

# 毫米波钻井技术

郭先敏

(中石化胜利石油工程有限公司钻井工艺研究院, 山东东营 257017)

**摘 要:** 为了给我国毫米波钻井技术的研发提供借鉴和思路, 研究了国外毫米波钻井技术的现状和成果。毫米波钻井技术是利用大功率回旋管毫米波发射机发射的毫米波电磁能强束熔化蒸发岩石, 高压空气或氮气携岩屑(实际是携纳米级粉末)进行钻井。毫米波技术可省去常规钻井更换钻头和下套管固井等工序, 因此可以缩短钻井周期。室内试验表明, 毫米波钻井的机械钻速与毫米波的功率、岩石的蒸发比能及吸收功率密度密切相关。毫米波钻井技术为提高钻井速度、降低钻井成本提供了一种可行的新思路和新方法。

**关键词:** 毫米波钻井 机械钻速 破岩机理 实验室试验

**中图分类号:** TE249 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-0890(2014)03-0055-06

## Millimeter Wave Drilling Technology

Guo Xianmin

(Drilling Technology Research Institute, Sinopec Shengli Oilfield Service Corporation, Dongying, Shandong, 257017, China)

**Abstract:** This paper introduces the millimeter wave drilling technique abroad, which uses the high-power gyrotron transmitter to emit intensive beam of millimeter-wave electromagnetic energy for melting or vaporizing rocks, and uses high pressure air or nitrogen for carrying cuttings (micron-sized powder actually), including the principle of drilling, theoretical research status and achievements and conclusion obtained by laboratory experiment. It can shorten the drilling time by eliminating the process of changing bit and running casing and cementing as conventional drilling method. The laboratory experiment shows that ROP of millimeter wave drilling is related to the millimeter wave power, specific energy for rock vaporization and absorption power density. Millimeter wave drilling technology will be a novel idea and method for improving drilling rate and reducing cost.

**Key words:** millimeter wave drilling; rate of penetration; rock breaking mechanism; laboratory experiment

目前, 深井、超深井钻井存在机械钻速慢等诸多技术难点, 钻井成本很高。复杂地质条件对钻井技术提出了“优、快、省、HSE”的要求, 促使钻井技术不断革新。自 20 世纪 60 年代激光技术兴起以来, 国内外专家学者对激光钻井进行了 50 多年的研究, 虽然理论研究证实激光钻井可显著提高机械钻速, 降低钻井成本, 但至今仍未见到穿透深度超过 1 m 的文献报告, 更没有在现场进行应用<sup>[1-10]</sup>。激光钻井未能取得重大进展, 有基础物理学和工艺方面的原因。美国麻省理工学院的 Paul Woskov 于 2008

年提出了可克服激光波谱范围局限性的毫米波钻井技术<sup>[11]</sup>。应用该技术可省去常规钻井更换钻头、清除岩屑和下套管固井等施工工序, 可显著提高机械

**收稿日期:** 2013-12-17; **改回日期:** 2014-03-14。

**作者简介:** 郭先敏(1972—), 男, 黑龙江通河人, 1995 年毕业于大庆石油学院石油工程专业, 2009 年获中国石油大学(北京)油气井工程专业硕士学位, 工程师, 主要从事科技情报工作。

**联系方式:** 13505466036, guaom-gxm@163.com。

**基金项目:** 中国石油化工股份有限公司前瞻项目“非油气领域科技成果的启示作用调研”(编号: P12094)部分内容。

钻速,适合等井径井眼钻井施工。该技术目前虽处于研发阶段,却是为降低深层高温岩体地热能源、石油和天然气勘探开发成本而研发的。为了给我国毫米波钻井技术的研发提供借鉴和研究思路,笔者对国外毫米波钻井技术进行了介绍。

## 1 毫米波钻井技术原理

毫米波是指波长为 1~10 mm,工作频率为 30~300 GHz 的电磁波。它位于微波与远红外波相交叠的波长范围,因而兼有 2 种波谱的特点。毫米波的理论和应用分别是微波向高频的延伸和光波向低频的发展。近十几年来,毫米波的应用范围迅速扩大,大功率毫米波回旋管发射机是毫米波得以应用的载体。在国际聚变能发展计划实施过程中,已研制成功发射频率 110~170 GHz、功率 1 MW 的毫米波回旋管发射机,其功率转换效率超过 50%。另外,发射频率 200~300 GHz、功率 1 MW 短脉冲毫米波回旋管发射机也已经研制成功<sup>[12~14]</sup>。

毫米波钻井技术是利用大功率毫米波回旋管发射机发射的毫米波电磁能强束熔化、蒸发岩石而进行钻进,钻井过程如图 1 所示。将圆形金属波导管下入井眼一定深度,使金属波导管前缘与井底间隔一定的距离,不仅可保证毫米波强束具有一定的发

散度,能够充满整个井眼,而且可保持金属波导管前缘温度足够低,延长金属波导管的使用寿命。位于地面的毫米波回旋管发射机发射的毫米波强束通过金属圆形波导管传输至波导管前缘,经井眼(直径 10~30 cm 的井眼可作为传输毫米波的介质,与长波光导纤维相似,但会出现能量损失)传输至井底,通过金属圆形波导管向井眼内注入压缩空气,控制井眼内的压力。在毫米波强束的作用下,井底岩石表面温度快速升高,当温度超过 3 000 °C 时岩石开始熔化和蒸发,热熔体前沿快速前进,使井眼得以加深,产生的饱和岩石蒸汽形成纳米颗粒烟雾,使井眼内的压力增大,一部分岩石蒸汽随着气流通过金属圆形波导管和井眼之间的环形空间运移至地面,另一部分在压力推动下进入地层微裂缝,冷却后在井壁上形成厚的、坚固的玻璃/陶瓷层。当毫米波在介质传输中能量损失过大造成机械钻速快速降低时,加深金属波导管的下入深度、恢复金属波导管前缘与井底之间的间隔距离,重复上述过程,即形成高效、控制状态下的钻井过程<sup>[11,15]</sup>。

## 2 岩石蒸发理论

### 2.1 热力学基础

毫米波蒸发岩石消耗的总能量  $H$  可以表示为 4 个阶段所需能量的总和<sup>[16]</sup>:第 1 阶段,岩石加热至熔点所需要的能量;第 2 阶段,岩石从固体变为熔化状态所需要的熔化潜热;第 3 阶段,岩石从熔化状态至蒸发温度所需要的能量;第 4 阶段,岩石从熔化状态变为蒸汽所需要的汽化潜热。用公式表示为:

$$H = c_s(t_m - t_i) + H_f + c_m(t_v - t_m) + H_v \quad (1)$$

式中: $c_s$  为固体岩石的平均热容, J/(g·°C);  $c_m$  为熔化岩石的平均热容, J/(g·°C);  $t_i$  为岩石的初始温度, °C;  $t_m$  为岩石的熔化温度, °C;  $t_v$  为岩石的蒸发温度, °C;  $H_f$  为熔化潜热, J/g;  $H_v$  为汽化潜热, J/g。

式(1)只是一个简化的表达式,忽略了岩石从固相转变为熔化相的中间相变以及温度对热容的依赖关系。热容取平均值即可预测所需的能量。表 1 和表 2 是利用大气科学团体关于陨石熔化变为纳米颗粒烟雾进入大气的试验数据,并结合特鲁顿法则预测得到的岩石熔化和蒸发所需的能量<sup>[16]</sup>。

从表 1 和表 2 可以看出,岩石蒸发所需要的能量是岩石熔化所需能量的 4~5 倍,这与激光系统下测量的结果基本相符,这是因为红外线能通常受到

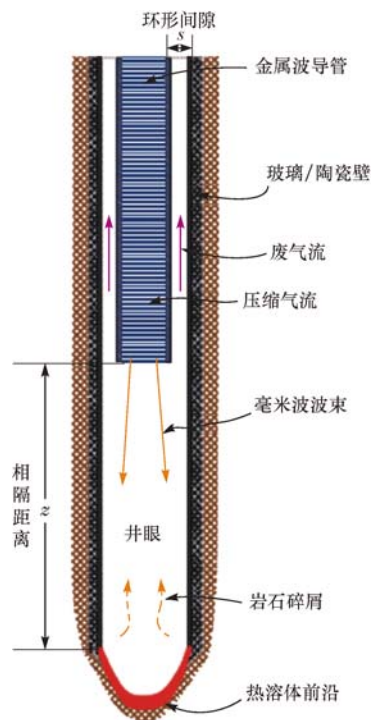


图 1 毫米波钻井过程示意

Fig. 1 Process of millimeter wave drilling

表 1 岩石熔化所需的能量  
Table 1 Estimated energy for melting rocks

岩石	密度/(g·cm <sup>-3</sup> )	岩石熔化平均热容/(J·g <sup>-1</sup> ·℃ <sup>-1</sup> )	熔化温度/℃	熔化潜热/(J·g <sup>-1</sup> )	熔化比能/(kJ·cm <sup>-3</sup> )
花岗岩	2.7	1.05	1 215~1 260	335	4.3~4.4
玄武岩	2.8	1.05	984~1 260	419	4.0~4.8
砂岩	2.2	1.04	1 650	335	4.5
石灰岩	2.6	1.04	2 600	498	11.0

表 2 岩石蒸发所需的能量  
Table 2 Estimated energy for vaporizing rocks

岩石	质量/g	岩石熔化平均热容/(J·g <sup>-1</sup> ·℃ <sup>-1</sup> )	蒸发温度/℃	汽化潜热/(J·g <sup>-1</sup> )	蒸发比能/(kJ·cm <sup>-3</sup> )
花岗岩	69	1.57	2 960~3 230	4.8~5.3	25.7~28.4
玄武岩	70	1.65	2 960~3 230	3.9~4.2	24.7~27.5
砂岩	62	1.51	2 800~3 010	4.3~4.5	18.7~19.9
石灰岩	51	1.61	3 360~3 620	6.0~6.5	30.9~33.4

羽烟的阻碍,只有在极少的情况下或在脉冲开始时与才能岩石表面较好地耦合。毫米波辐射可以克服这一局限性,因为对于细小颗粒来说,瑞利散射能力与波长的 4 次方成反比,也就是说,散射损失随毫米波波波长增长而降低<sup>[17-18]</sup>。另外,岩石蒸发得到的颗粒更小,达到纳米级,而较低能量的激光钻井所得到的颗粒尺寸仅为微米级。

2.2 机械钻速和井眼直径理论预测

可用机械钻速和井眼直径这 2 个参数评价毫米波钻井技术。美国麻省理工学院的 Paul Woskov 等人对此进行了预测<sup>[16]</sup>。

由于毫米波钻井是利用毫米波辐射熔化、蒸发岩石而钻进,因此,其机械钻速即为毫米波辐射下岩石蒸发的速度,因而与岩石的蒸发比能、吸收功率密度密切相关。在岩石吸收功率密度给定的情况下,利用岩石蒸发比能可确定毫米波钻井的机械钻速,其表达式为:

$$v_p = \frac{P_D}{e_v} \tag{2}$$

式中:  $v_p$  为机械钻速, cm/s;  $P_D$  为功率密度, kW/cm<sup>2</sup>;  $e_v$  为蒸发比能, kJ/cm<sup>3</sup>。

根据式(2)计算得到岩石蒸发比能分别为 10, 20 和 40 kJ/cm<sup>3</sup> 时的功率密度与机械钻速关系曲线(见图 2)。对于具有代表性的蒸发比能为 26 kJ/cm<sup>3</sup> 的花岗岩和玄武岩,其吸收功率密度为 1~50 kW/cm<sup>2</sup>, 毫米波钻井机械钻速为 1.4~70.0 m/h。为了避免产生等离子体,建议功率密度不要太高。因为等离子体会使能量多向流动,而不是定向流动,使机械钻速降低。在不产生等离子体的情况下,岩石的熔化

和蒸发可利用更多的稠密能量,减少岩石表面的直接能量耦合,同时使热熔体前沿成为一个锥形模腔,有助于提高热熔体前沿对稠密毫米波强束的吸收效率,从而提高机械钻速。短脉冲回旋管毫米波束空气击穿试验证实,在大气环境下,功率密度超过 1 MW/cm<sup>2</sup> 才会发生击穿。虽然击穿阈值随着作业连续进行会有所降低,但在深井较高的压力环境下会增大。

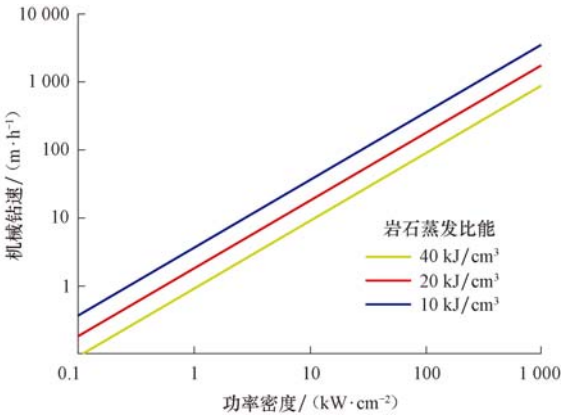


图 2 不同岩石蒸发比能下功率密度与机械钻速的关系  
Fig. 2 Relationship between power density and penetration rate at different specific energies of rock vaporization

在毫米波回旋管发射机输出功率  $P$  一定的情况下,可估算出井眼的直径  $D$ 。功率密度与井眼直径的关系式为:

$$D = 2 \sqrt{\frac{P}{\pi P_D}} \tag{3}$$

图 3 为根据式(3)计算得到的不同功率下功率密度与井眼直径的关系曲线。由图 2 和图 3 可以看出:毫米波钻井的机械钻速和所钻出井眼的直径与



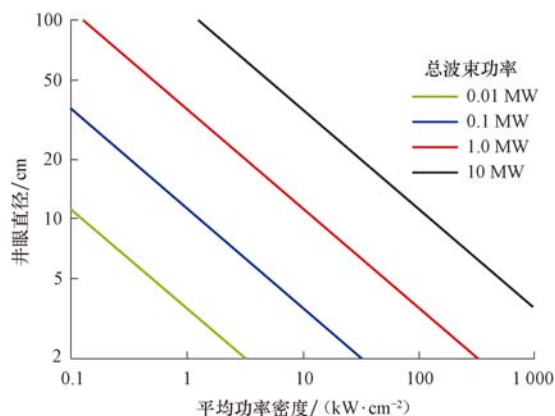


图3 不同功率下功率密度与井眼直径的关系

Fig. 3 Relationship between power density and wellbore diameter at different millimeter wave powers

毫米波回旋管发射机输出的功率有直接的关系,输出功率越大,机械钻速和井眼直径也就越大。

### 3 岩石蒸发试验研究

2011年10月,Paul Woskov和Phil Michael等人首次采用辐射线热分析方法进行了毫米波熔化和蒸发岩石的实时动态热力学试验<sup>[19-20]</sup>,岩样为美国马萨诸塞州东部采集的质地坚硬的浅灰色花岗岩。

毫米波蒸发花岗岩岩样试验的设备主要有10 kW、28 GHz CPI Model VIA-301 HeatWave二次谐波回旋管,水负荷试验箱,130 GHz外差式辐射计,一对完全相同的肖特基二极管检波器,定向耦合器,TE02-TE01模式转换器,Agilent Model E83632B网络分析仪及其他组件。试验箱为带有不锈钢盖的 $\phi 32$  cm不锈钢杜瓦瓶,其内部高度

为76 cm。内径32 mm的铜波导管穿过不锈钢盖中心进入试验箱。花岗岩岩样放在陶瓷坩埚或铝支架上。 $\phi 13$  mm特氟隆管(水在其中流动)螺旋排列在试验箱的内壁上,用来吸收捕获的能量,监测水的流量和温度的上升值,以确定吸收功率的大小。从试验箱上面铜波导管内的屏蔽窗进入的压缩空气可防止挥发物向铜波导管内传播。130 GHz外差式辐射计包括次谐波混频器和65 GHz本机振荡器,可实时测量岩石表面的温度变化。2个肖特基二极管检波器可分别测量正向功率和反射功率。定向耦合器在TE02工作模式下可对毫米波信号按照一定的功率比例进行分配。Agilent Model E83632B网络分析仪可测量室温下岩石对28 GHz毫米波的折射指数和吸收系数。

#### 3.1 岩石蒸发试验结果

共进行了4块花岗岩岩样蒸发试验,其中1#和2#岩样经毫米波辐射后的情况如图4所示。1#岩样共进行了2次毫米波辐射:第1次入射功率4 kW,时间3.6 min;第2次入射功率6 kW,时间3.3 min。从图4可以看出:1#岩样上直径15.5 mm的虚线圆是TE01模式下峰值功率辐射轮廓的大体位置;不规则黑色区域表明玻璃熔体已经流到辐射范围之外,并存在许多辐射过程中岩石蒸汽散逸形成的坑,最大的直径可达5 mm;熔化区域周围的未熔化区域颜色较浅,后来证实该区域的岩石很脆,容易破碎;在熔化区域周围存在发丝状裂缝,沿着岩样的侧边向下延伸约4 mm。1#岩样的质量损失为1.2 g,仅为初始质量的0.07%,研究认为是脱气而不是岩石蒸发所致。

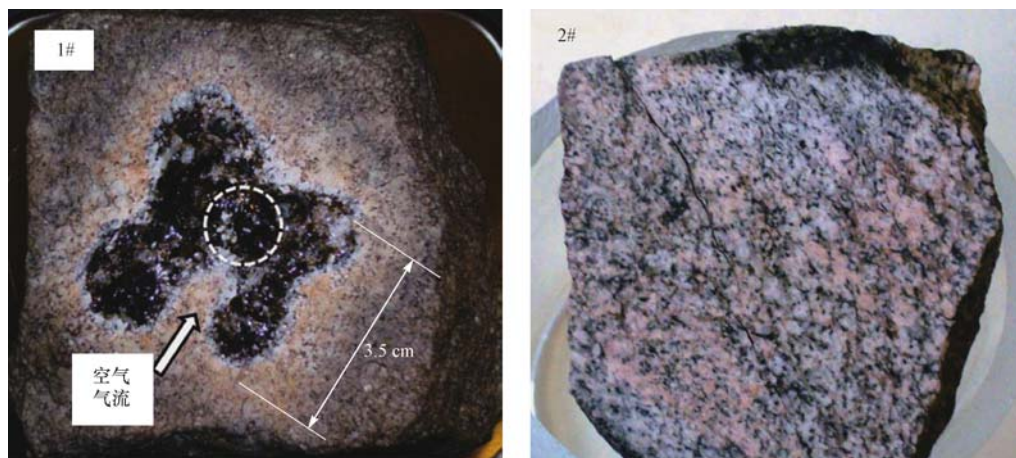


图4 毫米波辐射后的岩样

Fig. 4 Rock samples after millimeter wave radiation

2# 岩样辐射时间为 9 min, 入射功率从 1.2 kW 缓慢增至 3.9 kW, 辐射后也出现了黑色玻璃熔体区域。将岩样沿着黑色区域中心对半切开(见图 4), 岩石的熔化深度清晰可见, 黑色熔体延伸的最大深度为 9 mm, 颜色较浅区域延伸深度大约 30 mm, 而且辐射引起岩石破裂, 从岩样左上角开始沿着对角线向右下延伸。虽然在室温下, 辐射使岩石有一定的熔深, 但高于熔点以上的吸收主要还是发生在岩石表面。2# 岩样的质量损失为 3.2 g, 为初始质量的 0.24%, 假设脱气质量与 1# 岩样相等, 那么其余 2 g 就是蒸发所致。

辐射过程中对温度、正向功率和水吸收功率进行了实时测量, 计算分析得到花岗岩熔体的辐射系数为  $0.66 \pm 0.03$ , 而在 76 s 蒸发周期(温度  $2\,710 \pm 120\,^{\circ}\text{C}$ )内, 辐射系数增至  $0.70 \pm 0.03$ 。

### 3.2 功率平衡分析

在 76 s 稳定蒸发周期内, 认为正向功率与所有功率的损耗相等, 由此可确定岩石的蒸发比能。功率平衡方程为:

$$P_{\text{vap}} = \epsilon P_f - P_{\text{rad}} - P_{\text{cond}} - P_{\text{conv}} \quad (4)$$

$$P_{\text{vap}} = \frac{e_V V}{t} \quad (5)$$

$$P_{\text{rad}} = \epsilon_{\text{ir}} \sigma A (T_h^4 - T_c^4) \quad (6)$$

$$P_{\text{conv}} = h A (T_h - T_c) \quad (7)$$

式中:  $P_{\text{vap}}$  为岩石蒸发消耗的功率, kW;  $P_f$  为回旋管毫米波发射器的正向功率, kW;  $P_{\text{rad}}$ ,  $P_{\text{cond}}$  和  $P_{\text{conv}}$  分别为辐射、传导和对流功率损耗, kW;  $\epsilon$  为毫米波辐射系数;  $V$  为岩石蒸发的体积,  $\text{cm}^3$ ;  $t$  为岩石蒸发时间, s;  $\epsilon_{\text{ir}}$  为热辐射波长最大时的红外辐射系数;  $\sigma$  为斯蒂芬-玻尔兹曼常数,  $\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$ ;  $A$  为蒸发面积,  $\text{cm}^2$ ;  $T_h$  为蒸发温度, K;  $T_c$  为环境温度, K;  $h$  为对流换热系数,  $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 。

计算可知岩石蒸发消耗的功率和辐射功率损耗之间的差为 1.91 kW, 而这不可能实现, 除非在温度为  $2\,710\,^{\circ}\text{C}$  时花岗岩熔体的红外辐射系数低于 0.5。不同玻璃熔体的红外辐射系数有极大差别, 玄武岩熔体的红外辐射系数为 0.2~0.5。假设花岗岩熔体的红外辐射系数为 0.2~0.5, 那么蒸发比能为  $10 \sim 100 \text{ kJ}/\text{cm}^3$ , 因此不能通过功率平衡分析获得精确的岩石蒸发比能, 除非辐射功率损耗是已知量, 或需要测量明显高于蒸发临界值的入射波束强度情况下的质量损失。但目前的试验和分析足以证明, 毫米波比红外波更容易被高温熔化的岩石吸收。

### 3.3 钻进性能评价

通过测得的热力学参数可对毫米波钻井的钻进效果进行评价。在毫米波耦合效率为 0.7、红外辐射系数为 0.5、岩石蒸发比能分别为 25 和  $45 \text{ kJ}/\text{cm}^3$  条件下, 得到毫米波钻井机械钻速和功率密度的关系曲线(见图 5)。功率密度为  $1 \sim 100 \text{ kW}/\text{cm}^2$  时不仅可确保足够的辐射热量, 还可避免发生等离子击穿, 从而提高机械钻速。从图 5 可以看出, 当岩石蒸发比能为  $25 \text{ kJ}/\text{cm}^3$ 、功率密度为  $100 \text{ kW}/\text{cm}^2$  时, 机械钻速可达  $100 \text{ m}/\text{h}$ , 这几乎是采用常规钻井技术钻地热井机械钻速的 100 倍, 而在毫米波功率转换效率超过 50% 的情况下, 回旋管毫米波发射机发射功率为 2 MW 的毫米波可以在岩石功率密度为  $1 \text{ kW}/\text{cm}^2$  的地层钻出直径 25 cm 的井眼。

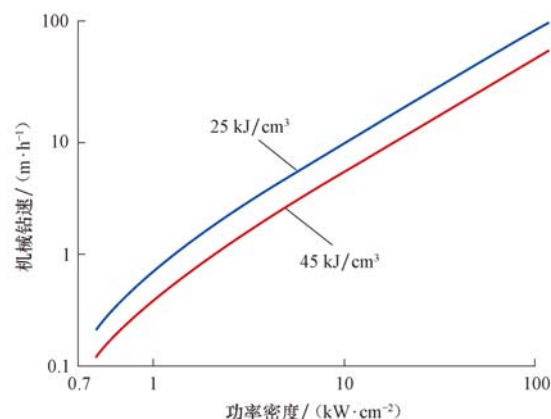


图 5 毫米波定向能钻井机械钻速与功率密度之间的关系

Fig. 5 Relationship between ROP and power density for millimeter wave drilling with directed energy

## 4 结论与建议

1) 毫米波钻井技术利用毫米波电磁能强束结合高压熔化、蒸发岩石并对产生的纳米级岩石颗粒烟雾进行清除, 以实现井眼连续钻进。与激光钻井技术相比, 极低的散射损失使毫米波波束可有效通过微米级和亚微米级颗粒而不会受到干扰, 因此可提供更高的能量, 钻进效率更高, 机械钻速可以进一步提高。

2) 进一步进行 10 kW 和更高功率毫米波辐射蒸发岩石的试验, 对比分析不同的入射功率、蒸发效率和毫米波钻井的钻进性能及经济性的关系, 并对纳米级颗粒烟雾冷却后形成的玻璃/陶瓷状物质进行强度、密封能力及其他特性测试。

3) 研发小尺寸毫米波钻井系统并进行浅层测试,为全尺寸毫米波钻井系统的研发及现场应用奠定基础。

4) 建议进行毫米波辅助破岩的可行性研究,为深井、超深井钻井提速、提效提供更为有效的技术手段。

### 参 考 文 献

#### References

- [1] Maurer W C. Novel drilling techniques[M]. London: Pergamon Press, 1968: 87-91.
- [2] Maurer W C. Advanced drilling techniques[M]. Tulsa: Petroleum Publishing Company, 1980: 17.
- [3] Moavenzadeh F, Ma Garry F J, Williamson R B. Use of laser and surface active agents for excavation in hard rocks[R]. SPE 2240, 1968.
- [4] Graves R M, O'Brien D G. StarWars laser technology applied to drilling and completing gas wells[R]. SPE 49259, 1998.
- [5] Sinha P, Gour A. Laser drilling research and application: an update[R]. SPE 102017, 2006.
- [6] 窦宏恩. 21 世纪的激光钻井技术[J]. 石油科技论坛, 2004(2): 59-62.  
Dou Hong'en. Laser drilling technology in the 21st century [J]. Oil Forum, 2004(2): 59-62.
- [7] Graves R M, Araya Anibal, Gahan B C, et al. Comparison of specific energy between drilling with high power lasers and other drilling methods[R]. SPE 77627, 2002.
- [8] Parker R A, Gahan B C, Graves R M, et al. Laser drilling: effects of beam application methods on improving rock removal[R]. SPE 84353, 2003.
- [9] Batarseh S, Gahan B C, Graves R M, et al. Well perforation using high power-lasers[R]. SPE 84418, 2003.
- [10] 高德利. 钻井科技发展的历史回顾现状分析与建议[J]. 石油科技论坛, 2004(2): 29-39.  
Gao Deli. Historical review situation analysis and recommendations of drilling technology development[J]. Oil Forum, 2004(2): 29-39.
- [11] Woskov P, Cohn D. Millimeter-wave drilling and fracturing system: US, 20100252324-A1[P]. 2010-10-7.
- [12] Sakamoto K, Kasugai A, Takahashi K, et al. Achievement of robust high-efficiency 1 MW oscillation in the hard-self excited region by a 170 GHz continuous-wave gyrotron[J]. Nature Physics, 2007, 3(4): 411-414.
- [13] Choi E M, Marchewka C D, Mastovsky I, et al. Experimental results for a 1.5 MW, 110 GHz gyrotron oscillator with reduced mode competition[J]. Physics of Plasma, 2006, 13(2): 1-7.
- [14] Grimm T L, Kreischer K E, Temkin R J. Experimental Study of a megawatt 200-300 GHz gyrotron oscillator[J]. Physics of Fluids B, 1993, 5(4): 4135-4143.
- [15] Woskov P, Cohn D. Drilling and fracturing with millimeter-wave directed energy[EB/OL]. [2013-10-15]. [http://www.researchgate.net/publication/232262554\\_White\\_Paper\\_Drilling\\_and\\_Fracturing\\_with\\_Millimeter-Wave\\_Directed\\_Energy](http://www.researchgate.net/publication/232262554_White_Paper_Drilling_and_Fracturing_with_Millimeter-Wave_Directed_Energy).
- [16] Woskov P, Cohn D. Annual report 2009 millimeter wave deep drilling for geothermal energy, natural gas and oil [EB/OL]. [2013-10-15]. [http://www.psfc.mit.edu/library/catalog/reports/2000/09rr/09rr011/09rr011\\_full.pdf](http://www.psfc.mit.edu/library/catalog/reports/2000/09rr/09rr011/09rr011_full.pdf)
- [17] Whitlock R D, Frick G M. Particle size distributions of aerosols formed by laser ablation of solids at 760 Torr[J]. Journal of Materials Research, 1994, 9(11): 2868-2872.
- [18] Hunten D M, Turco R P, Toon O B. Smoke and dust particles of meteoric origin in the mesosphere and stratosphere[J]. Journal of the Atmospheric Science, 1980, 37(6): 1342-1357.
- [19] Nancy W S. Reaching underground resources vaporize the rock-no drilling required[EB/OL]. [2013-10-14]. [http://www.psfc.mit.edu/news/pdf/Woskov%20-%20Energy\\_Futures\\_Spring\\_2012.pdf](http://www.psfc.mit.edu/news/pdf/Woskov%20-%20Energy_Futures_Spring_2012.pdf).
- [20] Woskov P, Michael P. Millimeter-wave heating, radiometry, and calorimetry of granite rock to vaporization[J]. Journal of Infrared Millimeter and Terahertz Waves, 2012, 33(1): 82-95.

[编辑 刘文臣]