



热学中的相对论性动质量和动质能

王海东, 曹炳阳*

清华大学航天航空学院工程热物理研究所, 北京 100084

* Email: caoby@tsinghua.edu.cn

收稿日期: 2021-04-08; 接受日期: 2021-05-18; 网络版发表日期: 2021-08-26

国家自然科学基金面上项目(批准号: 51976096)和国家千人计划青年项目资助

摘要 相对论是近代物理学的基础理论之一, 改变了人们基于牛顿力学框架的传统时空观, 尤其狭义相对论中的质能方程深刻地揭示了质量和能量这两个自然界中最基本物理量的内在关联, 该方程通常用于计算核变反应中的质量亏损和高能粒子加速器中的粒子能量. 但需要指出的是, 相对论和质能方程作为描述自然界基本规律的基础性理论, 它的适用范围并不限定在核变反应和高能物理领域, 在其他物理学分支中都具有普适性意义, 热学也不例外. 本文首先回顾了历史上相对论从时空观角度在热学中的一些应用, 指出相对论和热学也具有内在联系. 然后从相对论中质量传递的角度来研究热量的传递过程, 即基于质能方程提出了热质和热质能的概念, 热质和热质能是热学中的相对论性动质量和相对论性动质能. 进一步基于热质理论建立了普适导热方程并给出其宏观和微观物理解释, 阐明了出现热波等非傅里叶导热现象的物理原因. 最后通过高热流密度金纳米薄膜导热实验初步证明了热质理论的正确性.

关键词 质能方程, 热质, 热质能, 普适导热方程, 非傅里叶导热

1 引言

爱因斯坦提出的相对论深刻改变了人类对自然界最基本物理量的认识, 如长度、时间、引力、速度等, 改变了牛顿力学框架下的传统时空观, 奠定了现代物理学的基础^[1]. 在相对论提出后不久, 就有学者开始探讨相对论和热力学之间的关系, 发展了相对论热力学(relativistic thermodynamics)^[2,3]. 1932年, Tolman在纪念Gibbs的论文集中着重讨论了热力学和相对论的关系, 其中提到传统的热力学研究方法仅在有限时空和引力作用不强的范围内成立, 在相对论时空观下, 运动物体的温度、能量、压力等基本热力学参数变化及

其物理意义都需要重新讨论^[3]. 例如, 相对论热力学中温度依赖于坐标系的数学变换形式, 如果采用Planck变换形式, 运动坐标系下的物体温度会升高^[4], 但如果采用Lorentz变换形式, 需要考虑动量做功, 从而运动坐标系下的物体温度会降低^[5]. 由此可见, 相对论的引入改变了我们对于传统热力学系统的理解, 在极高运动速度和能量密度的条件下, 传统的热力学研究方法和结论可能不再准确.

另外, 相对论的研究方法对传热学也产生了重要影响. 傅里叶导热定律是传统传热学的理论基础, 它描述了热流和温度梯度之间线性的瞬时响应关系^[6]. 但是这将导致一个悖论, 物体一端建立起温度梯度的

引用格式: 王海东, 曹炳阳. 热学中的相对论性动质量和动质能. 中国科学: 技术科学, 2021, 51: 1245-1250
Wang H D, Cao B Y. Relativistic kinetic mass and kinetic energy in thermal science (in Chinese). Sci Sin Tech, 2021, 51: 1245-1250, doi: 10.1360/SST-2021-0149

同时另一端会立即感受到热流, 即热扰动的传播速度无限大, 这一点和相对论中的光速不变原理是矛盾的. 在实验研究方面, 人们在极低温的液氦超流体中发现了有限速度的热波传递现象, 此时热量以波动的形式进行传递^[7]. 近年来, 美国MIT的Huberman等人^[8]在120 K低温条件下发现层状石墨材料中也出现了热波传递现象, 其温度远高于液氦温度. 为了解释热波现象, 有学者尝试人为加入热流的时间滞后项来解决这个问题, 如Cattaneo-Vernotte(CV)模型和双相滞模型^[9~11], 但人为增加的滞后项不仅缺乏严格的理论基础, 还会导致负温度等非物理结果, 无法从物理本质上解释热波传递现象. 更进一步, 有学者基于相对论的时空观推导获得相对论导热方程(relativistic heat equation), 结果显示, 该方程是一种双曲型波动微分方程, 可以预测有限的热波传播速度^[12].

因此我们可以得出结论, 相对论和热学中的热力学、传热学等学科之间存在密切的内在联系, 传统的热力学和传热学研究方法仅在牛顿力学的框架下成立, 在更为宏观的相对论时空观下可能不再准确. 这也促使我们重新审视热学的基本概念, 如温度、能量、质量等, 提出新的热学理论模型和研究方法.

2 热质

2.1 热质概念提出的背景

爱因斯坦在狭义相对论中给出了质量和能量之间的定量描述, 即质能方程 $E = mc^2$ (E 表示能量, m 表示质量, c 表示真空中的光速), 它揭示了质量和能量这两个基本物理量之间的内在联系, 物体的质量就是其自身能量的一种量度^[1,9,13,14]. 质能方程的成立需要满足狭义相对论中的两个基本假设: (1) 所有惯性参考系中的光速各向同性并保持为常数 c ; (2) 所有惯性参考系中的物理定律都是相同的. 上述基本假设与质能方程中 E 的能量形式无关, 正如爱因斯坦在其著作*The Evolution of Physics*中所说, “The theory of relativity deduces, from its fundamental assumption, a clear and convincing answer to this question, an answer again of a quantitative character: all energy resists change of motion; all energy behaves like matter; a piece of iron weighs more when red-hot than when cool”(相对论从其基本假设出发, 推导出对这个问题一个清晰而令人信服的答案, 一个

量化的特征: 所有能量都会抵抗运动的变化; 所有能量都表现得像物质一样; 一块铁在红热时比冷时更重). 热作为一种能量形式也同样适用于质能方程^[1]. 费曼在其物理学讲义*The Feynman Lectures on Physics*中也提到类似的结论, “When the gas is heated, the speed of the molecules is increased, and therefore the mass is also increased and the gas is heavier”(气体被加热后分子运动速度增加, 所以质量也会增加, 气体会变得更重). 随后费曼还给出了这部分增加质量的计算公式, “We can also say that the increase in mass of all this body of gas is equal to the increase in kinetic energy divided by c^2 , or $\Delta m = \Delta(\text{K.E.})/c^2$ ”(气体增加的质量等于其增加的动能除以光速的平方)^[15].

由于通常情况下热量的能量密度要远远小于核裂(聚)变所释放的能量, 即热量所对应的相对论性动质量和静质量相比是极小的, 如室温条件下1 kg硅所含热能的相对论性动质量约为 2.3×10^{-12} kg, 所以对于一个物体的总质量而言, 热量所对应的相对论性动质量完全可以被忽略. 也许正是这个原因, 至今为止尚未见到关于质能方程在热学领域中的研究和应用的报道, 但是热量所具有的相对论性动质量是真实存在的.

2.2 热质的定义

为了提出热质的概念, 首先回顾一下狭义相对论中的质能方程:

$$M = E/c^2, \quad (1)$$

式中, E 是静止质量为 M 的粒子以远小于光速作规则运动时的动能, c 是真空中的光速, M 是粒子的相对论性的质量. 前面已经提到, 质能方程适用于热运动形式的能量, 热动理论指出热是以分子热运动的形式存储在物体中的能量, 在不可压物体中它就是热能, 热力学第一定律中的热量是传递的能量. 因此无论对于热能(状态量)或热量(过程量)我们都可以定义热的相对论性动质量, 即热质^[16~18]:

$$M_h = E/c^2, \quad (2)$$

式中, E 是可以储存在不可压物体中的热能, 也可以是传递的热量, c 是真空中的光速, M_h 就是热质. 该定义式和费曼讲义给出的定义式 $\Delta m = \Delta(\text{K.E.})/c^2$ 是一致的. 需要说明的是, 历史上曾出现过“热质”的概念, 它将热量看成一种实体物质, 物体吸收“热质”后温度升高, 失

去“热质”后温度降低. 后来随着人们对热量本质的认识更加深入, 发现热量的本质是基本粒子的无规则运动现象, 热动说代替了热质说. 本文提出的热质概念和历史上的“热质说”完全不同, 基于狭义相对论中的质能方程, 认为热质是热量的相对论性动质量, 其静质量为零.

2.3 热质的状态方程

热质是一种相对论性动质量, 它依赖于静质量物质骨架存在, 但同时也会发生定向运动形成热流. 因此我们可以把热质看作一种流体, 它具有特定的状态方程, 该方程决定于静质量骨架材料的性质. 这里以电介质材料为例, 根据电介质的德拜模型可以推导出其中热质的状态方程为^[19]

$$P_h = \gamma \frac{\partial E_{p0}}{V} = \gamma \rho_h CT = \frac{\gamma \rho}{c^2} (CT)^2, \quad (3)$$

式中, P_h 是热质气压强, 单位是Pa; $\rho_h = \rho CT/c^2$ 是热质密度, 单位是 kg/m^3 ; C , ρ 和 T 分别是静质量物质的比热、密度和温度; γ 是材料的Grüneisen系数. 对式(3)中的热质压强求导, 可以得到热质驱动力为

$$\frac{\partial P_h}{\partial x} = 2 \frac{\gamma \rho}{c^2} C^2 T \frac{\partial T}{\partial x}. \quad (4)$$

从式(4)可以看到, 在等温常物性条件下, 热质驱动力正比于温度梯度, 说明温度梯度形成了热质驱动力, 导致热质发生定向运动形成热流.

3 热质的运动

3.1 热质的流速

热质是基于狭义相对论中质能方程提出的, 它可以理解为在静质骨架中发生定向运动的流体, 其流动速度可以从热流密度 q 中提炼出来: $u_h = q/\rho CT$, 其中 u_h 是热质的运动速度, ρ , C , T 分别是介质材料的密度、比热和温度. 在恒温条件下, 热质的运动速度正比于热流密度. 而在通常的温度和热流密度条件下, 热质的运动速度在几十到几百米每秒的数量级, 即使在单壁碳纳米管(直径1~2 nm)极高热流密度($10^{11} \text{ W}/\text{m}^2$)条件下, 热质的运动速度也远远小于光速, 并且热质的质量很小, 引力场的作用完全可以忽略. 此时牛顿力学原理可以很好地解释热质流体的运动规律.

3.2 热质的守恒方程

鉴于两点前提: (1) 热质的流动速度(热质扩散速度)远小于光速; (2) 热质的动力学变量远大于普朗克常数 h , 量子力学效应可以忽略. 我们能够使用牛顿力学来描述热质的运动规律. 根据流体力学原理, 建立了热质的连续方程和动量守恒方程^[17-19]:

$$\frac{\partial \rho_h}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_h u_h) = 0, \quad (5a)$$

$$\rho_h \frac{D}{Dt} (\rho_h u_h) + \nabla P_h + f_h = 0, \quad (5b)$$

式中, $\rho_h = \rho CT/c^2$ 是热质密度, 单位是 kg/m^3 ; u_h 是热质的运动速度, 单位是 m/s ; P_h 是热质压强, 单位是Pa; f_h 是热质运动的阻力项. 热质流动的阻力来自于热质和静质量晶格骨架之间的作用, 可以理解为多孔介质中的流动行为. 由多孔介质渗流的达西定律可以给出热质阻力的表达式: $f_h = u_h 2\gamma c^2 \rho_h^2 C/\lambda$, 由此发现方程(5a)和(5b)完全类似流体力学的运动方程.

3.3 普适导热定律

把热质的状态方程(3)代入式(5a)和(5b), 经过整理得到^[18-21]:

$$\tau_h \left(\frac{\partial q}{\partial t} - \frac{q}{T} \frac{\partial T}{\partial t} + \frac{q}{\rho CT} \frac{\partial q}{\partial x} - \frac{q^2}{\rho CT^2} \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \lambda \frac{\partial T}{\partial x} + q = 0. \quad (6)$$

这是由温度和热流密度表示的有阻尼波动方程, 对应为一个有限的热波(热质压力波)的传播速度, 从而解决了傅里叶定律导致热扰动速度无限大的悖论. 热波传递同机械波传递的物理本质是类似的, 传热过程中热质(相对论性动质量)的存在导致了时间惯性或滞后, 这一项的引入将傅里叶导热的抛物型方程改写为波动双曲型方程, 其中特征时间 $\tau_h = \lambda/(2\gamma \rho C^2 T)$. 当忽略方程(6)中热质运动的空间惯性项后, 它将退化为描述热波现象的CV方程^[10]:

$$\tau_h \frac{\partial q}{\partial t} + \lambda \frac{\partial T}{\partial x} + q = 0. \quad (7)$$

当在此基础上进一步忽略时间惯性项后, 方程(7)将退化为傅里叶导热定律:

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial x} + q = 0, \quad (8)$$

式中, 等号左边第一项(温度梯度)代表热质运动的驱动力, 第二项(热流)代表热质在介质中运动的阻力

$f_h \propto u_h \propto q$, 因此可以看到傅里叶导热定律的物理本质是热质驱动力与阻力的平衡. 普适导热方程揭示了热波等非傅里叶导热现象的物理本质, 可以适用于纳米材料、超快速加热、极高热流密度等多种极端导热条件下的热分析和热设计.

4 普适导热定律的微观基础

在电介质材料中, 声子是热量的主要载体, 普适导热方程可以理解为描述声子宏观运动的控制方程. 从而讨论声子的微观分布和迁移为普适导热定律奠定了微观理论基础. 声子的集体行为可以用波尔兹曼方程 (Boltzmann equation) 来描述. 求解声子波尔兹曼方程的目标是得到声子微观态分布函数 f , 这样就可以通过积分获得宏观物理量的控制方程. 声子波尔兹曼方程可以写成弛豫形式^[21~23]:

$$\left(\frac{\partial}{\partial t} + \mathbf{v}_k^n \cdot \nabla \right) f_D^n = \frac{f_0^n - f_D^n}{\tau_R}. \quad (9)$$

两侧同乘以 $\hbar\omega/c^2$ 与 $\hbar\omega v_{ki}/c^2$ 并在 k 空间进行积分可得:

$$\frac{\partial \int \mathbf{k} f_D^n \hbar\omega^n}{\partial t} + \int \mathbf{k} \mathbf{v}_k^n \cdot \nabla f_D^n \hbar\omega^n = \frac{\int \mathbf{k} (f_0^n - f_D^n) \hbar\omega^n}{\tau_R}, \quad (10)$$

$$\frac{\partial \int \mathbf{k} f_D^n \hbar\omega^n v_{ki}^n}{\partial t} + \int \mathbf{k} \mathbf{v}_k^n \cdot \nabla f_D^n \hbar\omega^n v_{ki}^n = \frac{\int \mathbf{k} (f_0^n - f_D^n) \hbar\omega^n v_{ki}^n}{\tau_R}. \quad (11)$$

可以对 f_D 在 f_0 附近进行二阶泰勒展开, 将 f_D 的二阶展开带入并根据 f 各阶奇偶性质则可以得到:

$$\frac{\partial q_i}{\partial t} + \nabla_j \frac{q_j}{e} + \nabla_i p_h = -\chi \frac{q_i}{e}. \quad (12)$$

这就是通过求解声子波尔兹曼方程得到的宏观控制方程, 其中从左到右的四项依次对应于普适导热方程中的时间惯性项、空间惯性项、驱动力项和阻力项, 可以看到和普适导热定律(6)在形式上是一致的. 通过推导过程可知热质的时间惯性项与空间惯性项分别来自声子状态分布函数的一阶展开与二阶展开. 当忽略声子状态分布函数所有高阶展开时, 就相当于忽略了热质惯性力, 此时普适导热定律将回归到傅里叶导热定律. 在极小时间或空间尺度中, 热质惯性力不可忽略, 导致了非傅里叶导热现象的出现.

5 普适导热定律的实验验证

通常, 一个物体的热质与其静质相比是极小的, 例如对于 1000 K 的氮气, 其比值仅为 8.24×10^{-12} , 目前技术条件尚不能直接测量热质的数值, 但可以通过测量传递过程中热质的惯性效应来验证热质的存在.

在稳态导热条件下, 热质运动的时间惯性作用消失, 但是其空间惯性作用依然存在, 体现为材料表观导热率偏离其本征导热率, 也称为稳态非傅里叶导热现象. 我们利用 76 nm 厚度的金纳米薄膜、在 3 K 低温环境、 10^{10} W/m^2 条件下测量到了这种偏离, 初步证实了热质惯性作用的存在, 也为热质理论的正确性提供了间接的实验证据^[24].

图1所示为测量得到的金属纳米薄膜平均温度随加热功率的变化曲线, 其中带圆圈符号的实线为实验值, 带正方形和五角星符号的虚线分别为傅里叶导热定律和普适导热定律的预测结果. 结果显示当加热功率较大时实验值会高于傅里叶定律的预测值, 出现非傅里叶导热现象, 而实验值与普适导热定律的预测值符合较好.

6 热质能和“焯”

前面已经讨论过, 热质是热量的相对论性动质量 $M_h = E/c^2$. 假设包含热质的静质量物质被放置于温度为 T 的热场中, 热质的存在将导致物质总质量增加, 从而物质所包含的总内能也会增加, 这部分因为相对论性动质量而增加的能量可以定义为热质能, 即 $E_h = M_h c T / 2 = E c T / (2c^2)$, 其中分母的数字 2 来自于温度的积分. 可以看到, 热质能是一种相对论性动质能. 特别值得注意的是, 过增元团队之前根据热电比拟方法提出的物理量“焯”的数学表达式为: $G = M c T^2 / 2$, 对于固体导热而言, $E = M c T$, 于是热质能可以改写为 $E_h = E c T / (2c^2) = M (c T)^2 / (2c^2)$, 对比“焯”的定义式可以发现, 热质能和“焯”仅相差一个常数 c/c^2 , 即固体材料的比热除以光速的平方. 由此可见, “焯”的物理意义可以理解为物质的一种相对论性动质能(热质能). “焯”在工质体积不变的复杂换热系统优化、提高能源利用效率等方面具有重要的工程应用价值^[16,25], 这也间接证明了热质及热质能的概念在工程科学中的基础性作用.

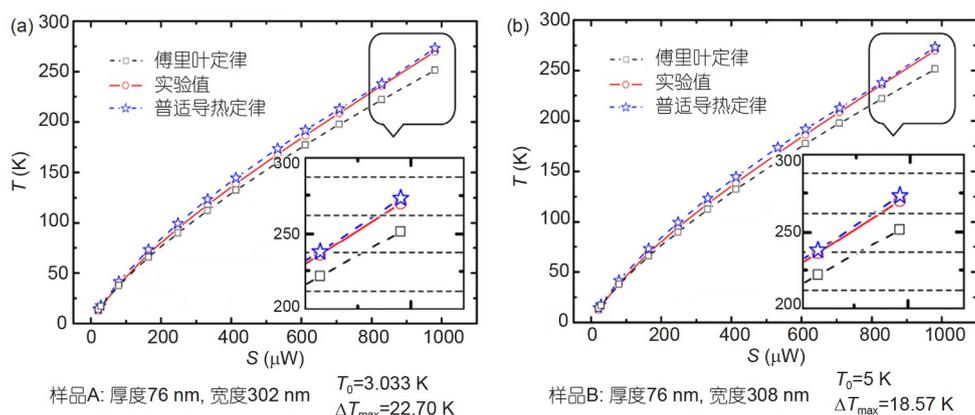


图 1 (网络版彩图)金属纳米薄膜平均温度随加热功率的变化曲线。(a)和(b)分别是3 K和5 K环境温度条件下实验测量温度同傅里叶导热定律、普适导热定律预测结果的对比, ΔT_{max} 是实验值和傅里叶导热定律预测值的最大偏差^[24]

Figure 1 (Color online) Average temperature of metallic nanofilm measured at different heating powers. (a), (b) The experimental results in comparison with predictions from Fourier's law and general heat conduction law at 3 K and 5 K, respectively. ΔT_{max} is the maximum difference between experimental data and prediction from Fourier's law [24].

7 结论

(1) 相对论和热学研究具有密切的内在联系, 传统的热学研究方法在极高运动速度和能量密度的条件下将不再准确, 需要在相对论的时空观下进行研究。

(2) 狭义相对论中的质能方程适用于所有的能量形式, 目前在高能粒子、核反应、宇宙物理学等领域获得了广泛应用, 但是在热学方面, 除了爱因斯坦和费曼有一些定性描述之外, 尚未见到具体应用的报道。

(3) 为了从本质上阐明热波等非傅里叶导热现象, 解决热扰动传播速度无限大的悖论, 我们重新审视热量的本质, 提出了热质(热量的相对论性动质量)和热质能(热量的相对论性动质能)的概念。

(4) 鉴于热质的流速远小于光速, 所以可用牛顿力

学描述热质的运动规律。基于流体力学原理建立了热质的动量守恒方程, 即普适导热定律。它是有阻尼的波动方程, 其中热质运动的时间惯性是导致热波现象的物理本质, 解决了热扰动传播速度无穷大的悖论, 它可以用于极端导热条件下的热分析和热设计。

(5) 通过求解电介质材料的声子玻尔兹曼方程给出了普适导热定律的微观解释, 在金纳米薄膜高热流密度的导热实验中初步证实了普适导热定律的可靠性。这些都间接地为热质惯性力的存在和热质概念的合理性提供了证据。

(6) 热质在热场中具有的能量是热质能, 它是一种相对论性动质能。热质能和“焓”仅相差一个常数, 从而指明了“焓”的物理意义。

参考文献

- 1 Einstein A, Infeld L. The Evolution of Physics. London: Cambridge University Press, 1938
- 2 Hamity V H. Relativistic thermodynamics. Phys Rev, 1969, 187: 1745
- 3 Tolman R C. Thermodynamics and relativity. Bull Amer Math Soc, 1933, 39: 49–75
- 4 Mareš J J, Hubík P, Špička V. On relativistic transformation of temperature. Fortschr Phys, 2017, 65: 1700018
- 5 Nakamura T K. Three views of a secret in relativistic thermodynamics. Prog Theor Phys, 2012, 128: 463–475
- 6 Lienhard J H. A Heat Transfer Textbook. Cambridge: MA: Phlogiston Press, 2018
- 7 Landau L. On the theory of superfluidity of helium II. J Phys, 1947, 11: 91–92
- 8 Huberman S, Duncan R A, Chen K, et al. Observation of second sound in graphite at temperatures above 100 K. Science, 2019, 364: 375–379
- 9 Chavanis P H. Models of universe with a polytropic equation of state: II. The late Universe. Eur Phys J Plus, 2014, 129: 222
- 10 Cattaneo C. Sur Une Forme De Lequation De La Chaleur Eliminant Le Paradoxe Dune Propagation Instantanee (in French). Comptes Rendus

- Hebdomadaires Des Seances De L Academie Des Sciences, 1958, 247: 431–433
- 11 Kumar R, Chawla V. A study of plane wave propagation in anisotropic three-phase-lag and two-phase-lag model. *Int Commun Heat Mass Transfer*, 2011, 38: 1262–1268
 - 12 Lopez Molina J A, Rivera M J, Berjano E. Fourier, hyperbolic and relativistic heat transfer equations: A comparative analytical study. *Proc Royal Soc A*, 2014, 470: 20140547
 - 13 Nakamura K, Hagiwara K, Hikasa K, et al. Review of particle physics. *J Phys G-Nucl Part Phys*, 2010, 37: 075021
 - 14 Hill D L, Wheeler J A. Nuclear constitution and the interpretation of fission phenomena. *Phys Rev*, 1953, 89: 1102–1145
 - 15 Feynman R P. *The Feynman Lectures on Physics*. New York: Basic Books, 2011
 - 16 Cheng X T, Liang X G. From thermomass to entransy. *Int J Heat Mass Transfer*, 2013, 62: 174–177
 - 17 Dong Y, Cao B Y, Guo Z Y. Temperature in nonequilibrium states and non-Fourier heat conduction. *Phys Rev E*, 2013, 87: 032150
 - 18 Dong Y, Cao B Y, Guo Z Y. Generalized heat conduction laws based on thermomass theory and phonon hydrodynamics. *J Appl Phys*, 2011, 110: 063504
 - 19 Cao B Y, Guo Z Y. Equation of motion of a phonon gas and non-fourier heat conduction. *J Appl Phys*, 2007, 102: 053503
 - 20 Guo Z Y. Motion and transportation of thermomass, thermomass and thermomass gas (in Chinese). *J Eng Thermophys*, 2006, 27: 631–634 [过增元. 热质的运动与传递, 热质和热子气. *工程热物理学报*, 2006, 27: 631–634]
 - 21 Wang H D, Guo Z Y. Physical heat transfer. *Front Heat Mass Transf*, 2019, 13: 20
 - 22 Dong Y, Guo Z Y. Hydrodynamic modeling of heat conduction in nanoscale systems. *J Nanosci Nanotechnol*, 2015, 15: 3229–3233
 - 23 Dong Y, Cao B Y, Guo Z Y. Ballistic-diffusive phonon transport and size induced anisotropy of thermal conductivity of silicon nanofilms. *Physica E*, 2015, 66: 1–6
 - 24 Wang H D, Liu J H, Guo Z Y, et al. Non-Fourier heat conduction study for steady states in metallic nanofilms. *Chin Sci Bull*, 2012, 57: 3239–3243
 - 25 Chen Q, Liang X G, Guo Z Y. Entransy theory for the optimization of heat transfer—A review and update. *Int J Heat Mass Transfer*, 2013, 63: 65–81

Relativistic kinetic mass and kinetic energy in thermal science

WANG HaiDong & CAO BingYang

Institute of Engineering Thermophysics, School of Aerospace Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China

Relativity is a basic theory of modern physics that has changed the traditional view of space-time based on Newton's mechanics. In particular, the mass-energy equation in special relativity reveals the profound internal relationship between mass and energy, the two most basic physical quantities in nature. Usually, this equation is used to calculate the mass loss in a nuclear reaction and the particle energy in a high-energy particle accelerator. However, it should be pointed out that relativity and the mass-energy equation, as the basic theories describing the laws of nature, are not limited only to nuclear reactions and high-energy physics. They are of universal significance in other branches of physics, including thermal science. This paper reviews some applications of relativity in thermal science from the relativity's view of time and space, and points out the internal relationship between relativity and thermal science. We analyzed the heat transfer process from the perspective of mass transfer in the framework of relativity. We put forward the concepts of thermal mass and thermal mass energy based on the mass-energy equation. In thermal science, thermal mass and thermal mass energy are relativistic kinetic mass and relativistic kinetic energy. Moreover, based on the thermal mass theory, we have established a general heat conduction equation and provided its physical explanation at both macroscopic and microscopic scales. The physical mechanism of non-Fourier heat conduction phenomena, such as heat waves, can be clarified. Finally, through the experiment of heat conduction in gold nanofilms with ultrahigh heat flux, thermal mass theory has been proved preliminarily to be correct.

mass-energy equation, thermal mass, thermal mass energy, general heat conduction equation, non-Fourier heat conduction

doi: [10.1360/SST-2021-0149](https://doi.org/10.1360/SST-2021-0149)