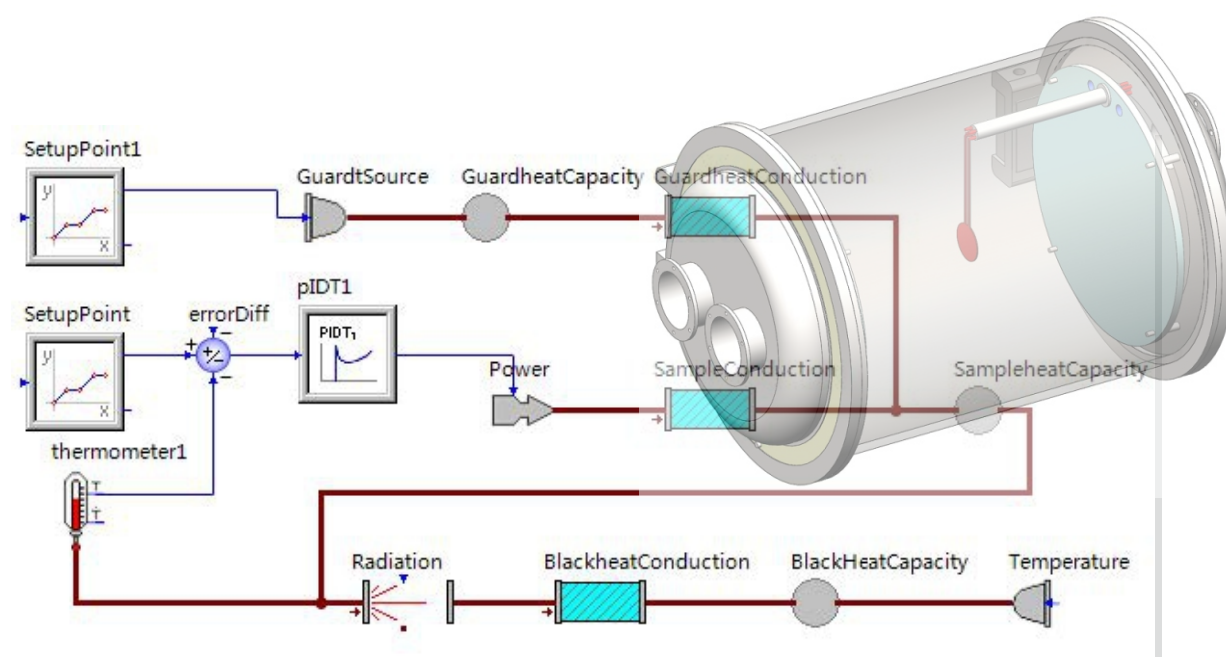


稳态量热法总半球发射率测试的 SimulationX 热仿真研究

SIMULATIONX Thermal Simulation Research on Steady State Calorimetry Total Hemisphere Emissivity Test



摘要：为了研究总半球发射率测试方法，特别是对间接通电加热式量热法总半球发射率测试进行更深入研究，本文采用 SimulationX 软件对所建立的测试模型进行了仿真计算，从而获得了样品温度与加热功率之间的量化关系，明确了测试过程中漏热对测量误差的影响程度，从而可有效指导总半球发射率测试装置的设计。

1. 热仿真目的

在总半球发射率测试设备的设计前期开展热仿真计算，拟达到以下几方面的目的：

- (1) 对总半球发射率测试过程中的加热方式和整个测试过程有较直观的认识。
- (2) 获得样品温度与加热功率的量化关系，由此确定真空水冷腔体冷却所需的最大冷却功率，以帮助水冷结构设计的制冷机选型。
- (3) 确定护热温差所引起的漏热对发射率测量精度的影响程度。

2. 样品材料

样品材料选择镍基高温合金 Inconel 600，这主要是因为 Inconel 600 是常用且研究比较深入的材料，有比较齐全的热物理性能参数（热导率、比热容、热扩散率和密度）随温度变化数据，这就非常便于热仿真计算中物性参数的准确设置。

3. 仿真模型

SimulationX 是一款分析评价技术系统内各部件相互作用的权威软件，是多学科领域建模、仿真和分析的通用 CAE 工具，并具有强大标准元件库。对于间接通电加热式稳态量热法总半球发射率测量方法的建模，会涉及到热学、电学和自动化 PID 控制多个领域，因此采用 SimulationX 软件进行建模和计算分析。

为了对测试方法进行深入研究，建立了两个仿真模型。一个是理想情况下的样品绝热时（样品热量无损失）的仿真模型，另一个是实际情况下样品有引线热损时的仿真模型，由此来研究两种状态下的加热过程和热损所带来的误差影响。

3.1. 绝热模型

采用 SimulationX 软件建立的绝热仿真如图 3-1 所示。由 PID 控制的热量加热被测样品，并按照不同设定值使样品达到不同设定温度，被测样品同时与作为黑体的等温量热计进行辐射热交换。在测试过程中，假设被测样品只有热辐射一种传热形式，样品加热引线上无导热热损，样品处于绝热状态。

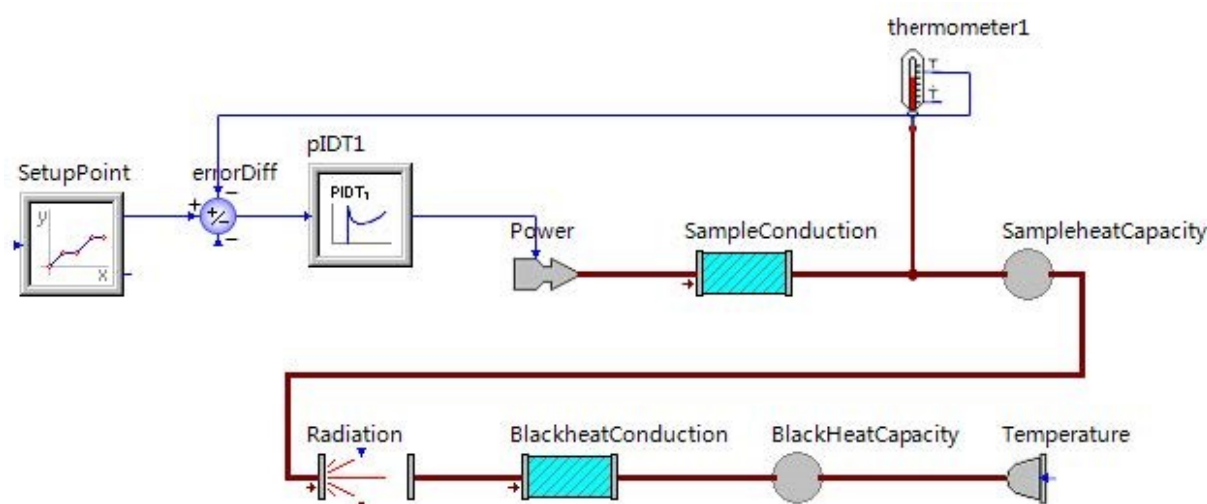


图 3-1 绝热条件下 SimulationX 仿真模型

为了计算出样品达到最高温度 1200℃时所需要的最大功率，设置样品表面的总半球发射率为 1。对于 100mm×100mm×6mm 规格的样品尺寸进行计算，结果如图 3-2 所示。

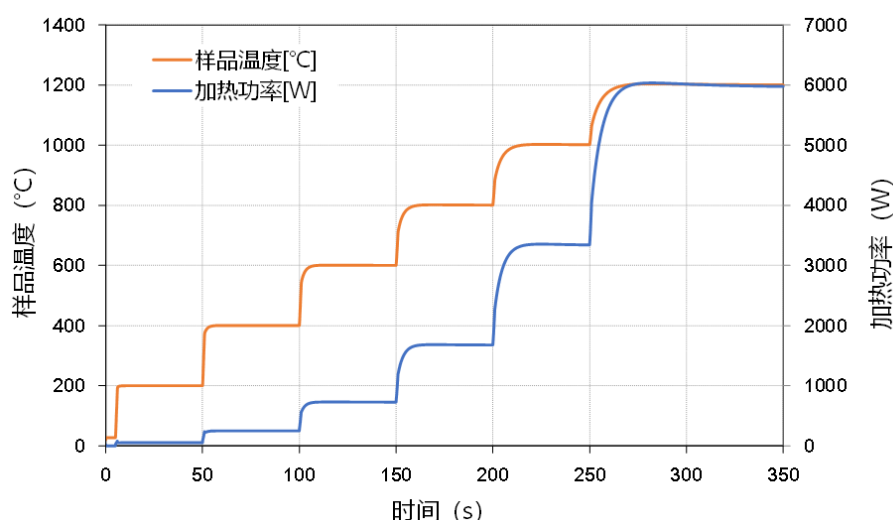


图 3-2 规格 100mm×100mm×6mm 样品加热温度和功率计算结果

按照图 3-2 所示的计算结果，可以采用发热率计算公式计算得到不同温度下的总半球发射率变化曲线，如图 3-3 所示。

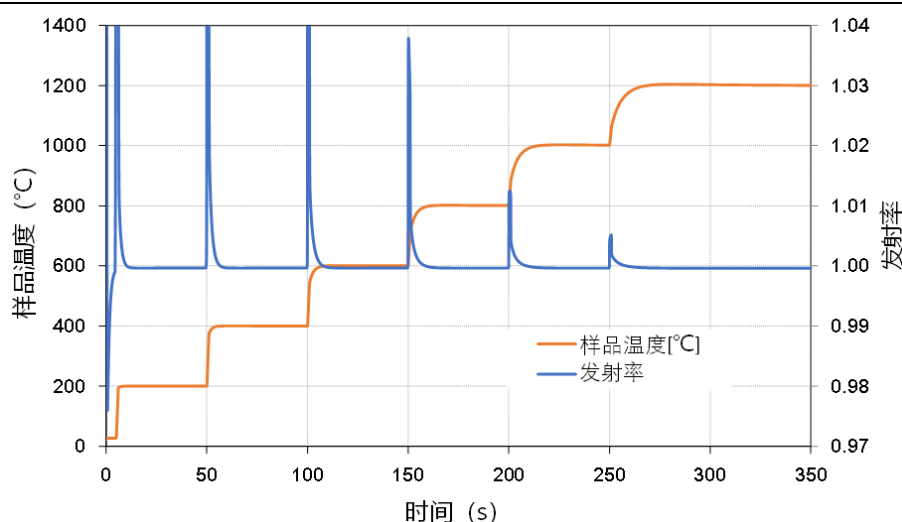


图 3-3 规格 100mm×100mm×6mm 样品不同加热温度下的发射率计算结果

从上述计算结果可以看出，发射率仿真结果与理论值无偏差，证明了所建模型是准确的。另外还可以看出，在间隔 200°C 的不同设定温度点上，随着加热温度的增加，加热功率几乎成倍的增加。如在 1000°C 时，加热功率 3.3kW，如果采用低压大电流电源，低压电压为 30V 时，直流电压则会至少 100A，那么所对应的电极引线会较粗，这势必会带来较大的引线导热热损。为避免加热引线导热热损则需要增加护热加热，将靠近样品处的加热导线温度也要保持与样品温度一直，这势必会给高温样品热辐射带来严重影响，相当于大幅度增加了样品辐射面积，从而给测量带来严重误差。

为避免大的加热功率，减小电极引线的粗细，将模型中样品缩小到 50mm×50mm×3mm，测试结果如图 3-4 和图 3-5 所示。

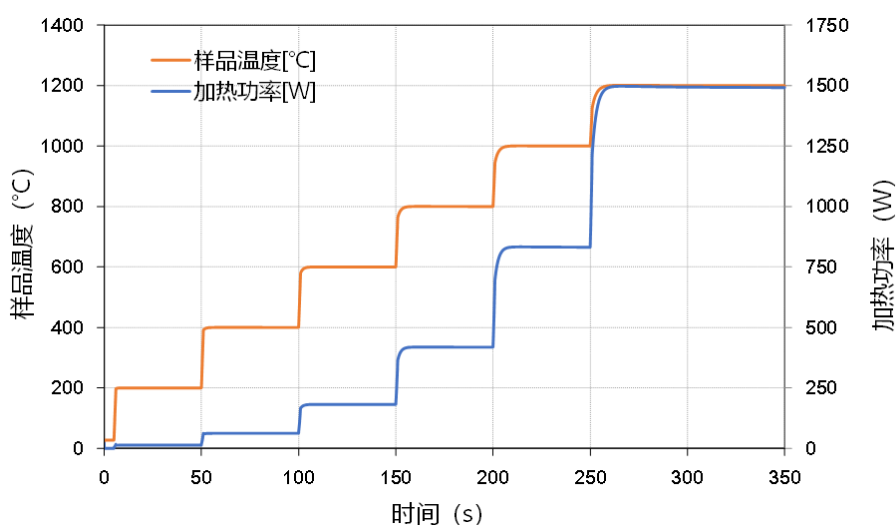


图 3-4 规格 50mm×50mm×3mm 样品加热温度和功率计算结果

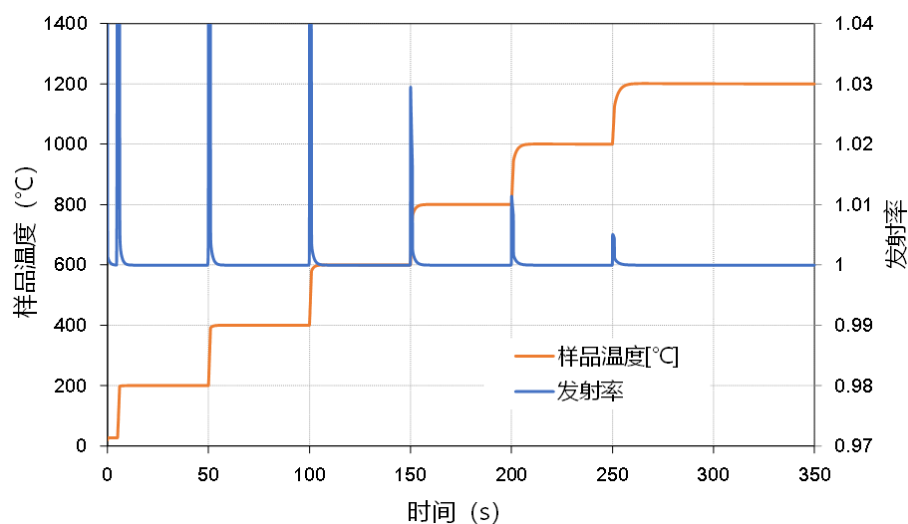


图 3-5 规格 50mm×50mm×3mm 样品不同加热温度下的发射率计算结果

从图 3-4 和图 3-5 所示结果可以看出，样品尺寸缩小后，在最高温度 1200°C 时的最大加热功率降低到了四分之一，约 1.5kW。

3.2. 护热模型

采用 SimulationX 软件建立的护热仿真如图 3-6 所示。在护热模型中，在原有 PID 控制加热被测样品（规格 50mm×50mm×3mm）的基础上，增加一路 PID 护热加热回路，控制护热回路温度始终跟踪样品温度变化。在理想情况下，护热温度要与样品温度完全相同，如此这两回路之间存在温差，则被测样品就会产生热损。

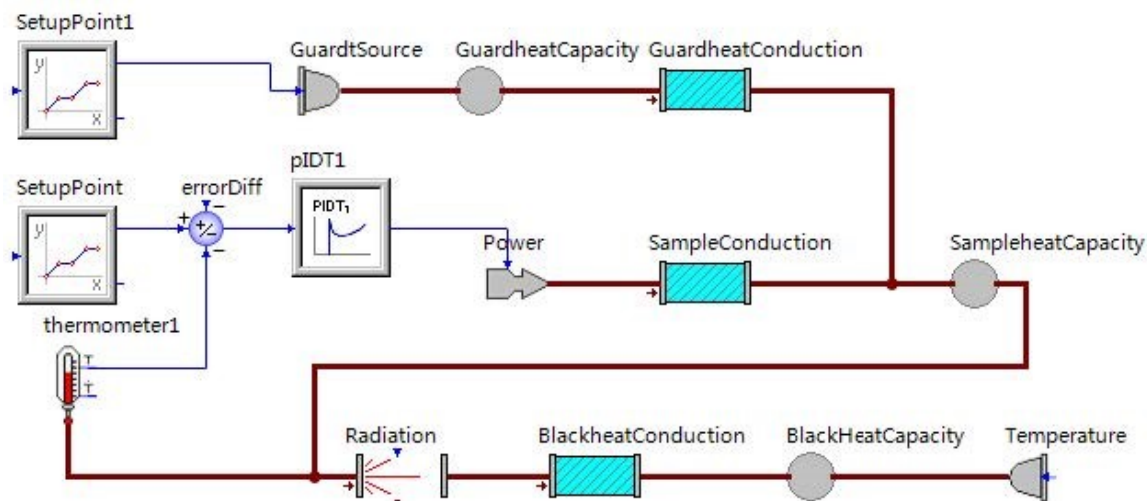


图 3-6 护热条件下 SimulationX 仿真模型

在护热模型计算中，样品发射率设置为 1，被测样品温度变化范围还是设置为 200°C ~1200°C，而护热温度总是比样品温度低 1%，由此来计算热损对发射率测量的影响，计算

结果如图 3-7 和图 3-8 所示。当设置样品发射率为 0.5 时，发射率测量结果如图 3-9 所示。

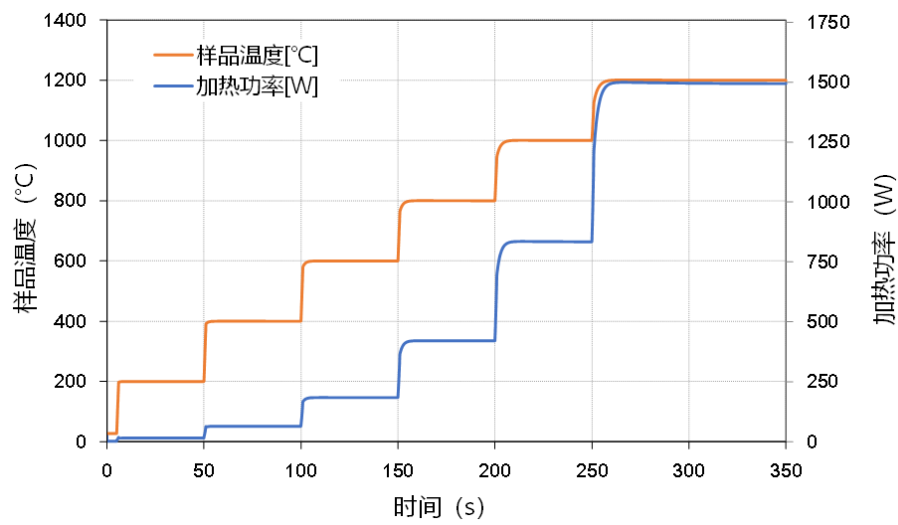


图 3-7 发射率为 1 时护热模型的加热温度和功率计算结果

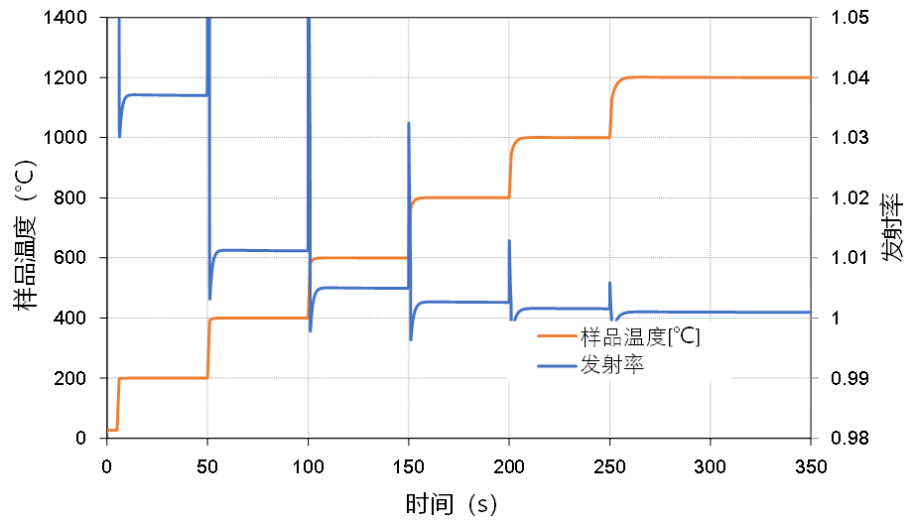


图 3-8 发射率为 1 时护热模型不同加热温度下的发射率计算结果

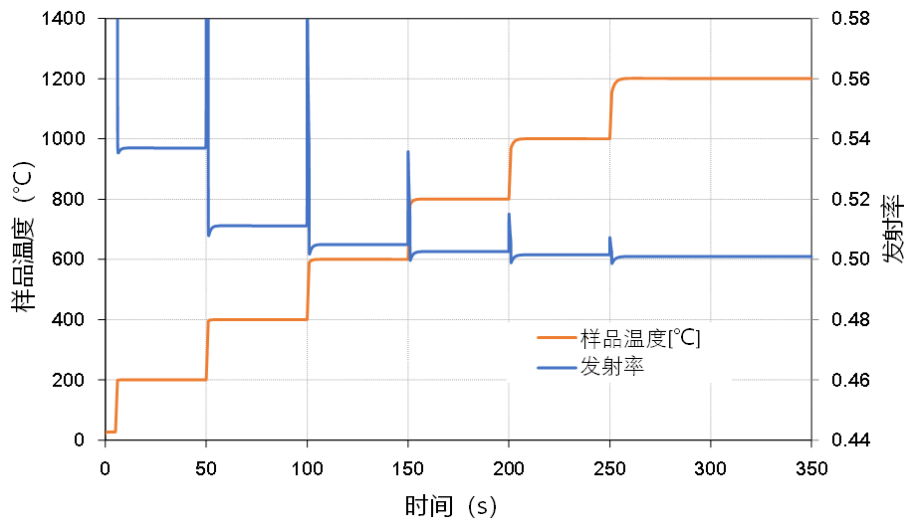


图 3-9 发射率为 0.5 时护热模型不同加热温度下的发射率计算结果

从上述测试结果可以看出，护热控制过程中 1%温差所造成的漏热，对样品加热功率的大小影响不大，但对发射率测量有影响，这种影响在较低温度段非常明显，并且对较低发射率样品的测量影响也较严重。

从图 3-8 可以看出，当样品发射率为 1 时，200℃时的发射率测量结果误差最大，相对误差接近 4%，然后随着样品温度的升高，误差急剧减小。由此可见在较低温度范围内，漏热在样品热辐射能量中所占的比重较大，从而造成发射率测量误差较大。随着样品温度的升高，漏热所占比重快速减小，从而发射率测量误差也快速减小。

从图 3-9 可以看出，当样品发射率为 0.5 时，同样是 200℃时的发射率测量结果误差最大，相对误差放大到了 8%左右，同样随着样品温度升高，误差急剧减小。由此可见，对于低发射率的测量，漏热会更严重的影响测量精度。

4. 总结

通过 SimulationX 软件建立了绝热和护热两种总半球发射率测量仿真模型，并在不同温度下来计算得到相应的加热功率和样品温度变化曲线，最终获得加热功率变化规律和发射率测量结果。通过仿真计算，得出以下结论：

(1) 间接式通电加热稳态量热法测量总半球发射率过程中，为达到 1200℃的最高温度，如果采用低压大电流加热方式，则需要较大的加热功率，并需要较粗的加热电极，这势必会给测试模型的准确性带来严重影响，并需要添加额外的护热装置，由此带来整个测试装置的复杂性和制造难度。

(2) 护热装置要求具有一定的温度跟踪精度以确保测试模型尽量接近绝热状态，温度跟踪精度对较低温度区间的样品发射率测量有较大影响，而且样品发射率越小，这种影响会急剧放大。

(3) 在存在漏热情况下，测量值会比实际值偏大。在存在增热情况下，测量值会比实际值偏小。