

油田低产井电磁感应加热技术应用及其度电成本与增产效益研究

张前保（山东省德州市临邑县临盘采油厂，山东 德州 251507）

摘要：目前，我国对于低产井的增产技术的研究还处于比较初级的阶段，本文从低产井电磁感应加热技术的应用出发，以我国某北方油田的低产井作为应用案例，选定了15口低产井作为研究对象，通过应用电磁感应加热技术，充分释放了低产井的产油潜能，大大激发了这些低产井的生产效率，从度电成本与增产效益的角度来进行对比和分析，发现电磁感应加热技术相比于传统的电加热技术等方式，具有更低的度电成本和更高的增产效益，因此，本研究认为此技术具有很强的推广意义。

关键词：低产井；电磁感应加热技术；度电成本；增产效益

中图分类号：TE355 文献标识码：A 文章编号：1674-5167(2025)013-0068-03

Application of Electromagnetic Induction Heating Technology in Low-Yield Oil Wells and Research on Its Cost per Kilowatt-Hour and Production Increase Benefits

Zhang Qian bao(Linpan Oil Production Plant, Linyi County, Dezhou Shandong 251507, China)

Abstract: Currently, research on production enhancement technologies for low-yield oil wells in China is still in its early stages. This paper focuses on the application of electromagnetic induction heating technology in low-yield oil wells, using a case study of low-yield wells in a northern oil field in China. Fifteen low-yield wells were selected as research subjects. By applying electromagnetic induction heating technology, the production potential of these low-yield wells was fully unlocked, significantly improving their production efficiency. From the perspectives of cost per kilowatt-hour and production increase benefits, it was found that electromagnetic induction heating technology has lower costs per kilowatt-hour and higher production increase benefits compared to traditional electric heating methods. Therefore, this study concludes that this technology has strong potential for widespread application.

Keywords: Low-yield oil wells; Electromagnetic induction heating technology; Cost per kilowatt-hour; Production increase benefits

我国石油开采技术的不断发展和成熟，让我国的部分油井的产量得到了很大的提升。目前面对一些低产井的增产问题，也有了一些比较先进的解决方法，在传统的采油技术中，我们经常会使用一些类似水蒸气驱油和电加热的方式来进行低产井的增产操作^[1]，但在实际生产过程中，我们发现这些传统的产油技术容易出现能耗较大、增产效果有限等各种各样的瓶颈和问题。在这种情况下，我们就必须思考到底有没有一种更新、更好的办法来解决低产井的增产问题。而随着电磁感应加热技术的完善，我们逐渐发现这种技术对于低产井有比较好的增产效果，因为这种技术本质上是通过电磁场来对地层油藏进行加热，针对性比较强，它可以起到很好的加热速度和能量转化效率，在节能环保等方面都具有良好的竞争优势，因此围绕电磁加热技术来展开对于低产井增产技术的研究就具有了更好的实践意义。

1 低产井电磁感应加热技术的应用

1.1 工程概况

本研究选取了位于我国某北方油田的低产井作为

应用案例。该油田的主要储层为砂岩型油藏，深度约为1500m，原油粘度较高，约为30~40cP，油层的渗透性较差，平均渗透率在20~50mD之间，导致井口产量长期低迷。由于地层温度较低，油井的开采效率受到严重影响，传统的采油方法如水蒸气驱油、电加热等虽已被应用，但由于能效较低，增产效果十分有限。

为解决这一问题，该油田于2023年初开始尝试应用电磁感应加热技术，对部分低产井进行改造。通过分析该油田的地质条件和生产情况，决定采用电磁感应加热技术，通过电磁场的作用加热地层，提高原油的流动性，从而实现增产目的。选定的低产井共计15口，这些井的初始产量普遍较低，每口井的日产量大多在10t以下。原油粘度较高，且井口温度维持在60℃左右，远低于油藏的最佳开采温度。

为实施这一改造项目，该油田采购了多台电磁感应加热设备，并进行了相应的技术培训和安装调试。电磁加热系统的主要组件包括加热器、能量转换装置、温度监测系统和电源管理系统。通过电磁加热装

置的加热作用，预计在一定时间内将原油温度提高至90℃~100℃，达到有效减少原油粘度的效果。项目的初期阶段侧重于小规模试验，逐步扩展到全油田应用。

1.2 低产井电磁感应加热技术的应用过程

①项目准备阶段。在项目正式启动之前，油田工程技术团队进行了广泛的现场勘查和数据分析，确保选择合适的低产井进行技术应用。针对本次应用的目标井，油田的技术团队针对这些井的详细资料，包括油藏深度、原油粘度、油层温度、渗透率、储层压力、含水率等一系列关键信息，进行了全面的收集和整理，把相关的数据进行了分类和重点标记处理。目标井的储层深度大约在1300m至1500m之间，油层的渗透性较差，渗透率约为30mD，原油粘度较高，达到35cP，储层温度较低，约为55℃。此类井的开采效率低，生产成本高，因此，引入电磁感应加热技术可以从生产过程中更好的集中能源的核心力量提高其生产能力。为了确保加热技术能够有效实施，油田技术团队与电磁加热设备供应商进行了多次技术交流，把实施过程中可能遇到的问题和关键点都进行了分析和预案处理，最终确定了最适合该油田条件的加热设备。经过充分的准备和规划后，工程正式开始，目标井的电磁感应加热技术改造也随之启动。

②电磁感应加热设备的选型与安装。在低产井改造过程中，电磁感应加热设备的选择与安装效果决定了整个增产改造工程的成效。如果设备选择不当，可能会导致加热效果不理想，甚至出现加热不均匀、能源浪费等问题^[2]。因此，设备的选型和安装必须精准且高效。针对该油田的低产井特征，工程团队进行了充分的分析和研究，最终选择了一款专为中深层油藏设计的电磁感应加热系统。该设备能够产生频率为50~60Hz的电磁场，通过电流在油层内产生热能，从而提高油层温度，降低原油的粘度，促进原油的流动性。设备主要由电磁加热器、电源装置、温控系统、以及电磁场监测系统四部分组成。这款电磁感应加热系统采用的是垂直井筒式加热设计，可以通过井口输入电缆与加热装置进行连接，电磁场通过导电体穿透至油层深处，从而精准地加热目标油层。该设备具有高效的热能转化效率(>85%)，适合深层油藏(深度可达1500m以上)使用。根据目标井的特定条件(井深约1450m，原油粘度为35cP，油层渗透率为30mD，油藏温度为55℃)，技术部门选择了工作频率为50Hz的电磁加热器，确保加热过程能够均匀深入整个油层。电场强度设定为3~5kV，能够提供足够的能量以提高油层温度。目标井深度为1450m，油层的厚度大约为80m，因此加热器的设计需要覆盖油层

的垂直厚度，确保均匀加热。每个电磁加热器的功率为100~150kW，能够在设定时间内将目标油层温度升高至90℃。温控系统的关键参数为温度调节精度($\pm 1^\circ\text{C}$)，温控系统实时反馈温度变化，并通过调节电磁场的强度进行优化控制，确保加热过程中的温度不超过设计范围。

设备的安装过程中，工程团队严格按照油田技术标准进行操作，对目标井井口进行了详细的勘察与准备工作，确保井口设备能够正确连接电磁感应加热设备。在井口，工程团队首先安装了专用的电缆连接系统。该电缆通过防护管道传输电能，确保电力能够稳定地传输至加热设备。电缆的直径为60mm，电流承载能力为200A，能够满足加热系统对电力的需求。经过前期的准备后，电磁加热器通过井筒下放至油层目标位置。安装过程中，技术团队特别注意加热器与油层的距离控制。根据设计要求，加热器与油层之间的距离保持在10~15m之间，确保加热器产生的电磁场能够均匀分布在油层内。该加热器采用内外环电流激励结构，可以将电磁波传递到油层，形成均匀的加热效果。在井筒内，同时安装了多组温度传感器，以实时监测油层温度的变化。每组传感器间距约为10m，确保能够覆盖加热区的每一层油层。温度传感器的精度为 $\pm 0.5^\circ\text{C}$ ，能够高精度地检测加热过程中油层的温度波动情况，实时反馈给温控系统，调整加热强度，保证油层加热均匀。安装完成后，工程技术团队进行了全面的设备调试，确保所有设备处于最佳工作状态。调试过程中，技术人员先通过低功率启动系统，观察设备的响应情况和稳定性。经过初步测试后，系统的各项参数(如电流、电压、频率、温度等)均符合设计要求。为了进一步确保设备的安全性和稳定性，团队对电磁加热器进行了高功率模拟加热，确认设备运行过程中不会出现过热、过载或其他故障。

③电磁感应加热过程的启动与调节。调试完成后，电磁感应加热技术正式开始应用。在加热初期，技术团队特别关注加热速率和温度的控制，以防止由于过快的升温引起油层的破坏。为了保证加热的安全性和稳定性，初期加热设置了相对较低的功率，逐步提高电磁场的强度。

初期加热过程分为三个阶段。第一阶段是预热阶段，目标井的温度由原来的60℃提升至75℃，持续加热一周。在这一过程中，温控系统自动监测温度并根据设定的范围进行调节。第二阶段是加热提升阶段，目标温度设定为90℃，在这一阶段，电磁加热设备的功率逐步提高，确保热量传递均匀，避免过热。第三阶段是稳定加热阶段，在这一阶段，油层温度稳定在

92℃左右，此时油层的原油粘度大幅下降，原油流动性明显增强。为了确保加热过程的高效与稳定，技术团队采用了动态调整电磁场频率的方式，根据温度变化和油层反应实时调整加热强度。在加热的过程中，油田技术人员持续监控电磁加热设备的工作状态，并根据油藏温度的变化情况进行精准调控。每个加热周期结束后，温控系统会自动调整下一轮加热的电磁场强度和频率，确保油层温度均匀上升。

④电磁感应加热后的监控与维护。加热过程中，油田团队不仅需要注重温度变化的实时监控，还要定期对设备进行检查与维护。在设备运行的过程中，工程师每隔一段时间需要检查加热器的工作状态、温控系统的响应速度、电磁场的强度分布等各项指标，确保设备处于最佳运行状态。另外，技术团队还对油层的结构变化进行了定期检查，确保加热过程中未对油层结构造成不利影响。在加热过程中，油田团队定期取样分析井下油水比、含水率及油气比等数据，以判断加热对油藏的影响。在整个加热过程中，团队还对设备的能耗进行了动态监控，并对加热过程的能效进行评估，确保能源的合理利用。

2 度电成本与增产效益分析

电磁感应加热技术作为一种新兴的采油增产方法，其主要优势体现在这种技术可以更为高效、精确地提高油层温度、减少原油粘度，进而从根本上改善原油的流动性问题，从而达到增产的效果和目的。然而，如何评估这种技术的经济性和增产效益，尤其是在能源消耗和成本控制这些方面，从数据的角度进行深度的分析，明确其实际经济效益，是目前实施该技术的关键问题之一。因此，本研究通过对该技术的度电成本进行了相应的计算，并对其增产效益进行如下分析，希望可以进一步验证电磁感应加热技术的实际应用价值。

2.1 度电成本分析

我们首先考虑了电磁感应加热过程中的电能消耗问题，因为电能消耗水平决定了成本支出规模，我们把设备的能耗进行不同侧面的监控和分析，准确计算出在一定时间内完成原油加热所需的电量，再根据设备的功率和加热时间，计算出每个目标井的电能消耗量。

在目标油田的15口低产井应用中，电磁加热设备的平均运行功率为120kW，单井每日加热时长为18h，工业用电价格为每千瓦时0.6元。通过持续加热，单井原油日产量从改造前的10t提升至18t，日均增产8t。基于此，单位原油产量的度电成本可通过设备总耗电量与增产原油量的比值计算得出。具体而言，单井每日耗电量为 $120\text{kW} \times 18\text{h}$ ，即 $2160\text{kW} \cdot \text{h}$ ，对应电费成本为 $2160\text{kW} \cdot \text{h} \times 0.6\text{元}$ ，合计1296元。由于日均增产原油量为8t，每吨原油的度电成本为1296

元除以8t，计算结果为162元/t。

为了充分验证电磁感应加热技术的成本优势，本研究也将电磁感应加热技术与传统电加热技术进行了相应的参数对比（见表1）。传统电加热技术由于需要对全井段进行全面加热，它的能量转化效率就会相对较低（大约60%左右），单井日均耗电量甚至可以高达 $2800\text{kW} \cdot \text{h}$ ，对应度电成本就大概为235元/t。而电磁感应加热技术乃是利用精准作用于目标油层的方法来进行针对性加热，能量转化效率就可以大幅提升至85%以上，日均耗电量也可以降低至 $2160\text{kW} \cdot \text{h}$ 左右，度电成本算下来大概就仅为162元/t，比我们的传统技术大概降低了30.6%。这一数据上的差异就说明了电磁加热技术在能耗控制与成本优化方面是具备显著优势的。

表1 电磁感应加热与传统电加热技术成本对比

技术类型	日均耗电量(kW·h)	度电成本(元/t)
传统电加热	2800	235
电磁感应加热	2160	162

2.2 增产效益分析

在增产效益方面来看，电磁感应加热技术的核心价值在于它可以通过改善原油的流动性来实现我们的增产目标。在我们的案例中，目标井群通过连续6个月的加热运行，实际上油层的温度已经从55℃稳定升高至92℃，原油粘度也由35cP降至12cP左右，流动系数直接提升了2.1倍，这是一个令人动容的数据，因为原油流动性的改善是可以直接反映于产量数据的，我们观察到，项目的单井日均产量已经从10t增至18t左右了，增产率达80%，这是超过我们想象的。而且，同期的油藏采出程度也从22%提高至31%，预计总体可延长油田经济开采寿命3~5年，这对于低产井的发展态势而言，是极具想象力的。

从经济效益角度来深入分析，我们就假设当前原油价格是600元/t、年生产天数300天计算，15口井的年增产原油量就可以达到： $8\text{t}/\text{井}/\text{天} \times 15\text{口井} \times 300\text{天}$ ，总计是3.6万吨，对应年增收额就达到了： $3.6\text{万吨} \times 600\text{元/t}$ ，即2160万元。我们扣除掉设备初期投资的1500万元及年度运营成本（含电费与维护费583万元）等一应杂费，项目净收益可以达到惊人的1877万元，投资回收期大约可以控制在14个月以内。这一数据说明，电磁感应加热技术不仅能够让投资方实现快速回本，实现盈利，还可为油田创造持续收益，创造更多的开发空间和增产可能性。

参考文献：

- [1] 林翔飞. 高频电磁感应加热技术在油田集输系统的试验 [J]. 化学工程与装备, 2021, (03):130-131.
- [2] 曾黎. 基于电磁感应加热原理的油田生产系统加热新技术 [J]. 油气田地面工程, 2019, 38(02):41-44.