架结构内,液动力系统采用封闭和隔音结构。

连续管钻井的井下工具也得到了快速的发展。目前应用较广、效果较好的连续管底部钻具组合都为电缆系统底部钻具组合,代表性的有Schlumberger公司的VIPER系统、Antech公司的COLT系统、Baker Hughes公司的CoilTrak系统等<sup>[10]</sup>。小直径井下马达、定向井钻井工具、轴向减震增压工具等也取得重大进展,电动和泥浆脉冲MWD工具已经能够提供越来越多的井下实时数据(自然伽马、电阻率、井斜角、方位角、井底压力),逐步改变了以往连续管不能用于复杂钻井作业的难题,进一步提高了连续管钻井技术的能力与水平<sup>[11-14]</sup>。

正是由于连续管钻井装备和工具的不断发展,连续管钻井应用范围从小井眼加深扩展到侧钻(水平井)、欠平衡钻井、过油管钻井和分支井等复杂钻井作业中。2005年连续管钻井作业占整个连续管业务的15%左右,2010年连续管钻井业务的份额已经占到了整个业务的27%左右。据不完全统计,全世界每年生产70~80套连续管整装钻机,在用连续管钻机超过1500台。

美国阿拉斯加Prudhoe Bay是美国最大的产油区,近年来应用连续管钻井装备与技术实施了600多口过油管侧钻井和侧钻水平井。据估计美国每年有4000~5000口井适合采用连续管钻井。在加拿大的阿尔伯塔、萨斯喀彻温等地区,从2006年起采用连续管钻井的数量超过1000口,2007年在浅井作业中采用连续管钻井的比例达到27%,2008年这一比例达到32%,这使得加拿大成为了采用连续管钻井最活跃的国家。世界上主要石油服务公司也都在开展连续管钻井技术研究与应用,其中Halliburton、BJ Service、Baker Hughes等油田服务公司占据优势。近年来,每年连续管钻井数都在1000口以上,其中老井侧钻定向井120口,新钻浅直井800口以上。

我国连续管钻井技术起步较晚,2010年7月,四川宏华石油设备有限公司研发了国内首台CTR120/300复合连续管钻机,其名义钻井深度( $\phi 114.3$  mm 钻杆)2000 m,并进行了厂内的钻井试验<sup>[2]</sup>。中石油钻井院于2011年在辽河油田马758井进行了国内首次老井加深现场试验,从2160.4 m加深至2181.4 m,钻进21.0 m<sup>[15]</sup>。自2013年以来,又开展了4口井的连续管侧钻井现场试验。2014年7月,中石油钻井院在大港油田女S67-43K井中成功进行开窗侧钻作业,填补了该技术国内空白。该井设计井深1994 m,开窗位置

1625 m,应用连续管完成了开窗、修窗、试钻等一系列作业,用时22.5 h,连续管钻井进尺170 m<sup>[16]</sup>。2015年6月,在大港油田官142-2K井首次利用连续管通井、刮铣管、坐挂斜向器、开窗、定向造斜和稳斜钻进的侧钻井整体工艺试验。连续管钻井进尺403 m,完钻井深1909 m,平均机械钻速3.3 m/h<sup>[17]</sup>。目前,我国已经基本掌握了连续管侧钻井设计、装备与钻具组合、施工操作、井眼质量控制等配套技术,并形成了一套现有装备和工具条件下的连续管侧钻井技术,为推动我国连续管钻井技术持续发展奠定了扎实的基础。

### 1.3 连续管完井压裂技术现状

连续管完井开始于上世纪90年代初,它具有减小对井的伤害、更好的井筒完整性、操作简便、成本低等优点。从最初的二次完井发展到初次完井,连续管完井形式多样,包括:气举完井、电潜泵完井、悬挂或加固衬管来堵气和堵水、油管中气举完井等<sup>[18]</sup>。连续管完井可以提高单井产量,保证井筒完整性、克服小尺寸井眼安装套管或注水泥时的抽汲、激动压力以及循环压力损失等。1995年,阿曼石油开发公司(Petroleum Development of Oman)使用外径3.5 in(88.9 mm)的大直径、高屈服强度连续管在8口井进行了完井试验<sup>[19]</sup>。1999年,Head等<sup>[20]</sup>提出在小尺寸井中使用连续管完井,以克服安装套管时的激动和抽汲压力以及注水泥过程中的循环压力损失问题。2002年,在Marnock油田高温高压井进行了连续管防砂完井,作业后每天增加25000当量桶原油<sup>[21]</sup>。2016年,Schlumberger公司在墨西哥海上油田的四口井进行了连续管尾管完井作业,使用了尺寸为 $2\frac{3}{8}$  in和 $3\frac{1}{2}$  in的连续管,在不改变井口装置和井筒完整性的条件下,增加了单井产油量<sup>[22]</sup>。

1992年,Schlumberger公司在美国拉斯加州普拉德霍湾的油井将连续管技术首次应用于压裂增产领域,早期连续管压裂仅限于在单一薄层压裂或施工压力较低的情况下应用<sup>[23]</sup>。连续管作为加砂压裂的传输工具可节约大量的时间,应用连续管可实现多个地层同时返排,连续管压裂施工设备可将所需支撑剂准确注入目的层。二十几年来,因连续管压裂的高效性和经济性而得到迅速发展,形成了连续管水力喷射压裂、连续管水力喷砂射孔环空加砂压裂和连续管水平井分段压裂等特色技术。国外多个油田服务公司均推出了各具特色的连续管压裂技术,如Schlumberger公司的

CoilFrac Service、BJ Service公司的OpticFrac Service、Halliburton公司的CobraFrac Service等<sup>[24]</sup>。

1998年, Halliburton公司工程师Surjaatmadja提出将水力喷射分段压裂技术用于特低渗油藏水平井压裂增产作业<sup>[25]</sup>。连续管水力喷射压裂技术是集水力射孔、压裂、隔离一体化的新技术, 结合了水力喷砂射孔定点压裂的优越性和连续管拖动的灵活性, 适应于多产层和薄层直井逐层压裂及裸眼水平井增产改造。2007年7月, 中石油西南油气田分公司和中国石油大学(北京)合作, 在四川白浅110井开展了国内自主研发的连续管水力喷射分段压裂工具和技术首次现场试验<sup>[26]</sup>。

连续管喷砂射孔多层环空加砂压裂技术是定点水力喷砂射孔、环空加砂压裂、机械封隔一体化的新型油气藏增产措施, 适用于多种完井方式的油气井增产, 施工周期短、安全可靠、作业成本低, 是目前储层改造、提高单井产量的有效措施。与常规压裂技术相比, 连续管喷砂射孔环空多层压裂工艺技术通过套管接箍定位器准确定位, 提高储层改造的准确度和有效率, 对水平井分段压裂和直井多层定点分段压裂有着广泛的应用前景。2004年, Halliburton公司先后在3口井中进行了连续管喷砂射孔多层环空加砂压裂作业, 作业后平均增产40%~60%<sup>[27]</sup>。长庆油田从2009年开始探索连续管喷砂射孔环空填砂分层压裂工艺, 已顺利完成6口井的现场应用<sup>[28]</sup>。

连续管拖动喷射酸压技术是连续管与水力喷射酸压技术相结合应用于油气田增产作业中的技术, 依靠连续管小巧、移动灵活、操作简便等特点, 提高作业效率, 降低施工风险, 实现全井段优化布酸, 已在和田河气田进行了成功应用, 最多施工分段达16段, 取得了较好的增产效果<sup>[29]</sup>。

## 2 连续管钻井完井基础理论研究进展

近年来, 随着连续管钻井和完井技术的迅速发展, 国内外学者围绕相关的基础理论开展了深入的研究, 在连续管可靠性、连续管变形伸长量、管内流动摩阻、携岩和水平井洗井等方面取得了一系列基础理论成果, 为连续管钻井和完井技术的应用提供了理论指导。

### 2.1 连续管疲劳寿命和可靠性研究

连续管每次井下作业都经历多次拉直-弯曲-拉直塑性变形, 并且连续管作业的范围不断扩展, 面临的井下工作环境差异较大, 如何将损伤的连续管安全

应用至钻井完井作业, 最大程度的提高连续管作业次数和可靠性, 是工程上迫切需要解决的关键难题。国内外学者对连续管弯曲寿命、摩阻及稳定性等问题进行了大量的试验和研究。何春生<sup>[30]</sup>开展了室内实验, 得到连续管椭圆度、壁厚及损伤参数随循环次数变化的计算模型, 并基于能量法建立了连续管在井底轴向压力作用下发生螺旋和正弦屈曲的多次失稳临界载荷计算模型。Hampson等<sup>[31]</sup>考虑连续管膨胀对连续管寿命的影响, 建立了更为完善的连续管疲劳寿命预测模型。王安义等<sup>[32]</sup>在综合分析软模型、硬模型和三维梁柱模型优缺点的基础上, 提出软模型是计算连续管摩阻的最优模型, 并给出了摩阻计算公式, 用以预测和分析连续管在三维井眼中的摩阻。Livescu等<sup>[33]</sup>在考虑流体性质、连续管参数、排量以及井底压力等因素的基础上, 建立了适用于大位移井的连续管轴向拉力和摩阻力的计算模型, 实验数据显示该模型的预测效果较好。张超越<sup>[34]</sup>依据Lyapunov运动稳定性理论推导出特殊的平衡稳定状态, 利用弹性细杆的非线性力学推导出连续管井下非线性弯曲的力学模型。张宝等<sup>[35]</sup>根据超深井连续管作业特点, 考虑温度、井内介质流动阻力等影响因素, 建立了连续管作业综合受力模型, 可在作业前对连续管作业过程中受力、变形以及井口注入头所需注入力进行模拟预测。

### 2.2 连续管伸长量预测研究

连续管伸长问题非常复杂, 在作业过程中受拉、压、弯曲等应力、螺旋屈曲、连续管内外流体压差、井眼尺寸、井眼轨迹、井壁摩擦、连续管壁厚、管材等多种因素的影响, 伸长量的大小很难准确预测。国内外学者对连续管屈曲变形的研究较多, 但对连续管伸长的定量研究相对较少。Tipton<sup>[36]</sup>基于复杂的材料塑性模型对计算模型进行了改进, 分析了连续管膨胀和伸长的变形特性, 并预测了现场载荷条件下连续管的长度。Newman等<sup>[37]</sup>分别用有限元分析、数值模型、解析模型、实验检验等方法对连续管变形伸长进行研究, 结果表明连续管旋转和轴向载荷会显著增加连续管的轴向伸长量。Qiu等<sup>[38]</sup>基于能量守恒对连续管在井眼中的屈曲变形进行研究, 分析了初始振幅、井斜角和尺寸对屈曲变形的影响。Adan等<sup>[39]</sup>基于连续管受力与螺旋管运动的关系, 建立了连续管自锁段长度预测模型, 并通过实验验证了模型的可靠性。何东升等<sup>[40]</sup>推导了连续管在自重、内外压、温差作用下的伸长量计算模型。侯学军等<sup>[41]</sup>分析了轴向载荷引起的伸长、热伸长、内外压差引起的伸长及螺旋弯曲引起的缩短等4种变

形问题,研究了相应的理论计算公式和计算方法,并通过实例分析了连续管变形伸长的基本特点。

### 2.3 连续管内流体摩擦压力损失研究

连续管水力学分析是连续管钻井的重要内容,连续管内流体循环压耗是水力学计算和设计的关键。连续管具有管径小、盘管流阻大、井下连续管发生正弦和螺旋屈曲后管流发生异变等特点,其管内流体摩擦阻大。当流体在螺旋管内流动时,在离心力的作用下产生二次涡流,导致螺旋管内流体压降远大于直管中的压降。Zhou等<sup>[42]</sup>和Jain等<sup>[43]</sup>开展了非牛顿流体在连续管中的摩擦压力损失的理论分析、室内实验和数值模拟研究。Shah等<sup>[44]</sup>通过全尺寸室内实验研究了非牛顿流体在连续管中的摩擦压力损失,开展了连续管流体流动降阻特性的研究。Gallego等<sup>[45]</sup>建立了直管段和连续管中的摩擦压力公式。张晋凯等<sup>[46]</sup>研究了连续管螺旋段内的二次流特性,建立一套适用于牛顿流体的预测螺旋段摩擦阻系数的回归公式。管锋等<sup>[47]</sup>基于相似理论,实验研究了连续管弯曲直径、聚合物添加剂以及井下工具组合等因素对连续管流体摩擦阻的影响。郭晓乐等<sup>[48]</sup>建立了连续管钻小井眼水平井的循环压耗计算方法,并对其规律进行了分析。

### 2.4 连续管钻井井筒携岩效率研究

连续管钻井过程中钻柱无旋转,使得岩屑的悬浮携带难度增大,容易在水平井和大斜度井的环空底端形成岩屑床,造成流体循环压耗和管柱滑动摩擦阻增大,制约了连续管钻井的水平井眼延伸能力,严重时甚至会发生卡钻事故。国内外学者通过理论分析、数值模拟和室内实验来研究连续管钻井过程中的岩屑运移规律。Cho等<sup>[49-50]</sup>建立了连续管钻定向井和水平井过程中全井筒的岩屑运移模型,在过渡段应用两层岩屑床模型,在水平段和近水平段应用三层岩屑床模型。Takahashi<sup>[51]</sup>基于两层岩屑床模型建立了临界流速数学模型,用来预测连续管钻水平井和定向井过程中避免岩屑床形成的最小临界流速。宋先知等<sup>[52]</sup>建立了连续管钻水平井过程中岩屑运移的混合物漂移模型,研究了钻井液排量、环空偏心度、岩屑直径和井斜角等因素对微小井眼水平井岩屑运移的影响,得到了各种条件下环空岩屑速度和浓度的分布规律。Kamyab等<sup>[53]</sup>通过实验确定了有效运移岩屑的临界流速,分析了岩屑尺寸和钻井液性质的影响,并通过数值模拟分析不同参数对岩屑运移的影响,与实验结果进行了对比。王梦抒<sup>[54]</sup>通过数值模拟和室内实验研究了微小井眼水

平井岩屑运移规律,分析了岩屑尺寸、偏心度、机械钻速、排量等参数对连续管钻微小井眼水平井时岩屑运移效率的影响。

### 2.5 连续管水平井冲砂洗井研究

连续管冲砂洗井一直在连续管作业总量中占最大比例。针对水平井筒中地层砂、充填砂易沉积形成砂床的难点,国内外相继发展了固定式、转向式和旋转式等多种基于连续管技术的射流冲砂洗井工具,并对水平井连续管冲砂洗井的井筒流场、砂床运移效率、参数优化设计等内容开展了大量的理论和实验研究。Walker等<sup>[55]</sup>通过大量的室内实验分析了喷嘴类型、颗粒尺寸、流体类型、井斜角、多相流动等因素对洗井效率的影响。Li等<sup>[56]</sup>针对连续管内径小、环空尺寸大的特点,提出采用反循环洗井方式来提高砂粒运移效率,并通过室内实验研究优化了连续管送进速度。Li等<sup>[57]</sup>提出同心连续管柱配合井下喷射泵方法来有效清除砂粒,该技术不会对地层施加额外的静液压力,因而适用于地层压力系数较低时的冲砂洗井作业。刘寿军<sup>[15]</sup>设计研制了连续管水平井固定式旋流冲砂装置,并利用 $k-\varepsilon$ 湍流模型对水平井旋流冲砂洗井的流场进行了数值模拟。管锋等<sup>[47]</sup>建立了连续管水平井冲砂洗井水力计算模型,提出水平井筒临界携岩速度为竖直井筒砂粒沉降末速度的6倍。宋先知等<sup>[58-59]</sup>利用数值模拟和实验的方法,揭示了水平井旋转射流冲砂洗井的环空旋流形成机理,实验表明连续管水平井旋转射流冲砂洗井作业存在旋流冲洗段、直流冲洗段和过渡段,分析了环空非均匀旋流场与沉积砂床相互作用下临界旋流作用长度的影响规律和砂床运移效率。

## 3 连续管钻井完井新技术发展趋势

目前,世界油气钻井和完井技术主要向着有利于发现新油气藏、保护储集层、提高油气田采收率和自动化智能化的趋势发展。结合当前油气钻井完井领域的前沿新技术,研究连续管超临界CO<sub>2</sub>钻井、非接触式破岩钻井、无水压裂、无限级压裂、钻井与压裂一体化等一系列连续管钻井完井新技术,有望能够大幅度降低开发成本,提高作业和生产效率,减少储层污染和保护环境,具有广阔的发展前景。

### 3.1 连续管超临界CO<sub>2</sub>钻井

超临界CO<sub>2</sub>射流具有破岩门限压力低、破岩速度快、储层伤害低等优点;因此将连续管技术和超临界

CO<sub>2</sub>射流技术相结合,将有望降低喷射钻井的工作压力,提高钻井速度,大幅降低钻井成本。高压超临界CO<sub>2</sub>流体由钻头喷嘴喷出后,将产生焦耳-汤姆逊冷却效应,可以大幅度降低井底温度,冷却钻头及井下工具,延长钻头和井下工具使用寿命。此外,超临界CO<sub>2</sub>密度变化范围大,既可以为井下马达提供足够的扭矩,也可以实现欠平衡钻井,进一步提高钻井速度。利用超临界CO<sub>2</sub>喷射辅助连续管钻井<sup>[60-61]</sup>进行小井眼和微小井眼钻井,将进一步降低钻井成本,增强小井眼和微小井眼钻井的生命力,将连续管钻井的发展速度和发展水平推向新的高度。

### 3.2 连续管非接触式破岩钻井

非接触破岩是借助水力、热力、磁力等动力通过非接触的方式,引起岩石破碎的方法,是当前高研磨地层破岩方法的一个重要发展方向。非接触式破岩不与地层岩石接触,可以避免钻头磨损,减少起下钻时间,提高钻井效率,节省了钻井成本。连续管非接触式破岩钻井即采用连续管将非接触破岩工具送进至目标地层,通过调节连续管下放速度控制破岩的喷距与效率,实现地层岩石的持续破碎与钻进。它具有以下优势:连续管下入深度和速度可自动化精确调节,在钻井过程中实现非接触式破岩喷距的精细控制;连续管钻井、地面设备简单灵活,更易与非接触地面破岩设备配合,满足各种非接触破岩方法地面设备差异大等要求。目前,结合连续管技术与岩石高温热裂解方法,已相继提出了连续管流体热裂解破岩方法、热力射流破岩方法<sup>[62]</sup>等非接触破岩钻井技术,其中热力射流破岩方法结合了高压水射流冲击作用与高温热裂解效应,有望在高研磨地层获得更好的破岩效果。总之,将连续管技术与非接触式破岩方法相结合,有望进一步提高破岩效率,降低钻井成本,具有重要的研究价值与广阔的应用前景。

### 3.3 连续管无水压裂

超临界CO<sub>2</sub>压裂、LPG压裂和液氮压裂等新型无水压裂方法近年来得到了广泛关注。相对于传统水力压裂技术,上述无水压裂技术具有以下优势:无需使用水,返排迅速,避免了常规水基压裂液对油气层的伤害;无残渣,可使裂缝面和导流床保持清洁高效;应用范围广,可用于常规油气和页岩气等非常规油气压裂增产。但是无水压裂技术对循环流体压力和温度控制的要求苛刻,易发生密封泄漏、流体相变而导致安全事故。利用连续管技术具有的流体连续循环、压

力易调节、设备模块化自动化程度高等优势,发展连续管超临界CO<sub>2</sub>压裂、LPG压裂和液氮压裂等连续管无水压裂系列技术<sup>[63-65]</sup>,有望进一步提高无水压裂技术的适应性,拓展连续管压裂增产技术的发展领域。

### 3.4 连续管喷砂射孔无限级压裂

北美数十年的页岩气生产数据表明,增加压裂级数、降低单级压裂液注入量可获得更好的增产效果,使得无限级压裂成为非常规油气资源高效开发的迫切需求。连续管以其灵活的起下管柱能力,与水力喷射压裂有机结合,实现了理论上无限级数的压裂改造<sup>[66-68]</sup>,是未来连续管用于油气藏增产的发展方向之一。其技术原理是采用连续管拖动水力喷砂器,依靠机械封隔器或填砂塞等方式封隔井眼,喷砂器产生磨料射流,定点喷砂射孔,接着套管加砂压裂,压后拖动喷砂器至下一层段。该技术的突出优势是:(1)射孔压裂联作,作业效率高。北美实践表明,一趟管柱最高压裂级数达104级,24 h完成40级压裂。(2)布置裂缝灵活多变。裂缝间距短至15 m(常规压裂方法难以实现),并且可在已压裂的2条裂缝中间再布置新裂缝,利用缝间应力干扰增加缝网复杂度。(3)压裂规模、泵注参数精细控制,减少耗水量。个性化设计单级压裂泵注程序和压裂液体系,精细控制压裂规模,整体耗水量下降。技术关键包括高性能抗冲蚀水力喷砂器研制、高效封隔与解封系统设计、井下压力实时监测与井口压力控制、井下工具定位与锚定等。未来该技术的发展朝着“压裂级数更多、更加安全高效、增产效果更强”的方向进步。

### 3.5 连续管钻井与压裂一体化

钻井与压裂改造一体化是缩短油气井建井周期、降低综合作业成本的新思路,是顺应非常规油气资源低成本高效开发的前沿技术。其内涵是通过统筹规划钻完井与压裂改造等各个环节的需求与联系,实现钻完井与压裂改造等工序的批量、交叉和一体化作业,具体包括井网井型部署、井眼轨迹优化与控制、钻井提速、压裂优化一体化技术。连续管在钻井与压裂改造方面效率高、综合成本低,因此用于钻井与压裂改造一体化具有较大潜力。技术优势表现在:连续管可实现全过程欠平衡钻井和微小井眼钻井,机械钻速高于常规钻井,钻井周期和成本可显著降低,同时最大限度保护油气层;连续管适用性广,适用于钻井、洗井、排液、压裂增产等多个环节,同时井下工具更换便捷,完钻后直接更换压裂工具进行多级压裂改造是

可行的；连续管起下管柱速度快，并且可连续循环钻井液，因此作业效率高，井控风险小。

连续管钻多分支井，并在分支井眼中进一步压裂增产是钻完井与压裂改造一体化的重要发展趋势之一。其技术原理是通过钻成不同空间方位、数量和长度的分支井眼，利用井眼间应力干扰，控制形成三维复杂裂缝网络，即分支井眼控制压裂缝网形成的增产新思路。针对特定储层，甚至采用纯水力喷射破岩工具，利用高压水射流钻成不同空间方位、数量、长度的径向孔眼，并利用原有钻井管柱进行一体化压裂，从而实现“一井多层(段)、一层(段)多孔，一孔多缝”的复杂三维裂缝网络。一定长度的径向分支孔眼可望沟通距离主井筒较远的地层，避免或改善近井地带砂堵；不同径向孔眼分支在水平和垂直方向相互交错干扰，压裂后可望在储层中形成一个辐射面积较大的复杂裂缝网络，这无疑会大幅提高单井产量。

## 4 结论与展望

(1)连续管钻井和完井技术优势明显，工具装备、

工艺技术和基础理论研究进展迅速，为连续管小井眼/微小井眼钻井、侧钻井、欠平衡钻井、多分支井钻井和自动化钻井等技术的发展和應用提供了保障。同时，连续管水力喷射分段压裂、拖动酸化、冲砂解堵等技术有利于开发低渗油气藏，可有效提高单井产量和采收率，应用前景广阔。

(2)开展连续管超临界CO<sub>2</sub>钻井、连续管非接触式破岩钻井、连续管无水压裂、连续管喷砂射孔无限级压裂、连续管钻井与压裂改造一体化等前沿新技术研究，有望进一步提高钻井和完井效率，降低作业成本，同时拓宽连续管钻井和完井的技术应用领域。

(3)随着油气勘探开发不断向深层、深水和非常规等油气领域发展，油气开采所面临的地质条件和环境日趋复杂，连续管钻井完井技术以其安全高效、环保、低成本的技术优势，将具有更为广阔的应用前景。

因此，我国大力发展和推广连续管钻井完井新技术的时机已经成熟，必将产生良好的经济效益和社会效益，有助于全面提升我国钻井工程技术与装备水平，为我国能源产业与生态环境协调可持续发展提供有力支撑。

## 参考文献

- [1] 刘寿军,李根生.我国连续管技术面临的挑战和发展建议[J].石油机械,2013,41(11):1-5.[LIU S J,LI G S.Challenges for China's coiled tubing technology and development suggestions[J].China Petroleum Machinery,2013,41(11):1-5.]
- [2] 单代伟,李奔,田雨,等.CTR120/300复合连续油管钻机研制与试验[J].天然气工业,2013,33(2):76-80.[SHAN D W,LI B,TIAN Y,et al.Research & development of CTR120/300 hybrid coiled tubing rig and its experimental studies[J].Natural Gas Industry,2013,33(2):76-80.]
- [3] 贺会群,李相方,熊革,等.CT38连续管作业车研制与应用[J].石油机械,2008,36(3):1-4.[HE H Q,LI X F,XIONG G,et al.Development and application of CT38 coiled tubing unit[J].China Petroleum Machinery,2008,36(3):1-4.]
- [4] 贺会群.连续管钻井技术与装备[J].石油机械,2009,37(7):1-6.[HE H Q.The coiled tubing drilling technology and equipment[J].China Petroleum Machinery,2009,37(7):1-6.]
- [5] 唐志军,刘正中,熊继有.连续管钻井技术综述[J].天然气工业,2005,25(8):73-75.[TANG Z J,LIU Z Z,XIONG J Y.Brief statement of coiled tubing drilling techniques[J].Natural Gas Industry,2005,25(8):73-75.]
- [6] LAUN L E, LINK L R, NESVIK K T, et al. Large-diameter coiled tubing becomes available safely offshore through a newly developed spoolable connector: Case histories and field implementation[C]. SPE/ICoTA Coiled Tubing Conference and Exhibition, The Woodlands, 12-13 April, 2005.
- [7] MAKRIK K, BARCLAY D A, VANARNAM W D D. Use of high-strength coiled tubing in high-pressure/high-temperature perforating operations[C]. SPE/ICoTA Coiled Tubing & Well Intervention Conference and Exhibition, The Woodlands, 5-6 April, 2011.
- [8] 韦奉.宝鸡石油钢管有限责任公司高钢级大直径连续油管下线[J].钢管,2013,1(1):16.[WEI F.High grade and large diameter coiled tubing of CNPC Baoji Petroleum Steel Pipe Co., LTD rolled off the production line[J].Steel Pipe,2013,1(1):16.]
- [9] VALDEZ M, MORALES C, ROLOVIC R, et al. The development of high-strength coiled tubing with improved fatigue performance and H<sub>2</sub>S resistance[C]. SPE/ICoTA Coiled Tubing & Well Intervention Conference & Exhibition, The Woodlands, 24-25 March, 2015.
- [10] 尹方雷,余雷,夏炎,等.连续管钻井工具现状及趋势[J].辽宁化工,2013,42(9):1068-1074.[YIN F L,YU L,XIA Y,et al.Development status and trend of coiled tubing drilling tools[J].Liaoning Chemical Industry,2013,42(9):1068-1074.]
- [11] PINK A P, NEVES M, SEYLER C, et al. Drilling with a positive-displacement motor and rotary-steerable system on 3 1/2-in. coiled tubing in the San Juan Basin[C]. SPE/ICoTA Coiled Tubing and Well Intervention Conference and Exhibition, The Woodlands, 20-21 March, 2007.

- [12] ANYANWU O N, KLOTZ C, LABRECQUE D, et al. Optimized downhole mud motor delivers outstanding performance improvement in Alaska coiled tubing drilling[C]. SPE/ICoTA Coiled Tubing & Well Intervention Conference and Exhibition, The Woodlands, 27-28 March, 2012.
- [13] EBRAHIMI A, SCHERMER P J, JELINEK W, et al. Turbodrill bottomhole assembly and real-time data improve through-tubing coiled-tubing drilling operations in sour gas well[C]. Abu Dhabi International Petroleum Exhibition and Conference, Abu Dhabi, 9-12 November, 2015.
- [14] OYEDOKUN O, SCHUBERT J. Extending the reach of coiled tubing in directional wells with downhole motors[C]. SPE/ICoTA Coiled Tubing and Well Intervention Conference and Exhibition, The Woodlands, 25-26 March, 2014.
- [15] 刘寿军. 连续管作业机关键部件研制及现场试验[D]. 北京: 中国石油大学(北京), 2013. [LIU S J. Development and field test on coiled tubing unit key components[D]. Beijing: China University of Petroleum(Beijing), 2013.]
- [16] 石艺. 渤钻钻井一公司实施连续油管开窗作业[J]. 石油钻采工艺, 2014, 36(4): 87. [SHI Y. Bohai drilling company implemented window cuttings operation with coiled tubing[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2014, 36(4): 87.]
- [17] 中石油钻井院. 连续管侧钻井技术现场试验取得重大突破[J]. 石油机械, 2015, 43(8): 46. [CNPC Drilling Research Institute. Major breakthroughs of coiled tubing sidetrack drilling were made in field test[J]. China Petroleum Machinery, 2015, 43(8): 46.]
- [18] COURVILLE P W, CLARK T R. Coiled tubing completions: An economic discussion of procedures[C]. Middle East Oil Show, Bahrain, 11-14 March, 1995.
- [19] HOOKANI S A, CHURCHFIELD S, NEIL J, et al. 3 1/2" Coiled tubing completions in PDO[C]. Abu Dhabi International Petroleum Exhibition and Conference, Abu Dhabi, 13-16 October, 1996.
- [20] HEAD P, TURNER D, CAMERON G, et al. Slimwell concept-innovative coiled tubing completion technology[C]. SPE/ICoTA Coiled Tubing Roundtable, Houston, 25-26 May, 1999.
- [21] MUNRO C, ALLAM R, ERBIL M M, et al. Stimulating depleted HP/HT sand screen completions using coiled tubing[C]. SPE/ICoTA Coiled Tubing Conference and Exhibition, Houston, 9-10 April, 2002.
- [22] RAMONDENC P, FRANCO D, MOLERO N, et al. Reviving oil production in a mature offshore field through a downhole coiled tubing completion[C]. SPE/ICoTA Coiled Tubing and Well Intervention Conference and Exhibition, Houston, 22-23 March, 2016.
- [23] GULRAJANI S, OLMSTEAD C C. Coiled tubing conveyed fracture treatments evolution methodology and field application[C]. SPE Eastern Regional Conference and Exhibition, Charleston, 21-22 October, 1999.
- [24] 李根生, 黄中伟, 田守增等. 水力喷射压裂理论与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2011. [LI G S, HUANG Z W, TIAN S C, et al. Hydraulic jet fracturing theory and application[M]. Beijing: Science Press, 2011.]
- [25] SURJAATMADJA J B, GRUNDMANN S R, MCDANIEL B, et al. Hydrjet fracturing: An effective method for placing many fractures in openhole horizontal wells[C]. SPE International Oil and Gas Conference and Exhibition in China, Beijing, 2-6 November, 1998.
- [26] 田守增, 李根生, 黄中伟, 等. 连续油管水力喷射压裂技术[J]. 天然气工业, 2008, 28(8): 61-63. [TIAN S C, LI G S, HUANG Z W, et al. Hydrjet-fracturing technology with coiled tubing[J]. Natural Gas Industry, 2008, 28(8): 61-63.]
- [27] SURJAATMADJA J B, EAST L E, LUNA J B, et al. An effective hydrjet-fracturing implementation using coiled tubing and annular stimulation fluid delivery[C]. SPE/ICoTA Coiled Tubing Conference and Exhibition, The Woodlands, 12-13 April, 2005.
- [28] 任国富, 桂捷, 付钢旦, 等. 提高连续油管分层压裂施工效率的技术对策[J]. 重庆科技学院学报(自然科学版), 2013, 15(2): 101-103. [REN G F, GUI J, FU G D, et al. Technical countermeasures for raising efficiency of coiled tubing layer fracturing[J]. Journal of Chongqing University of Science and Technology(Natural Sciences Edition), 2013, 15(2): 101-103.]
- [29] 邹鸿江, 袁学芳, 杨向同, 等. 连续油管拖动喷射酸压工艺在和田河气田的应用[J]. 钻采工艺, 2012, 35(3): 44-45. [ZOU H J, YUAN X F, YANG X T, et al. Acid fracturing technique in HeTian River Gas Field[J]. Drilling & Production Technology, 2012, 35(3): 44-45.]
- [30] 何春生. 连续油管低周疲劳寿命预测及屈曲方法研究[D]. 大庆: 东北石油大学, 2014. [HE C S. The prediction of low cycle fatigue life and study of buckling analysis method for coiled tubing[D]. Daqing: Northeast Petroleum University, 2014.]
- [31] HAMPSON R, JANTZ E, SEIDLER T. Predicting coiled tubing life should consider diameter growth in addition to low cycle fatigue[C]. SPE/ICoTA Coiled Tubing and Well Intervention Conference and Exhibition, Houston, 22-23 March, 2016.
- [32] 王安义, 梁政, 吴大飞. 连续管井下作业摩阻计算分析[J]. 石油机械, 2010, 38(1): 25-31. [WANG A Y, LIANG Z, WU D F. An analysis and calculation of the downhole operating friction of coiled tubing[J]. China Petroleum Machinery, 2010, 38(1): 25-31.]
- [33] LIVESCU S, CRAIG S, AITKEN B. Coiled tubing friction in extended-reach wells[C]. SPE/ICoTA Coiled Tubing and Well Intervention Conference and Exhibition, Houston, 22-23 March, 2016.
- [34] 张超越. 预弯曲连续油管井下稳定性分析[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2013. [ZHANG C Y. The stability analysis of pre-bending coiled tubing in the downhole[D]. Qinghuangdao: Yanshan University, 2013.]
- [35] 张宝, 邵兵, 郭新维, 等. 超深井连续管作业过程受力分析及实例计算[J]. 石油机械, 2013, 41(8): 55-64. [ZHANG B, SHAO B, GUO X W, et al. Force analysis of CT operating process in superdeep well and example calculation[J]. China Petroleum Machinery,



- 2013, 41(8): 55-64.]
- [36] TIPTON S M. Coiled-tubing deformation mechanics: Diametral growth and elongation[J]. SPE Production & Facilities, 1998, 13(3): 194-199.
- [37] NEWMAN K R, SATHUVALI U B, WOLHART S. Elongation of coiled tubing during its life[C]. SPE/ICoTA North American Coiled Tubing Roundtable, Montgomery, 1-3 April, 1997.
- [38] QIU W, MISKA S Z. Effect of coiled tubing initial configuration on buckling bending behavior in straight deviated wells[J]. SPE Journal, 1999, 4(1): 64-71.
- [39] ADNAN S, CHEN Y C. An improved prediction of coiled tubing lockup length[C]. SPE/ICoTA Coiled Tubing Conference and Exhibition, Houston, 23-24 March, 2004.
- [40] 何东升, 徐克彬, 魏广森, 等. 连续油管在水平井中作业的力学分析[J]. 石油钻采工艺, 1999, 21(3): 61-64. [HE D S, XU K B, WEI G S, et al. Mechanics analysis of coiled tubing operation in horizontal well[J]. Oil Drilling & Production Technology, 1999, 21(3): 61-64.]
- [41] 侯学军, 高德利. 连续管伸长量分析[J]. 石油钻采工艺, 2012, 34(1): 23-27. [HOU X J, GAO D L. Elongation analysis of coiled tubing[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2012, 34(1): 23-27.]
- [42] ZHOU Y, SHAH S N. Non Newtonian fluid flow in coiled tubing: theoretical analysis and experimental verification[C]. SPE Annual Technical Conference and Exhibition, San Antonio, 29 September-2 October, 2002.
- [43] JAIN S, SINGHAL N. Effect of coiled tubing curvature on friction pressure loss of newtonian and non-newtonian fluids - experimental and simulation study[C]. SPE Annual Technical Conference and Exhibition, Houston, 26-29 September, 2004.
- [44] SHAH S N, AHMED K, ZHOU Y. Drag reduction characteristics in straight and coiled tubing-an experimental study[J]. Journal of Petroleum Science & Engineering, 2006, 53(3): 179-188.
- [45] GALLEGRO F, SHAH S N. Friction pressure correlations for turbulent flow of drag reducing polymer solutions in straight and coiled tubing[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2009, 65(3): 147-161.
- [46] 张晋凯, 李根生, 黄中伟, 等. 连续油管螺旋段摩阻压耗数值模拟[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2012, 36(2): 115-119. [ZHANG J K, LI G S, HUANG Z W, et al. Numerical simulation on friction pressure loss in helical coiled tubing[J]. Journal of China University of Petroleum(Edition of Natural Science), 2012, 36(2): 115-119.]
- [47] 管锋, 刘进田, 易先中, 等. 连续管水平井冲砂洗井水力计算研究[J]. 石油机械, 2012, 2012(11): 73-78. [GUAN F, LIU J T, YI X Z, et al. Hydraulic calculation of CT sand washing well flushing in horizontal well[J]. China Petroleum Machinery, 2012, 2012(11): 73-78.]
- [48] 郭晓乐, 龙芝辉, 齐成伟. 连续管钻小井眼水平井水力学分析[J]. 科学技术与工程, 2013, 13(26): 7781-7784. [GUO X L, LONG Z H, QI C W. Hydraulics analysis of horizontal slimhole using coiled tubing drilling method[J]. Science Technology and Engineering, 2013, 13(26): 7781-7784.]
- [49] CHO H, SHAH S N, OSISANYA S O. A three layer modeling for cuttings transport with coiled tubing horizontal drilling[C]. SPE Annual Technical Conference and Exhibition, Dallas, 1-4 October, 2000.
- [50] CHO H, SHAH S N, OSISANYA S O. A three segment hydraulic model for cuttings transport in coiled tubing horizontal and deviated drilling[J]. Journal of Canadian Petroleum Technology, 2002, 41(6): 32-39.
- [51] TAKAHASHI H. Modeling of cuttings transport for hole cleaning in horizontal and highly inclined wells by coiled tubing drilling[C]. ASME/JSME 2003 4th Joint Fluids Summer Engineering Conference, Hawaii, 6-10 July, 2003.
- [52] 宋先知, 李根生, 王梦抒, 等. 连续油管钻水平井岩屑运移规律数值模拟[J]. 石油钻探技术, 2014, 1(2): 28-32. [SONG X Z, LI G S, WANG M S, et al. Numerical simulation on cuttings carrying regularity for horizontal wells drilled with coiled tubing[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2014, 1(2): 28-32.]
- [53] KAMYAB M, RASOULI V. Experimental and numerical simulation of cuttings transportation in coiled tubing drilling[J]. Journal of Natural Gas Science & Engineering, 2016, 29: 284-302.
- [54] 王梦抒. 微小井眼水平井井眼净化效率研究[D]. 北京: 中国石油大学(北京). 2015. [WANG M S. Research on the wellbore cleaning efficiency of microhole horizontal wells[D]. Beijing: China University of Petroleum(Beijing), 2015.]
- [55] WALKER S, LI J. Coiled tubing wiper trip hole cleaning in highly deviated wellbores[C]. SPE/ICoTA Coiled Tubing Roundtable, Houston, 7-8 March, 2001.
- [56] LI J, LUFT B H. Fills cleanout with coiled tubing in the reverse circulation mode[C]. IADC/SPE Asia Pacific Drilling Technology Conference and Exhibition, Bangkok, 13-15 November, 2006.
- [57] LI J, LUFT B H, WILDE G, et al. Cleanouts with coiled tubing in low bottom hole pressure wellbores[C]. SPE/ICoTA Coiled Tubing and Well Intervention Conference and Exhibition, Woodlands, 1-2 April, 2008.
- [58] SONG X Z, LI G S, HUANG Z W, et al. Experimental study on horizontal wellbore cleanout by rotating jets[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2010, 75(1): 71-76.
- [59] SONG X Z, LI G S, ZHANG L B, et al. Mechanism and characteristics of horizontal wellbore cleanout by annular helical flow[J]. SPE

- Journal. 2014, 19(1): 45-54.
- [60] KOLLE J J. Coiled tubing drilling with supercritical carbon dioxide[C]. SPE/CIM International Conference on Horizontal Well Technology, Calgary, 6-8 November, 2000.
- [61] 沈忠厚, 王海柱, 李根生. 超临界CO<sub>2</sub>连续油管钻井可行性分析[J]. 石油勘探与开发, 2010, 37(6): 743-747. [SHEN Z H, WANG H Z, LI G S. Feasibility analysis of coiled tubing drilling with supercritical carbon dioxide[J]. Petroleum Exploration and Development, 2010, 37(6): 743-747.]
- [62] 宋先知, 李根生, 黄中伟, 等. 一种利用热力射流高效破岩的钻井新方法: CN201410075665.9.[P].[2016-04-26]. [SONG X Z, LI G S, HUANG Z W, et al. A new efficient drilling method using hydrothermal jet: CN201410075665.9. [P].[2016-04-26].]
- [63] 程宇雄, 李根生, 王海柱, 等. 超临界CO<sub>2</sub>连续油管喷射压裂可行性分析[J]. 石油钻采工艺, 2013, 35(6): 73-77. [CHENG Y X, LI G S, WANG H Z, et al. Feasibility analysis on coiled-tubing jet fracturing with supercritical CO<sub>2</sub>[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2013, 35(6): 73-77.]
- [64] LESTZ R S, WILSON L, TAYLOR R S, et al. Liquid petroleum gas fracturing fluids for unconventional gas reservoirs[J]. Journal of Canadian Petroleum Technology, 2007, 46(12): 68-72.
- [65] 张云鹏. 煤层气井液氮压裂技术研究[D]. 成都: 西南石油大学, 2015. [ZHANG Y P. Liquid fracturing technology research in coalbed meththane well[D]. Chengdu: Southeast Petroleum University, 2015.]
- [66] CASTRO L, WATKINS T, BEDORE B A, et al. Reducing operational time, fluid usage, hydraulic horsepower, risk and downtime: targeted fracs using CT-enabled frac sleeves[C]. SPE/ICoTA Coiled Tubing & Well Intervention Conference and Exhibition, Woodlands, 27-28 March, 2012.
- [67] CASTRO L, JOHNSON C C, THACKER C W. Tagreted annular hydraulic fracturing using CT-enabled frac sleeves a case history form montana's bakken formation[C]. SPE Annual Technical Conference and Exhibition, New Orleans, 30 September-2 October, 2013.
- [68] 李梅, 刘志斌, 路辉, 等. 连续管无限级滑套分段压裂技术在苏里格的应用[J]. 石油机械, 2015, 43(2): 40-43. [LI M, LIU Z B, LU H, et al. Application of CT stepless sleeve staged fracturing technique in sulige[J]. China Petroleum Machinery, 2015, 43(2):40-43.]

## Research progress and prospects of well drilling and completion with coiled tubing

LI Gensheng, SONG Xianzhi, HUANG Zhongwei, TIAN Shouceng, SHI Huaizhong, WANG Haizhu, SHENG Mao

*State Key Laboratory of Petroleum Resources and Prospecting (China University of Petroleum-Beijing), Beijing 102249*

**Abstract** Coiled tubing drilling and completion technology is a low-cost, high-efficiency and reliable technology. It has developed rapidly since the early 1990s. In this paper the development process of coiled tubing technology is reviewed, and the current situation of drilling and completion technology using coiled tubing all over the world is analyzed. The theoretical advances in coiled tubing drilling and completion: the life and reliability, elongation, friction pressure loss of fluid flow, cuttings transport and wellbore cleanout in horizontal wells are illustrated here. Moreover, the feasibility and prospect of supercritical carbon dioxide drilling, non-contact rock drilling, waterless fracturing, multistage unlimited fracturing and the integration of drilling and fracturing by coiled tubing is discussed. Finally, the prospects of the applications of coiled tubing drilling and completion technology are forecast.

**Keywords** coiled tubing; drilling; completion; technology; theory; research progress; prospects

**doi:** 10.3969/j.issn.2096-1693.2016.01.006

(编辑 马桂霞)