

doi: 10.12029/gc20190520

李立鑫, 张丰琰, 张恒春, 汪伟, 张毅, 胡郁乐. 2019. 深井复合钻柱技术在特深科学钻探中的应用探讨[J]. 中国地质, 46(5): 1200–1208.
Li Lixin, Zhang Fengyan, Zhang Hengchun, Wang Wei, Zhang Yi, Hu Yule. 2019. A discussion on deep-well combined drill string technology for ultra-deep drilling project[J]. Geology in China, 46(5): 1200–1208(in Chinese with English abstract).

深井复合钻柱技术在特深科学钻探中的应用探讨

李立鑫^{1,2}, 张丰琰^{1,2}, 张恒春³, 汪伟^{1,2}, 张毅^{1,2}, 胡郁乐^{1,2,4}

(1. 中国地质科学院, 北京 100037; 2. 中国地质调查局-中国地质科学院地球深部探测中心, 北京 100037; 3. 中国地质科学院勘探技术研究所, 河北 廊坊 065000; 4. 中国地质大学(武汉), 湖北 武汉 430074)

摘要: 深井复合钻柱技术是解决特深科学钻探超长钻杆柱可靠性问题的重要途径, 其与设备能力、材料性能、钻进条件及管柱力学等息息相关。本文系统总结了复合钻柱技术在我国深部钻探中的发展和应用情况, 在复合钻柱强度理论的基础上, 探讨了不同复合钻柱的组合方案及其极限下深。研究结果表明, 若以 $\phi 216$ mm 直径终孔, 仅依靠钢质钻柱已无法满足特深钻探 13000 m 的下深要求, 而采用 V150 钢级 $\phi 127$ mm 钻杆配合 $\phi 127$ mm 钛合金钻杆及 S135 钢级 $\phi 127$ mm 钻杆配合 $\phi 129$ mm 铝合金钻杆可分别满足最大 13484 m 和 18783 m 的下深要求, 钻柱总重分别仅有 360.5 t 和 324.3 t, 均具备可靠的安全性保障。本文对特深科学钻探用复合钻柱的设计和选择具有参考意义。

关键词: 松辽盆地; 科学钻探; 复合钻柱; 极限下深; 钛合金钻杆; 铝合金钻杆; 深地勘查工程

中图分类号: P634 文献标志码: A 文章编号: 1000-3657(2019)05-1200-09

A discussion on deep-well combined drill string technology for ultra-deep drilling engineering

LI Lixin^{1,2}, ZHANG Fengyan^{1,2}, ZHANG Hengchun³, WANG Wei^{1,2}, ZHANG Yi^{1,2}, HU Yule^{1,2,4}

(1. Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China; 2. China Deep Exploration Center, China Geological Survey & Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China; 3. Institute of Exploration Techniques, CAGS, Langfang 065000, Hebei, China; 4. China University of Geosciences (Wuhan), Wuhan 430074, Hubei, China)

Abstract: Deep-well combined drill string technology has become one of the most important scheme to solve the super-long drill string used for ultra-deep drilling project, which is related to equipment capacity, material property, drilling conditions and string mechanics. In this paper, the application and development of combined drill string technology in geological drilling are summarized systematically, the design scheme and its limitation length are discussed in detail on the basis of strength theory. The results show that the drilling mission with the depth of 13000m could not be finished by simply using pure steel combined drill string with the final borehole diameter being 216mm. By using drill string consisting of V150 steel drill pipe & titanium alloy drill pipe and S135 steel drill pipe & aluminum alloy drill pipe, the limitation depth and the weight of each combined drill string are respectively

收稿日期: 2019-06-05; 改回日期: 2019-08-25

基金项目: 中国地质调查局项目(DD20189702)和中国地质科学院基本科研业务费(YWF201901、JYYWF20180501)联合资助。

作者简介: 李立鑫, 男, 1988年生, 博士, 助理研究员, 主要从事钻探工艺及工具研究; E-mail: lilixin0311@163.com。

通讯作者: 张丰琰, 男, 1992年生, 硕士, 助理研究员, 主要从事钻探工艺研究; E-mail: zgsydxzfy@163.com。

13484m, 18783m and 360.5, 324.3t; in this way both of them own application reliability and advantage. These results have reference significance to the design and selection of deep-well combined drill string used for ultra-deep drilling project.

Key words: Songliao Basin; scientific drilling; combined drill string; titanium alloy drill pipe; aluminum alloy drill pipe; deep exploration engineering

About the first author: LI Lixin, male, born in 1988, doctor, associate researcher, mainly engages in the study of drilling technology and drilling tools. E-mail: lilixin0311@163.com..

About the corresponding author: ZHANG Fengyan, male, born in 1992, master, associate researcher, mainly engages in the study of drilling technology. E-mail: zgsydxzfy@163.com.

Fund support: Supported by China Geological Survey Project (No. DD20189702) and Basic Scientific Research Projects of Chinese Academy of Geological Sciences (No. YWF201901, JYYWF20180501).

1 引言

科学钻探以获取深部未知地层的大量岩心为主要工程特征,具有隐蔽性和复杂性,是目前能直接获取地下实物资料的唯一技术方法,能够为地球系统科学、深部资源勘查、地质灾害预警等重大问题的研究提供实物支撑和数据保障(王达等,2007;张金昌和谢文卫,2010;许志琴等,2016)。进入21世纪以来,中国已相继实施了大别—苏鲁超高压变质带科学钻探(王达和张伟,2005)、汶川地震断裂带科学钻探(张伟等,2012)、西藏罗布莎科学钻探(陈师逊等,2012)、腾冲火山地热构造带科学钻探(吴焯等,2013)、铜陵矿集区科学钻探(王军等,2015)、松辽盆地大陆深部科学钻探等工程和项目(朱永宜和王稳石,2008;闫家等,2019),为中国地球科学的发展和区域重大问题的决策做出了重要贡献(许志琴等,2005;王成善等,2008;戎合等,2013;董树文等,2014;邹长春等,2018),也为中国后续开展超万米特深科学钻探积累了宝贵的技术经验。

超万米特深科学钻探象征着一个国家的综合科技实力,也是世界各大国竞相开展的大型科学探索活动,具有成本极高、风险极大、技术极复杂的特点,钻孔的实施面临着高温高压、高地应力、超长钻柱、关键装备等一系列技术难题(张金昌和刘秀美,2014;王达等,2018)。在这些迫切需要解决的关键技术中,超长钻柱是深井钻探过程中最为薄弱的环节,其可靠性直接决定着特深科学钻探的成败,尤其在深部井段高温高压的复杂环境下,钻柱受高温影响导致力学性能下降,易诱发钻杆断裂、碰撞变形等井下事故,钻柱的可靠性问题更需重点关注,

钻柱在满足特深钻探超万米下深要求的同时必须具有更高的安全系数。

采用不同尺寸、不同壁厚及不同材料的钻杆组成的复合钻柱,既能满足钻柱的强度要求,提高钻柱的整体安全性能,又能减轻钻柱的重力,允许在一定钻机负荷能力下钻至更大的井深,已成为超长钻柱领域十分重要的研究方向,是实现特深科学钻探用高性能超长钻柱最为有效的解决方案。本文总结了复合钻柱技术在深部钻探中的应用情况,对复合钻柱技术在特深钻探中的应用进行了探讨,基于复合钻柱强度理论,研究了不同钢质复合钻柱和轻质合金-钢复合钻柱的极限下深问题,提出了适用于13000 m特深钻探的轻质合金-钢复合钻柱组合方案,指出复合钻柱技术是未来特深钻探的重点研究方向。

2 复合钻柱技术的应用现状与发展趋势

国外复合钻柱技术主要包括钢质接头-铝合金杆体复合钻柱、钛合金钻杆-钢质钻杆复合钻柱、铝合金钻杆-钢质钻杆复合钻柱等形式。钢质接头-铝合金杆体复合钻柱技术曾在前苏联的钻探工程中大量应用,创造了kola SG-3井12262 m的垂深世界纪录。钛合金钻杆-钢质钻杆复合钻柱和铝合金钻杆-钢质钻杆复合钻柱目前主要应用于水平井、大位移井的造斜井段,充分发挥铝合金和钛合金钻杆弯曲应力小、造斜能力强的特点,多配合井下动力钻具完成短半径造斜作业,当造斜结束后,再换回钢质钻杆继续钻进,目前已于美国、俄罗斯、卡塔尔等国家取得了成功的应用,完成了工厂化丛式井、页岩气水平井、油气田大位移井等复杂结构井

的造斜任务(袁文义和张泉海,2006;Kamel and Yigi,2014;Lee et al.,2014;冯春和杨尚谕,2017)。

复合钻柱技术在我国也被广泛应用于各类型钻探、钻井作业,早期多使用上部高强度钻杆和下部低强度钻杆组成的复合钻柱,达到降低作业成本的目的。随着钻探、钻井深度的不断增加,复合钻柱技术逐渐开始使用上部大直径钻杆和下部小直径钻杆组成复合钻柱,可大幅度提升钻机的极限钻深,实现小型钻机钻至更大井深的目的,其特点对地质钻探而言尤为重要。在被誉为“中国岩金勘查第一深钻”的山东莱州三山岛矿区ZK96-5钻孔的施工中,通过使用塔式复合钻柱(自下而上依次为NQ钻头钻具+ $\phi 71$ mm钻杆+变丝接手+HQ钻杆)和同径复合钻柱(自下而上依次为NQ绳索钻头钻具+ $\phi 71$ mm钻杆+变丝接手+ $\phi 60$ mm高强度特质钻杆),在当时绳索取芯地质钻杆仅具备3000 m下深能力的情况下,成功完成了钻深4000 m、终孔直径75 mm的钻孔任务,证明了深孔钻探时使用复合钻柱的可行性(陈师逊和杨芳,2014)。

松辽盆地大陆深部科学钻探2号井(以下简称松科二井)通过首次钻穿松辽盆地白垩纪陆相地层,完钻井深7018 m,在能源勘探、气候演变、钻探技术等领域取得了一系列重要成果(张伟,2016;李宁,2017)。松科二井在深部井段采用了复合钻柱技术,施工过程中未发生因钻柱强度问题引起的井下事故,各井段应用的钻具组合如图1所示,可以看出,松科二井在上部井段(一开至四开)正常钻进过程中均采用单一直径的钻杆柱设计。而随着井深的不断增加,在深井井段(进入五开后)开始,为满足悬渣循环要求和管柱通畅,采用不同直径的钢质钻杆复合钻柱设计。钻孔五开和加深段均采用S135钢级 $\phi 88.9$ mmDP+ $\phi 139.7$ mmDP的复合钻柱组合方案,可满足最大近万米的钻孔下深需求。

随着井深的增加,复合钻柱技术的应用优势越发明显,不仅可以增强整个钻柱的服役安全性,避免了在深井作业过程中因钻柱强度导致的井下事故,还可以大幅度降低大钩载荷,显著提升钻机的钻深能力。对于特深科学钻探面临的超长钻柱安

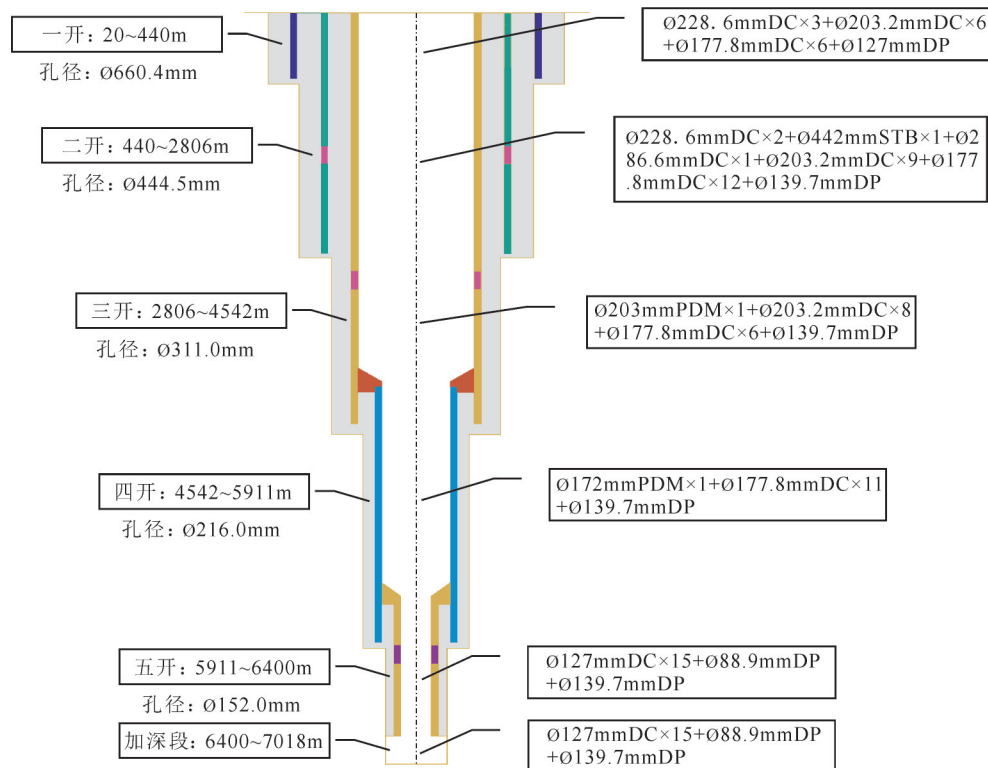


图1 松科二井各井段钻具组合应用情况

Fig.1 Application of drill tool assembly in each section of SK-2 borehole

全问题,需研究应用复合钻柱技术并设计组合方案。

3 复合钻柱技术在特深钻探中的应用研究

3.1 复合钻柱的设计方法及选用参数

复合钻柱的设计包括钻铤柱和钻杆柱两部分。钻铤柱长度的确定需同时满足中性点位于钻铤上并提供足够钻压。在钻柱最大允许抗拉力的基础上,钻柱理论长度设计综合考虑钻杆安全系数、卡瓦设计系数和拉力余量,以满足钻柱的强度要求,计算方法如下(楼一珊等,2013)。

钻铤柱长度计算:

$$K_s=1-\rho_M/\rho_c \quad (1)$$

$$L_{CT}=\frac{W_D S_N}{q_c K_s \cos \alpha} \quad (2)$$

$$L_C=[L_{CT}/l_c]l_c \quad (3)$$

式中: K_s —钢材浮力系数; ρ_M —钻井液密度, g/cm^3 ; ρ_c —钻铤密度, g/cm^3 ; L_{CT} —理论钻铤柱总长,m; W_D —钻井工艺要求最大钻压,m; S_N —钻铤安全系数; q_c —钻铤线重,kN/m; L_C —实际钻铤柱总长,m; α —钻铤所在位置的井斜角, $^\circ$; l_c —单根钻铤长度,m。

钻杆柱长度计算:

$$F_{Pi}=S_P-F_{Yi} \quad (4)$$

$$F_{Ai}=(F_{Pi}/S_{D_i}, F_{Pi}/S_{K_i}, F_{Pi}-F_R)_{\min} \quad (5)$$

$$L_{Pni}=\left(\frac{F_{Ai}}{K_i}-q_c L_C-q_{p1} L_{p1}-\dots-q_{p(i-1)} L_{p(i-1)}\right)/q_{pi} \quad (6)$$

$$(i=1,2,3,\dots) \quad (7)$$

$$K_i=1-\rho_M/\rho_i \quad (8)$$

$$L_{pi}=\lfloor L_{Pni}/l_p \rfloor \quad (9)$$

$$L_L=L_C+\sum_i^n L_{pi} \quad (i=1,2,3,\dots) \quad (10)$$

$$W_L=(q_c L_C+\sum_i^n q_i L_i)/9.8 \quad (10)$$

式中: F_{Pi} —第*i*段钻杆最大允许抗拉力,kN; S_P —最大允许抗拉力系数; F_{Yi} —第*i*段钻杆整体抗拉强度,kN; F_{Ai} —第*i*段钻杆最大安全静拉力,kN; S_D , S_K —分别为钻杆安全系数和设计系数; F_R —拉力余量,kN; K_i —第*i*段钻杆材料的浮力系数; ρ_i —第*i*段钻杆材料的密度, g/cm^3 ; L_{Pni} —第*i*段钻杆柱理论设计长度,m; q_{pi} —第*i*段钻杆线重,kN/m; L_{pi} —第*i*段钻杆柱实际长度,m; l_p —单根钻杆长度,m; L_L —钻柱总长,m; n —钻柱共用不同类钻杆的总段数; W_L —钻柱总重,t。

计算所用钻探工艺参数及钻探管材参数见表1和表2。因钻铤所在位置不可避免的存在井斜,为保证中位点位于钻铤上,计算过程设定井斜角为 3° ;考虑到钻杆柱与井壁摩擦产生的提升摩擦阻、卡钻附加的提升拉力等情况,设定钻杆安全系数为1.3。

3.2 钢质钻杆复合钻柱的极限下深

基于前述计算方法,参照松科二井加深段复合钻柱的应用方案,通过式(1)~(10)计算出的不同钢质复合钻柱组合方案如表3所示。由表3可以看出,在终孔直径 $\phi 152$ mm的钻孔中,松科二井所用复合钻柱组合方案(使用S135钢级)最大可满足9936.2 m的下深要求,若将钻杆升级为V150钢级后,可满足11088 m的极限下深,较S135钢级方案提升11.59%,钻柱总重由303.9 t提升至337.9 t,重量提升11.19%。若将复合钻柱中直径 $\phi 39.7$ mm的钻杆更换为 $\phi 127$ mm的厚壁钻杆,复合钻柱的极限下深还能再增加403 m,达到11491 m。因此,若是需要钻成一口13000 m井深的特深井,仅使用钢质钻杆组成的复合钻杆柱易因自重被拉断,已无法满足特深钻探的使用要求。为了能够下入更多种类和功能的井下观测仪器,特深钻探的终孔直径尽可能扩大至 $\phi 216$ mm,在这种情况下,采用V150钢级的 $\phi 127$ mmDP+ $\phi 168.3$ mmDP组成的复合钻柱仅能够满足8270.7 m的极限下深,更无法满足万米

表1 特深钻探复合钻柱用设计参数

Table 1 Design parameters of combined drill string for super-deep drilling

参数名称	值	参数名称	值	参数名称	值
最大钻压/kN	100	井深/m	13000	井斜角/ $^\circ$	3
钻井液密度/ $(g \cdot cm^{-3})$	1.20	最大允许抗拉力系数	0.9	拉力余量/kN	300
钻铤安全系数	1.2	钻杆安全系数	1.3	设计系数	1.42
钢质钻杆密度/ $(g \cdot cm^{-3})$	7.85	钛合金钻杆密度/ $(g \cdot cm^{-3})$	4.5	铝合金钻杆当量密度/ $(g \cdot cm^{-3})$	3.38

表2 计算用钻井管材主要参数

Table 2 Main parameters of drilling pipe used for calculation

管材类型	外径/mm	壁厚/mm	单根长度/m	使用材质	抗拉强度/kN	公称质量/(kg·m ⁻¹)
钻铤	127.0	34.9	9.15	S135钢	—	79.0
	177.8	60.3	9.15	S135钢	—	174.3
钻杆	88.9	11.4	9.6	S135钢	2588	25.6
			9.6	V150钢	2875	25.6
	90	9	9.6	DT II 铝合金	1099	6.5
	101.6	9.65	9.6	BHTG105钛合金	2018	15.4
	127	12.7	9.6	S135钢	4250	42.4
			9.6	V150钢	4722	42.4
	127.0	9.19	9.6	BHTG105钛合金	2464	20.1
	129.0	11.0	9.6	DT II 铝合金	1956	11.5
	139.7	10.54	9.6	S135钢	3986	40.6
			9.6	V150钢	4429	40.6
	168.3	9.19	9.6	S135钢	4283	48.7
		9.6	9.6	V150钢	4758	48.7

表3 钢质复合钻柱组合方案

Table 3 Combined drilling string scheme consisting of steel drill pipe

序号	终孔井径/mm	钻柱组合(钢级)/根	极限下深/m	钻柱总重/t
1	152	ϕ 127mmDC \times 21+ ϕ 88.9mmDP(S135) \times 742+ ϕ 139.7mmDP(S135) \times 273	9936.2	303.9
2	152	ϕ 127mmDC \times 21+ ϕ 88.9mmDP(V150) \times 831+ ϕ 139.7mmDP(V150) \times 304	11088	337.9
3	152	ϕ 127mmDC \times 21+ ϕ 88.9mmDP(V150) \times 831+ ϕ 127mmDP(V150) \times 346	11491	360.2
4	216	ϕ 177.8mmDC \times 10+ ϕ 127mmDP(V150) \times 846+ ϕ 168.3mmDP(V150) \times 6	8270.7	363.1

表4 不同材质钻杆的性能对比

Table 4 Comparison of drill pipes made by different materials

材质	性能参数	优点	缺点	应用范围
钢质钻杆	弹性模量 210 GPa 剪切模量 79 GPa	综合性能优异、强度高、成本低	比强度小、应力腐蚀、疲劳开裂	常规油气钻井及地质钻探
钛合金钻杆	弹性模量 110 GPa 剪切模量 42 GPa	密度、强度与比强度介于钢和铝之间、与钢性能接近、耐腐蚀、耐磨、抗疲劳、热强度高、无磁	制造难度大、售价及成本高	超短半径钻井、超深井、深水钻井、大位移井与水平井
铝合金钻杆	弹性模量 71 GPa 剪切模量 27 GPa	比强度高、密度低、弯曲应力小、耐酸腐、可钻穿、无磁	不耐磨、高温强度下降明显、与钢接头存在电化学腐蚀、不耐盐腐	深井、超深井及酸性气井的勘探开发

深孔的工艺要求。

3.3 轻质合金-钢复合钻柱在特深钻探的应用分析

由于单纯使用钢质钻杆无法满足特深钻探的要求,必须在钻柱中使用轻质合金材料。现阶段较为成熟的轻质钻杆主要有钛合金钻杆和铝合金钻杆两种,其性能特点见表4。相比于钢质钻杆,轻质合金钻杆质量轻,可显著降低钻机载荷,铝合金钻杆和钛合金钻杆的比强度分别为钢质钻杆的1.0~

3.0倍和1.0~2.4倍(于荣华和袁鹏斌,2011),比强度优势明显,其中,铝合金钻杆具有最佳的比强度优势,而钛合金钻杆则具有更为优异的耐高温性能、抗疲劳性能和耐腐蚀性能,可满足特深钻探高温高压环境的服役要求(王小红等,2014;查永进等,2017;付毓伟等,2017;梁健等,2017)。图2对比了由单一材质钻杆组成的钻柱在理论直井中的最大下深,计算选用表2所示 ϕ 127mm的V150级钢质

钻柱、 $\phi 127\text{ mm}$ 的BHTG105钛合金钻柱以及 $\phi 129\text{ mm}$ 的DT II铝合金钻柱,在不考虑钻井过程中钻柱弯曲、摩擦井壁等因素的情况下,铝合金钻柱和钛合金钻柱的理论最大下深分别为钢质钻杆的1.62~3.26倍和1.05~1.73倍。

鉴于轻质合金钻杆极限下深大的特点,采用下部为轻质合金钻杆、上部为钢质钻杆组成的复合钻柱技术方案,充分发挥出钢质钻杆刚度大、综合性能好的特点以及轻质合金钻杆质量轻、比强度高的优势,即可有效提升复合钻柱的下深极限,解决13000 m特深科学钻探面临的超长钻柱问题。

表5为基于前述复合钻柱设计方法计算获得的轻质合金钻杆和钢钻杆组成的复合钻柱方案,在直径 $\phi 152\text{ mm}$ 终孔的条件下,采用钛合金钻杆和铝合金钻杆后,复合钻柱的极限下深分别达到14698 m和19431 m,足以满足特深钻探的实际需求,其钻柱总重分别为337.8 t和304.2 t,较前述钢质复合钻柱方案分别下降6.22%和15.55%,可有效降低钻机

的钩载负荷。若设计终孔直径为 $\phi 216\text{ mm}$ 时,采用V150钢级 $\phi 127\text{ mm}$ 钻杆配合 $\phi 127\text{ mm}$ 钛合金钻杆,可满足最大13484 m的下深要求,在极限下深条件下,该复合钻柱仅有360.5 t。而采用更为轻质的 $\phi 129\text{ mm}$ 铝合金钻杆,仅配合S135钢级的 $\phi 127\text{ mm}$ 钻杆即可将复合钻柱的极限下深提高至18783 m,此时极限下深状态下的复合钻柱总重仅有324.3 t,显著降低了钻机负荷。若选取钩载储备系数为1.8时,表5所示方案5和方案6所需要的大钩载分别为648.9 t和583.74 t,选用现有9000 m石油钻机(大钩载675 t)即可满足使用要求,为选用较低级别钻机完成特深钻探提供了可能。此外,采用轻质合金-钢复合钻柱技术后,13000 m钻孔的终孔直径可由 $\phi 152\text{ mm}$ 增加至 $\phi 216\text{ mm}$,为特深钻探较大口径完钻提供了可行方案。

在终孔直径 $\phi 216\text{ mm}$ 的条件下,不同复合钻柱组合在距井底一定位置处的横截面所承受的重量和安全比值(钻杆可承受最大拉力与浮重的比值)随距离井底长度变化的曲线如图3所示。由图可以看出,3种复合钻柱方案在极限下深长度内,均具有可靠的安全性,纯钢质复合钻柱、钛合金-钢复合钻柱和铝合金-钢复合钻柱的最小安全比值分别为1.58、1.58和1.59,但采用轻质合金钻杆后,复合钻柱的安全比值较纯钢质钻柱更高,具有明显的可靠性优势。随着复合钻柱横截面位置上移,距离井底长度的增加导致下部钻柱重量增加,复合钻柱的安全比值逐渐降低,但在不同材料钻杆的连接部位,安全比值出现跳变增加,表明在复合钻柱上部使用更高强度材质的钻杆可有效增加钻柱的可靠性,相比于仅使用单一轻质合金钻柱,复合钻柱的可靠性更高。因此,在特深科学钻探中采用轻质合金-钢复合钻柱方案,可提供更为有效的安全性保障,应用潜力巨大。

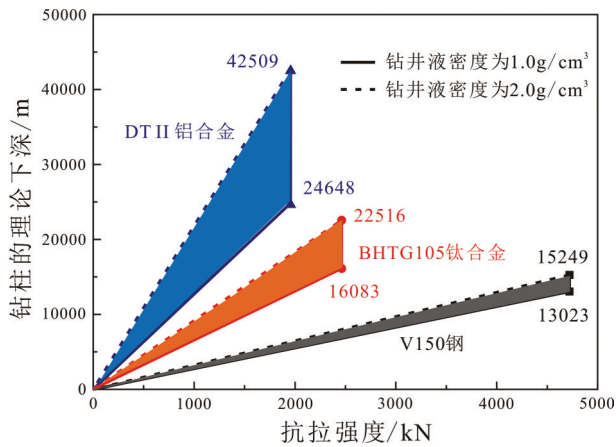


图2 不同材质钻柱在理想直井中的理论下深
Fig.2 Theoretic lengths of drill pipes made by different materials in an ideal vertical well

表5 轻质合金-钢复合钻柱组合方案

Table 5 Combines drilling string scheme consisting of lightweight alloy & steel drill pipe

序号	终孔井径/mm	钻柱组合(钢级)/根	极限下深/m	钻柱总重/t
1	152	$\phi 127\text{mmDC}\times 21+\phi 101.6\text{mmDP(BHTG105)}\times 1101+\phi 139.7\text{mmDP(V150)}\times 410$	14698	337.8
2	152	$\phi 127\text{mmDC}\times 21+\phi 90.0\text{mmDP(DT II)}\times 1503+\phi 139.7\text{mmDP(S135)}\times 501$	19431	304.2
3	152	$\phi 127\text{mmDC}\times 21+\phi 101.6\text{mmDP(BHTG105)}\times 1101+\phi 127\text{mmDP(V150)}\times 448$	15063	360.3
4	216	$\phi 177.8\text{mmDC}\times 10+\phi 127\text{mmDP(BHTG105)}\times 1043+\phi 127\text{mmDP(S135)}\times 263$	12629	324.3
5	216	$\phi 177.8\text{mmDC}\times 10+\phi 127\text{mmDP(BHTG105)}\times 1043+\phi 127\text{mmDP(V150)}\times 352$	13484	360.5
6	216	$\phi 177.8\text{mmDC}\times 10+\phi 129\text{mmDP(DT II)}\times 1632+\phi 127\text{mmDP(S135)}\times 315$	18783	324.3

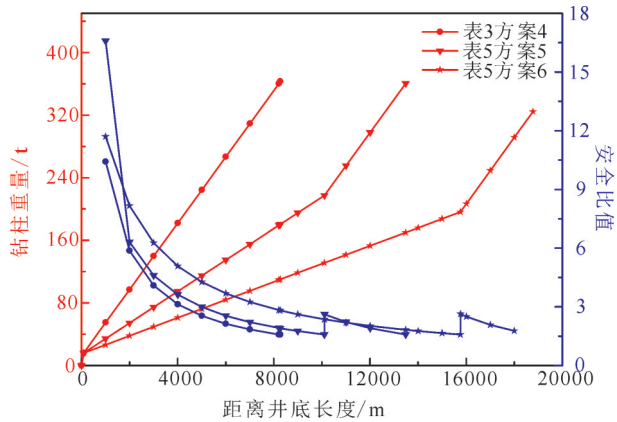


图3 距井底不同距离处不同复合钻柱重量和安全比值的变化
Fig.3 Weight and safe ratio of different combined drill string changes with the length to the bottom of borehole

4 结 论

结合松科二井等复合钻柱的工程实例以及特深科学钻探未来的技术需求,论文运用复合钻柱强度理论对复合钻柱技术进行了分析研究,获得结论如下:

(1)在终孔直径为 $\phi 216$ mm的前提下,采用不同直径钢质复合钻柱最大可以满足8270.7 m的钻井深度,对于超万米特深钻探而言,单纯依靠钢质钻杆组成的复合钻柱已无法满足13000 m特深科学钻探对超长钻柱的需求。

(2)在特深科学钻探领域,采用钛合金-钢复合钻柱和铝合金-钢复合钻柱可以满足13000 m钻孔的下深需要,而且在使用安全性方面具有明显的优势,应用潜力巨大。

(3)采用V150钢级 $\phi 127$ mm钻杆配合 $\phi 127$ mm钛合金钻杆和S135钢级的 $\phi 127$ mm钻杆配合 $\phi 129$ mm铝合金钻杆组成的复合钻柱分别仅有360.5 t和324 t,大幅降低了钻机的大钩载荷,为使用小钻机实现特深钻探提供了可能。

致谢:本文在写作过程中得到了中国地质调查局王达教授、张伟教授和贾军教授的建议,在此表示衷心的感谢。

References

Chen Shixun, Yang Fang. 2014. Research and application of composite drill pipes in deep drilling[J]. *Geology and Exploration*, 50(4):772-776 (in Chinese with English abstract).

Chen Shixun, Zhai Yufeng, Wang Luzhao, Zhong Chonglong. 2012. Enlightenment to deep drilling technology from scientific drilling in Luobusha of Tibet[J]. *Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling)*, 39(11):1-9(in Chinese with English abstract).

Dong Shuwen, Li Yandong, Chen Xuanhua, Gao Rui, Lü Qingtian, Shi Yaolin, Huang Danian, Yang Jingsui, Wang Xueqiu, Wei Wenbo, Chen Qunce. 2014. SinoProbe revealed crustal structures, deep processes, and metallogenic background within China continent[J]. *Earth Science Frontiers*, 21(3):201-225(in Chinese with English abstract).

Feng Chun, Yang Shangyu. 2017. Feature and progress in aluminum alloy drill pipe[J]. *Petroleum Tubular Goods & Instruments*, 3(4):1-7 (in Chinese with English abstract).

Fu Yuwei, Zhao Liping, Zhao Yabing, Zhao Haiying, Cui Jian, Chen Mingjun. 2017. Application foreground of titanium alloy in petroleum exploration and development[J]. *Oil Drilling & Production Technology*, 39(5):136-140(in Chinese with English abstract).

Kamel J M, Yigit A S. 2014. Modeling and analysis of stick-slip and bit bounce in oil well drillstrings equipped with drag bits[J]. *Journal of Sound & Vibration*, 333(25):6885-6899.

Lee W, Kim Y, Olson S D, Lim S. 2014. Nonlinear dynamics of a rotating elastic rod in a viscous fluid[J]. *Physical Review E Statistical Nonlinear & Soft Matter Physics*, 90(3):033012.

Li Ning, Zou Changchun, Peng Cheng, Zhao Jinhuan, Niu Yixiong. 2017. Core Spatial Position Restoring of the CCSD-SK-2 East Borehole in the Songliao Basin of Northeast China[J]. *Geological Science and Technology Information*, 36(4):276-281(in Chinese with English abstract).

Liang Jian, Gu Yanhong, Yue Wen, Sun Jianhua, Liu Junxiu, Yang Yuanhang. 2017. Analysis on corrosion failure of aluminum alloy drill pipe for scientific ultra-deep well drilling[J]. *Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling)*, 44(2):60-66 (in Chinese with English abstract).

Lou Yishan, Li Qi, Long Zhihui, Xiong Qingshan. 2013. *Drilling Engineering*[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 81-89 (in Chinese).

Rong He, Yang Jingsui, Zhang Zhongming, Xu Xiangzhen. 2013. A preliminary study of FT-IR on the diamonds from the Luobusha chromitites of Tibet and the eclogite of CCSD-MH[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 29(6):1861-1866(in Chinese with English abstract).

Wang Chengshan, Feng Zhiqiang, Wu Heyong, Wang Pujun, Kong Fanjun, Feng Zihui, Ren Yanguang, Yang Gansheng, Wan Xiaoqiao, Huang Yongjian, Zhang Shihong. 2008. Preliminary achievement of the Chinese Cretaceous continental scientific

- drilling project-SK-1[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 82(1):9-20 (in Chinese with English abstract).
- Wang Da, Zhang Wei, Jia Jun. 2018. The key problems of ultra-deep drilling engineering[J]. *Chinese Science Bulletin* 63, (26): 2698-2706.
- Wang Da, Zhang Wei, Zhang Xiaoxi. 2007. Drilling Engineering Technology of China Continental Scientific Drilling Engineering CCSD-1 Well[M]. Science Press, 9-12 (in Chinese).
- Wang Da, Zhang Wei. 2005. Overview of drilling construction technology of CCSD-1[J]. *Geology in China*, 32(2):184-194 (in Chinese with English abstract).
- Wang Jun, Man Haibo, Liu Dilei, Wang Di. 2015. Drilling technology of TLSJD-1 in Tongling scientific drilling[J]. *Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling)*, 42(3):6-10 (in Chinese with English abstract).
- Wang Xiaohong, Guo Jun, Guo Xiaohua, Peng Jian, Zhou Xingyu, Luo Liang. 2014. Research progress on the material, characteristics and wear of aluminum alloy drilling rods[J]. *Materials Review*, 28(23): 431-434 (in Chinese with English abstract).
- Wu Ye, Lu Yubei, Chen Ying. 2013. Research on the air drilling test in the Tengchong volcano-geo-thermal-tectonic zone[J]. *Geology and Exploration*, 49(3): 528-533(in Chinese with English abstract).
- Xu Zhiqin, Yang Jingsui, Zhang Zeming, Liu Fulai, Yang Wencai, Jin Zhenmin, Wang Rucheng, Luo Liqiang, Huang Li, Dong Hailiang. 2005. Completion and achievement of the Chinese Continental Scientific Drilling (CCSD) Project[J]. *Geology in China*, 32(2): 177-183 (in Chinese with English abstract).
- Xu Zhiqin, Yang Wencai, Yang Jingsui, An Zhisheng, Wang Chengshan, Li Haibing, Liu Jiaqi, Su Dechen, He Bizhu, Wang Da, Zhang Wei, Zhang Xiaoxi. 2016. 15 years of hardship and struggle history and the prospects for the future of the Chinese Continental Scientific Drilling Program (CCSD): In memory of the 15 year anniversary of CCSD and 20 year anniversary of ICDP[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 90(9):2109-2122(in Chinese with English abstract).
- Yan Jia, Wang Wenshi, Zhang Hengchun, Xu Jie, Cao Longlong. 2019. Practice of Turbo-drill core drilling in Well SK-2[J]. *Drilling & Production Technology*, 42(1):31-34(in Chinese with English abstract).
- Yu Ronghua, Yuan Pengbin. 2011. Aluminum drill Pipe characteristics and potential applications[J]. *Oil Field Equipment*, 40(3):81-85 (in Chinese with English abstract).
- Yuan Wenyi, Zhang Haiquan. 2006. Foreign research progress of titanium alloy drill pipe[J]. *Xinjiang Petroleum Science & Technology*, 16(3):13-15 (in Chinese with English abstract).
- Zha Yongjin, Hu Shijie, Zhuo Lubin, Liu Mingxin, Li Long. 2017. Research on application prospect of titanium alloy drill pipe[J]. *Drilling & Production Technology*, (4):1-3(in Chinese with English abstract).
- Zhang Jinchang, Liu Xiumei. 2014. 13000 m drilling technology of super-depth scientific drilling-well[J]. *Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling)*, 41(9):1-6 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Jinchang, Xie Wenwei. 2010. Status of scientific drilling technology for ultra-deep well[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 84(6): 887-894 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Wei, Li Haibing, Huang Yao, Si Jialiang, Liu Dongliang, Li Yong, Wang Huang, Yang Guang, Sun Liwen. 2012. Lithologic characteristics and fault zone structure revealed by No.2 hole cores of the Wenchuan eart fault zone scientific drilling (WFSD-2)[J]. *Geological Bulletin of China*, 31(8):1201-1218(in Chinese with English abstract).
- Zhang Wei. 2016. Scientific drilling activities of China during the "12th Five-year plan" period[J]. *Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling)*, 43(4):18-23(in Chinese with English abstract).
- Zhu Yongyi, Wang Wenshi. 2008. Summery on China Cretaceous scientific drilling engineering in Well-1 of Songliao scientific drilling[J]. *Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling)*, 35(3):1-4 (in Chinese with English abstract).
- Zou Changchun, Zhang Xiaohuan, Peng Cheng, Zhang Shuxia, Li Ning, Xiao Liang, Niu Yixiong, Ding Yujiao, Qin Yuxing, Lin Feng. 2018. Scientific results of geophysical logging in the upper cretaceous strata,CCSD SK-2 east borehole in the Songliao Basin of Northeast China[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 39(6): 679-690 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 陈师逊, 杨芳. 2014. 深部钻探复合钻杆的研究与应用[J]. *地质与勘探*, 50(4):772-776.
- 陈师逊, 翟育峰, 王鲁朝, 仲崇龙. 2012. 西藏罗布莎科学钻探施工对深部钻探技术的启示[J]. *探矿工程(岩土钻掘工程)*, 39(11):1-9.
- 董树文, 李廷栋, 陈宣华, 高锐, 吕庆田, 石耀霖, 黄大年, 杨经绥, 王学求, 魏文博, 陈群策. 2014. 深部探测揭示中国地壳结构、深部过程与成矿作用背景[J]. *地学前缘*, 21(3):201-225.
- 冯春, 杨尚渝. 2017. 铝合金钻杆的特点及发展应用[J]. *石油管材与仪器*, 3(4):1-7.
- 付毓伟, 赵立平, 赵亚兵, 赵海英, 崔建, 陈明君. 2017. 钛合金在油气勘探开发领域的应用前景[J]. *石油钻采工艺*, 39(5):136-140.
- 李宁, 邹长春, 彭诚, 赵金环, 牛一雄. 2017. 松辽盆地科学钻探工程松科2井东孔岩心空间归位[J]. *地质科技情报*, 36(04):276-281.

- 梁健, 顾艳红, 岳文, 孙建华, 刘俊秀, 杨远航. 2017. 科学超深井钻探铝合金钻杆的腐蚀失效分析[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 44(2): 60-66.
- 楼一珊, 李琪, 龙芝辉, 熊青山. 2013. 钻井工程[M]. 北京: 石油工业出版社, 81-89.
- 戎合, 杨经绥, 张仲明, 徐向珍. 2013. 西藏罗布莎橄榄岩与中国大陆科学钻探主孔(CCS-D-MH)榴辉岩中金刚石的红外特征初探[J]. 岩石学报, 29(6):1861-1866.
- 王成善, 冯志强, 吴河勇, 王璞珺, 孔凡军, 冯子辉, 任延广, 杨甘生, 万晓瞧, 黄永建, 张世红. 2008. 中国白垩纪大陆科学钻探工程: 松科一井科学钻探工程的实施与初步进展[J]. 地质学报, 82(1): 9-20.
- 王达, 张伟, 贾军. 2018. 特深科学钻探的关键问题[J]. 科学通报, 63(26):2698-2706.
- 王达, 张伟, 张晓西. 2007. 中国大陆科学钻探工程科钻一井钻探工程技术[M]. 北京: 科学出版社, 9-12.
- 王达, 张伟. 2005. “科钻一井”钻探施工技术概览[J]. 中国地质, 32(2):184-194.
- 王军, 满海波, 刘狄磊, 王迪. 2015. 铜陵科学钻探 TLSJD-1 孔钻探技术[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 42(3):6-10.
- 王小红, 郭俊, 郭晓华, 彭建, 周星宇, 罗亮. 2014. 铝合金钻杆材料、特点及其磨损研究进展[J]. 材料导报, 28(23):431-434.
- 吴焯, 卢予北, 陈莹. 2013. 腾冲火山地热构造带空气钻探试验研究[J]. 地质与勘探, 49(3):528-533.
- 许志琴, 杨经绥, 张泽明, 刘福来, 杨文采, 金振民, 王汝成, 罗立强, 黄力, 董海良. 2005. 中国大陆科学钻探终孔及研究进展[J]. 中国地质, 32(2):177-183.
- 许志琴, 杨文采, 杨经绥, 安芷生, 王成善, 李海兵, 刘嘉麒, 苏德辰, 何碧竹, 王达, 张伟, 张晓西. 2016. 中国大陆科学钻探的过去、现在和未来——纪念中国大陆科学钻探实施15周年、国际大陆科学钻探委员会成立20周年[J]. 地质学报, 90(9):2109-2122.
- 闫家, 王稳石, 张恒春, 许洁, 曹龙龙. 2019. 松科2井带涡轮钻具取心钻进探索[J]. 钻采工艺, 42(1):31-34.
- 于荣华, 袁鹏斌. 2011. 铝合金钻杆的特点及应用前景[J]. 石油矿场机械, 40(3):81-85.
- 袁文义, 张泉海. 2006. 国外钛合金钻杆的研究进展[J]. 新疆石油科技, 16(3):13-15.
- 查永进, 胡世杰, 卓鲁斌, 刘明鑫, 李洪. 2017. 钛合金石油管材应用前景研究[J]. 钻采工艺, 40(4):1-3.
- 张金昌, 刘秀美. 2014. 13000m科学超深井钻探技术[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 41(9):1-6.
- 张金昌, 谢文卫. 2010. 科学超深井钻探技术国内外现状[J]. 地质学报, 84(6):887-894.
- 张伟, 李海兵, 黄尧, 司家亮, 刘栋梁, 李勇, 王焕, 杨光, 孙立文. 2012. 四川汶川地震断裂带科学钻探2号孔(WFSD-2)岩性特征和断裂带的结构[J]. 地质通报, 31(8):1201-1218.
- 张伟. 2016. 我国“十二五”期间的科学钻探活动[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 43(4):18-23.
- 朱永宜, 王稳石. 2008. 中国白垩纪科学钻探松科一井(主井)钻探工程概要[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 35(3):1-4.
- 邹长春, 张小环, 赵金环, 彭诚, 张淑霞, 李宁, 肖亮, 牛一雄, 丁娱娇, 秦宇星, 林峰. 2018. 松辽盆地科学钻探工程松科二井东孔上白垩统地球物理测井科学成果[J]. 地球学报, 39(6): 679-690.