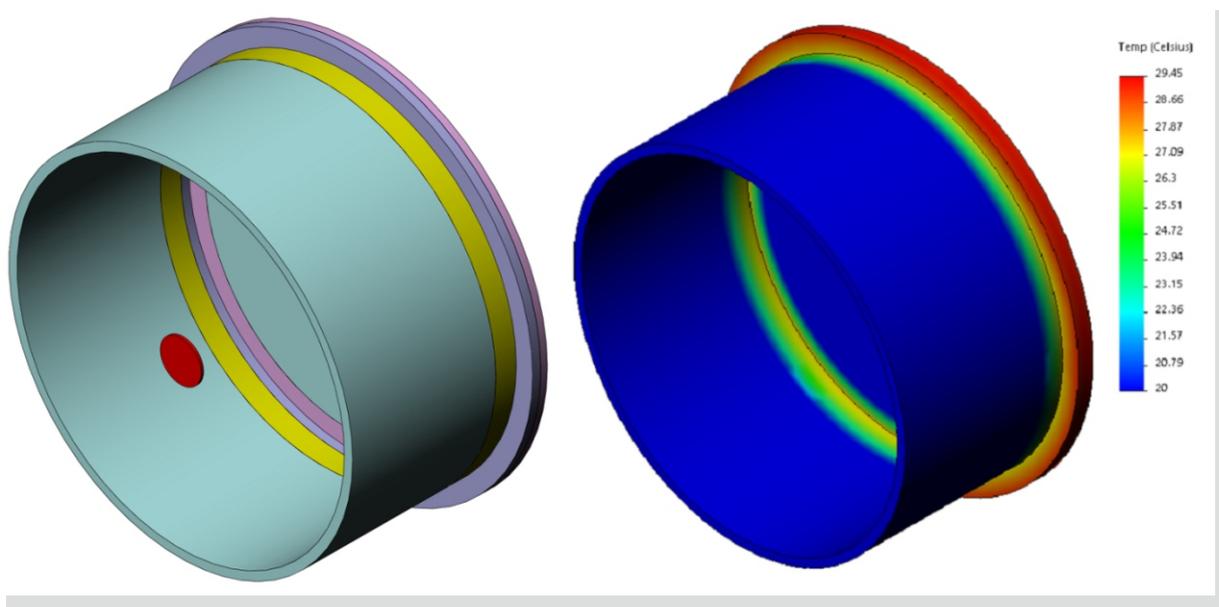


# 高温半球发射率测量装置真空腔体 温度均匀性的有限元热仿真分析

Finite Element Thermal Simulation Analysis of the Temperature  
Uniformity of the Vacuum Chamber of the High-Temperature  
Hemispheric Emissivity Measurement Device



摘要：在高温半球发射率测量装置中，真空腔体温度均匀性是保证半球发射率测量精度和测试设备安全运行的重要技术参数。本文介绍了采用 SolidWorks 软件对水冷真空腔体上各处法兰温度分布的有限元计算过程和获得的结果，以指导确定真空腔体设计参数和制造工艺的确定。

## 1. 问题的提出

在采用稳态量热法测量材料高温半球发射率过程中，要求被测样品处于高真空环境中，作为量热计的真空腔体始终恒定在较低温度（如水温或液氮温度），真空腔体内表面要保持较高的发射率数值，从而保证作为量热计的真空腔体是一个黑体能吸收样品辐射出的所有热量。

在高温半球发射率测量装置中，真空腔体的冷却和温度控制方式是在真空腔壁内部布置流道让冷却介质（水或液氮）按照一定方式进行流动，并由此带走腔壁吸收的热量并使得腔壁温度始终恒定。但由于真空腔体上还布置有各种法兰（如引线法兰、抽气法兰和炉门法兰等），这使得真空腔壁内部流道就要绕开这些法兰，造成冷却液并不能直接冷却到这些部件，这些法兰吸收和积累的热量就需要通过法兰材料自身的热传导方式将热量传递给冷却液，由此往往会在这些法兰部件上形成比真空腔体其他位置更高的温度。为了保证高温半球发射率测量装置的安全性和测量准确性，在设计过程中需要准确了解这些法兰处的温度分布并进行优化。

本文将介绍水冷真空腔体上各处法兰温度分布的计算过程和获得的结果，以指导确定真空腔体的具体参数和制造工艺设计。

## 2. 热仿真模型

### 2.1. 常规模型

高温半球发射率测量装置的主要结构是一个卧式水冷真空腔体，双侧开门。真空腔体的外径为 840mm，长度为 800mm，两侧腔门直径为 920mm。腔体和腔门都为双层不锈钢结构，中间布置冷却水流道，腔体和腔门的总壁厚都为 20mm，腔体和腔门分别独立水冷。被测样品悬挂在真空腔体的中心位置，最大样品尺寸为直径 100mm×12mm。

针对上述规格尺寸的高温半球发射率测量装置建立热仿真模型，建模和仿真计算采用 SOLIDWORKS 软件。为了简化计算工作量，针对此对称结构的真空腔体，在一半真空腔体的基础上建立热仿真模型，如图 2-1 所示。

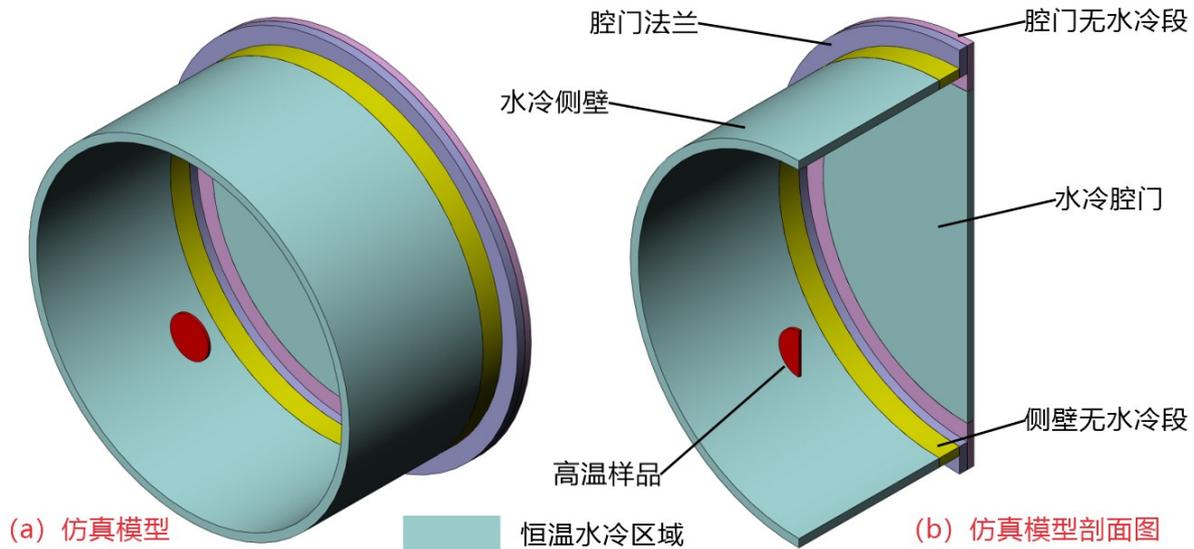


图 2-1 仿真模型及其剖面图

如图 2-1 所示，在热仿真建模中做了以下几方面的设计假设：

(1) 对于外径 840mm、长度 400mm、壁厚 20mm 的一半真空腔体，假设水流道直接覆盖的区域长度为 350mm，剩余 50mm 为“侧壁无水冷段”，此段上的热量完全靠不锈钢材质的导热传递给冷却液。

(2) 同样，对于外径 920mm、厚度 20mm 的腔门，假设水流道直接覆盖腔门的中心区域，此水冷区域直径为 720mm，剩余宽度为 100mm 的实心圆环为“腔门的无水冷段”，此段上的热量完全靠不锈钢材质的导热传递给冷却液。

(3) 真空腔体和腔门之间设计有一个腔门法兰，用于放置密封圈和安装腔门转动合页。此腔门法兰无任何水冷，热仿真模型设计为宽度为 100mm、外径为 920mm 的圆环。

(4) 模型中样品尺寸为直径 100mm、厚度 6mm 的圆片，为实际最大样品尺寸的一半。为计算出样品最大辐射能力时对无水冷部件的影响程度，样品温度设置为最高温度 1200℃，样品热辐射面（表面和侧面）的半球发射率设置为 1，样品背面为绝热面。

(5) 整个真空腔体和腔门的内壁，都涂有高发射率黑色涂料，在热模型中它们的表面发射率也都设置为 1。水冷侧壁和水冷腔门温度设置为水冷温度 20℃。模型中所有材质

设计为 304 不锈钢, 由于真空腔体自身温度不会处于高温状态, 所以模型中不锈钢的热物性能参数都采用常温数据。

(6) 对于高温半球发射率测量装置而言, 测试过程中真空腔体内部始终为 0.001Pa 量级的高真空, 因此真空腔体内部的传热形式设定为只有辐射传热, 样品上的热量只通过热辐射形式传递给侧壁、法兰和腔门。

## 2.2. 简化模型

为进一步减小网格尺寸和提高热仿真精度, 将上述模型进行了简化, 即去掉占用面积最大的水冷部件 (水冷侧壁和水冷腔门), 将于水冷侧壁和水冷腔门接触部件的接触面温度设定为 20°C 恒温。由此得到的简化后模型如图 2-2 所示, 这种简化后的仿真模型只考虑高温样品对无水冷部件的辐射加热, 最终得到无水冷部件在 1200°C 高温样品辐照下达到的最高温度。

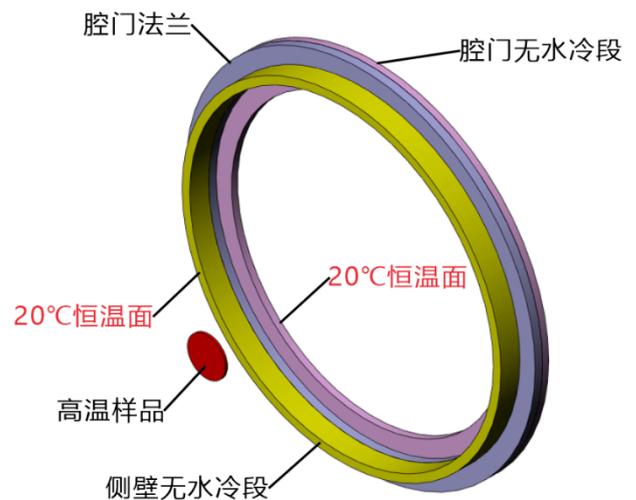


图 2-2 简化后热仿真模型

## 2.3. 增加引线法兰后的模型

在实际高温半球发射率测量装置中, 在水冷腔门上安装有引线法兰和抽气法兰, 而循环水冷直接接触及这些法兰, 在 1200°C 高温样品辐照时会使得这些法兰温度升高。为了解这些法兰在高温辐照时温度升高的最大温度, 专门在上述第二种简化模型的基础上增加了两个引线法兰, 如图 2-3 所示。同样, 在此模型中, 去掉了面积最大的水冷部件, 但水冷接触面处同样需要设定 20°C 恒温。

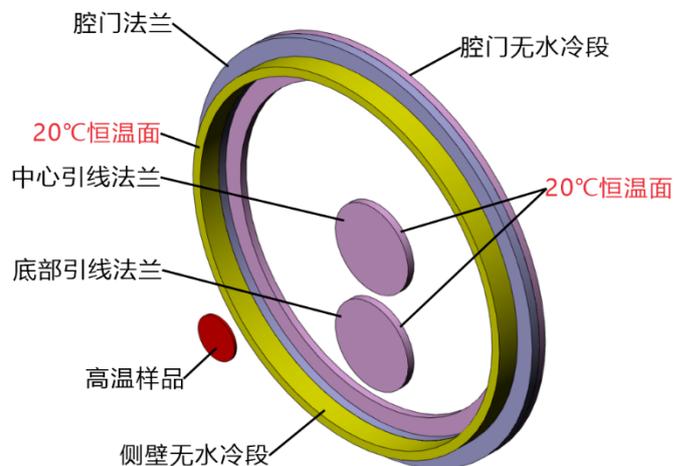


图 2-3 增加引线法兰后的简化模型

## 3. 热仿真结果

对于上述三种仿真模型分别进行了有限元计算。

### 3.1. 常规模型仿真结果

对于图 2-1 所示的第一种常规模型，采用稳态形式进行了有限元计算，有限元网格形成则采用标准网格和自动过渡形式，最终热仿真结果如图 3-1 所示。从图 3-1 所示仿真结果可以看出，水冷区域温度始终处于  $20^{\circ}\text{C}$ ，无水冷区域会有一定温升，温升最高处位于腔门和法兰的边缘位置，最高温度为  $29.5^{\circ}\text{C}$ ，即温度比水冷温度升高了近  $10^{\circ}\text{C}$ 。

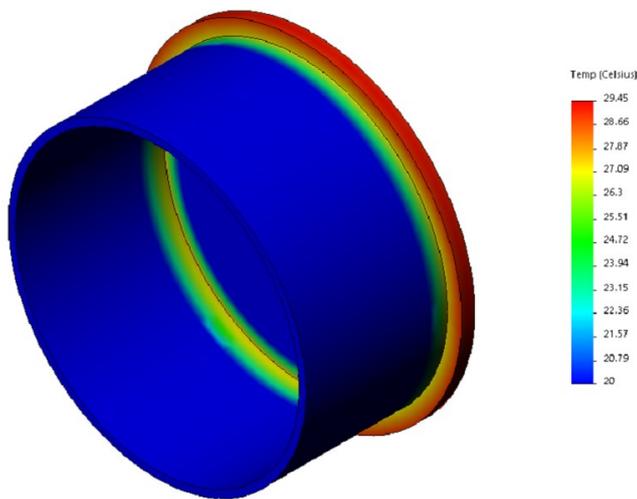


图 3-1 常规模型仿真结果

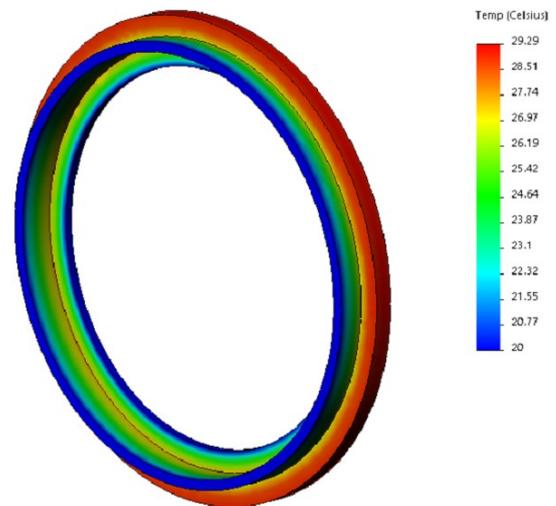


图 3-2 简化模型仿真结果

### 3.2. 简化模型仿真结果

对于图 2-2 所示的第二种仿真模型，采用稳态形式进行了有限元计算，有限元网格形成则采用基于曲率的网格，最大单元大小和最小单元大小都设置为  $20\text{mm}$ ，最终热仿真结果如图 3-2 所示。从图 3-2 所示仿真结果可以看出，水冷区域接触面温度始终处于  $20^{\circ}\text{C}$ ，无水冷区域会有一定温升，温升最高处同样位于腔门和法兰的边缘位置，最高温度为  $29.3^{\circ}\text{C}$ ，即温度比水冷温度升高不到  $10^{\circ}\text{C}$ ，与常规模型仿真结果相差  $0.2^{\circ}\text{C}$ 。

### 3.3. 增加引线法兰后的简化模型仿真结果

对于图 2-3 所示的第三种仿真模型，采用稳态形式的有限元计算，有限元网格形成则

采用基于曲率的网格，最大单元大小和最小单元大小都设置为 20mm，最终热仿真结果如图 3-3 所示。

从图 3-3 所示仿真结果可以看出，水冷区域接触面温度始终处于 20°C，无水冷区域会有温升。其中腔门法兰和腔门边缘处温升还是与简化模型结果一致，最高温度为 29.2°C。增加引线法兰后，中心引线法兰圆心处温度最高，达到了 55.5°C，温升达到了 25.5°C；而底部引线法兰中心处温度最高为 42.4°C，温升达到了 22.4°C。由此可见，腔门上的引线法兰会给真空腔体的整体温度均匀性带来严重影响，这就要求在真空腔体法兰的设计中设法规避这种现象。

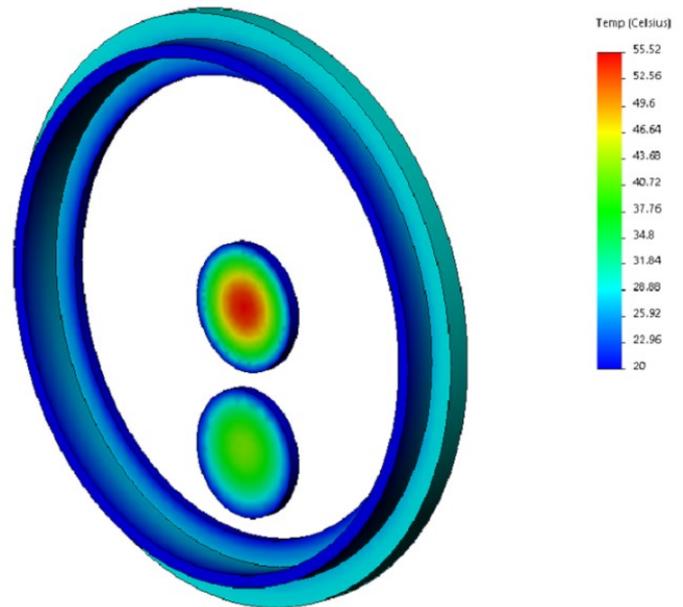


图 3-3 增加引线法兰后的模型仿真结果

## 4. 总结

通过对高温半球发射率测量装置中真空腔体的建模，针对不同模型进行了有限元热仿真计算，得到以下结论：

(1) 对于现有尺寸和结构形式的双侧开门卧式真空腔体，如果冷却循环水控制在 20°C 时，样品温度处于高温 1200°C，腔门边缘处无水冷区域内的最高温度不会超过 30°C，此 10°C 的温升可以忽略不计，对设备的测试和安全运行没有影响。

(2) 为了保证测量装置的加工和运行的便利性，会在两个腔门上布置各种引线法兰和抽气法兰。如果这些法兰的无水冷区域为直径 200mm 尺寸，那么距离高温 1200°C 样品最近处的法兰中心温度会达到近 56°C，其他位置处的法兰中心温度也会达到 42°C 左右，这将严重影响真空腔壁温度的整体均匀性，因此在设计和制造中必须设法解决此问题。