文章编号：1000-0747(2025)05-1180-09 DOI: 10.11698/PED.20250259

深地塔科 1 井万米特深井钻探关键技术进展与科学意义

杨海军[1, 2, 3, 4]，王春生[1, 2, 3, 4]，杨宪彰[1, 2, 3, 4]，张志[1, 2, 3, 4]，郭旭光[5]，
孙崇浩[1, 2, 3, 4]，吕晓钢[1, 2, 3, 4]，刘金龙[1, 2, 3, 4]

（1. 中国石油塔里木油田公司，新疆库尔勒 841000；2. 中国石油天然气集团有限公司超深层复杂油气藏勘探开发技术研发中心，新疆库尔勒 841000；3. 新疆维吾尔自治区超深层复杂油气藏勘探开发工程研究中心，新疆库尔勒 841000；4. 新疆超深油气重点实验室，新疆库尔勒 841000；5. 中国石油油气和新能源分公司，北京 100009）

摘要：为进行万米特深层地球科学探索和油气勘探，实现特深钻井工程技术的迭代升级，中国石油天然气集团有限公司 2023 年在塔里木盆地部署了万米特深井深地塔科 1 井。通过该井的成功钻探，地质认识方面取得突破性进展，首次获取了万米深层岩心、测井、录井、流体、温度及压力资料，认识到万米特深层仍发育有效烃源岩、碳酸盐岩储层及可动常规油气，打破了传统的油气地质理论认识，明确了塔里木盆地万米特深层油气勘探的巨大潜力并指出了有利勘探领域。工程技术方面形成了特深井复杂压力系统安全钻井、特深井复杂难钻地层优快钻井、特深井苛刻工况井筒质量控制、特深超高温复杂地层资料录取 4 大关键技术体系。同时铸就了特深钻完井工程技术十大利器，顺利成功完钻了亚洲第 1、全球第 2 垂直深井，极大促进了对万米特深层地质条件的认识，助力中国成为具备特深井钻探核心技术的少数国家。

关键词：塔里木盆地；万米深地工程；深地塔科 1 井；特深钻井技术；油气地质理论；有利勘探领域

中图分类号：TE245 **文献标识码：**A

Technological progress and scientific significance of the drilling of the ten-thousand-meter ultra-deep well TK1, Tarim Basin, NW China

YANG Haijun[1, 2, 3, 4], WANG Chunsheng[1, 2, 3, 4], YANG Xianzhang[1, 2, 3, 4], ZHANG Zhi[1, 2, 3, 4], GUO Xuguang[5], SUN Chonghao[1, 2, 3, 4], LYU Xiaogang[1, 2, 3, 4], LIU Jinlong[1, 2, 3, 4]

(1. *PetroChina Tarim Oilfield Company*, *Korla* 841000, *China*; 2. *CNPC R&D Center for Ultra-Deep Complex Reservoir Exploration and Development*, *Korla* 841000, *China*; 3. *Engineering Research Center for Ultra-deep Complex Reservoir Exploration and Development*, *Xinjiang Uygur Autonomous Region*, *Korla* 841000, *China*; 4. *Xinjiang Key Laboratory of Ultra-deep Oil and Gas*, *Korla* 841000, *China*; 5. *PetroChina Oil & Gas and New Energy Company*, *Beijing* 100009, *China*)

Abstract: In 2023, the China National Petroleum Corporation (CNPC) has successfully drilled a 10 000-m ultra-deep well – TK-1 in the Tarim Basin. This pioneering project has achieved dual breakthroughs in ten-thousand-meter ultra-deep earth science research and hydrocarbon exploration while driving technological advancements in ultra-deep well drilling engineering. The successful completion of TK-1 has yielded transformative geological discoveries. For the first time in exploration history, comprehensive data including cores, well logs, fluids, temperature and pressure were obtained from 10 000-meter depths. These findings conclusively demonstrate the existence of effective source rocks, carbonate reservoirs, and producible conventional hydrocarbons at such extreme depths – fundamentally challenging established petroleum geology paradigms. The results not only confirm the enormous hydrocarbon potential of ultra-deep formations in the Tarim Basin but also identify the most promising exploration targets. From an engineering perspective, the project has established four groundbreaking technological systems: safe drilling in complex pressure systems of ultra-deep wells, optimized and fast drilling in complex and difficult-to-drill formations of ultra-deep wells, wellbore quality control under harsh conditions in ultra-deep wells, and data acquisition in ultra-deep, ultra-high-temperature complex formations. Additionally, ten key tools for ultra-deep well drilling and completion engineering were developed, enabling the successful completion of Asia's first and the world's second-deepest vertical well. This achievement has significantly advanced the understanding of geological conditions at depths exceeding 10 000 m and positioned China as one of the few countries with core technologies for ultra-deep well drilling.

Key words: Tarim Basin; 10 000-m deep-earth exploration; Well TK-1; ultra-deep well drilling technology; petroleum geology theory; promising exploration target

引用：杨海军, 王春生, 杨宪彰, 等. 深地塔科 1 井万米特深井钻探关键技术进展与科学意义[J]. 石油勘探与开发, 2025, 52(5): 1180-1188.

YANG Haijun, WANG Chunsheng, YANG Xianzhang, et al. Technological progress and scientific significance of the drilling of the ten-thousand-meter ultra-deep well TK1, Tarim Basin, NW China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2025, 52(5): 1180-1188.

0 引言

向地球深层进军是全球能源发展和能源安全的战略需求[1-3]。全球深层油气资源丰富，已在深层（大于 4 500 m）和超深层（大于 6 000 m）发现油气藏 1 477 个，油、气探明可采储量分别占总可采储量的 40%和 49%[4-5]。特深层（大于 9 000 m）—万米特深层逐渐成为科学家关注的热点领域[6-9]。塔里木盆地作为中国最大的含油气盆地，以深层、超深层油气资源勘探开发为主[10-12]，已累计完钻 8 000 m 以深钻井 224 口，在超深层探明油气储量 24.1×10^8 t，占全盆地的 66%，超深层油气年产量突破 $2\ 000\times10^4$ t，成为中国最大的超深油气生产基地，未来特深层油气勘探领域前景依然广阔。

塔里木盆地具有“深、冷”的地质特点。盆地发育巨厚中—新生界，导致古生界烃源岩埋藏深度超过万米，烃源岩层具有时代古老、有机质热演化程度高、构造运动期次多等特点，深层与中浅层油气成藏机理与富集主控因素存在显著差异[13-14]。传统油气成藏理论认为烃源岩生气下限 R_o 值为 2.0%[15]，回答了中低温度（小于 160 ℃）有机质成烃和油气成藏动力机制等理论问题。塔里木盆地地温梯度低、具备冷盆的特征，导致烃源岩演化延迟，有利于特深层油气藏形成与保存。万米特深层地温在 210 ℃左右，仍具备液态烃的赋存条件，但特深层温压场、流体场和地球化学环境明显不同于盆地浅部[16-18]，万米特深层领域生烃机理、规模有效储层保持机制以及油气成藏富集规律等属于未知领域，探索万米特深层油气成因与生烃理论，将对特深层油气勘探具有重大战略意义[19-20]。

为了解决上述问题，中国石油天然气集团有限公司（简称“中国石油”）在新疆塔里木盆地塔克拉玛干沙漠腹地部署万米特深井深地塔科 1 井，设计井深 11 100 m，设计钻穿下古生界，承载地球科学探索和油气勘探发现两个目的，解决特深层烃源岩发育及生烃机理、储层类型及成储机制以及油气成藏模式等科学问题，创新并实现特深井钻井工程技术迭代升级。深地塔科 1 井于 2023 年 5 月 30 日开钻，2025 年 2 月 20 日胜利完钻，完钻井深 10 910 m，完钻层位为古生界寒武系。本文结合深地塔科 1 井钻探实施全过程，阐述万米特深井钻探过程中形成的关键技术体系、取得的工程技术效果与地质认识突破进展。

1 关键技术体系

中国石油塔里木油田在超深—特深钻井领域积累了丰富的经验[21-22]，2024 年完成深度大于 8 000 m 的超深钻井近 50 口，实现了 8 000～9 000 m 超深钻完井工艺技术体系与装备工具能力成熟配套，但万米特深井配套技术体系尚属空白。深地塔科 1 井特深（11 100 m）、超高温（213 ℃）、超高压（133 MPa）、高含 H_2S、地层复杂等多因素耦合叠加，相比 9 000 m 级钻井，难度呈现指数增长[23-24]，面临复杂压力系统安全钻进风险高、特深难钻地层高效钻进难度大、苛刻工况条件井筒质量控制标准严、特深超高温复杂地层资料录取技术需求高等系列工程技术挑战[25-26]。为实现中国首口万米科探井“打成、打好、打直、测成”，中国石油创新配套以万米特深井复杂压力系统安全钻井技术、复杂难钻地层优快钻井技术、苛刻工况条件井筒质量控制技术、特深超高温复杂地层资料录取技术为核心的特深层钻井工艺技术体系，推动中国深地井工程全链条基础理论和关键核心技术取得跨越式提升。

1.1 特深井复杂压力系统安全钻井技术体系

深地塔科 1 井设计钻揭 13 套地层，至震旦系完钻，结合区域已钻井与地震预测，全井存在 10 个特殊复杂地质体[27]。特别是万米以深存在 3 大问题：①寒武系下丘里塔格组—奥陶系蓬莱坝组含硅白云岩、下丘里塔格组硬脆性白云岩井壁失稳严重；②寒武系吾松格尔组发育“串珠”灰岩缝洞体、高低压地层相互交错、安全密度窗口窄，可能导致地层坍塌；③卡钻、漏失、井涌等故障复杂情况不断交织显现[28-29]。同时特深层白云岩可参考的地震和测井资料少、品质差，压力预测精度低，风险点不确定性强、控制难度大，万米特深井身结构设计与安全钻进难度大[30-33]。

1.1.1 全球首台陆上 12 000 m 自动化钻机研发

研发制造全球首台陆上 12 000 m 全自动化钻机，提升能力达到 900 t，具有双司钻集成控制、一键式操作功能，降低了人工干预风险。集成中国最先进的管柱机械手、铁钻工、动力猫道等 8 套作业机器人，具备超高钻台管柱输送和万米钻具自动化排放能力，自动化作业减少人工重体力劳动 80%。配套 15 m 高钻台、4 413 kW 绞车、900 t 承载顶驱、2 206 kW 五缸泵等中国首创技术，实现了最重负载、最快钩速、最高压力、最大功率，可满足开展万米级特深层勘探开发的载荷

能力需求。

1.1.2 基于风险评估和控制的井身结构设计

建立了基于地质风险精准识别和工程控制能力评估的万米特深井身结构设计方法，通过对地震、测井、邻井实钻等资料的分析研究，定量预测了特殊温压场、岩性、地质体、流体等可能影响钻井安全的特殊复杂地层发育情况（见表 1）。采用地质工程一体化系统评估工程技术对地层风险的控制能力，综合判断必封点和风险点，在保证完成钻井目的的前提下考虑安全和经济原则，设计“塔标Ⅱ五开井身结构”，通过多套复杂地层一开次同打、增加套管下入深度，以最优井身结构实现钻探目的，主力储层采用ϕ139.7 mm 套管完井（见图 1）。

表 1 深地塔科 1 井钻前特殊复杂地层发育情况预测

“五特”类型	特殊复杂地层
特殊表层	表层为沙漠，上部地层疏松
特殊温压场	奥陶系、寒武系、震旦系碳酸盐岩可能钻遇相对定容的缝洞体异常高压，完钻（11 100 m）温度 212.8 ℃
特殊岩性	二叠系火成岩，石炭系膏岩，蓬莱坝组、下丘里塔格组含硅质地层，阿瓦塔格组含膏地层
特殊地质体	奥陶系一间房组/鹰山组/蓬莱坝组、寒武系沙依里克组/吾松格尔组、震旦系奇格布拉克组可能发育裂缝
特殊流体	沙依里克组、吾松格尔组和奇格布拉克组为目的层，赋存油气

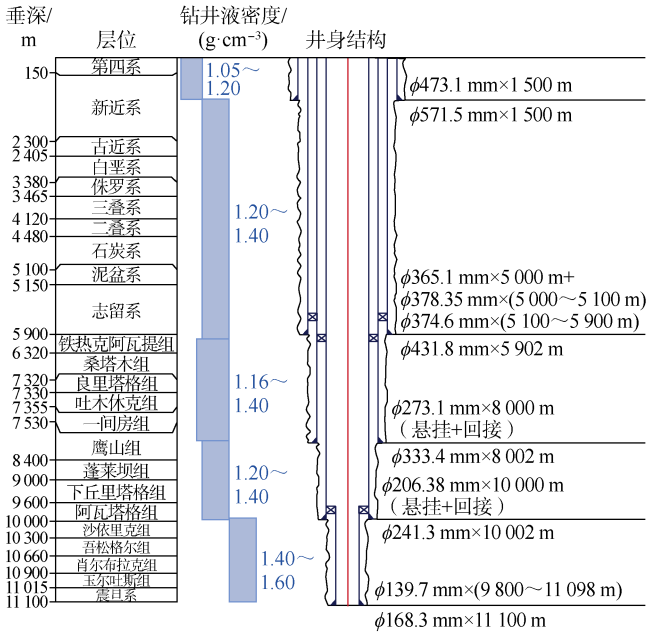


图 1 深地塔科 1 井设计塔标Ⅱ五开井身结构

1.1.3 抗 220 ℃高温水基钻井液技术

塔里木油田联合院士创新团队自主攻关，揭示钻井液处理剂分子结构与抗温性能构效机制，研发抗高温高盐降滤失剂、增黏剂、提切剂等关键处理剂（见图 2），构建了具有完全自主知识产权的抗 220 ℃超高温聚合物水基钻井液体系。体系抗高温老化性能良好，抗 NaCl 至饱和、抗 Ca^{2+} 7 000 mg/L、抗石膏 3%、抗劣质土 10%、抗 HCO_3^- 12 400 mg/L，玻璃棒在 220 ℃热静止 64 h 后钻井液中自由下落到底，实钻各项性能指标满足特深钻进需求。为解决深部地层钻井面临的井壁失稳、井漏、卡钻、摩阻高等难题，配套形成了特深井复杂处理钻井液配套技术[34]，包括以“强支撑+强封堵+强携砂”为核心的深部白云岩地层井壁稳定技术、以“密度优化+井筒强化”为核心的特深裂缝性地层防漏堵漏技术、以“酸液配方优化+隔离液防污染+封闭浆防漏失”为核心的特深白云岩地层高效解卡技术。

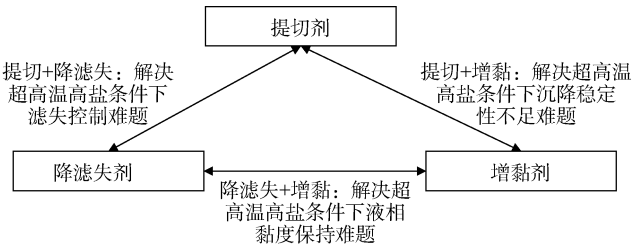


图 2 抗 220 ℃高温水基钻井液处理剂协同增效机理

1.1.4 特深井钻具研制及安全管控技术

万米特深井钻具服役环境苛刻、受力状态复杂，在“拉、压、扭”等复合载荷作用下易断裂失效，加之井下振动剧烈，对钻具本质安全要求极高，安全管控难度大。为此，研发ϕ168.275 mm-V150 高钢级钻杆，抗拉强度达到 9 238 kN（见表 2），成功将四开尾管下至 9 877 m；升级钻铤、稳定器等材质与冲击韧性（冲击功提升至 100 J）；国内首次设计应用全管柱双台肩螺纹结构，钻柱整体抗扭强度提升 30%。同时，形成了一套特深井钻具现场安全管理办法，建立以“螺纹上卸扣数智化、单根钻具使用信息清单化、底部钻具组合使用时间个性化、钻杆监测精细化”为核心的特深井钻具使用及维护技术规范，实时掌握单根钻具使用状态，严控疲劳失效。

表 2 高强度钻杆性能参数表

外径/mm	壁厚/mm	内径/mm	钢级	抗拉强度/kN	抗扭强度/(kN·m)	接头类型
149.200	10.92	127.4	V150	4 906	182.5	ϕ139.700 mm FHDS
168.275	19.05	130.2	V150	9 238	358.5	ϕ168.275 mm FH

注：FHDS—贯眼双台肩扣；FH—贯眼扣

1.2 特深井复杂难钻地层优快钻井技术体系

特深井地层岩性复杂、研磨性高、可钻性差，面临机械钻速低、单趟进尺短等问题，通过岩石力学特

性研究，特深白云岩围压下强度达到 611 MPa，弹性模量达到 67 GPa，切削齿吃入困难。现有可钻性评价手段不完善、预测精度低，严重制约特深井钻头的科学设计和选型。现有钻头、工具对特深地层适应性和可靠性受限，在超高温、超高压等复杂难钻地层中钻进提速效果差，轮探 3 井寒武系白云岩地层ϕ168.3 mm 钻头出井后磨损严重，单趟钻进尺 62～115 m，平均机械钻速仅 0.47～1.61 m/h，亟须探索特深井高效破岩新技术。

1.2.1 “一趟钻”高效破岩技术

通过实施“一趟钻”工程，系统配套每趟钻的进尺目标、钻头型号、提速工具与钻进参数，实现每趟钻最大行程钻速。采用个性化设计钻头，提升多套地层钻进适应性。结合多套地层特征，尤其是二叠系火成岩、志留系沥青砂岩等特殊地层，参考邻井实钻情况开展个性化钻头设计，兼顾攻击性、抗研磨性、防卡性等综合性能，使用尖圆、斧形、锥球等高效异形齿复合片，实现高效破岩的同时提高钻头在多套地层中的适应性。前三开累计 10 趟钻进尺 7 856 m，平均机械钻速 8.3 m/h，单趟钻最长进尺 2 555 m、单日进尺最高 567 m。

1.2.2 特深难钻地层钻井提速技术

四开、五开特深难钻地层的冲击性和研磨性极强，轮探 3 井完钻层位为震旦系，井深 8 699 m，使用ϕ168.3 mm 平面齿钻头，钻井过程中存在提速效果差、出井钻头磨损严重现象（见图 3a）。深地塔科 1 井在可钻性优化评价基础上，通过设计高抗冲击异形齿（ϕ168.3 mm，实验表明抗冲击能力较平面齿提高 500%），优化切削齿脱钻深度，采用混合布齿、多重力平衡设计合理优化单齿功率及载荷分布，提高 PDC（聚晶金刚石复合片）钻头抗冲击、抗研磨、抗涡动能力，出井钻头轻微磨损（见图 3b）。四开累计 16 趟钻进尺 2 150 m，平均机械钻速 2.11 m/h，平均单趟钻进尺 134 m。五开白云岩地层使用混合布齿 PDC 钻头，单只进尺 90.66 m，平均机械钻速 1.64 m/h，含膏地层使用平面齿钻头单只进尺 140.1 m，平均机械钻速 1.27 m/h。



钻头入井前　　钻头出井后

(a) 轮探3井钻头进尺115 m后损坏情况



钻头入井前　　钻头出井后

(b) 深地塔科1井钻头进尺175 m后损坏情况

图 3　轮探 3 井、深地塔科 1 井同工况钻头磨损情况对比

1.2.3 特深井钻井复杂事故预防及处置技术

井深大于 8 000 m 以后，由于地层特深、超高温、超高压，井下井壁失稳、井漏、卡钻等工程风险大幅度增加，且处置难度大、时间及费用投入高。为此攻关形成了地质工程一体化钻井风险识别技术、基于科学钻井的井下复杂事故预防技术和全面高效的井下复杂事故处置技术，全面降低复杂事故发生风险，减少复杂事故处置时间。四开钻至井深 9 977.06 m 过程中发生钻具失效，经过反扣母锥换鱼头、正扣钻具对扣打捞、震击解卡后，打捞成功。五开井段 10 289～10 383 m 钻遇缝洞型灰岩发生严重漏失，环空液面深度 1 800 m，通过以 0.02 g/cm^3 为阶梯逐级降低钻井液密度，配合 13 次起下钻验证井壁稳定性，确定以 1.06 g/cm^3 的安全密度恢复钻进。

1.3 特深井苛刻工况井筒质量控制技术体系

前苏联科拉 SG-3 井钻探实践表明[35-36]，井眼打直是特深井钻探成功的基础，井身质量差将导致深部地层钻井作业钻压传递困难、扭矩增大、钻柱振动加剧、套管磨损、钻具疲劳失效等一系列工程问题。深地塔科 1 井钻具超重（大于 350 t）、温度超高，井身质量控制要求高、难度大，防斜打直面临垂直钻井系统抗温不足、9 000 m 以深井段无主动防斜手段等难题。

1.3.1 耐温 175 ℃全旋转动态推靠式垂直钻井工具主动防斜技术

井深 9 000 m 以浅使用耐温 175 ℃全旋转动态推靠式垂直钻井工具主动防斜，优选钻井参数、钻具组合，优化垂直钻井工具安装位置、推靠臂推靠力，形成特深井垂直钻井工具组合方案，提高防斜效率和底部钻具安全性。在合金钢材质的推靠臂外表面，耦合设计碳化钨涂层及 PDC 复合片，提高垂直钻井工具推靠臂表面耐磨与抗冲击能力。

1.3.2 强钟摆降斜力底部钻具组合（BHA）优化技术

构建特深井底部钻具组合准动力学模型，模拟分析多种钻具组合结构的降斜力特征，有效指导 BHA 设

计。计算结果表明，钻压 50 kN、转速 60 r/min、井斜角 3°条件下，3 根ϕ196.85 mm 钻铤、双扶正器钻具组合的降斜力较常规 2 根ϕ177.80 mm 钻铤、双扶正器钻具组合提高 85.7%（见表 3），四开 9 000 m 以深井段采用该钻具组合防斜。

表 3 特深井新型钟摆钻具组合降斜力模拟结果表

BHA 钻具组合	钻铤尺寸/mm	模拟降斜力/kN
2 根钻铤+双扶正器	177.80	0.42
	196.85	0.53
3 根钻铤+双扶正器	177.80	0.59
	196.85	0.78

1.3.3 超重大尺寸套管封隔式分级固井技术

二、三开套管理论浮重分别为 625 t 和 590 t，固井面临超重大尺寸套管安全下入难、固井漏失风险高、井口坐挂吨位控制难、大排量地面施工工艺要求高等难题。为实现超重套管安全下入，基于有限元与强度理论，分析套管及配套工具在超重载荷下的应力状态和变形情况，确保套管连接强度及套管下入工具强度满足安全下入需求，在此基础上研发中国首套ϕ365.125 mm 封隔式分级箍，配套安放位置优选、固井防漏设计等固井工艺，实现二、三开全井段有效封固，固井质量合格率大于 80%。

1.3.4 特深层长裸眼多压力系统尾管固井技术

特深尾管固井面临油气显示活跃、固井防漏提质难、施工安全保障难等难题，为此，创新研发抗 220 ℃水泥浆和超高温、超重载高压尾管悬挂器，水泥浆抗温能力提高至 220 ℃，悬挂器悬挂能力提高至 400 t，发展形成以“压稳防漏防塌、提升顶替效率、保障施工安全”为核心的特深长裸眼窄窗口固井工艺，解决特深裸眼“上溢下漏、糖葫芦井眼”固井难题，保障万米级固井作业顺利实施，固井质量合格。

1.4 特深超高温复杂地层资料录取技术体系

万米特深层油气勘探面临地层层系多、岩性多变、多套地层压力系统、超高压等复杂地质条件及油气成藏规律认识不清等客观困难，加之井筒环境复杂，导致油气显示发现与评价、地质风险监测与预警难度大，常规分析化验设备不能满足科学钻探需要，取全取准地质资料难度大。

1.4.1 万米特深复杂地层录井技术

攻关形成了以岩性识别及地质卡层、油气发现及评价、风险监测及预警、录井新设备、岩屑及岩心多维核磁共振、随钻气体碳同位素分析检测等为核心的万米特深层录井技术，创新基于岩屑元素及图像结合的岩性识别及地质卡层方法，岩性识别准确率 92%、地质卡层成功率 100%、油气发现率 100%，提高了地质风险预警的准确性，取全取准了万米深井各类地质资料。

1.4.2 万米特深超高温超高压测井技术

攻关形成了超高温超高压（230 ℃、180 MPa）常规和成像测井系列、13 000 m 级超高强度特制电缆、15 000 m 超大容量绞车滚筒及动力系统等，采用国产测井装备安全高效完成了全部测井采集任务。全井五开次累计测井施工 30 趟次，采集测井曲线 74 条、累计测井曲线长度 26.3×10^4 m，为万米深地油气发现和工程应用提供丰富、准确基础资料。

1.4.3 万米特深硬脆性难钻地层取心技术

常规取心工具耐超高温密封性差、内筒表面光滑度低、机械强度不足，取心钻头钻进效率低，万米特深层配套取心工艺不完善，导致取心作业安全和收获率无法保障。为此，攻关形成了以抗温 240 ℃高强度取心工具、高效破岩取心钻头和配套取心工艺为核心的万米特深层取心技术，获取万米以深地层岩心 3 筒，累计取心长度 12.64 m，平均收获率 92.5%。

2 钻探成效

2.1 工程技术成效

2.1.1 成功创造亚洲第 1 深井工程记录

深地塔科 1 井于 2024 年 3 月 4 日钻达 10 006 m，突破万米，用时 279 d，创造了全球陆上钻达万米用时最短纪录[37-38]，但受井下复杂地质、工程等因素的影响，于井深 9 230 m 处实施侧钻，至 2025 年 1 月 5 日，五开钻至井深 10 910 m 完钻，成功完钻了亚洲第 1、全球第 2 垂直深井。全井开钻至完钻，地层钻进累计采用 51 趟钻（见表 4），钻头 51 只，实钻平均机械钻速 3.2 m/h。

表 4 实钻各开次钻进趟数、平均趟钻进尺与平均机械钻速

开次	井段/m	钻进趟数	平均趟钻进尺/m	平均机械钻速/(m·h^{-1})
一开	0～1 503.00	1	1 503	20.52
二开	1 503.00～5 856.00	5	862	8.70
三开	5 856.00～7 856.00	4	496	5.06
四开	7 856.00～10 006.00	16	134	2.11
	侧钻 9 230.00～9 889.63	11	60	0.66
五开	9 889.63～10 910.00	14	73	1.45

2.1.2 铸就特深钻完井工程技术十大利器

深地塔科 1 井的胜利完钻，检验了一大批中国自

主研发的关键核心技术的可靠新和稳定性，在中国石油一体化统筹优势引领下，科技赋能引领支撑，产学研用攻关瓶颈技术，构建了特深层钻完井理论与工艺、装备完整技术体系（见表 5）。

表 5　深地塔科 1 井万米钻探十大技术利器

序号	名称	技术内涵	技术效果
1	12 000 m 自动化钻机	自主研制全球陆上首台 12 000 m 自动化钻机	满足万米科探需求
2	地质工程一体化技术	创新形成钻前-钻中-钻后地质工程一体化技术	保障全过程复杂地层安全钻进
3	高强度钻杆及安全管控技术	创新钻具强度升级与特深井钻具使用技术规范	保障钻具使用安全
4	超硬复合片及高效 PDC 钻头	结合地层特征自主研制个性化钻头	实现复杂难钻地层高效破岩
5	超高温钻井液体系	研发抗温 220 ℃钻井液体系	为万米钻探提供优质“血液”保障
6	恶性井漏防治技术	碳酸盐岩缝洞型地层防漏、堵漏	保障复杂压力、漏失地层安全钻进
7	高强度取心工具与特深取心技术	研制抗温 240 ℃高强度取心工具，配套工艺	获取万米以深地层岩心 3 筒
8	移动式井场岩样测量	研制井场岩样成像系统	快速识别储层
9	特深超高温超高压测井仪器	研制 230 ℃/180 MPa 超高温超高压系列仪器	取全取准万米测井资料
10	特深固井关键技术	配套固井装备与复杂地层、压力系统固井技术	全井段固井质量良好

2.1.3 带动中国钻完井工程技术进入万米时代

2000—2010 年，美国逐渐成熟配套 12 000 m 级特深井钻完井装备与技术，至今墨西哥湾完钻井深（含水深）超过 10 000 m 的特深井多达 60 余口[37-38]。深地塔科 1 井的胜利完钻与获得的勘探发现，开启了中国万米特深层勘探开发的“新纪元”;提出的问题与挑战，引领了涵盖重大装备、高端工具、新型材料、专业软件等万米深地勘探开发产业集群的创新发展；进一步完善了基础层、技术层和应用层产业链，全面保障了万米深地钻井关键技术装备的自主安全可控，提升了保障国家能源安全的能力。

2.2 地质认识突破

深地塔科 1 井钻探在石油地质理论认识方面取得突破性进展：①万米深层发现常规可动油气，实现了陆上万米以深油气发现“零”的突破。在寒武系肖尔布拉克组 10 693～10 777 m 井段见 7 m/2 层油气显示，全烃最高 39.9%，干燥系数 0.99，以干气为主，经液气分离器点火焰高 1.0～2.5 m，能量充足，燃烧持续 14 h，经测井解释裂缝 4 条，解释差气层 10 m/2 层。塔里木盆地海相天然气具有伴生气、原油裂解气、过成熟干酪根裂解气 3 种成因类型，深地塔科 1 井烃源岩 R_o 值（等效）为 2.52%，肖尔布拉克组天然气 $\delta^{13}C$ 平均值为−33‰，气源对比分析结果表明气源主要为寒武系玉尔吐斯组过熟干酪根裂解气，万米深层的天然气为有机成因。②万米深层发现两类碳酸盐岩储层，首次证实万米深层依旧保存有规模优质储层。第 1 类为白云岩缝洞型储层，井深 9 953～10 265 m，其中Ⅱ类储层厚 96 m，以砂屑云岩和藻云岩为主，测井孔隙度 2.2%～4.1%，岩心核磁孔隙度 3%～4%，储集空间为溶蚀孔洞、裂缝，主要发育在高能礁后滩相中，垂向多旋回叠置发育，表明万米深层白云岩储层仍然具有相控性和旋回性特征[39]，白云岩缝洞型储层在钻井过程中频繁发生井漏。第 2 类是灰岩断溶体储层，井深 10 265～10 348 m，地震反射表现为典型的“串珠”，储层厚 34 m，以含云鲕粒灰岩、粉屑灰岩为主，钻井过程中出现钻井液失返性漏失。两类规模优质碳酸盐岩储层的发现有效拓展了油气勘探的纵向深度。③钻揭了目前全球埋藏最深的优质烃源岩，证实烃源岩生烃潜力大。下寒武统玉尔吐斯组 10 851～10 910 m 钻揭两段优质烃源岩，具有高 *TOC* 值、高生产力、硫化还原特征。上段以灰质烃源岩为主，厚 33 m，其中好烃源岩 22.5 m，*TOC* 值平均 1.3%，(S_1+S_2) 值平均 2.1 mg/g；下段以泥质烃源岩为主，厚 26 m，*TOC* 值平均 4.3%，均为优质烃源岩，(S_1+S_2) 值平均 3.8 mg/g，属于高—过成熟阶段。井震结合证实塔里木盆地北部坳陷玉尔吐斯组烃源岩自北向南厚度增大，上段灰质烃源岩段从北部的含泥灰岩向南相变为泥质灰岩，质量变好，下段泥质烃源岩段自北向南逐渐增厚，满西凹陷—阿瓦提凹陷寒武系玉尔吐斯组均发育厚层优质烃源岩，埋深超万米的优质烃源岩面积约 11×10^4 km^2，奠定了万米深层油气资源基础。

3 科学意义

3.1 地球科学领域

3.1.1 探索中国中西部叠合盆地形成演化重大基础问题，为特深层油气勘探领域选择提供依据

通过深地塔科 1 井的钻探，为研究原特提斯洋形成演化与冈瓦纳大陆重构过程、恢复震旦纪—寒武纪古构造古环境、解决克拉通陆块特深层多场演化的动力学机制、判识特深层油气形成提供了重要依据。震旦纪—寒武纪是地球演化历史上最重大的变革时期之一，全球板块构造、古气候变化与环境变迁、生命演化等一系

列地质事件都发生在这一时期。塔里木盆地受多期构造运动叠加改造影响，盆缘野外露头构造变形强烈，难以准确建立完整震旦系—寒武系沉积充填序列。通过岩心、岩屑系统取样分析，可恢复震旦纪—寒武纪重大转换期克拉通盆地古构造、古环境及其演化过程，为原特提斯洋演化与冈瓦纳大陆重构提供重要依据。

与中浅层相比，特深层经历超长构造演化、多场耦合叠加改造作用，决定了中国陆块特有的构造格局和油气资源分布。受露头震旦系—寒武系不整合沉积间断大、沉积后多遭受强改造等影响，陆块动力学机制在盆地内的多场响应机制不清，限制了克拉通盆地特深层油气资源的探测活动。通过深地塔科 1 井实物资料的取样分析，开展地质年代学、地球化学、构造沉降史恢复等综合性基础研究，将进一步揭示中国克拉通盆地形成动力学过程、机制及其对地温、压力场等关键盆地构成要素的控制作用，更深入理解特深层油气生成与成藏机制，为特深层油气形成提供重要判识依据，并推动沉积盆地形成演化理论与认识创新。

3.1.2 揭示特深层高温高压油气成藏富集机理，探索特深层油气分布及规模勘探极限

万米特深层钻探揭示的高温高压（温度大于 200 ℃，压力大于 100 MPa）和复杂流体环境，超出了传统油气生成地质理论范畴，多类型源灶的有效性、多场耦合下的烃类生成机制、规模优质储层成储机理与保存机制等是特深层油气勘探面临的重大科学问题，也是当前国际前缘科学难题。

万米特深层钻探揭示的有机质热演化程度超过 2.5%，深部地层热液流体比中浅层更加活跃，油气资源在超高地温环境下能否生成和保存，是资源潜力评价面临的首要难题，亟待开展交叉基础理论攻关，结合高温高压物理模拟实验手段、流体成因分析和原位表征新技术，探讨深部流体、围岩矿物和有机质参与的复合生烃和油气保存机理，支撑万米特深层油气资源量评价和勘探有利区预测。

万米特深层发育储层超出了已有的储层发育下限认知，伴随着高温高压条件的出现和流体性质的变化，流体-岩石相互作用的类型、方式与中浅层可能不同，盆地深层仍然发育原生孔隙、次生孔（洞）、孔（洞）缝复合和裂缝等多类型储集空间，其储集空间的原生保持和深部溶蚀机理尚未揭示，造成规模有效储层的分布规律不明。通过对上述问题的系统解析，将深化特深层多类型成储机理的认识，为规模有效储层分布预测和油气勘探开发提供理论依据。

万米特深层超出了传统认识上的油气成藏和勘探深度下限，超高温高压条件下的流体性质与相态、岩石力学性质、油气运聚动力学机制与中浅层差异明显，通过研究深化万米特深层油气成藏富集与保持机理认识，回答“油气藏是否存在成藏极限，勘探深度是否存在下限”这一关键科学问题，将为万米油气领域的拓展和勘探发现提供理论与技术支撑。

3.2 油气勘探领域

将深层—超深层资源评价深度拓展到万米。深地塔科 1 井的成功钻探，有助于发现万米特深层油气勘探重大战略接替领域。该井所在的塔里木盆地轮南—古城地区古老碳酸盐台缘带长度 355 km，宽度 30～90 km，厚 1 500～3 500 m，是中国尚未获得规模油气发现的最大台地边缘勘探领域，预期可发现中寒武统沙依里克组礁后滩、下寒武统吾松格尔组丘滩体和震旦系奇格布拉克组白云岩风化壳等多套油气藏，一旦取得突破将开辟中国最大古老碳酸盐台地边缘勘探领域。轮南—古城地区寒武系—奥陶系发育 14 期台地边缘带，有利面积约 1.6×10^4 km^2，天然气资源量约 3×10^{12} m^3、石油资源量 10×10^8 t，是油气勘探的重大战略接替领域。

3.3 工程技术辐射效应

深地塔科 1 井的胜利完钻，检验了一大批中国自主研发的关键核心技术的可靠性和稳定性，国产 ZJ120 钻机、耐高温高压装备工具、液体材料的可靠性得到有效验证，万米特深层钻井、技术服务保障队伍的实践能力经受住实战考验。培育出一支综合万米钻井、录井、地震、测井、取心、完井改造、测试等业务能力的特深层技术服务队伍。目前世界上只有美国与俄罗斯具备万米钻探技术，中国万米深地科探工程的顺利实施，将形成一批原创性、前瞻性和基础性科研成果及工艺技术标准、规范和专利，加快形成万米特深领域高效勘探开发的技术系列，提升中国石油特深工程技术领域的核心竞争力，推动国际特深层油气资源的战略合作。

4 结语

深地塔科 1 井的成功钻探对探索塔里木盆地演化、发现油气资源均具有重要意义，首次在万米特深层获得油气发现，证实万米深层仍然发育优质油气储层，具备良好的油气勘探潜力。通过深地塔科 1 井的钻探，发现了目前已知埋深最大的古老烃源岩，生烃潜力大。

深地塔科 1 井的科学研究，将围绕中西部叠合盆地形成演化重大基础问题、特深层高温高压油气成藏富集

机理、特深层油气分布与规模勘探极限等方面展开，并推动中国叠合复合盆地演化、古气候重建、成烃机理等方面的深化研究，为特深层勘探领域选择提供依据。

深地塔科 1 井的胜利完钻，系统检验了关键核心技术的可靠性和稳定性，构建了特深层钻完井理论、工艺设计、装备迭代等技术体系。同时，培育锻炼出一支综合万米钻井、录井、地震、测井、取心、完井改造、测试等全产业链业务能力的特深层技术服务队伍。

深地塔科 1 井的完钻，提出了新的问题与挑战。如特深层断裂、缝洞地震刻画精细度不够，导致碳酸盐岩缝洞型地层钻进过程中发生恶性井漏；特深钻具的振动状态复杂，易引发钻具疲劳失效；国产耐温 200 ℃垂直钻井工具不成熟、耐油与耐超高温橡胶螺杆稳定性不足、金属螺杆待研发；仍需持续攻关完善基础层、技术层和应用层产业链，推进工程技术由超深层向特深层的跨越式迭代升级。

符号注释：

R_o——镜质体反射率，%；S_1——游离烃含量，mg/g；S_2——热解烃含量，mg/g；TOC——总有机碳含量，%。

参考文献：

[1] 何登发, 贾承造, 赵文智, 等. 中国超深层油气勘探领域研究进展与关键问题[J]. 石油勘探与开发, 2023, 50(6): 1162-1172.
HE Dengfa, JIA Chengzao, ZHAO Wenzhi, et al. Research progress and key issues of ultra-deep oil and gas exploration in China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2023, 50(6): 1162-1172.

[2] 赵文智. 中国油气勘探行业面临的五大挑战[J]. 世界石油工业, 2019, 26(2): 1-2.
ZHAO Wenzhi. Five challenges of oil and gas exploration in China[J]. World Petroleum Industry, 2019, 26(2): 1-2.

[3] 贾承造. 中国石油工业上游前景与未来理论技术五大挑战[J]. 石油学报, 2024, 45(1): 1-14.
JIA Chengzao. Prospects and five future theoretical and technical challenges of the upstream petroleum industry in China[J]. Acta Petrolei Sinica, 2024, 45(1): 1-14.

[4] 庞雄奇, 汪文洋, 汪英勋, 等. 含油气盆地深层与中浅层油气成藏条件和特征差异性比较[J]. 石油学报, 2015, 36(10): 1167-1187.
PANG Xiongqi, WANG Wenyang, WANG Yingxun, et al. Comparison of otherness on hydrocarbon accumulation conditions and characteristics between deep and middle-shallow in petroliferous basins[J]. Acta Petrolei Sinica, 2015, 36(10): 1167-1187.

[5] 贾承造, 庞雄奇. 深层油气地质理论研究进展与主要发展方向[J]. 石油学报, 2015, 36(12): 1457-1469.
JIA Chengzao, PANG Xiongqi. Research processes and main development directions of deep hydrocarbon geological theories[J]. Acta Petrolei Sinica, 2015, 36(12): 1457-1469.

[6] 陈代钊, 钱一雄. 深层—超深层白云岩储集层: 机遇与挑战[J]. 古地理学报, 2017, 19(2): 187-196.
CHEN Daizhao, QIAN Yixiong. Deep or super-deep dolostone reservoirs: Opportunities and challenges[J]. Journal of Palaeogeography (Chinese Edition), 2017, 19(2): 187-196.

[7] HAO F. Enrichment mechanism and prospects of deep oil and gas[J]. Acta Geologica Sinica (English Edition), 2022, 96(3): 742-756.

[8] 王清华, 杨海军, 杨威. 库车坳陷超深层碎屑岩油气地质研究新进展和下步勘探方向[J]. 石油勘探与开发, 2025, 52(1): 70-83.
WANG Qinghua, YANG Haijun, YANG Wei. New progress and future exploration targets in petroleum geological research of ultra-deep clastic rocks in Kuqa Depression, Tarim Basin, NW China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2025, 52(1): 70-83.

[9] 贾承造. 含油气盆地深层—超深层油气勘探开发的科学技术问题[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2023, 47(5): 1-12.
JIA Chengzao. Key scientific and technological problems of petroleum exploration and development in deep and ultra-deep formation[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2023, 47(5): 1-12.

[10] 杨学文, 田军, 王清华, 等. 塔里木盆地超深层油气地质认识与有利勘探领域[J]. 中国石油勘探, 2021, 26(4): 17-28.
YANG Xuewen, TIAN Jun, WANG Qinghua, et al. Geological understanding and favorable exploration fields of ultra-deep formations in Tarim Basin[J]. China Petroleum Exploration, 2021, 26(4): 17-28.

[11] 田军, 王清华, 杨海军, 等. 塔里木盆地油气勘探历程与启示[J]. 新疆石油地质, 2021, 42(3): 272-282.
TIAN Jun, WANG Qinghua, YANG Haijun, et al. Petroleum exploration history and enlightenment in Tarim Basin[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2021, 42(3): 272-282.

[12] 王清华, 徐振平, 张荣虎, 等. 塔里木盆地油气勘探新领域、新类型及资源潜力[J]. 石油学报, 2024, 45(1): 15-32.
WANG Qinghua, XU Zhenping, ZHANG Ronghu, et al. New fields, new types of hydrocarbon explorations and their resource potentials in Tarim Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2024, 45(1): 15-32.

[13] 刘可禹, 杨鹏, 杨海军, 等. 重新审视深层油气成藏模式: 以塔里木盆地为例[J]. 地质学报, 2023, 97(9): 2820-2841.
LIU Keyu, YANG Peng, YANG Haijun, et al. Deep petroleum accumulation models revisited: Case studies from the Tarim Basin[J]. Acta Geologica Sinica, 2023, 97(9): 2820-2841.

[14] 黄亚浩, 汪如军, 文志刚, 等. 塔里木盆地富满油田深层—超深层油气成藏过程[J]. 石油学报, 2024, 45(6): 947-960.
HUANG Yahao, WANG Rujun, WEN Zhigang, et al. Hydrocarbon accumulation process of the deep to ultra deep reservoirs in Fuman Oilfield, Tarim Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2024, 45(6): 947-960.

[15] TISSOT B P, WELTE D H. Petroleum formation and occurrence[M]. Berlin: Springer, 1984.

[16] 张水昌, 苏劲, 张斌, 等. 塔里木盆地深层海相轻质油/凝析油的成因机制与控制因素[J]. 石油学报, 2021, 42(12): 1566-1580.
ZHANG Shuichang, SU Jin, ZHANG Bin, et al. Genetic mechanism and controlling factors of deep marine light oil and condensate oil in Tarim Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2021, 42(12): 1566-1580.

[17] 赵文智, 汪泽成, 黄福喜, 等. 中国陆上叠合盆地超深层油气成藏条件与勘探地位[J]. 石油学报, 2023, 44(12): 2020-2032.
ZHAO Wenzhi, WANG Zecheng, HUANG Fuxi, et al. Hydrocarbon accumulation conditions and exploration position of ultra-deep reservoirs in onshore superimposed basins of China[J]. Acta Petrolei Sinica, 2023, 44(12): 2020-2032.

[18] 汪泽成, 赵振宇, 黄福喜, 等. 中国中西部含油气盆地超深层油气成藏条件与勘探潜力分析[J]. 世界石油工业, 2024, 31(1): 33-48.
WANG Zecheng, ZHAO Zhenyu, HUANG Fuxi, et al. Ultra-deep hydrocarbon accumulation conditions and exploration potential in sedimentary basins of central-western China[J]. World Petroleum Industry, 2024, 31(1): 33-48.

[19] 杨海军, 陈永权, 潘文庆, 等. 塔里木盆地南华纪—中寒武世构造沉积演化及其盐下勘探选区意义[J]. 中国石油勘探, 2021, 26(4): 84-98.

YANG Haijun, CHEN Yongquan, PAN Wenqing, et al. Study on tectonic and sedimentary evolution during the Nanhua-Middle Cambrian and its significance for subsalt exploration, Tarim Basin[J]. China Petroleum Exploration, 2021, 26(4): 84-98.

[20] 陈永权, 王晓雪, 何皓, 等. 塔里木克拉通南华纪—寒武纪隆坳格局演化[J]. 中国石油勘探, 2022, 27(4): 30-46.
CHEN Yongquan, WANG Xiaoxue, HE Hao, et al. Evolution of uplift and depression framework of Tarim Craton in Nanhua-Cambrian[J]. China Petroleum Exploration, 2022, 27(4): 30-46.

[21] 苏义脑, 路保平, 刘岩生, 等. 中国陆上深井超深井钻完井技术现状及攻关建议[J]. 石油钻采工艺, 2020, 42(5): 527-542.
SU Yinao, LU Baoping, LIU Yansheng, et al. Status and research suggestions on the drilling and completion technologies for onshore deep and ultra deep wells in China[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2020, 42(5): 527-542.

[22] 王春生, 王哲, 张权, 等. 塔里木油田超深层钻井技术进展及难题探讨[J]. 钻采工艺, 2024, 47(2): 59-69.
WANG Chunsheng, WANG Zhe, ZHANG Quan, et al. Progress and obstacles of ultra-deep drilling technology in Tarim Oilfield[J]. Drilling & Production Technology, 2024, 47(2): 59-69.

[23] 王春生, 冯少波, 张志, 等. 深地塔科 1 井安全高效钻井关键技术[J]. 深地能源科技, 2025, 1(1): 110-116.
WANG Chunsheng, FENG Shaobo, ZHANG Zhi, et al. Key technology for safe and high-efficiency drilling of the well Shendi Take1[J]. Deep Earth Energy Science & Technology, 2025, 1(1): 110-116.

[24] 汪海阁, 黄洪春, 纪国栋, 等. 中国石油深井、超深井和水平井钻完井技术进展与挑战[J]. 中国石油勘探, 2023, 28(3): 1-11.
WANG Haige, HUANG Hongchun, JI Guodong, et al. Progress and challenges of drilling and completion technologies for deep, ultra-deep and horizontal wells of CNPC[J]. China Petroleum Exploration, 2023, 28(3): 1-11.

[25] 赵金海, 张洪宁, 王恒, 等. 中国石化超深层钻完井关键技术挑战及展望[J]. 钻采工艺, 2024, 47(2): 28-34.
ZHAO Jinhai, ZHANG Hongning, WANG Heng, et al. Key technical challenges and prospects of drilling and completion in ultra-deep reservoirs, Sinopec[J]. Drilling & Production Technology, 2024, 47(2): 28-34.

[26] 孙金声, 刘伟, 王庆, 等. 万米超深层油气钻完井关键技术面临挑战与发展展望[J]. 钻采工艺, 2024, 47(2): 1-9.
SUN Jinsheng, LIU Wei, WANG Qing, et al. Challenges and development prospects of oil and gas drilling and completion in myriametric deep formation in China[J]. Drilling & Production Technology, 2024, 47(2): 1-9.

[27] 王春生, 冯少波, 张志, 等. 深地塔科 1 井钻井设计关键技术[J]. 石油钻探技术, 2024, 52(2): 78-86.
WANG Chunsheng, FENG Shaobo, ZHANG Zhi, et al. Key technologies for drilling design of Well Shendi Take-1[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2024, 52(2): 78-86.

[28] 孙金声, 杨景斌, 白英睿, 等. 深层超深层钻井液技术研究进展与展望[J]. 石油勘探与开发, 2024, 51(4): 889-898.
SUN Jinsheng, YANG Jingbin, BAI Yingrui, et al. Research progress and development of deep and ultra-deep drilling fluid technology[J]. Petroleum Exploration and Development, 2024, 51(4): 889-898.

[29] 王建云, 韩涛, 赵宽心, 等. 塔深 5 井超深层钻井关键技术[J]. 石油钻探技术, 2022, 50(5): 27-33.
WANG Jianyun, HAN Tao, ZHAO Kuanxin, et al. Key drilling technologies for the ultra-deep Well Tashen 5[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2022, 50(5): 27-33.

[30] 王志刚, 王稳石, 张立烨, 等. 万米科学超深井钻完井现状与展望[J]. 科技导报, 2022, 40(13): 27-35.
WANG Zhigang, WANG Wenshi, ZHANG Liye, et al. Present situation and prospect of drilling and completion of 10000 meter scientific ultra deep wells[J]. Science & Technology Review, 2022, 40(13): 27-35.

[31] 杨海军, 陈永权, 田军, 等. 塔里木盆地轮探 1 井超深层油气勘探重大发现与意义[J]. 中国石油勘探, 2020, 25(2): 62-72.
YANG Haijun, CHEN Yongquan, TIAN Jun, et al. Great discovery and its significance of ultra-deep oil and gas exploration in Well Luntan-1 of the Tarim Basin[J]. China Petroleum Exploration, 2020, 25(2): 62-72.

[32] 杨沛, 刘洪涛, 李宁, 等. 塔里木油田超深井钻井设计及优化技术: 以亚洲最深井轮探 1 井为例[J]. 中国石油勘探, 2021, 26(3): 126-135.
YANG Pei, LIU Hongtao, LI Ning, et al. Drilling design and optimization technology of ultra-deep wells in the Tarim Oilfield: A case study of Well Luntan 1, the deepest well in Asia[J]. China Petroleum Exploration, 2021, 26(3): 126-135.

[33] 宋周成, 翟文宝, 邓昌松, 等. 富满油田超深井井身结构优化技术与应用[J]. 钻采工艺, 2022, 45(6): 36-41.
SONG Zhoucheng, ZHAI Wenbao, DENG Changsong, et al. Optimization technology and application of casing program of ultra-deep wells in Fuman Oilfield[J]. Drilling & Production Technology, 2022, 45(6): 36-41.

[34] 刘锋报, 孙金声, 尹达, 等. 塔里木万米科探井垮塌机理研究及技术对策[J]. 钻井液与完井液, 2024, 41(6): 709-718.
LIU Fengbao, SUN Jinsheng, YIN Da, et al. Mechanisms of and technical measures for solving borehole wall instability in ten-thousand-meter scientific exploration wells in Tarim Basin[J]. Drilling Fluid & Completion Fluid, 2024, 41(6): 709-718.

[35] 莫杰. 科拉超深钻的重大成果[J]. 地质与勘探, 1987, 23(5): 27-28.
MO Jie. Major achievements of the Kola superdeep drilling[J]. Geology and Prospecting, 1987, 23(5): 27-28.

[36] 杨明清, 杨一鹏, 卞玮, 等. 俄罗斯超深井钻井进展及技术进步[J]. 石油钻采工艺, 2021, 43(1): 15-20.
YANG Mingqing, YANG Yipeng, BIAN Wei, et al. Drilling progress and technological improvement of ultradeep wells in Russia[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2021, 43(1): 15-20.

[37] 刘岩生, 张佳伟, 黄洪春. 中国深层—超深层钻完井关键技术及发展方向[J]. 石油学报, 2024, 45(1): 312-324.
LIU Yansheng, ZHANG Jiawei, HUANG Hongchun. Key technologies and development direction for deep and ultra-deep drilling and completion in China[J]. Acta Petrolei Sinica, 2024, 45(1): 312-324.

[38] 汪海阁, 黄洪春, 毕文欣, 等. 深井超深井油气钻井技术进展与展望[J]. 天然气工业, 2021, 41(8): 163-177.
WANG Haige, HUANG Hongchun, BI Wenxin, et al. Deep and ultra-deep oil/gas well drilling technologies: Progress and prospect[J]. Natural Gas Industry, 2021, 41(8): 163-177.

[39] 杨海军, 王平, 孙崇浩, 等. 深地塔科 1 井万米深层优质白云岩储层特征及成因分析[J]. 深地能源科技, 2025, 1(1): 49-60.
YANG Haijun, WANG Ping, SUN Chonghao, et al. Characteristics and genesis of high-quality dolomite reservoir in the Well Shendi Take 1 in ten thousand-meter deep formations[J]. Deep Earth Energy Science & Technology, 2025, 1(1): 49-60.

第一作者简介: 杨海军（1970-），男，河北卢龙人，博士，中国石油塔里木油田公司教授级高级工程师，主要从事石油地质综合研究及塔里木盆地油气勘探方面的工作。地址：新疆巴州库尔勒市石化大道 26 号，邮政编码：841000。E-mail: yanghjun-tlm@petrochina.com.cn

通讯作者简介：刘金龙（1988-），男，重庆忠县人，硕士，中国石油塔里木油田勘探事业部高级工程师，主要从事超（特）深钻完井方面研究工作。地址：新疆巴州库尔勒市石化大道 26 号，邮政编码：841000。E-mail: liujlong-tlm@petrochina.com.cn

收稿日期：2025-04-25 修回日期：2025-09-18

（编辑 唐俊伟）