

稠油采集高效电加热方法的研究*

孙梅生¹⁾ 郑南方²⁾ 方星豪¹⁾ 亢强²⁾ 李忠海²⁾ 王磊¹⁾ 孙稚¹⁾ 姚成刚¹⁾

¹⁾ (清华大学自动化系 北京 100084)

²⁾ (辽河油田 盘锦 124209)

(2002 年 4 月 3 日收到 2002 年 5 月 27 日收到修改稿)

阐述稠油采集电加热的重要意义,提出了电阻率非线性特种电缆和升高电加热频率两种提高稠油采集电加热效率的方法,并运用绝缘双极型晶体管(IGBT)和非晶态变压器等研制成功 100kVA/2000Hz 特种变频器,实施了一种高效电加热方法,取得了国内最佳节能效果.

关键词:稠油采集电加热,电阻率非线性电缆,升高电加热频率,IGBT,非晶态,高效电加热

PACC: 8610Z

1. 引 言

我国已探明的石油矿藏中稠油成分较多,有的凝固点超过 60℃. 一些油井开采数月后,剩下的以稠油为主,靠自喷或注水加压已不能采集. 经过多年研究,国内外稠油采集技术可分为化学方法、物理方法和生物方法三大类. 前者污染环境尚未解决,后者尚未达到工业应用水平,目前稠油采集实际工业应用的主要方法是电加热式物理方法,即给深入油井的特制电缆输入合适的电流(有的需事先注入过热蒸汽),使油井中从井底到井口的稠油均可流动,达到稠油采集条件.

辽河油田、胜利油田、新疆油田和南阳油田等均已探明具有稠油矿藏,目前辽河油田稠油开采水平和规模具有世界先进水平,但其电加热耗电量很大. 为节省电能,本文作者从 2000 年 5 月起在辽河油田进行考察和研究,研制了以绝缘栅双极型晶体管(IGBT)^[1](一种高性能大功率电力电子器件)和非晶态^[2]铁芯变压器为核心的稠油采集高效电加热设备,并已开始实施工业应用. 如何进一步提高稠油采集电加热的效率,加快高效率开采稠油,满足工农业和人民生活日益增长的石油需求,具有重要意义,值

得深入研究. 本文提出两种提高电加热效率的方法,并说明其中一种方法的实施效果.

2. 非线性电加热可提高效率

由地球物理知识可知,正常情况下,每深入地下 100m,温度大约升高 3℃,如图 1 中斜实线所示. 此图纵坐标以地面为 0 点, h 为负值代表深度,并设油井深度为 2000m.

由于线性加热(加热电缆的电阻率为常值,加热电源为工频,电缆的电容及电感效应几乎为零)简单易行,因此早期的稠油采集均为线性加热,其电加热温度特性如图 1 中点状斜线所示(设稠油开采温度条件为 75℃).

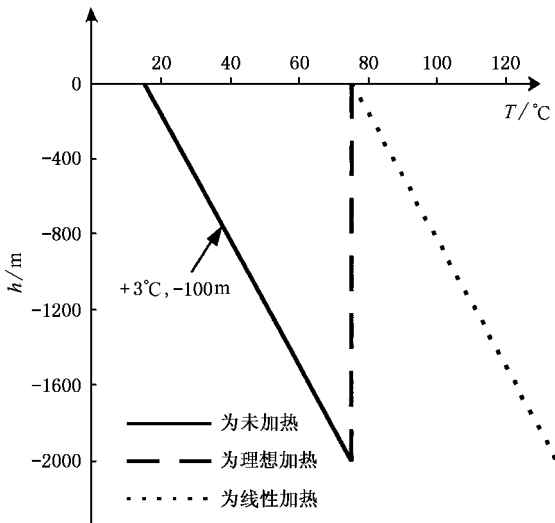
根据傅里叶热传导定律和热力学理论^[3],并结合稠油采集电加热之具体情况和图 1 之坐标系,设单位时间内在深度 $h = h_0$ 通过电缆外壁 dS 面积的热量为 dQ ,则

$$\begin{cases} dQ = \kappa \left(\frac{dT}{dr} \right)_{h_0} \times dS; \\ dS = 2\pi r_0 \times dh, \end{cases}$$

即

$$dQ = \kappa \left(\frac{dT}{dr} \right)_{h_0} \times 2\pi r_0 dh, \quad (1)$$

*“211”基金(批准号:计社会[1996]1498)资助的课题.

图1 温度 T 与地层深度 h 关系

式中 κ 为热导率, $\left(\frac{dT}{dr}\right)_{h_0}$ 表示深度 $h = h_0$ 处电缆外壁的径向温度梯度, r_0 代表加热电缆圆形外壳之半径, r 代表加热电缆圆形横截面的径向矢量。

由图1可知,在线性均匀加热条件下,从井底到井口(地面),电缆上下不同位置(即 h_0 取不同值)单位长度的散热相等,即电缆外壁上径向温度梯度 $\left(\frac{dT}{dr}\right)_{h_0}$ 处处相等,记它为 G_1 ,则单位时间内,稠油从井底提升到井口所损失的热量 Q_1 为

$$Q_1 = \int_{-2000}^0 kG_1 \times 2\pi r_0 dh,$$

即

$$Q_1 = 4000\pi r_0 kG_1. \quad (2)$$

若能采用理想非线性电加热方法,使油井内从井底到井口的温度不变,如图1中垂直虚线所示,则加热电缆外壁的径向温度梯度 G_2 随深度 h 的变化可用下式表示:

$$G_2 = \left(\frac{2000 + h}{2000}\right) G_1, \quad (3)$$

式中 h 为 0 至 -2000m。

在上述非线性电加热条件下,单位时间内稠油从井底提升到井口所损失的热量 Q_2 可由下式求出:

$$Q_2 = \int_{-2000}^0 kG_2 \times 2\pi r_0 dh. \quad (4)$$

将(3)式代入上式,可得到

$$Q_2 = 2\pi r_0 \int_{-2000}^0 k \left(\frac{2000 + h}{2000}\right) G_1 dh,$$

即

$$Q_2 = 2000\pi r_0 kG_1. \quad (5)$$

由上式和(2)式可得到

$$\frac{Q_2}{Q_1} \times 100\% = 50\%. \quad (6)$$

由此可见,与线性电加热相比,上述理想非线性电加热方法,理论上可节省电能 50%。而有的油田有数百口甚至上千口稠油井,每口稠油井目前电加热平均耗电约为 50kW,而且 24h 连续运行,若能实现上述设想,其节电效益相当可观。由此可见,研究稠油采集高效电加热方法,具有重要意义。

3. 采用电阻率非线性特种电缆可提高电加热效率

稠油采集电加热常用的电缆采用均匀材质制成,其电阻 R_{CA} 与长度 l 成正比,一般每米电缆的电阻值不超过 50m Ω ,其分布电容 C_{CA} 一般每米不超过 500pF。在采用工频电源直接供电条件下, C_{CA} 的容抗比 R_{CA} 大 100 倍以上(设电缆长度为 $l \leq 3000m$), C_{CA} 的作用可忽略不计。因此这种电阻率线性电缆所能获得的电加热温度特性是与图1中点状斜线相同或平行的斜直线,显然它耗能多。

如果选用电阻率不同的材料(设其各处的截面积相等)制成电加热特种电缆,它的电阻率 ρ 从井底到井口由 0 逐渐增大到最大值 ρ_{max} ,即 ρ 与 h (h 为负值)的函数关系为

$$\rho(h) = \frac{\rho_{max}}{L}(L + h), \quad (7)$$

式中 L 为特种电缆的总长度。

在仍采用工频电源直接供电条件下, C_{CA} 的作用仍可忽略不计,特种电缆各处的电流相等,其电加热功率 P_w 对深度 h 的变化率为

$$\frac{dP_w}{dh} = \frac{I^2 \rho(h)}{S}, \quad (8)$$

式中 S 为特种电缆的截面积。

为了利用图1,取 $L = 2000m$,并将(7)式代入(8)式,则可得到

$$\frac{dP_w}{dh} = \rho_{max} \frac{I^2}{2000 S} (2000 + h). \quad (9)$$

由上式可知,在 ρ_{max} 和电流 I 取值恰当的条件下,采用电阻率非线性特种电缆,用工频电源直接供电,可获得图1中垂直虚线所示的电加热效果,理想

情况下其节能最大值可达到 50% . 然而 , 这种电阻率非线性特种电缆加工相当困难 , 难以实施 .

4. 升高频率可提高电加热效率

电加热电缆存在分布电容 , 还有电阻和电感效应 . 而且电缆外层钢管的涡流损耗^[4]与频率的平方成正比 , 其磁滞损耗^[5]和电感之感抗随频率升高而增加 . 因此升高频率可使电缆的分布电容作用更加显著 , 实现非线性加热 , 提高电加热效率 . 为了用等效电路法^[6]进一步分析升高频率对电加热效率的影响 , 可将整条电缆分成 n 等分 , 画出图 2 所示等效电路 .

对于均匀材质制成的电阻率为常值的电加热电缆 , 图 2 中各电阻值相等 , 设其为 r , 其电阻值包括特种电缆在交变磁场作用下涡流损耗^[7]和磁滞损耗之等效电阻 ; 各电感量和各电容量均相等 , 分别设为 L 和 C , 即

$$r_1 = r_2 = r_3 = \dots = r_{n-1} = r_n = r , \quad (10)$$

$$L_1 = L_2 = L_3 = \dots = L_{n-1} = L_n = L , \quad (11)$$

$$C_2 = C_3 = \dots = C_{n-1} = C_n = C . \quad (12)$$

此外 , 图 2 中 a, b 两端接变频器的输出 , 其位置在井口 , 图中 d 点在井底 .

由图 2 可知 , 流过图 2 中各电阻的电流分别为

$$\dot{I}_{r_1} = \dot{I}_1 , \quad (13)$$

$$\dot{I}_{r_2} = \dot{I}_1 + \dot{I}_2 , \quad (14)$$

$$\dot{I}_{r_3} = \dot{I}_1 + \dot{I}_2 + \dot{I}_3 , \quad (15)$$

.....

$$\dot{I}_{r_{n-1}} = \sum_{j=1}^{n-1} \dot{I}_j , \quad (16)$$

$$\dot{I}_{r_n} = \sum_{j=1}^n \dot{I}_j , \quad (17)$$

因此电加热电缆各等分的加热功率(功耗) 分别为

$$P_{r_1} = |\dot{I}_{r_1}|^2 r_1 = |\dot{I}_1|^2 r , \quad (18)$$

$$P_{r_2} = |\dot{I}_{r_2}|^2 r_2 = |\dot{I}_1 + \dot{I}_2|^2 r , \quad (19)$$

$$P_{r_3} = |\dot{I}_{r_3}|^2 r_3 = |\dot{I}_1 + \dot{I}_2 + \dot{I}_3|^2 r , \quad (20)$$

.....

$$P_{r_{n-1}} = |\dot{I}_{r_{n-1}}|^2 r_{n-1} = |\sum_{j=1}^{n-1} \dot{I}_j|^2 r , \quad (21)$$

$$P_{r_n} = |\dot{I}_{r_n}|^2 r_n = |\sum_{j=1}^n \dot{I}_j|^2 r . \quad (22)$$

而图 2 中所示各电流可分别表示为

$$\dot{I}_1 = \frac{\dot{U}_{C_2}}{r_1 + j\omega L_1} = \frac{\dot{U}_{C_2}}{r + j\omega L} , \quad (23)$$

$$\dot{I}_2 = \dot{U}_{C_2} \times j\omega C_2 = j\omega C \dot{U}_{C_2} , \quad (24)$$

$$\dot{I}_3 = \dot{U}_{C_3} \times j\omega C_3 = j\omega C \dot{U}_{C_3} , \quad (25)$$

.....

$$\dot{I}_{n-1} = \dot{U}_{C_{n-1}} \times j\omega C_{n-1} = j\omega C \dot{U}_{C_{n-1}} , \quad (26)$$

$$\dot{I}_n = \dot{U}_{C_n} \times j\omega C_n = j\omega C \dot{U}_{C_n} . \quad (27)$$

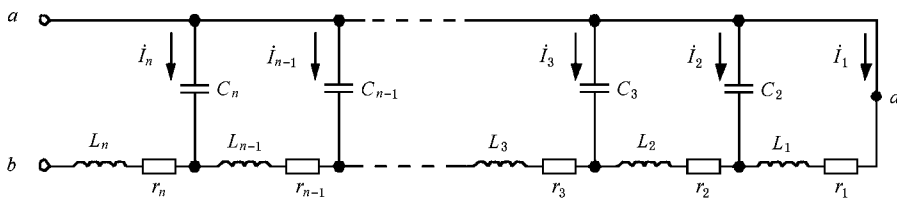


图 2 长加热电缆等效电路

由以上所述可知 , 当变频器输出给电加热电缆之电压的频率高到一定程度时 , 电加热的温度特性可与图 1 中垂直虚线接近 , 理论上最佳条件下节省电能可接近 50% .

5. 实践与效果

前面提出了电阻率非线性特种电缆和升高频率

两种提高电加热效率的方法 , 前者因加工困难 , 所需资金相当多 , 未能实施 . 我们在辽河油田实施了第二种方法 , 其概况是 : 将三相工频市电经过整流滤波 , 再经过四只 IGBT(625A/1200V) 为主开关的逆变电路 , 获得 200A/500V 的 2kHz 方波 , 然后经过 100kVA 非晶态^[8]铁芯变压器升压 , 得到 50A/2000V 的 2kHz 方波 , 最大加热功率为 100kW , 实际稳态加热功率为

10 至 50kW), 送给加热电缆. 这种方法先后在辽河油田 6 口稠油井实施过, 属国内首创. 经现场运行测试, 与 500Hz 以下电加热设备(在上述技术创新之前, 国内稠油采集电加热设备的实际工作频率为 50 至 500Hz)相比, 2kHz 电加热可平均节省电能 20% 左右, 节能效果国内最优. 在稠油采集高效电加热领域取得显著技术进步.

6. 结 语

本文提出了两种提高稠油采集电加热效率的方

法, 并实施了其中一种, 取得了国内最佳节能效果. 由于电加热电缆耐压有限和安全等条件约束, 电加热频率受限制, 实施效果未能接近理想值, 尚有相当大的节能潜力. 如何进一步提高电加热效率, 值得深入研究.

在实施上述方法的过程中, 辽河油田工程师谢雨清、郑学成, 采油现场刘欣等同志和清华大学徐文立、白守仁等老师, 给了本文作者很多支持和帮助, 在此深表感谢.

-
- [1] Hao Y, Zhu J G, Guo L and Zhang Z F 2001 *Acta Phys. Sin.* **50** 120 (in Chinese) [郝跃、朱建纲、郭林、张正幡 2001 物理学报 **50** 120]
- [2] Li Y F, Chen D X, Shen B G, Vazquez M and Hernando A 2001 *Acta Phys. Sin.* **50** 953 (in Chinese) [李印峰、陈笃行、沈保根、Vazquez M and Hernando A 2001 物理学报 **50** 953]
- [3] Geng H Y, Wu Q and Tan H 2001 *Acta Phys. Sin.* **50** 1334 (in Chinese) [耿华运、吴强、谭华 2001 物理学报 **50** 1334]
- [4] Zhang H W, Zhang S Y, Shen B G, Goll D and Kronmüller H 2001 *Chin. Phys.* **10** 1169
- [5] Hu L F, Zhou L, Zhang P X and Wang J X 2001 *Acta Phys. Sin.* **50** 1359 (in Chinese) [胡立发、周廉、张平祥、王金星 2001 物理学报 **50** 1359]
- [6] Wang J H 2000 *Acta Phys. Sin.* **49** 1696 (in Chinese) [王均宏 2000 物理学报 **49** 1696]
- [7] Li Y F, Chen D X, Guo H Q, Vazquez M and Hernando A 2000 *Acta Phys. Sin.* **49** 1591 (in Chinese) [李印峰、陈笃行、郭慧群 Vazquez M and Hernando A 2000 物理学报 **49** 1591]
- [8] Xiao S H, Chao Y S and Zhou B L 2000 *Acta Phys. Sin.* **49** 288 (in Chinese) [肖素红、晁月盛、周本濂 2000 物理学报 **49** 288]

Research on high-efficiency methods of electrical heating in gathering heavy oil^{*}

Sun Mei-Sheng¹⁾ Zheng Nan-Fang²⁾ Fang Xing-Hao¹⁾ Kang Qiang²⁾
Li Zhong-Hai²⁾ Wang Lei¹⁾ Sun Zhi¹⁾ Yao Cheng-Gang¹⁾

¹⁾(Department of Automatics , Tsinghua University , Beijing 100084 ,China)

²⁾(Liaohe Oil Field , Panjin 124209 ,China)

(Received 3 April 2002 ; revised manuscript received 27 May 2002)

Abstract

This paper expounds the significance of electrical heating in gathering heavy oil , and presents two methods of improving the efficiency of electrical heating : heating with special cable made of nonlinear-resistivity material and improving electrical frequency. We put the latter in practice by developing 100kVA/2000Hz frequency-transducer with IGBT and amorphous transformer. The best effect of energy-saving is obtained.

Keywords : electrical heating in gathering heavy oil , cable made of nonlinear-resistivity material , improving electrical frequency , IGBT , amorphous state , high-efficiency electrical heating

PACC : 8610Z

^{*} Project supported by the Foundation of " 21st Century , 100 High Quality Universities " (Grant No. JiSheHa[1996]498).