



**Jochen Gies**  
感应加热销售  
工程学硕士 (Dipl-Ing)



**Markus Langejürgen**  
工艺负责人  
工程学博士 (Dr-Ing)

## 提高感应加热系统能效的最新进展

文 / Jochen Gies, Markus Langejürgen · 西马克艾洛特姆公司

**鉴**于锻造行业不断增加的成本压力，锻造生产线的制造商也被要求发展创新，以节约现有资源。这些概念必须提供机会，以满足许多代加工厂商在减少二氧化碳排放方面的要求。因此，提高感应加热系统的能效至关重要，是感应加热系统持续进一步发展的关键环节。

德国每年生产约 230 万吨热成形锻件，加热锻造材料的能耗需求约为每年 1000GWh，这意味着：即使能源成本仅为 0.10 欧元 /kWh 时，每年总计花费也要达到 1 亿欧元。现有数据表明，感应加热装置的制造商尤其被要求进行智能概念的节能型感应加热系统开发。

带有 LLC 谐振电路的变频电源（图 1）的开发被证明是降低能耗的重中之重，LLC 指的是逆变器输出

端的接线。此变频电源由不受控整流器、直流链路电容、IGBT 逆变器和输出扼流圈组成，在所有部分负载范围内，其效率为 97%， $\cos\phi$  恒定为 0.95。实现既定目标的关键还在于采用了特低损耗铜绕组的最佳耦合感应器、使用了数据库支持的软件，以及开发了减少辐射损耗的感应器概念。

### 用于分区技术 (iZone) 的 LLC 变频电源

以长棒料加热机为例，每个感应器都有自己的变频电源，因此可以单独控制。

#### 生产开始

大规模棒材（直径 300 毫米）从室温到 1250°C 的加热时间长达 50 分钟，这是从系统首次启动直到可以剪切第一部分所需的时间。在此之前，棒材通过

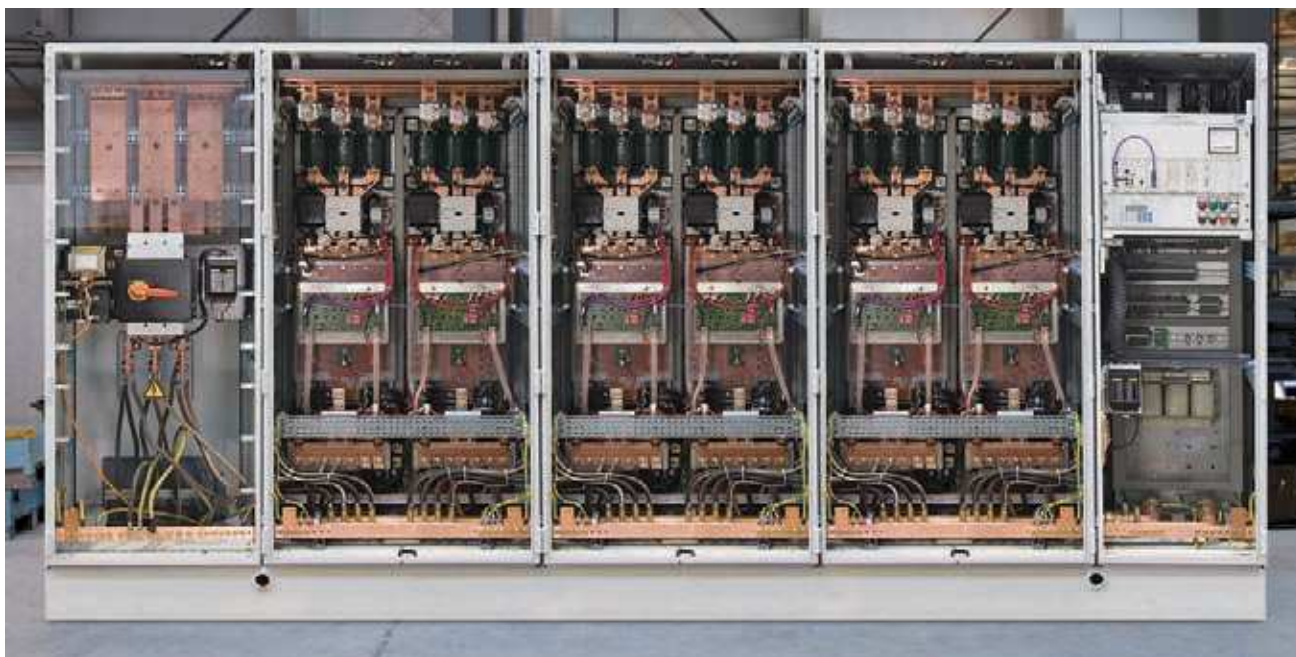


图1 六模块 LLC 变频电源

整套感应器。由于 iZone 控制单元始终知道棒材在加热站中的位置，因此只有当棒材进入时，相应的感应器才会被激活。在这种系统运行模式下，感应器的系统连接防止了由于感应器的“空转”而造成的不必要的能量损失。

#### 生产结束

在生产结束时，按相反的顺序切断感应器。在最后的棒材离开各个感应器后，感应器被关闭。了解棒材在加热系统中的位置也是在出料过程中切断各个感应器的基础。

#### 部分产能模式

近年来，由于批量较小，对柔性生产的要求越来越高，这意味着现代加热系统也必须能够提供节能的部分产能的生产。根据操作员输入的数据，iZone 控制立即计算出最佳加热策略，并自动调整感应器距离，只有实现指定的部分产能所需的感应器被连接。

#### 裂纹敏感钢的加热（软加热）

由于连接的感应器的独特性能规格，iZone 还提供加热裂纹敏感钢的选择。这包括 100Cr6 等滚动轴

承钢。为了使这成为可能，传统型变频电源技术中必须使用特殊缠绕的感应器，以便在居里点以下的范围内实现所谓的“软加热”。

随着智能 iZone 控制与 LLC 变频电源的结合，以前所需要的感应器的改变已成为过去。待加热材料（如 100Cr6）在控制中被相应的预选后，加热系统总是结合所需的产能进行最佳调整。

#### 使用 ELO-FORGE 和 ELO-BAR 的故障策略

(1) ELO-BAR (长棒料感应加热)。

在常规锻造过程中，棒材加热系统通常需要被清空。例如，在下游热剪切出现故障时，重新启动意味着加热时间变长，特别是对直径较大的棒材加热。由于系统重新启动而导致的生产停机对于能源使用（重新加热已经加热的棒材）和材料来说是不合理的。

通过单独控制感应器的选项，现在可以在没有任何问题的情况下将加热站内的整个棒料段的温度保持在一个确定的、精准的水平。智能的 iZone 控制提前计算在各个感应器中的棒料段的焓（热量含量）。这使得单个感应器的输出降低，而棒料的各自能量含量

几乎保持不变。故障消除后，可以通过棒料的回退（避免了由位于感应器间隙的棒料段的冷却而产生的“斑马效应”），立即恢复生产。

(2) ELO-FORGE L (短坯料感应加热)。

短坯料加热系统通常在感应器之间没有间隙，这里使用了如上所述的类似的策略。由于没有间隙，这里不需要回退坯料段。坯料段停止，并通过单独调整各个感应器的输出来保持温度。由于采用了专门开发的数据库支持软件和操作模式，与传统操作系统相比，循环物料可减少 80%，这个数值经过了几个已经交付的生产系统验证。

### 新感应器概念 (ELO-ICE)

感应加热使用的带有水冷的铜线圈只有在距离工件很小时工作才具有很高的电效率。在短坯料和长棒料加热时，感应线圈通常浇筑耐火混凝土，以提供线圈的机械和热保护。直接安装在耐火混凝土中的水冷铜绕组可以为衬里创造非常有效的冷却效果，但是，这会导致相对较低的衬里温度，从而产生较高的热损失，而且老化、渗透以及结垢也会降低机械防护效果。此外，耐火混凝土并不是保温隔热的最佳材料。热的工件与经冷却的线圈之间存在较大的温度差，这意味着感应线圈在较高温度范围内的热效率并不理想。

西马克艾洛特姆公司的新型 ELO-ICE (感应器概念效率) 系统，由于全新的、优化的隔热措施，可以节省能源和成本，通过减少高达 50% 的热损失，大量节约了费用。

在 ELO-ICE 系统的新开发过程中，面临的挑战是保持工件和衬里之间的温差尽可能低以减少热对流，从而减少水冷感应线圈的热损耗。

所有这些都是通过混合耐火复合系统实现的。该系统由具有细丝形状、并有极高强度的新材料组成。不同的材料也可以结合在一起，以创建一个具有精确协调的尺寸和性能的多层同轴结构。因此，可以实现具有耐磨性能的面向工件的内表面，以及对冷铜线圈的良好保温隔热性能。

西马克艾洛特姆与合作伙伴合作，成功开发了一种感应器衬里：作为预制模铸件，其强度与传统铸造

衬里相似，但壁厚减少，热性能优化。

新开发的 ELO-ICE 系统与传统的模制衬里相比，减少了一半的热损失。因此，对于直径或边长在 80 毫米左右的大截面来说，根据西马克艾洛特姆进行的各种测试，验证了节能效果为 4% ~ 6%，具体取决于工厂的运行情况。

### ELO-ICE 的节能效果

这里以短坯料加热系统的节约情况为例：此系统包含 12 个感应器，每个长度为 1200 毫米。考虑了不同的工件直径，每个工件都在以此为目的设计的感应器中加热。节约值是基于 6000 小时 / 年、三班制运行和仅为 0.10 欧元 / 千瓦时的保守假设电价来计算的。

图 2 显示了一个典型的长度方向上的温度曲线。由于直径范围大，这些曲线在现实中会有很大的不同。可以看出，优化后的衬里表面温度明显高于常规耐火材料衬里的表面温度，这就是热量损失减少的原因。

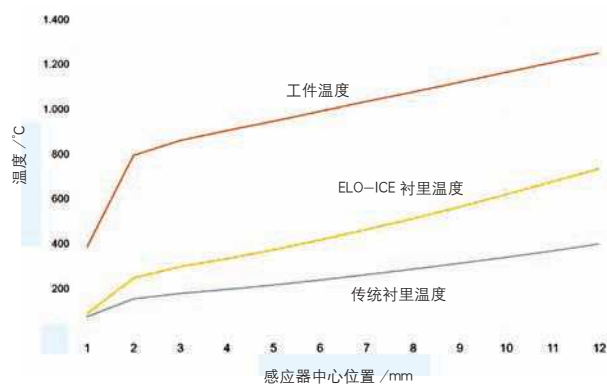


图 2 沿着加热线的温度曲线

正如预期的那样，最大的节能潜力是在高温阶段，对应后部的感应器。

表 1 中的评价区分了整个系统使用新设计时、仅对最后六个感应器进行隔热优化时、以及用 ELO-ICE 感应器替换出口感应器时的不同节能状态。每千瓦时能源价格均为 0.1 欧元，年运行时间 6000 小时，加



表 1 使用 ELO-ICE 系统的潜在节约评估

ELO-ICE	直径 (mm)	60	65	70	80	90	100	120	140	160
	节约的功率 (kW)	66	74	80	97	109	117	148	178	208
	节约的能耗 (kWh/t)	7	7	8	10	9	8	10	9	10
	节约的费用 (€)	0.66	0.74	0.80	0.97	0.87	0.78	0.99	0.89	1.04
	年节约费用 (€)	39719	44362	47992	58146	65351	70335	88939	106958	124693
仅 6 个 ELO-ICE 感应器	直径 (mm)	60	65	70	80	90	100	120	140	160
	节约的功率 (kW)	54	60	65	78	87	95	118	141	163
	节约的能耗 (kWh/t)	7	7	8	10	9	8	10	9	10
	节约的费用 (€)	0.66	0.74	0.80	0.97	0.87	0.78	0.99	0.89	1.04
	年节约费用 (€)	32309	35911	38866	46542	52373	56730	70949	84484	97787
仅最后一个感应器采用 ELO-ICE	直径 (mm)	60	65	70	80	90	100	120	140	160
	节约的功率 (kW)	13	15	16	19	21	23	28	33	38
	节约的能耗 (kWh/t)	7	7	8	10	9	8	10	9	10
	节约的费用 (€)	0.66	0.74	0.80	0.97	0.87	0.78	0.99	0.89	1.04
	年节约费用 (€)	8072	8909	9593	11248	12632	13911	17019	19950	22760

热到 1250°C。从表中数据可知：即便只是优化一个感应器，每年也可以节省 8000 ~ 24000 欧元。

节能的 ELO-ICE 系统对感应器的维护更加友好、快速，这使其更具吸引力：因为它消除了传统耐火混凝土上耗时费力的拆除工作，并排除了对感应器线圈可能造成的损害。这最终减少了生产停机时间和高昂的维修成本。

### ELO-FORGE L (短坯料感应加热)

西马克艾洛特姆已经考虑到锻造行业在短坯料和长棒料感应加热领域对使用全新设计的低维护感应加热系统不断增加的要求。除了在工艺可用性、可靠性、减少循环材料和备件方面的全新概念外，加热系统的

设计也接受了测试。这样做的结果已经被许多客户所信任。图 3 所示的加热系统显示了这一努力的结果。

图 3 最新一代 ELO-FORGE 感应加热系统



新开发的使用导向管的感应器技术经证明使用寿命（磨损部分）超过一年，此项已成为西马克艾洛特姆的产品标准。和在生产条件下清空感应加热系统直至最后一截坯料一样，在 2 分钟的转换时间内完成从一个产品到另一个新产品的切换功能也是西马克艾洛特姆新系统的标准。如之前所述，在发生外部故障时的保温功能也是标准的，可用性经验证高达 99%，并可以通过相应的维护周期来保证。通过相容的标准化减少备件库存是新一代 ELO-FORGE 系列的另一个特点；分区技术和新的面向数据库的软件完善了兼容工业 4.0 的加热系统。

### ELO-BAR(长棒料感应加热系统)

西马克艾洛特姆在感应加热领域进一步发展的重点是 ELO-FORGE 和 ELO-BAR 感应加热系统。在这里，能效和标准化与吸引人的设计一样重要，这体现在加热系统的结构上。

这一发展的结果如图 4 所示，在 Hatebur HM75 卧式压力机前安装了一个最近交付的长棒材加热系统，产能 20 吨/小时，加热最大棒料直径 90 毫米。感应器的概念与 ELO-FORGE L(短坯料感应加热)相对应，这里的重点也是最大限度的标准化和可用性，

图 4 用于 Hatebur HM75 型压机的长棒料感应加热系统



以及易于维护。此外，外围设备也尤为重要，尤其是给料（棒料仓），在这样的大型系统中起着重要的作用。

基于这些数据，西马克艾洛特姆面临的挑战是，在不填充上游棒材库的情况下，必须保证一个小时的生产。由于感应加热系统的长度，还必须提供一个系统完全自动的将已经加热的棒材再次加载。棒材库的容量为 30 吨，如图 5 所示。图左侧是已加热棒料，储存库确保了在压力机出现故障后，在相应的冷却时间后，回退的棒材可以自动返回到加工中。



图 5 容量为 30 吨的棒料库，包含已加热料存储

### 总结与展望

新技术通过使用模块化组件和创新的 iZone 分区技术，使作业者能够进行灵活的生产。

在每个产能中的智能能量分配和基于逐步启动、系统下料以及在故障的情况下保持坯料段温度的最小能耗方式，再结合 ELO-ICE 概念，系统从各方面满足了大规模成形中资源和能效可持续增长的需求。

锻造行业对感应加热系统日益增长的减少二氧化碳排放、高可用性以及减少备件维护的要求，是感应加热系统生产商面临的主要挑战，目前西马克艾洛特姆提出的概念满足了这些要求。FM