

传热学三类边界条件背后的物理意义 及其在热物性测量中的应用

Physical Significance Behind Three Types of Boundary Conditions of Heat Transfer and Its Application In Thermophysical Properties Measurements

摘要：针对传热学三类边界条件目前常见的定义，本文从导热、对流和辐射三种传热机理出发介绍了三类边界条件的物理意义及其拓展。另外，本文重点介绍了三类边界条件更直观的温度形式的定义，以及这些边界条件温度形式在热物性测量中的实际应用。

1. 传热学三类边界条件的常规定义

在常规条件下，固体物体的热传递有导热、对流和辐射三种形式。依据热传递的这三种基本形式，现有教科书和网络资料对物体传热过程中的三类边界条件定义，可以归纳为：

- (1) 第一类边界条件：规定了物体边界上的温度值。
- (2) 第二类边界条件：规定了物体边界上的热流密度（也称之为热通量）。
- (3) 第三类边界条件：规定了物体边界与周围流体间的表面传热系数和周围流体的温度。

三类边界条件下物体内部的温度变化和传热形式如图1所示。

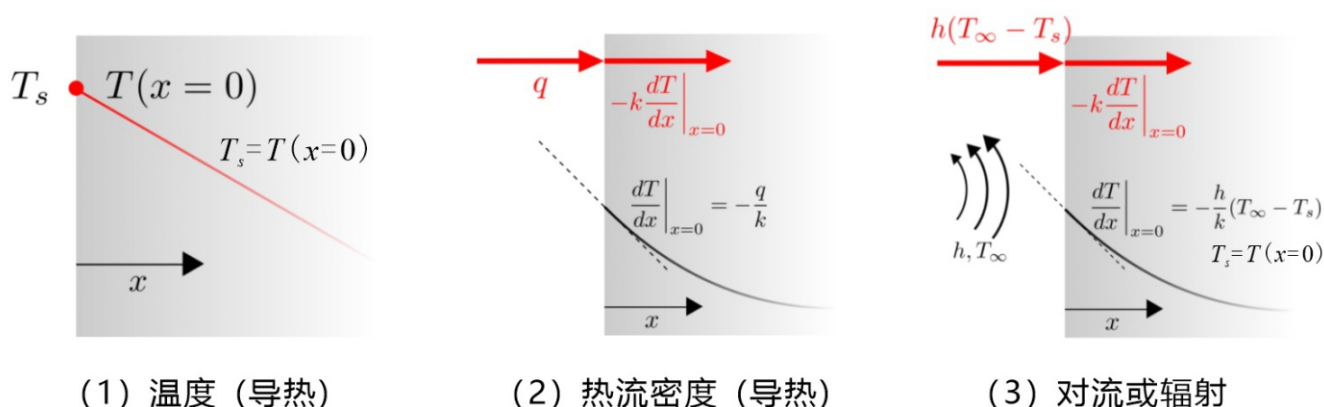


图1 物体的三类边界条件及其内部温度变化形式

对于第一类边界条件很容易理解，就是物体在边界处的内外温度相同。

同样，依据能量守恒定律，对于第二类边界条件，则是物体在边界处的热流密度相同，即进入物体表面单位面积上的热量等于在物体内部（边界内）单位面积上传导的热量。由于物体中进入热量并进行热传导，自然会形成温度梯度，这样就会与物体的导热系数发生关系，而这种热流密度与导热系数之间的关系则在很多热计算和导热系数测量中得到应用。

从图1所示的三类边界条件可知，第一和第二类边界条件实际上是对物体导热传热时的描述，而第三类边界条件是对辐射或对流传热时的描述。这里之所以将辐射与对流归为一起，是因为辐射传热可以进行线性化处理近似为对流形式。

当有流体通过或热源辐照物体边界，会使用对流或辐射边界条件，这在许多热工程应用中非常普遍，如散热器、热交换器、发动机和涡轮机等，这种第三类边界条件也会常被用来在对流和辐射条件下对物体的换热系数和热辐射系数进行测量。

2. 传热学三类边界条件的温度形式定义

在传热学的实际应用中，无论是哪一种边界条件的实现和测量，最基本、最简单也是最直观的是物体边界的温度变化。因此，我们就以温度形式来对这三种边界条件进行说明和补充。

(1) 第一类边界条件

当物体在恒定的介质温度 ($T=\text{常数}$) 条件下进行加热时，物体表面温度随时间变化是一条直线，如图2所示，这一类加热（或冷却）的边界条件就是第一类边界条件，也称之为第一类正规工况。

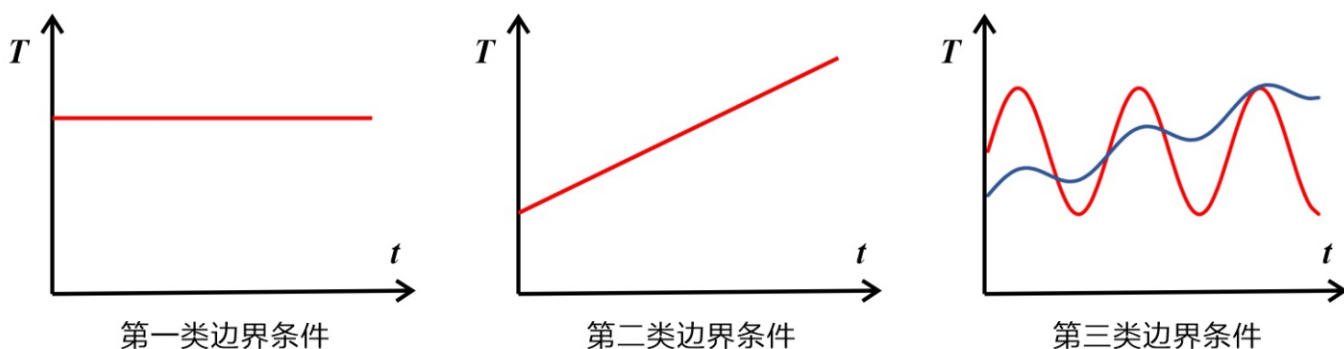


图2 以温度形式表达的三类边界条件示意图

(2) 第二类边界条件

如果介质温度按线性规律变化，物体以恒定的速率被加热或冷却，或者物体是以恒定的热流加热或冷却，此时物体内部任一点的温度是时间的线性函数，如图2所示，这就是第二类边界条件，也称之为第二类正规工况。

在第二类边界条件下，经过短暂的初始时间后，物体内部任意点温度会呈线性变化，这使得物体内部任意两点之间的温差始终保持不变，这种动态形式称之为准稳态，因此第二类边界条件也称为准稳态边界条件或准稳态工况。

由于第二类边界条件的这种准稳态特性以及简便易操作，只需对物体进行线性加热或冷却就可实现，从而使得这类准稳态边界条件在热物性测试中得到较多应用。通过对被测样品加载恒定的升降温速率，理论上可用于测量任意温度范围内的高低温热物理性能参数，如ASTM E2584量热计法。这种方法也常被用于各种热分析仪器，如差热量热仪（DTA）、差热扫描量热仪（DSC）和绝热量热仪等。

(3) 第三类边界条件

常规定义的第三类边界条件，是对实际对流和辐射传热的一种描述，但在传热性能试验测试中较难实现。这是由于第三类边界条件的实验模拟，很难获得稳定的对流环境，特别是实现高低温对流环境的准确控制更为复杂和困难。

为此，可以将第三类边界条件同样转换成温度形式，温度变化呈正弦波形式，如图2所示。这种正弦波形式温度变化的第三类边界条件可以有两种基本形式，一种是纯正弦波变化形式，另一种是在纯正弦波上叠加一个现象变化，即温度在正弦波变化的同时还在线性升温，而温度的线性拟合曲线为一直线。

这种温度形式的第三类边界条件在实际应用经常可以看到，如对于各种薄膜材料的热物性参数测量中，如Angstrom法、ISO 22007-3温度波法、ISO 22007-6温度调节比较法、3Omega法和交流量热法等。这种第三类边界条件在热分析中的重要应用是温度调制式差示扫描量热仪（MTDSC），这是一种在线性温度程序上叠加一个正弦波形式的温度程序，形成热流速率和温度信号的非线性调制的差示扫描量热法。

3. 总结

通过以上描述和分析可以看出，传热学中的三类边界条件其背后的物理意义分别代表了物体的导热、对流和辐射三种传热机理，但在实际应用中，特别是在材料的热性能测试分析过程中，可将这三类边界条件分别转换为不同的温度变化形式，这将非常便于三类边界条件的工程实现。

实际应用中采用温度形式的第二和第三类边界条件时，尽管测试模型的数学求解相对比较复杂，但除了工程实现简单之外，更重要的优势是可以保证测量的准确性和宽泛的温度范围，这是很多其他方法很难具备的测试能力。