◀油气田开发工程▶

稠油井下大功率加热电缆结构对传热行为影响*

张 斌[1,2] 董亮亮[3] 宋红兵[1,2] 祝效华[3] 周 超[1,2] 冯海洋[3] 张锦刚[1,2]
（1. 中油国家石油天然气管材工程技术研究中心有限公司 2. 中国石油集团宝石管业有限公司
3. 西南石油大学机电工程学院）

张斌，董亮亮，宋红兵，等. 稠油井下大功率加热电缆结构对传热行为影响［J］. 石油机械，2025，53（10）：123-131.

Zhang Bin，Dong Liangliang，Song Hongbing，et al. Influence of high-power heating cable structure on heat transfer behavior in heavy oil wells［J］. China Petroleum Machinery，2025，53（10）：123-131.

摘要：蒸汽辅助重力泄油（steam assisted gravity drainage，SAGD）是开发稠油油藏最有效的技术之一，井下大功率电加热技术是提高SAGD工艺技术能效的重要技术手段。为研究井下大功率加热电缆结构对传热行为的影响，基于计算流体动力学和传热学理论，建立了SAGD注采工艺井筒蒸汽循环电加热数值模型，开展了6种结构的加热电缆在不同注汽量、功率下的传热行为研究。研究结果表明：在传热过程中，随着注汽量的增加，蒸汽和电缆芯线的平均温度降低；而随着加热功率的增加，平均温度升高；对于三芯单护套、三芯双护套、单护套集成和双护套集成这4种电缆，其芯线与护套之间的平均温差为16.7 ℃，其中三芯单护套传热效果最好；而双护套空气式和单护套空气式电缆由于内部空气的低热导率限制了芯线向外界的传热，导致芯线与护套的平均温差分别达803和763 ℃，氧化镁作为传热介质更合适。研究结果可为稠油井下大功率加热电缆的结构选型提供理论依据。

关键词：稠油油藏；蒸汽辅助重力泄动；大功率电加热；加热电缆；数值模拟；温度场
中图分类号：TE345 **文献标识码：**A DOI：10.12473/CPM.202408082

Influence of High-Power Heating Cable Structure on Heat Transfer Behavior in Heavy Oil Wells

Zhang Bin[1,2] Dong Liangliang[3] Song Hongbing[1,2] Zhu Xiaohua[3] Zhou Chao[1,2] Feng Haiyang[3] Zhang Jingang[1,2]
（1. *Chinese National Engineering Research Center for Petroleum and Natural Gas Tubular Goods Co.，Ltd.*；2. *CNPC Baoji Petroleum Pipe Industry Co.，Ltd.*；3. *School of Mechanical Engineering，Southwest Petroleum University*）

Abstract：Steam assisted gravity drainage（SAGD）is one of the most effective technologies for developing heavy oil reservoirs，and downhole high-power electric heating technology is an important technical means to improve the energy efficiency of SAGD. To investigate the influence of downhole high-power heating cable structure on heat transfer behavior，a numerical model of SAGD injection-production process wellbore steam circulation electric heating was established based on computational fluid dynamics and heat transfer theory. Heat transfer behaviors of six types of heating cables were studied under different steam injection rates and power ratings. The study results show that during the heat transfer process，as the steam injection rate increases，the average temperature of the steam and cable core decreases，while as the heating power increases，the average temperature increases. For three-core single-sheathed，three-core double-sheathed，single-sheath integrated and double-

* 基金项目：中国石油天然气集团有限公司前瞻性基础性技术攻关项目“井下大功率电加热器研制”（2022DJ1409）。

sheath integrated cables, the average temperature difference between the core wire and the sheath is 16.7 ℃, and the three-core single-sheathed cable has the best heat transfer effect. However, due to the low thermal conductivity of the internal air, the double-sheathed and single-sheathed air type cables restrict the heat transfer from the core wire to the outside, resulting in the average temperature difference between the core wire and the sheath reaching 803 and 763 ℃ respectively. Therefore, magnesium oxide is more suitable as a heat transfer medium. The study results provide a theoretical basis for the structural selection of high-power heating cables in heavy oil wells.

Keywords: heavy oil reservoir; SAGD; high-power electric heating; heating cable; numerical simulation; temperature field

0 引 言

在世界上已发现的原油资源中，稠油储量占比超过⅔，我国的稠油和超稠油储量远超常规原油的储量。据统计，我国稠油油藏地质储量高达 15 500×10^8 t，具有极大的开发价值[1-3]。热采技术是开采稠油的主要手段，目前蒸汽辅助重力泄油（steam assisted gravity drainage，SAGD）技术是国内外应用最广泛的热采技术之一，相比传统热采技术能更好地提高原油采收率[4-6]。SAGD 技术的核心是向地层注入高温蒸汽降低稠油的黏度来提高采收率[7-11]。但由于高温蒸汽在过长的水平井中散热量较大，温度降低过快，导致水平段动用程度低，蒸汽腔温度不均匀。因此，对注汽管内的蒸汽进行持续加热以保持蒸汽的温度和质量就显得尤为重要。

国内外针对稠油电加热技术以及加热电缆的传热规律和结构影响展开了诸多研究。A. SADEGHI 等[12-13]对比研究了电加热器和电磁波加热技术，电加热器加热方式具有更高的加热效率，而电磁波加热较电加热器具有更短的加热周期和更大的加热范围。ZHANG J. P. 等[14]发现针对水平井不同生产阶段分别对蒸汽采用不同的加热形式会更加有效地提高采收率。WANG Z. 等[15]设计了一种双层壳体的新型电加热器，其传热损失相比单层壳体电加热器降低了 87.2%。H. HASSANZADE 等[16-17]通过向地层中补充适量水或溶剂，发现电加热器的传热效率大幅提高，同时也减轻了电加热器因温度过高而烧毁的情况。ZHU M. 等[18-19]发现电缆加热效率受地层含水体积分数的影响较大，含水体积分数越高，其加热效率越低。周洪亮[20]针对稠油井油管电加热功率进行了优化。HAO Y. 等[21]研究了电加热器材料属性对电加热器温度分布的影响，发现加热器的功率、密度和热容对温度分布影响显著，而导热系数的影响较小。薛继军等[22]对空心杆电加热系统加热效果影响因素进行了研究，得出了电流频率、空心杆壁厚以及电缆偏置对加热效果的影响规律。

尽管如此，稠油井下大功率加热电缆在实际中的应用仍然较少。新疆风城油田是我国第一个采用井下大功率电加热 SAGD 预热技术开采的井组。试验结果表明，该技术热效率提高了 20%，蒸汽使用量减少了 90%。同时研究指出，水平段井间夹层范围为 150 m 时，电加热功率最佳为 1 500 W/m[23]。稠油井下大功率加热电缆作为井下加热技术的核心，需要具备快速加热能力，这对电缆的结构和传热能力提出了要求，在确保加热效率的同时便于生产和操作。笔者基于计算流体动力学和传热学理论，建立了 SAGD 注采工艺井筒蒸汽循环电加热数值模型，系统揭示了 6 种结构的加热电缆的发热规律及传热行为，并明确了注汽量、加热功率、结构和导热介质对加热效果的影响。研究结果可为稠油井下大功率加热电缆的结构选型提供理论依据。

1 井下大功率加热电缆加热原理

井下大功率加热电缆的工作原理是通过电缆内的芯线产生热量，依赖于芯线的阻抗特性，电流通过芯线时会转换成热能，通过热传导传递到电缆的外护套。一旦热量到达外护套，它将继续通过蒸汽的对流作用向外传递。在井下环境中，蒸汽的流动由压力差驱动，它使得热量能够在蒸汽中传播，从而加热周围的介质。蒸汽与注汽管和井筒间的传热方式为热传导和热对流[24-25]。在热传导过程中，热量通过蒸汽与注汽管管壁和井筒壁的直接接触传递。而在热对流过程中，蒸汽的流动带动了热量的传递，尤其是在蒸汽与井筒壁面接触时，热量通过流体的微观运动从高温区域向低温区域传递。井筒蒸汽循环电加热结构示

意图如图 1 所示。

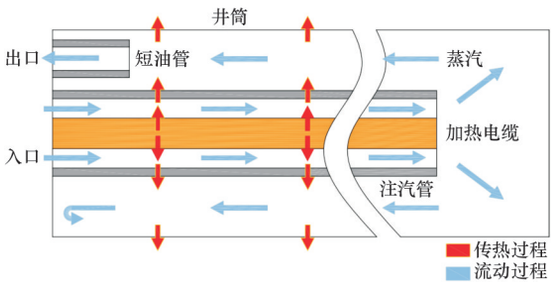


图 1　井筒蒸汽循环电加热结构示意图

Fig. 1　Schematic diagram of wellbore steam circulation electric heating structure

1.1　传热计算控制方程

1.1.1　热传导

当 2 个不同温度的物体相互接触或同一物体内部存在温度差时，依靠物体内部的分子、原子等微观粒子的热运动产生的能量传递现象称为热传导[26]。因此加热电缆内部以及油管内部的传热形式即为热传导，其表达式为：

$$q = -\lambda \frac{\mathrm{d}T}{\mathrm{d}x} \tag{1}$$

式中：q 为热流密度，W/m²；λ 为导热系数，W/（m·K）；T 为流体温度，K；x 为流体微元长度，m。

1.1.2　热对流

流体的不同部分之间发生相互混合并引起热量传递现象称为热对流。因此加热电缆与蒸汽以及蒸汽与油管、井筒间的传热形式即为热对流，其表达式为：

$$Q = hA(T - T_{\mathrm{m}}) \tag{2}$$

式中：Q 为流体温度从 T 上升到 T_{m} 所需的总热量，W；h 为对流传热系数，W/（m²·K）；A 为传热面积，m²；T_{m} 为周围介质的温度，K。

1.2　流场控制方程

不考虑油管环空和井筒内蒸汽的质量损失，蒸汽的流动为稳态流动，即蒸汽在油管环空和井筒内的流动过程及传热过程遵守质量守恒、动量守恒和能量守恒方程[27-28]。

1.2.1　质量守恒方程

蒸汽在油管和井筒中流动、加热过程中质量流量不随着位置变化而变化，遵循质量守恒定律。质量守恒方程为：

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial (\rho \boldsymbol{u})}{\partial x} + \frac{\partial (\rho \boldsymbol{v})}{\partial y} + \frac{\partial (\rho \boldsymbol{w})}{\partial z} = 0 \tag{3}$$

式中：ρ 为蒸汽平均密度，kg/m³；t 为流动时间，s；$\boldsymbol{u}$、$\boldsymbol{v}$ 和 $\boldsymbol{w}$ 分别为流体在 x、y 和 z 方向上的速度分量，m/s。

1.2.2　动量守恒方程

蒸汽在油管和井筒中的流动过程遵循动量守恒定律。动量守恒方程为：

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \boldsymbol{V}) + \nabla \cdot (\rho \boldsymbol{V}\boldsymbol{V}) = -\nabla p + \nabla \cdot [\mu(\nabla V + \nabla V^{\mathrm{T}})] + \rho \boldsymbol{g} + \boldsymbol{F} \tag{4}$$

式中：$\boldsymbol{V}$ 为蒸汽速度矢量，m/s；Δp 为静压，Pa；μ 为分子黏度，Pa·s；$\boldsymbol{g}$ 为重力加速度，m/s²；$\boldsymbol{F}$ 为作用于流体微元的体积力，N/m³。

1.2.3　能量守恒方程

蒸汽在油管和井筒中的加热、井筒的换热量及加热电缆产生的热量遵循能量守恒定律。能量守恒方程为：

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho E) + \nabla \cdot \left[\boldsymbol{V}(\rho E + p)\right] = \nabla \cdot (k_{\mathrm{eff}} \nabla T) + S_{\mathrm{h}} \tag{5}$$

式中：E 为能源单位质量释放的能量，J/kg；k_{eff} 为有效导热系数，W/（m·K）；S_{h} 为能量方程源相，W/m³。

2　井筒蒸汽循环电加热数值计算模型

以新疆油田目前 SAGD 工艺工况为例，利用普通水平井注蒸汽井筒结构参数，建立 SAGD 注采工艺井筒蒸汽循环电加热数值计算模型，如图 2 所示。计算采用的管柱结构参数为：水平段长度 400 m，井筒外径 244.5 mm；并在井筒内设置长 380 m 的注汽管和加热电缆，注汽管外径为 101.6 mm，加热电缆采用外径为 25.4 mm 的连续管封装；另设有短油管作为蒸汽出口，外径为 73 mm。

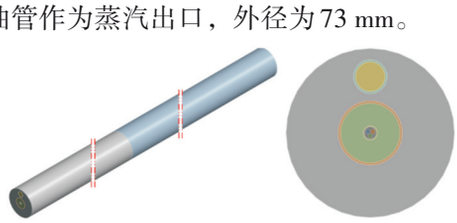


图 2　井筒蒸汽循环电加热模型及径向视图

Fig. 2　Wellbore steam circulation electric heating model and radial view

2.1　电加热模型建立及网格划分

将图 2 井筒蒸汽循环电加热模型进行网格划分，采用全局六面体扫掠法的结构化网格，并对中心加热电缆剖面进行网格加密处理，如图 3 所示。再对全局网格进行了无关性验证，结果如表 1 所示。

从表 1 的数据可以得出，模型网格沿轴向方向被均匀分成 N 段，并且随着段数增多，出口温度降

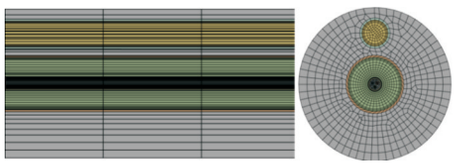


图 3　井筒局部网格划分示意图

Fig. 3　Schematic diagram for local grid division of wellbore

表 1　网格无关性验证结果

Table 1　Grid independence validation results

名　称	划分段数	网格尺寸/mm	网格数量	出口温度/℃
方案 1	800	500	534 842	109.1
方案 2	1 000	400	857 736	107.8
方案 3	1 200	333	1 084 436	106.6
方案 4	1 400	286	1 267 887	106.8
方案 5	1 600	250	1 445 845	106.8

低并趋于稳定。相邻方案间的误差率依次为 1.2%、1.1%、0.19%、0。综合考虑误差率和网格计算量，方案 3 的网格数量较为合理。

井下大功率加热电缆是 SAGD 注采工艺井筒蒸汽循环电加热的关键设备，主要由加热丝、绝缘体氧化镁、热电偶和不锈钢护套组成。6 种加热电缆的具体结构如图 4 所示。

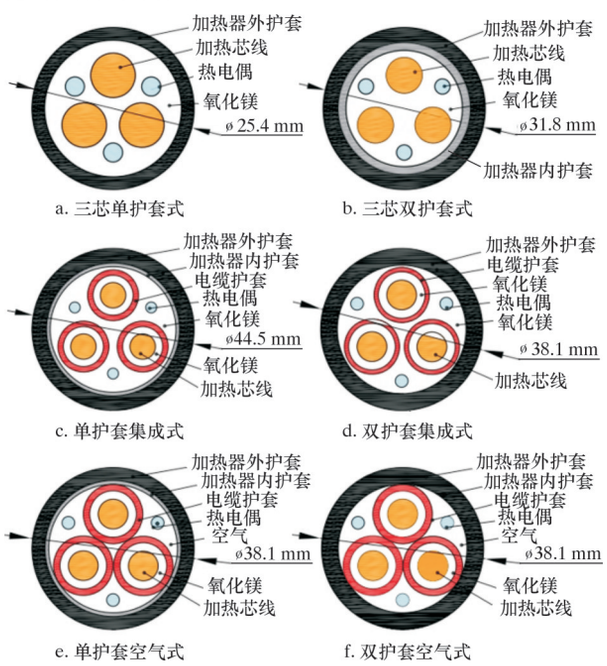


图 4　6 种加热电缆结构组成及命名

Fig. 4　Structure composition and naming of 6 types of heating cables

2.2　边界条件

由于井筒内高温蒸汽的可压缩性，入口边界采用质量流入口，出口边界采用压力出口，操作压力按照实际工况设定。考虑到壁面处流场及介质浓度，壁面函数采用标准壁面函数处理。蒸汽初始温度为 245 ℃，质量流量为 10~80 t/d，地层（井筒壁）温度为 80 ℃；井筒与外界热交换采用对流传热，其余均为耦合传热；加热电缆的功率密度通过固体能量源项输入，加热功率密度为 1~3 kW/m^2。模型材料参数如表 2 所示。

表 2　模型材料参数

Table 2　Material parameters of model

名　称	材质	密度/（kg·m^{-3}）	比热容/（J·kg^{-1}·K^{-1}）	导热系数/（W·m^{-1}·K^{-1}）
加热芯线	Cr20Ni80	8 100	4 400	16.5
绝缘导热介质	氧化镁	3 650	886	36.0
加热器内护套	不锈钢 304	7 930	500	16.3
加热器外护套	不锈钢 301	8 000	500	14.2
井筒壁	碳酸岩	2 200	800	1.6
注汽管	不锈钢 304	7 930	500	16.3
短油管	不锈钢 304	7 930	500	16.3

2.3　温度场分布规律

为了获得加热电缆芯线的发热规律以及蒸汽在注汽管和井筒内的温度场分布情况，以注汽量为 80 t/d、加热功率密度为 2 kW/m^2 的三芯单护套式加热电缆为例，计算其加热电缆及蒸汽温度分布，计算结果如图 5 和图 6 所示。

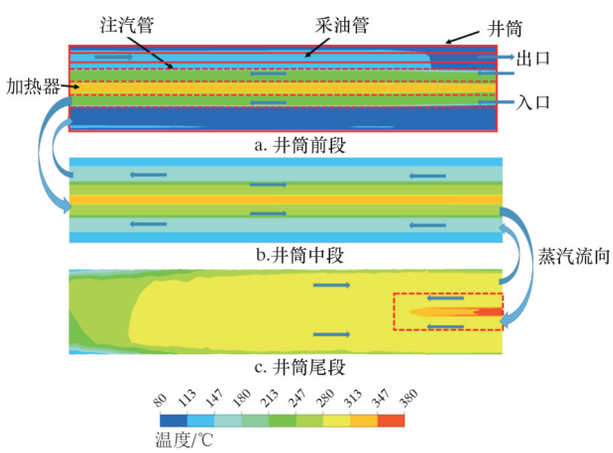
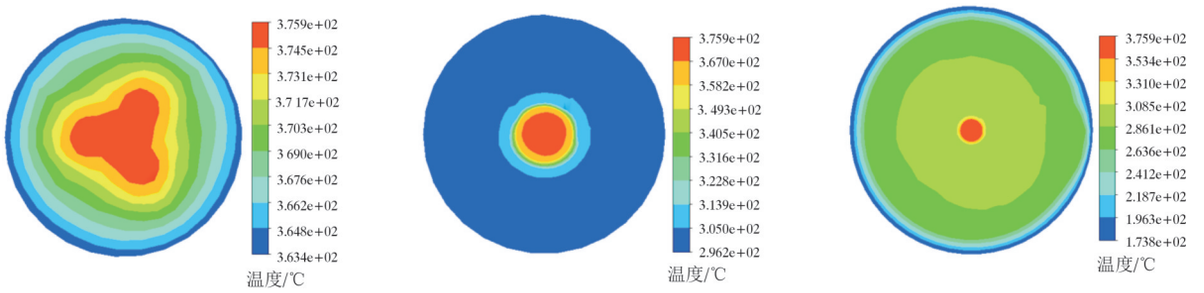


图 5　井筒轴向截面温度分布规律

Fig. 5　Axial sectional temperature distribution pattern of wellbore

由图 5 可以看出，蒸汽经注汽管入口进入沿水平轴向流动过程中，在加热电缆的加热作用下逐渐升温并向径向扩散。加热电缆与蒸汽温度均沿着轴向方向逐渐升高，在注汽管末端达到最高，注汽管首尾段的加热电缆与蒸汽温差分别为 49 和 54 ℃，表明加热电缆对蒸汽有较为明显的加热作用。由图 6 可知，加热电缆和蒸汽的径向温度分布整体呈辐射状，热量由中心向外传递，芯线温度最高到达了 375 ℃，这是不同材料的导热系数差异导致的。



a. 电缆截面温度云图　　b. 注汽管截面温度云图　　c. 井筒截面温度云图

图 6　出口径向各截面温度分布规律

Fig. 6　Radial sectional temperature distribution pattern of outlet

3　不同电缆结构的传热规律分析

3.1　电缆温度分布规律

3.1.1　氧化镁为导热介质

以氧化镁作为加热电缆的绝缘以及导热填充介质，分别计算了三芯单护套、三芯双护套、单护套集成和双护套集成式 4 种电缆结构，在 5 种注汽量和 3 种加热功率时的芯线及注汽管温度分布规律。在加热功率密度为 2 kW/m^{2}时，注汽量按 10、20、40、60、80 t/d 取值。在注汽量为 80 t/d 时，加热功率密度按 1、2、3 kW/m^{2}取值。不同注汽量以及加热功率密度对应的温度分布结果如图 7~图 10 所示。

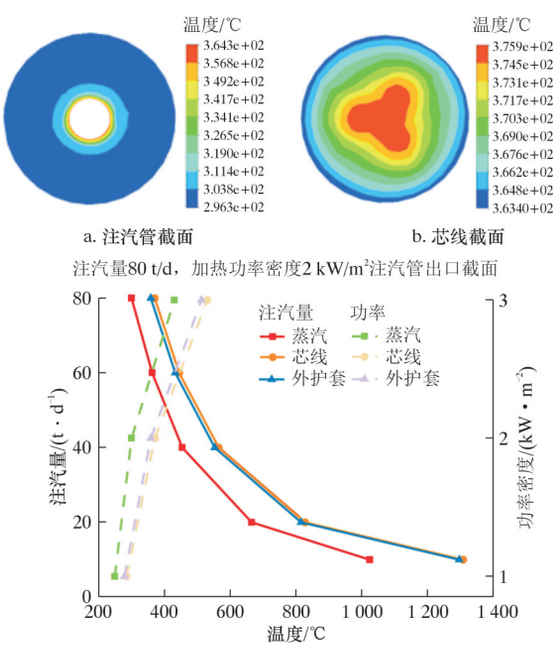


图 7　三芯单护套式电缆温度变化规律曲线

Fig. 7　Temperature variation of three-core single-sheathed cable

从图 7~图 10 可以看出，随着注汽量的增大，4 种结构的加热电缆注汽管内的蒸汽温度、电缆芯线温度以及外护套温度逐渐降低，呈现出负相关规律。同时，从曲线图还可以看出，注汽量的大小对电缆内外温差影响较小，但对加热电缆整体的散热影响较大。这主要是因为芯线与外护套的热量交换以热传导为主，而蒸汽与外护套的热量交换则以热对流为主，流体的流速影响对流传热系数，注汽量越大，蒸汽的流速越快，热交换的速率也就越快。

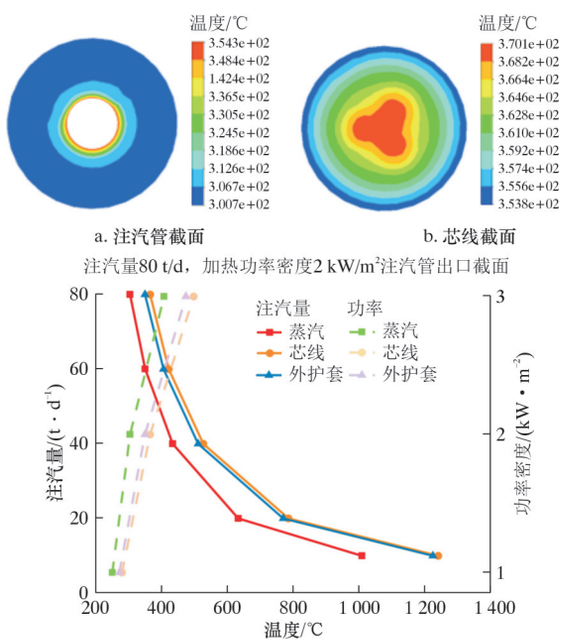


图 8　三芯双护套式电缆温度变化规律曲线

Fig. 8　Temperature variation of three-core double-sheathed cable

随着加热功率的增大，注汽管内的蒸汽温度、电缆芯线温度以及外护套温度逐渐升高，呈现出正相关规律。这是因为加热功率的提高为系统提供了更多的热量，但功率的增大加大了电缆的热负荷。在实际生产过程中需要严格控制加热器表面温度，而注汽量和加热功率的大小会显著影响加热器表面温度。因此，根据实际工况选择合理的注汽量以及加热功率尤为重要。

在注汽量为 80 t/d，加热功率密度为 2 kW/m^2

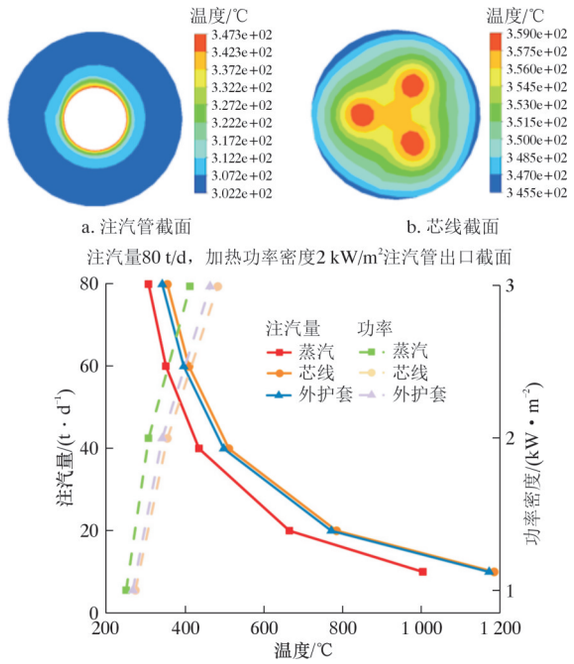


图 9　单护套集成式电缆温度变化规律曲线

Fig. 9　Temperature variation of single-sheath integrated cable

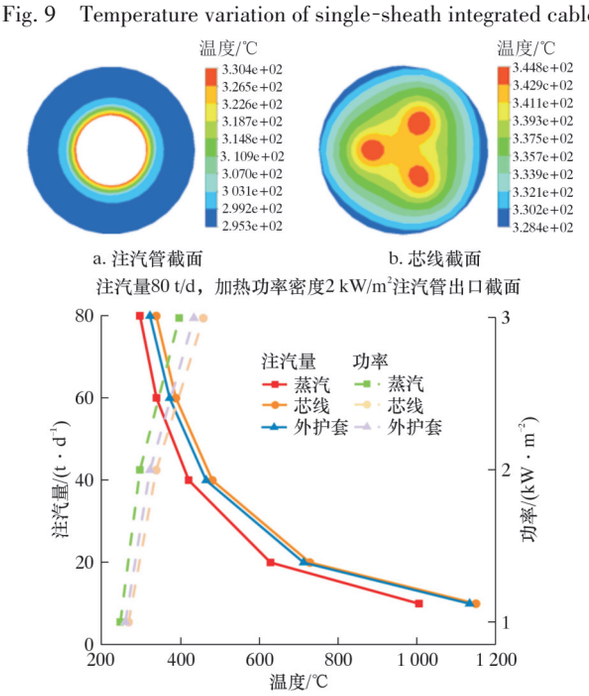


图 10　双护套集成式电缆温度变化规律曲线

Fig. 10　Temperature variation of double-sheath integrated cable

的工况下，4 种结构各部分温度对比如图 11 所示。由图 11 可以看出，以上 4 种结构的加热电缆温度差异较小。三芯单护套、三芯双护套、单护套集成和双护套集成式电缆的芯线与外护套的平均温差分别为 12.0、15.7、13.1、15.8 ℃。双护套集成式由于护套整体厚度增加，体积更大，热容量也随之增大，导致热量被更广泛地分散。尽管如此，这种热量分散并未对总体温差产生显著影响。从图 9 和图 10 可以看出，单护套集成和双护套集成式由于单独增加了芯线护套和传热介质，明显避免了芯线处的热量集中。但考虑到加工的难度和经济效益，在相同条件下，三芯单护套式电缆足够满足使用要求。

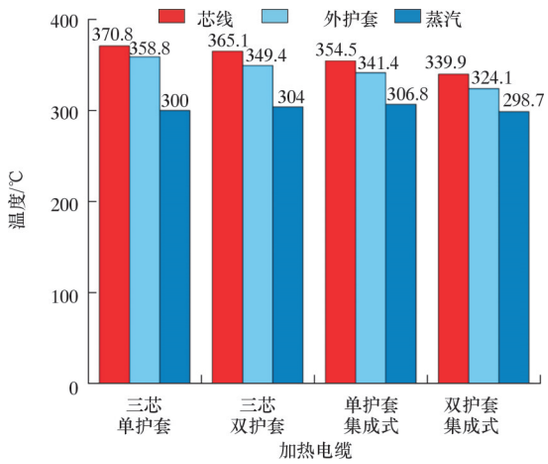


图 11　4 种结构各部分温度对比

Fig. 11　Temperature comparison of various parts of 4 structures

3.1.2　空气为导热介质

以空气作为加热电缆的绝缘以及导热填充介质分别计算了双护套空气和单护套空气式加热电缆在 5 种注汽量和 3 种加热功率时的芯线及注汽管温度分布规律。不同注汽量以及加热功率对应的温度分布结果如图 12、图 13 所示。

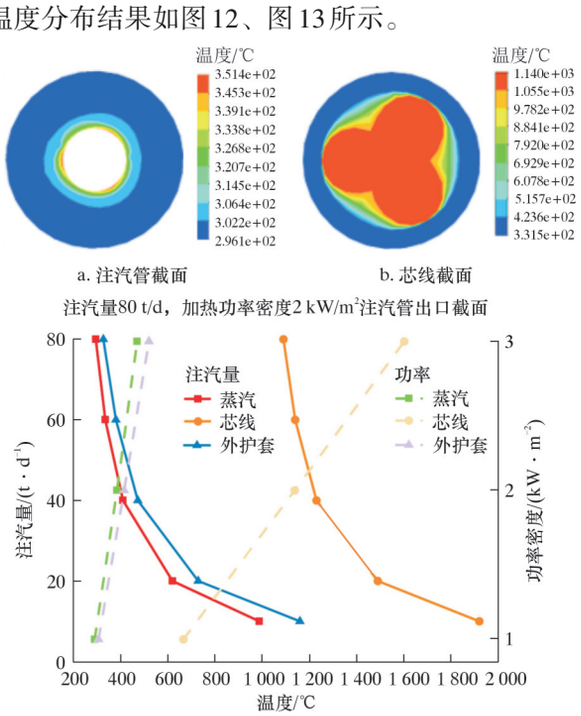


图 12　双护套空气式电缆温度变化规律曲线

Fig. 12　Temperature variation of double-sheathed air type cable

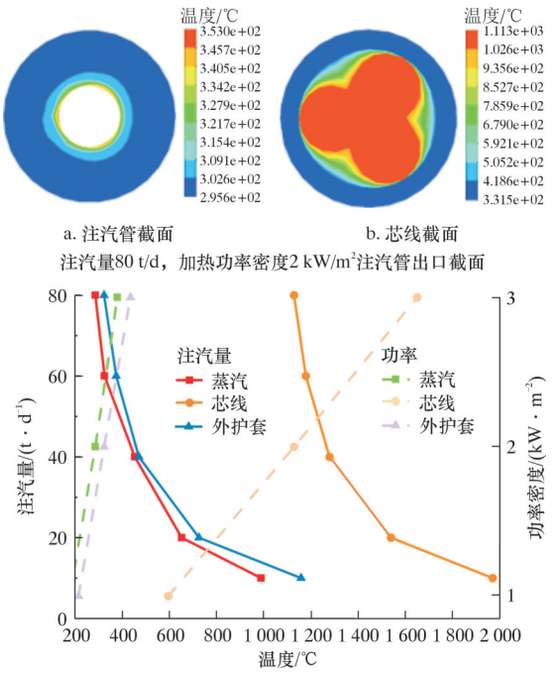


图 13　单护套空气式电缆温度变化规律曲线

Fig. 13　Temperature variation of single-sheathed air type cable

由图 12 和图 13 可知，2 种结构加热电缆的注汽管内的蒸汽温度、电缆芯线温度和外护套温度的变化规律与前述 4 种结构规律相似，均呈现出随着注汽量的增大而降低，加热功率增大而增大的特点。而区别在于，以空气作为传热介质的加热电缆其芯线与护套的温差远远大于前 4 种结构，分别是前 4 种结构的平均温差的 48.2 倍和 45.8 倍。主要归因于空气较低的热导率以及可能在接触面之间产生的气隙增加了接触热阻，从而影响传热效率，导致芯线产生的热量难以及时传递，造成芯线温度过高甚至烧毁。因此，空气并不适合作为加热电缆的传热介质。

3.2　6 种结构的电缆加热及传热效果评价

以现场常用的注汽量为参考，同时电加热器的表面温度应控制在 400 ℃以下，防止温度过高造成原油焦化。故选择注汽量 80 t/d、加热功率密度为 2 kW/m² 和初始温度为 245 ℃的蒸汽，作为评价 6 种结构加热电缆加热效果的边界条件，结果如图 14 所示。

由图 14 可以看出，6 种结构对蒸汽温度的加热效果相比入口温度分别提升了 22.4%、24.1%、25.2%、21.9%、18.4%、20.4%。加热电缆的传热效果以芯线与护套的温差作为评价标准，加热电缆芯线与护套的温差越小说明传热效果越好。6 种结构的平均温差分别为 12.0、15.8、13.1、15.9、806.0、760.2 ℃。综合分析，三芯单护套式加热电缆的传热效果最好，单护套集成式加热电缆对蒸汽温度的提升最大。但考虑其结构复杂性、加工难度和经济性，三芯单护套式结构能够满足加热和传热需求，具有更好的应用价值。

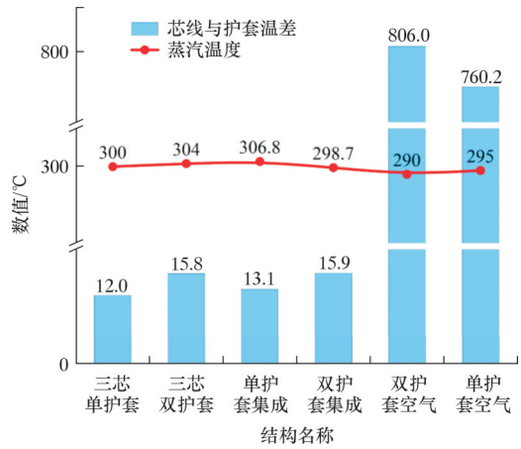


图 14　6 种结构蒸汽温度及温差变化

Fig. 14　Steam temperature and temperature difference variations of 6 structures

4　结论及建议

（1）针对电加热辅助 SAGD 技术主控因素影响规律的问题，利用数值模拟的表征方法，开展了针对不同注汽量和功率的稠油井下大功率加热电缆传热规律研究。结果表明，蒸汽和芯线的平均温度随着注汽量的增加而降低，随着加热功率的增加而升高。相较于传统 SAGD 生产过程，该技术可以通过控制注汽量和加热功率的方法，提高蒸汽温度改善加热电缆温度，达到降低蒸汽消耗和提升井底蒸汽品质的目的。

（2）针对不同结构的加热电缆传热行为的差异，利用单因素分析方法，以注汽管出口截面处的平均温度为评价标准，温度从高到低依次为：三芯单护套>三芯双护套>单护套集成>双护套集成。综合其性能、工艺和成本，建议采用三芯单护套式的加热电缆的排布方式。

（3）针对空气作为加热电缆导热介质对传热行为的影响，开展了 2 种结构的传热效果分析。结果表明，双护套空气和单护套空气式电缆由于空气导热系数较小限制了芯线向外界的传热，传热效果差。因此，相比于空气，氧化镁作为加热电缆的传热介质更合适。

参　考　文　献

[1]　蒋琪，游红娟，潘竟军，等. 稠油开采技术现状与发

展方向初步探讨［J］. 特种油气藏，2020，27（6）：30-39.
JIANG Q， YOU H J， PAN J J， et al. Preliminary discussion on current status and development direction of heavy oil recovery technologies［J］. Special Oil & Gas Reservoirs， 2020， 27（6）： 30-39.

［2］ 王俊奇，张祖峰，李建馨，等. 稠油开采电加热设备节能技术［J］. 石油机械，2010，38（9）：45-48.
WANG J Q， ZHANG Z F， LI J X， et al. The energy-saving technology of the electric heater for heavy oil recovery ［J］. China Petroleum Machinery， 2010， 38（9）： 45-48.

［3］ AFDHOL M K， ERFANDO T， HIDAYAT F， et al. The prospect of electrical enhanced oil recovery for heavy oil： a review ［J］. Journal of Earth Energy Engineering， 2019， 8（2）： 73-94.

［4］ YUAN Z， LIU P C， ZHANG S F， et al. Experimental study and numerical simulation of a solvent-assisted start-up for SAGD wells in heavy oil reservoirs［J］. Journal of Petroleum Science and Engineering， 2017， 154： 521-527.

［5］ WANG C， WU Y B， LUO C H， et al. Experimental study and numerical simulation of an electrical preheating for SAGD wells in heavy oil reservoirs ［J］. Energies， 2022， 15（17）： 6102.

［6］ 孙新革，罗池辉，张胜飞，等. 新疆油田浅层超稠油SAGD高效低碳开发技术研究与展望［J］. 特种油气藏，2024，31（1）：1-8.
SUN X G， LUO C H， ZHANG S F， et al. Research and prospects of efficient and low-carbon SAGD development technology for shallow ultra-heavy oil in Xinjiang oilfield ［J］. Special Oil & Gas Reservoirs， 2024， 31（1）： 1-8.

［7］ HASIBUAN M Y， REGINA S， WAHYU R， et al. Electrical heating for heavy oil：past，current，and future prospect［EB/OL］. Preprints. org， 2020： PPR108587（2020-01-12）［2020-01-15］. https：//europepmc. org/article/PPR/PPR108587.

［8］ 路朋. 超稠油井筒电加热技术优化对策研究［J］. 内蒙古石油化工，2022，48（10）：87-90.
LU P. Research on optimization countermeasures of electric heating technology for super heavy oil wellbore ［J］. Inner Mongolia Petrochemical Industry， 2022， 48（10）： 87-90.

［9］ 李万开. 井筒电加热技术在稠油开采中的应用研究［J］. 化工管理，2019（6）：180-181.
LI W K. Application of wellbore electric heating technology in heavy oil recovery ［J］. Chemical Enterprise Management， 2019（6）： 180-181.

［10］ 李玄. 提高浅层超稠油油藏蒸汽驱效果的策略［J］. 石油石化物资采购，2021（12）：112-113.
LI X. Strategies for improving steam flooding effect in shallow ultra-heavy oil reservoirs［J］. Petroleum & Petrochemical Material Procurement， 2021 （12）： 112-113.

［11］ 任维娜，张庆华，魏裕森，等. 海上稠油油田电加热改善原油流动性技术研究［J］. 长江大学学报（自科版），2019，16（3）：37-42.
REN W N， ZHANG Q H， WEI Y S， et al. The research on technology of improving oil fluidity by electric heating of heavy oil in offshore oilfields ［J］. Journal of Yangtze University （Natural Science Edition），2019， 16（3）： 37-42.

［12］ SADEGHI A， HASSANZADEH H， HARDING T G. A comparative study of oil sands preheating using electromagnetic waves， electrical heaters and steam circulation ［J］. International Journal of Heat and Mass Transfer， 2017， 111： 908-916.

［13］ WANG Z X， GAO D L， DIAO B B， et al. Comparative performance of electric heater vs. RF heating for heavy oil recovery ［J］. Applied Thermal Engineering， 2019， 160： 114105.

［14］ ZHANG J P， WU Y B， WANG C， et al. Experimental study on improvement mechanism of electric heating-assisted cyclic steam stimulation of horizontal well ［J］. Applied Sciences， 2022， 12（21）： 11294.

［15］ WANG Z， LU X， LI Q， et al. Downhole electric heater with high heating efficiency for oil shale exploitation based on a double-shell structure ［J］. Energy， 2020， 211： 118539.

［16］ HASSANZADE H， HARDING T. Analysis of conductive heat transfer during in-situ electrical heating of oil sands ［J］. Fuel， 2016， 178： 290-299.

［17］ RANGEL-GERMAN E R， SCHEMBRE J， SANDBERG C， et al. Electrical-heating-assisted recovery for heavy oil ［J］. Journal of Petroleum Science and Engineering， 2004， 45（3/4）： 213-231.

［18］ ZHU M， ZHONG H Q， LI Y C， et al. Research on viscosity-reduction technology by electric heating and blending light oil in ultra-deep heavy oil wells ［J］. Journal of Petroleum Exploration and Production Technology， 2015， 5（3）： 233-239.

［19］ WAN T. Study of hybrid thermal recovery process and geomechanics on heavy oil production performance ［J］. Journal of Petroleum Science and Engineering， 2022， 218： 111007.

［20］ 周洪亮. 稠油井油管电加热功率优化与应用［J］. 石油机械，2019，47（3）：99-103.

ZHOU H L. Tubing electric heating power optimization for heavy oil recovery ［J］. China Petroleum Machinery，2019，47（3）：99-103.

［21］ HAO Y，GAO X Q，XIONG F S，et al. Temperature distribution simulation and optimization design of electric heater for in-situ oil shale heating ［J］. Oil Shale，2014，31（2）：105-120.

［22］ 薛继军，杨文波，白哲，等. 空心杆电加热系统加热效果影响因素分析［J］. 石油机械，2022，50（4）：118-123.
XUE J J，YANG W B，BAI Z，et al. Analysis on factors affecting the performance of hollow rod electric heating system ［J］. China Petroleum Machinery，2022，50（4）：118-123.

［23］ 吴永彬，李秀峦，郑浩然. 电加热辅助 SAGD 生产关键机理研究［C］//2018 油气田勘探与开发国际会议. 西安：西安石油大学，2018：1-7.
WU Y B，LI X L，ZHENG H R. Research on the key mechanism of electric heating assisted SAGD production ［C］//2018 International Conference on Oil and Gas Field Exploration and Development. Xi'an：Xi'an Shiyou University，2018：1-7.

［24］ 修德欣. 海上稠油油田电加热开采技术研究［D］. 青岛：中国石油大学（华东），2014.
XIU D X. The research on electric heating technique of offshore heavy oil field ［D］. Qingdao：China University of Petroleum （East China），2014.

［25］ 朱广海，刘章聪，熊旭东，等. 电加热稠油热采井筒温度场数值计算方法［J］. 石油钻探技术，2019，47（5）：110-115.
ZHU G H，LIU Z C，XIONG X D，et al. Numerical calculation method of the wellbore temperature field for electric heating heavy oil thermal recovery ［J］. Petroleum Drilling Techniques，2019，47（5）：110-115.

［26］ 邬田华. 工程传热学［M］. 武汉：华中科技大学出版社，2011：12-78.

［27］ 潘丽萍，王强，贺铸. 实用多相流数值模拟［M］. 北京：科学出版社，2020：14-15.

［28］ 赵铎. 水平管内气液两相流流型数值模拟与实验研究［D］. 北京：中国石油大学（北京），2007.
ZHAO D. Numerical simulation and experiment research on flow pattern of gas-liquid flow in horizontal pipe ［D］. Beijing：China University of Petroleum （Beijing），2007.

第一作者简介：张 斌，正高级工程师，生于 1966 年，2006 年毕业于西南石油大学机械设计及理论专业，获博士学位，现从事石油钻采、管材及新能源装备研制、检验、标准、产业化工作。地址：（100007）北京市东城区。email：zb_sc@cnpc. com. cn。

通信作者：祝效华，教授。email：Zhuxh@swpu. edu. cn。

收稿日期：2024-08-28　　**修改稿收到日期：**2025-02-07

（本文编辑　南丽华）

（上接第 85 页）

［13］ 王泽，张伟国，韦红术，等. 基于 CFD-DEM 耦合模型的深水钻屑返出运移沉积规律研究［J］. 海洋工程装备与技术，2019（增刊 1）：327-333.
WANG Z，ZHANG W G，WEI H S，et al. Migration & deposition of deepwater drilling cuttings by CFD-DEM coupled simulation model ［J］. Ocean Engineering Equipment and Technology，2019（Sup1）：327-333.

［14］ 魏纳，刘洋，崔振军，等. 海洋天然气水合物层钻水平井不同扩径方式携岩能力图版［J］. 石油钻采工艺，2019，41（4）：435-440.
WEI N，LIU Y，CUI Z J，et al. Charts of cuttings carrying capacity in different hole enlargement modes for drilling horizontal wells in marine gas hydrate reservoirs ［J］. Oil Drilling & Production Technology，2019，41（4）：435-440.

［15］ 李文华，苏明军. 常用湍流模型及其在 Fluent 软件中的应用［J］. 水泵技术，2006（4）：39-40，31.
LI W H，SU M J. Common turbulence models and their application in Fluent software ［J］. Pump Technology，2006（4）：39-40，31.

引文样式：石油机械双语

第一作者简介：杨柳青，正高级工程师，生于 1973 年，2005 年毕业于美国伊利诺伊大学香槟分校机械工程专业，现从事钻完井工具研发与智能制造工作。地址：（610051）四川省成都市。email：yangliuq_sc@cnpc. com. cn。

收稿日期：2025-05-19　　**修改稿收到日期：**2025-07-09

（本文编辑　刘 锋）