

NANMAC 须知

消除传导引入的温度误差

Jacob Nanigian*

Nanmac Corp. Framingham, Mass.

无论是基本的热处理过程控制还是高级热处理过程控制，都需要精确测量温度。接触型温度传感器的精度受校准、响应时间和传导的影响。

校准误差通常可以忽略不计。传感器可以校准到 $\pm 0.25^{\circ}\text{C}$ (0.5°F)精度，在 NIST (National Institute of Standards and Technology)等实验室，可校准到小数点后六位数。在间歇式或连续式应用场合，传感器的响应时间非常重要，但在熔炉应用场合，通常不采用快速间歇式测温方法。然而，熔炉的主要问题在于传导现象，因为这会使测量的温度产生很大的误差。

传导误差的原因

传导误差是由熔炉、熔炉壁和熔炉外环境之间的温度梯度引起的。由于温度传感器通过熔炉壁安装在熔炉里，所以它会形成一条传导路径，致使热量从熔炉内部传到外部来，从而使被测温度产生误差。熔炉内加热不均、流通不畅和负荷分布不均匀也会产生温度梯度。

为了精确测量温度，温度传感器必须：

- 在被测温度范围内具备可再生的稳定校准特性（温度对电动势和温度对电阻）；
- 不影响介质的局部温度，且
- 准确跟踪温度变化，响应时间足够快。

图 1 表示加热室壁截面在任何时候的温度分布曲线。在此图中，壁采用同质材料制成，例如钢材或陶瓷。如果壁用几种材料制成，例如钢材、绝缘材料加石墨或陶瓷，每种材料都有各自的温度分布曲线。

从图 1 中我们可以观察到：

- 热量始终从较热的介质流向较冷的介质。
- 壁较热的一面不断吸收热能，而较冷的一面则将热量释放到冷却介质（空气、水等）中。在稳态条件下，吸收的热量必须等于释放的热量，否则壁会熔化。
- 每个接合面的温度分布曲线接近指数规律。
- 任何一个区域的截面均不存在恒温。恒温区称为等温线，只出现在与热流平面平行的地方。

在熔炉壁上钻一个合适的孔，将热电偶安装在里面。热电偶穿过无数等温线，在热区到冷区之间建立一个热传导路径。热电偶（测量自身温度）不断被此热传导过程冷却。

热电偶的输出始终与进入热电偶结的热量和通过热电偶套管传导到熔炉外壳和外部环境中的热量达到平衡，这个过程叫做杆效应。这种误差受导线热传导、绝缘材料、热电偶护套或套管的影响。实际上不能预测此误差的大小，即使你可以确定特定温度下的误差，它也会随温度变化而变，因为所有材料的导热性随温度变化而变。

因此，热处理的工的目标是在熔炉内安装一个热电偶，使传感头始终与我们感兴趣的温度保持平衡，从而精确测量温度。在理想情况下，传感器应该是绝热探头，即它与壁之间绝热。

传导测试

我们设计了一个实验，可以确定杆效应产生的误差大小。我们采用一个浸入冷水池中的热水容器。热水通过内部加热器保持温度不变，而冷水通过循环泵和散热器保持温度不变。用精度为 $\pm 0.25^{\circ}\text{C}$ (0.5°F)的实验室温度计连续监控热水温度和冷水池温度。碳钢热水箱的外径为 12 cm (5 英寸)，壁厚 1 cm (0.5 英寸)。图 2 是实验装置示意图。

热水箱的壁内安装了四个热电偶，与水箱内表面齐平，每个热电偶有不同的热电偶结。因此，

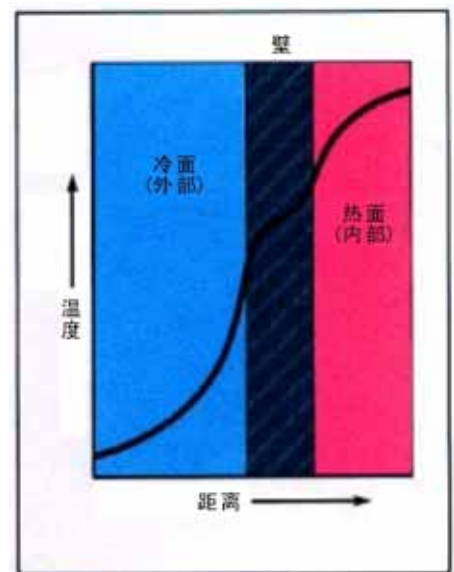


图1：热壁截面温度分布曲线

所有热电偶均直接接触热水。所有热电偶均有铁/铜镍合金元件，其输出用同一个仪表监控，仪表上有热电偶选择开关。此外，所有热电偶均采用同一批导线，电阻值相同。

四种热电偶结是：

T1—焊珠外露式热电偶结

T2—接地热电偶结：护套焊接封闭，热电偶结与护套有电接触。

T3—绝缘热电偶结：护套焊接封闭，但热电偶结与护套有电绝缘。所有 RTD 和温度调节器采用类似的绝缘热电偶结设计。传感元件有电绝缘，然后封装在金属护套内，护套保护传感元件免受侵蚀、氧化、腐蚀和化学品等环境的损害。

此类保护措施的成本是测量精度随之降低。

T4—直角热电偶结：非屏蔽带状焊接热电偶结。

T1、T2 和 T3 是常规热电偶结(图 2)，而 T4 是采用带状元件的直角热电偶结(图 3)。

热电偶分 16 个阶段测量温度。当热水温度保持在 83°C (181°F)，冷水温度保持在 38°C (101°F)时，热电偶 T1 的读数为 78°C (173°F)，T2 的读数为 69°C (156°F)，T3 的读数为 53°C (128°F)，而直角带状热电偶的读数为 83°C (181°F)。

在为期两天的实验过程中，一直保持着 40-50°C (70-88°F)的温度梯度。(实验地点为 ISA 展览期间的一个展厅。)梯度变化是由下列几个因素引起的：简单的热交换器——循环水泵和小散热器，不能很好地控制冷却系统；当白天大厅里的环境温度上升时，冷水池的温度随之上升，从而对热交换系统造成额外的负担。注意无论是测量热水和冷水之间的温度变化绝对值还是百分比，绝缘热电偶结(T3)的误差始终是最大的。

直角带状传感器的热电偶结厚度为 0.07 mm (0.003 英寸)。热电偶结附近的延长线也是带状的，与传感结位于同一平面内，长度至少是热电偶结厚度的 20 倍。因此，传感头和相邻的带状元件均与热流平面平行，由于热电偶结两面的带状元件同时受热，杆效应不会导致明显的误差。

为了将所有传感器中杆效应所产生的误差降到最低限度，传感头必须保持 20:1 的比例。例如 3 mm (0.125 英寸) 不锈钢圆探头必须安装在熔炉内，与热流平面平行的长度为 6 cm (2.5 英寸)。可采用下列方法之一实现这一目的：将 6 cm (2.5 英寸) 长的探头在其尖端弯曲 90 度，或者调整安装位置，使探头平行于热流平面。

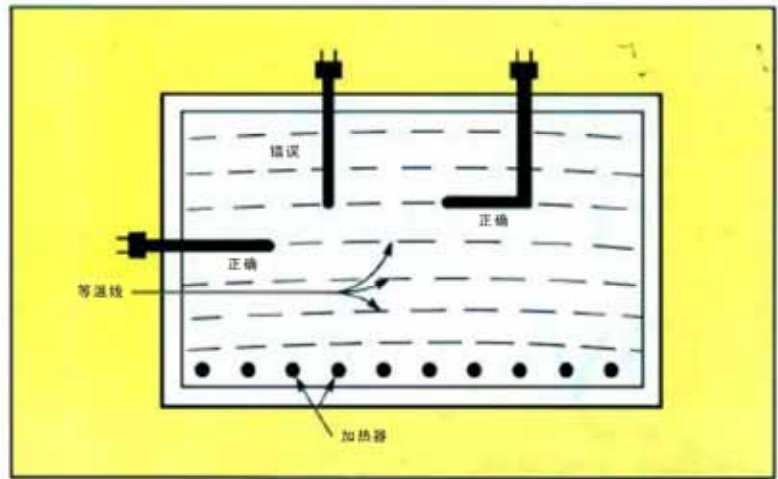


图4：加热器在底部的熔炉

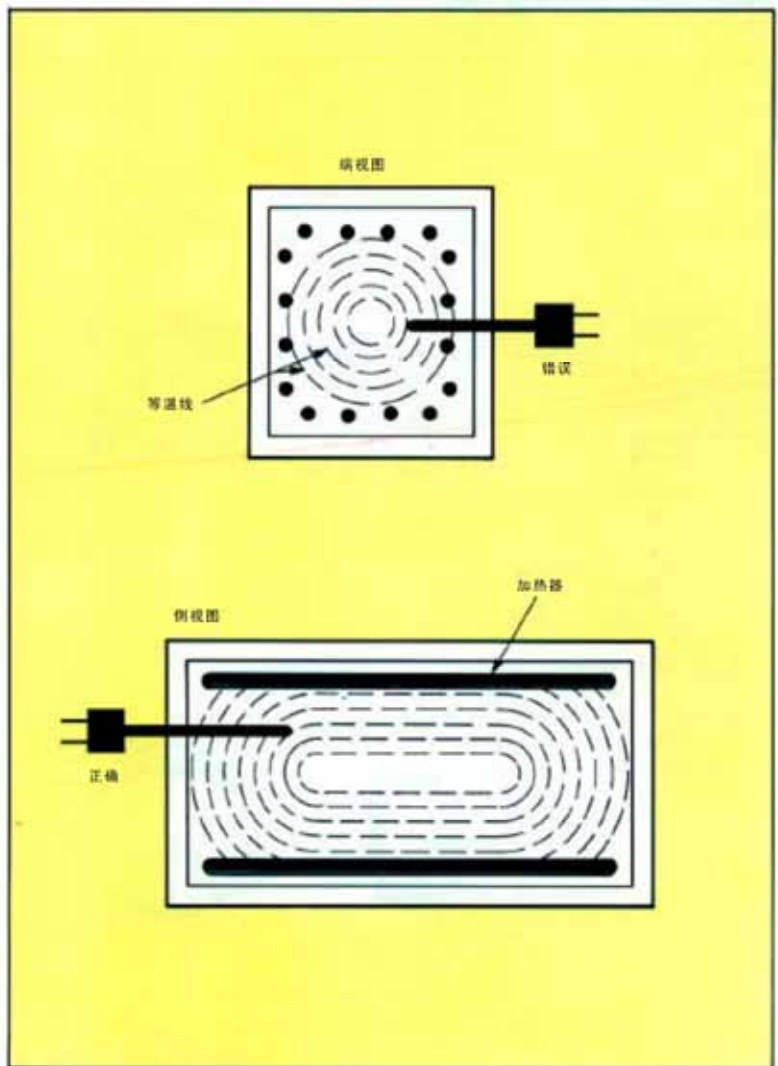


图5：所有壁均有加热器的熔炉

图 4 是加热元件位于底部的熔炉示意图，等温线用虚线表示。图 5 是类似的示意图，表示各个面都有加热元件的熔炉的等温线。在任何情况下，均要求热电偶的安装方向与等温线平行，此段平行长度为探头直径的 20 倍。上述实验中所用的直角热电偶可直接安装在熔炉内，无需弯曲 90 度，因为探头已经是弯曲的了。

**ASM International 的成员*