

接触热流密度最大值计算及试验研究

谭理刚[†], 代超, 彭博, 秦光照, 李高磊

(湖南大学 机械与运载工程学院, 湖南长沙 410082)

摘要:对于非稳态传热过程,现有理论无法很好地解决热流密度初始值的问题.提出接触热流密度最大值及接触热流密度常数的概念,在此基础上,提出接触热流密度最大值的计算公式,确定接触热流密度最大值与两物体之间的初始温差成正比,公式中的比例系数为接触热流密度常数.通过极短时间的平均热流密度逼近瞬间热流密度的试验原理,搭建热流密度测试平台,开展金属薄片温升试验,计算接触热流密度最大值及接触热流密度常数.试验结果表明,以0.5~5.0 mm厚的不锈钢304金属薄片为试验对象,在温升100 K的范围内,接触热流密度常数为1 022.51 W/(m²·K).

关键词:传热;非稳态;热流密度;接触热流密度常数

中图分类号:TQ021.3 **文献标志码:**A

Calculation and Experimental Research of Maximum Contact Heat Flux Density

TAN Ligang[†], DAI Chao, PENG Bo, QIN Guangzhao, LI Gaolei

(College of Mechanical and Vehicle Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China)

Abstract: In unsteady state heat transfer processes, existing theories still cannot effectively solve the problem of initial heat flux density values. This article proposes the concept of maximum contact heat flux density and the contact heat flux density constant. Based on this, a calculation formula for the maximum contact heat flux density is proposed, which determines that the maximum contact heat flux density is proportional to the initial temperature difference between the two objects, and the proportionality coefficient in the formula is the contact heat flux density constant. Additionally, based on the experimental principle of approximating instantaneous heat flux with an extremely short average heat flux density, a heat flux testing platform is established to conduct temperature rise tests on metal sheets. The maximum contact heat flux density and contact heat flux density constant are calculated. Based on experimental research, the contact heat flux density constant is 1 022.51 W/(m²·K) for stainless steel 304 metal sheets with a thickness of 0.5~5.0 mm and a temperature rise of 100 K.

Key words:heat transfer; unsteady state; heat flux density; contact heat flux density constant

* 收稿日期:2023-11-14

基金项目:湖南省自然科学基金资助项目(2023JJ30150), Natural Science Foundation of Hunan Province(2023JJ30150)

作者简介:谭理刚(1975—),男,湖南湘乡人,湖南大学副教授,博士

† 通信联系人,E-mail: tlg9@163.com

19世纪20年代,著名物理学家、数学家傅里叶总结并提出了著名的傅里叶定律,为传热定律的建立奠定了基础,之后傅里叶定律被证实适用常规条件下的导热过程。20世纪30年代,传热学逐渐成为一门独立的学科,但是现阶段传热定律主要是基于试验检验程序来证明的试验性定律,不可避免地存在一定的局限性^[1-2]。傅里叶定律主要适用于稳态热传导过程和热波传播速度快的非稳态过程的分析,当热运输现象涉及极短时间、极高热通量、极低温度以及微纳尺度时,傅里叶定律往往失效^[3-4]。

傅里叶定律认为热以扩散的方式传播,傅里叶导热模型又称为扩散模型,但扩散模型在物理上却存在着根本的缺陷,该模型隐含了热扰动传播速度为无穷大的结论,违背了物理学原理。因此,傅里叶导热定律原则上不完全适用于瞬态导热问题^[5-6]。在此基础上,20世纪40年代以来,研究者逐渐提出了非傅里叶导热定律^[7],即对傅里叶定律提出各种修正模型以修正其缺陷,如Cattaneo^[8]、Vernotte^[9]和Tzou^[10]相继提出了含有弛豫时间经修正后的广义热传导理论、双相滞模型等非傅里叶模型,以解释并适用于热波、热扩散等传热现象,而满足非傅里叶导热定律的传热现象又被称作非傅里叶效应^[11],但滞后项会导致负温度等不合理结果,缺乏严格的理论基础^[12]。Cao等^[13]、过增元^[14]由质能关系提出了热子气、普适导热定律等观点,从而为极端条件下热传导现象的研究开辟新的途径。

国内外研究者对非稳态传热过程的研究主要针对特定工程背景,缺少系统简明的理论支撑,试验研究相对匮乏^[15]。面对非傅里叶效应给传热学科发展带来的挑战,核心的傅里叶导热定律不再适用,重新审视热量的本质并研究热量传递的规律具有重要意义^[14]。对于非稳态传热过程,现有理论无法很好地解决热流密度初始值的问题。本文开展了接触热流密度最大值的理论分析,以金属薄片为试验对象,薄片厚度与传热时间为变量进行热流密度试验,提出接触热流密度最大值的计算公式并初步确定公式中的常数值,为研究有限热流速度下的热流传递过程及初始值问题提供一种思路与方法。

1 理论及试验原理分析

1.1 理论分析

以热源A与物体B为传热研究对象,设定热源A的初始温度为 T_A ,物体B的初始温度为 T_B ,满足 $T_A > T_B$ 。当热源A与物体B接触时,由于温差的存在必然发生热传递现象,热量从高温(热源A)自发向低温(物体B)传递,并在接触边界产生热流密度,如图1所示。

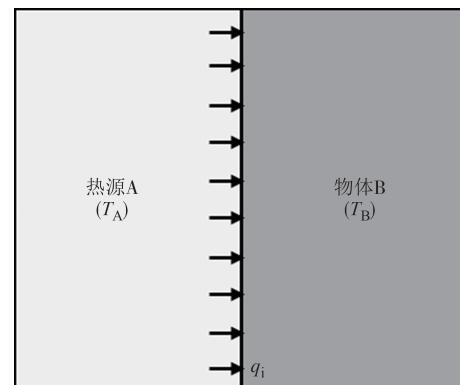


图1 接触传热示意图

Fig.1 Schematic diagram of contact heat transfer

在上述情景下,定义接触热流密度最大值 q_i 为:在接触位置、传热发生的极短时间内,两物体接触边界所达到的热流密度最大值。其为整个传热过程中接触边界热流密度所能达到的最大值,在后续的传热过程中,随两物体间的温差减小,接触边界的热流密度减小。

本文中后续理论推导过程基于以下假设:

1)由于两物体是直接接触传热,将热传导作为唯一传热形式,不考虑对流传热与辐射传热。

2)忽略外部环境及接触热阻的影响。

接触热流密度最大值仅发生在两物体接触的极短时间内,涉及的传热过程仅为A、B两物体接触边界的传热,对于物体B而言,其内部的传热尚未发生,接触热流密度最大值 q_i 与物体B自身物性参数无关,仅与两物体之间的初始温差有关。

$$q_i = f(\Delta T_0) \quad (1)$$

式中: q_i 为接触热流密度最大值; ΔT_0 为两物体之间的初始温差,即 $\Delta T_0 = T_A - T_B$ 。

在现实中传热的宏观表现为:当低、高温物体间温差越大,低温物体的升温速度就越快。在此基础上,进一步合理定性分析:接触热流密度最大值与初

始温差呈正相关.

傅里叶导热定律指出热流同温度梯度之间具有线性关系^[1],且线性模型是正相关的最简形式,基于最简模型开展试验研究,提出接触热流密度最大值 q_i 与温差 ΔT_0 的函数关系如式(2)所示.

$$q_i = k\Delta T_0 \quad (2)$$

式中: k 为接触热流密度常数,单位为 $W/(m^2 \cdot K)$, k 不受热源A与物体B的物性参数以及温差等因素的影响,为定值.

1.2 试验原理

在上述接触热流密度最大值数学模型中,主要研究接触热流密度常数 k . 试验原理为:在金属片极薄情况下,将极短时间内的平均热流密度等效为瞬时热流密度,该瞬时热流密度最大值即为接触热流密度最大值. 由于热流难以直接测量,通过试验传热产生的温升来计算热流密度. 用数学方程描述该过程为:

$$\begin{cases} \bar{q}tS = mc\Delta\bar{T} \\ \lim_{\delta \rightarrow 0} \bar{q} = q_i \end{cases} \quad (3)$$

式中: \bar{q} 为平均热流密度; t 为传热时间; S 为传热接触面积; m 为金属薄片质量; c 为金属比热容; $\Delta\bar{T}$ 为金属薄片在传热时间内的平均温升; δ 为金属薄片厚度.

该试验原理需要说明的是:

1) 实际试验需要通过金属薄片的温升来计算热流密度,由于设备采集的延迟,温升采集的传热时间必然会超过达到接触热流密度最大值的极短时间,再考虑到实际试验过程的散热影响等,所以依据试验结果计算所得的接触热流密度最大值会小于其真实值,如式(4)所示.

$$q_{it} < q_i \quad (4)$$

式中: q_{it} 为基于试验结果计算得到的接触热流密度最大值.

2) 通过温升来计算热流密度,则被传热物体的储热能力要尽可能大,才能保证接触热流密度最大值的计算结果更接近真实值. 因此,在该试验原理下,金属薄片并不是越薄越好,需要设置厚度梯度,保证金属薄片有足够的储热能力.

3) 实际试验中,金属薄片与加热平台表面存在间隙,存在接触热阻,金属薄片自身又存在散热,传热模型较为复杂. 为精准化计算结果,对试验传热时间设置梯度,分析传热时间对计算结果准确度的影响.

2 接触传热试验

2.1 试验装置与方案

根据试验原理,搭建接触传热试验装置,如图2所示. 试验装置主要包括上机位、温度巡检仪、恒温加热平台、贴片式热电偶等. 其中恒温加热平台作为恒温热源;贴片式热电偶作为测温原件,测量金属薄片上表面(与热源不直接接触的另一端面)温度变化;温度巡检仪进行试验原始数据采集,并传输至上机位;上机位对试验数据进行处理与分析.

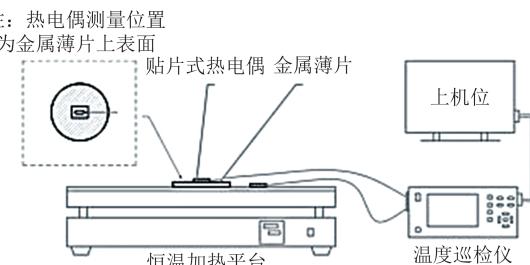


图2 金属薄片热流密度测试平台

Fig.2 Metal sheet heat flux density testing platform

试验仪器型号参数如下:

1) 恒温加热平台为力辰 LC-DB-1DA, 温度均匀性 5%, 控温精度 ± 2 K.

2) 温度巡检仪为惠普 TCP-8X, 最小采集间隔为 0.1 s.

3) 贴片式热电偶测温薄片厚度 0.02 mm, 焊点直径 ≤ 0.25 mm, 最小测量精度为 0.01 K.

金属薄片为不锈钢 304 圆柱体, 最小厚度为 0.5 mm, 直径为 50 mm. 在计算过程中取其密度为 7.93×10^3 kg/m³, 比热容为 0.5 kJ/(kg·K).

基于上述试验装置与计算原理,设计试验方案如下:

1) 试验温度数据的采集项包括:环境温度、恒温加热平台台面温度(热源)、金属薄片端面温度.

2) 热源温度 373 K, 波动范围为 ± 2 K.

3) 环境初始温度为 295 K, 波动范围为 ± 2 K.

4) 温升数据采集间隔为 0.1 s.

5) 金属薄片厚度分别为 0.5 mm、1.0 mm、1.5 mm、2.0 mm、3.0 mm、4.0 mm、5.0 mm.

试验温度采集的开始时间为:待恒温加热平台温度(热源温度)稳定后,在金属薄片与恒温加热平台接触前,提前一定时间进行试验温度数据的预

采集.

试验温度采集的结束时间为:试验金属薄片温度采集端面(上表面)温度稳定后(± 2 °C波动).

试验的实际起始时间:金属薄片温度试验数据中,自初始温度出现稳定上升的首个数据点.该数据点作为金属薄片与恒温加热平台的接触瞬间.

用于热流密度计算的试验温升时间梯度为:自试验实际起始时间的0.5 s、1.0 s、1.5 s、2.0 s、2.5 s、3.0 s内.

2.2 试验数据处理

接触热流密度最大值计算原理如式(5)所示.

$$\begin{cases} \bar{q} t S = mc\Delta\bar{T} \\ q_{it} = \bar{q} \end{cases} \quad (5)$$

试验可直接获取金属薄片的上表面温升 ΔT_{up} .由于金属材料的热扩散系数较大,同时在金属薄片较薄的情况下,上下表面温升接近一致,考虑将测得的端面温升 ΔT_{up} 作为整体统一温升(即传热时间内的金属薄片的平均温升 \bar{T}),即

$$\bar{T} = \Delta T_{up} \quad (6)$$

联立式(5)与式(6),得接触热流密度最大值的计算式为:

$$q_{it} = \bar{q} = \frac{Q}{St} = \frac{mc\Delta\bar{T}}{St} = \frac{cp\delta\Delta T_{up}}{t} \quad (7)$$

式中: ρ 为金属薄片的密度.

接触热流密度常数 k 的计算式可表示为:

$$k = \frac{q_{it}}{\Delta T_0} \quad (8)$$

式中: ΔT_0 为78 K,为热源温度(373 K)与金属薄片初始温度(与环境温度一致,295 K)的差值.

2.2 结果与分析

当接触传热时间 t 分别为0.5 s、1.0 s、1.5 s、2.0 s、2.5 s、3.0 s时,不同厚度下,金属薄片上表面温升 ΔT_{up} 的试验结果如图3所示.

根据式(7)和式(8)可以计算得到接触热流密度最大值 q_i 和常数 k .当接触传热时间 $t=0.5$ s时,不同厚度金属薄片上表面温升试验结果及相关参数计算结果如表1所示.

由表1可知,在0.5 s传热时间内,接触热流密度常数 k 的计算结果最大值为640.50 W/(m²·K).

同理,当接触传热时间分别为1.0 s、1.5 s、2.0 s、2.5 s、3.0 s时,在金属薄片不同厚度下,接触热流密度最大值和 k 值计算结果分别如图4和图5所示.

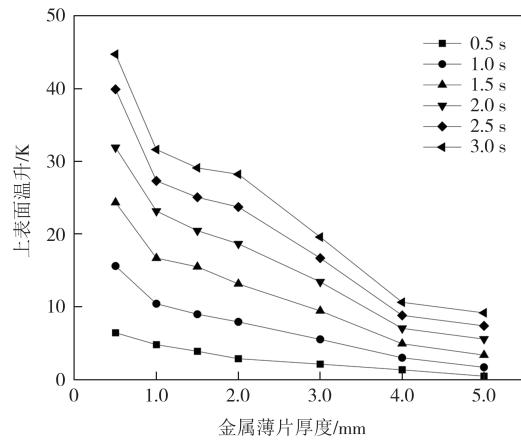


图3 在不同接触传热时间下,金属薄片上表面温升随厚度的变化曲线

Fig.3 The variation curve of surface temperature rise with thickness on metal foil under different contact heat transfer times

表1 当 $t=0.5$ s时,不同厚度金属薄片上表面温升试验结果及相关参数计算结果

Tab.1 When $t=0.5$ s, the temperature rise test results of the upper surface of metal sheets with different thicknesses and the calculation results of related parameters

δ/mm	$\Delta T_{up}/\text{K}$	$q_i/(\text{W} \cdot \text{m}^{-2})$	$k/(\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1})$
0.5	6.42	25 435.48	326.10
1.0	4.78	37 865.75	485.46
1.5	3.86	45 914.70	588.65
2.0	2.85	45 121.70	578.48
3.0	2.10	49 959.00	640.50
4.0	1.32	41 711.80	534.77
5.0	0.45	17 644.25	226.21

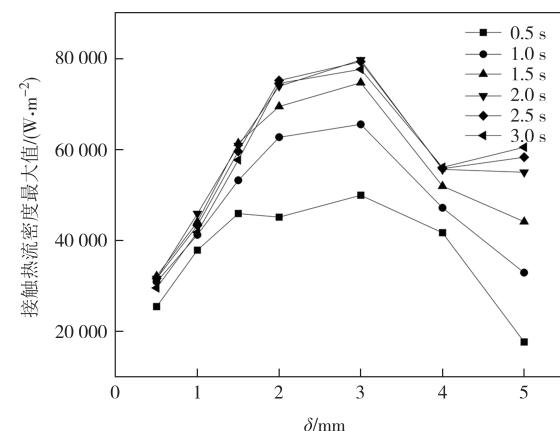


图4 在不同接触传热时间下,金属薄片接触热流密度最大值随厚度的变化曲线

Fig.4 The variation curve of the maximum contact heat flux density of metal foil with thickness at different contact heat transfer times

由图4和图5可知,接触热流密度最大值和 k 值随金属薄片厚度的增大总体呈先增大、后减小的变

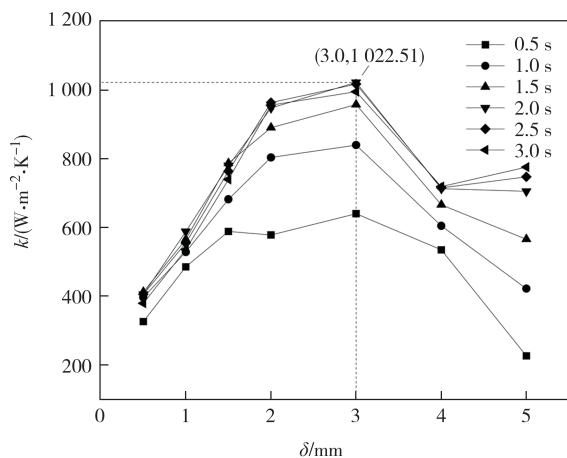


图5 在不同接触传热时间下,接触热流密度常数k随金属薄片厚度的变化曲线

Fig.5 The variation curve of the contact heat flux density constant k with the thickness of the metal sheet at different contact heat transfer times

化趋势.这是由于基于温升所计算的接触热流密度,本质上是通过金属薄片所吸收的热量计算得来,因此金属薄片需要一定厚度来实现最大热量的吸收,从而呈现先增大的趋势.在实际试验过程中,金属薄片与外部环境存在对流与辐射传热现象,达到一定厚度后,受外表面散热的制约,又呈现后减小的趋势.

图4和图5显示,当金属薄片厚度为5.0 mm时,且传热时间达到2.5 s后,接触热流密度相较于4.0 mm的金属薄片不降反升,不同于传热时间小于2.5 s的曲线趋势.这是因为在当前非稳态传热过程中,金属薄片越厚,在相同的传热时间内两端的温差越大,以端面温升作为物体平均温升所带来的误差就越大.当金属薄片厚度与接触传热时间超过一定范围后,将导致接触热流密度最大值计算误差过大,影响接触热流密度最大值与接触热流密度常数随厚度变化的曲线趋势.

由图5可知,在不同传热时间下(0.5 s、1.0 s、1.5 s、2.0 s、2.5 s、3.0 s),接触热流密度常数k的最大值均在金属薄片厚度为3.0 mm时取得,进一步分析此厚度条件下接触传热时间对接触热流密度常数k值的计算影响.图6为3.0 mm厚金属薄片上表面温升及接触热流密度常数k值随接触传热时间的变化情况.

由图6可知,接触热流密度常数k最大值在传热时间 $t=2.7$ s时取得,超过3.0 s后k值出现明显下滑.

因此,对于3.0 mm厚金属薄片,图5所选定的接触传热时间范围内能计算得到接触热流密度常数k的最大值.

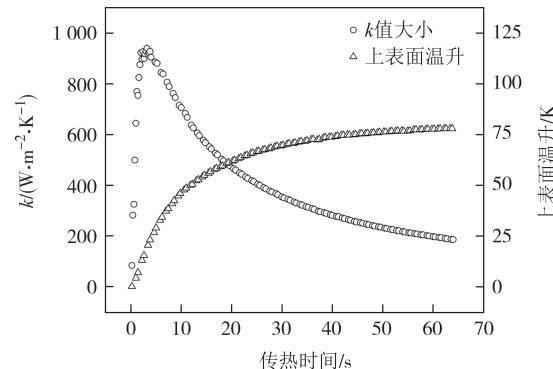


图6 当金属薄片厚度为3.0 mm时,上表面温升和接触热流密度常数k值随接触传热时间的变化情况

Fig.6 When the thickness of the metal sheet is 3.0 mm, the temperature rise on its upper surface and the contact heat flux constant k value change with the contact heat transfer time

结合接触传热时间与金属薄片厚度对接触热流密度常数 k 的计算影响分析,由图5可知,接触热流密度常数 k 最大计算结果为1 022.51 W/(m²·K),该结果以3.0 mm厚金属薄片、传热时间为2.0 s为试验条件,为多次试验下的平均计算结果.

综合考虑试验原理的局限性,以及实际环境、接触热阻等因素的影响,接触热流密度常数 k 的真实值应大于计算结果.

3 结论与展望

基于现有传热学研究的基础与科学的假设,通过本文的理论推导和分析,得到以下结论:

- 1)提出了接触热流密度最大值 q_i 与接触热流密度常数 k 的概念,并提出了 $q_i=k\Delta T_0$,为研究有限热流速度下的热流传递过程及初始值问题提供一种思路与方法.
- 2)提出了计算接触热流密度常数 k 的试验原理:试验获取金属薄片的上表面温升,以计算平均热流密度,并将其等效为瞬时热流密度,进一步统计与分析不同厚度与时间下的试验结果,确定最大接触热流密度,完成对常数 k 的计算.

- 3)以0.5~5.0 mm厚的不锈钢304金属薄片为试验对象,在热源温度为100 °C、温差为78 K的条件下,得到接触热流密度常数 k 为1 022.51 W/(m²·K).

本文所提出的理论基于假设推导,受试验条件的限制,其准确性与适用性仍需完善与验证,后续研究可用其他金属材料及非金属材料为试验对象,进一步优化试验装置与计算原理开展试验研究,以期更精准地得到接触热流密度和接触热流密度常数。

参考文献

- [1] FOURIER J. Analytical theory of heat [M]. London: London Dover Publications, Inc, 1955:84-86.
- [2] 王海东,过增元. 热子气-气体和金属中热量传递的载体[J]. 科学通报,2010,55(21):2164-2170.
WANG H D, GUO Z Y. Thermon gas-carrier of heat transfer in gases and metals [J]. Chinese Science Bulletin, 2010, 55 (21) : 2164-2170. (in Chinese)
- [3] ZHANG H W, ZHANG S, GUO X, et al. Multiple spatial and temporal scales method for numerical simulation of non-classical heat conduction problems: one dimensional case [J] . International Journal of Solids and Structures, 2005, 42 (3/4) : 877-899.
- [4] 张创. 声子输运的介观数值方法及非傅里叶导热机理研究[D]. 武汉:华中科技大学,2021.
ZHANG C. Mesoscopic numerical method of phonon transport and study on non-Fourier heat conduction mechanism [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2021. (in Chinese)
- [5] KUNDU B, LEE K S. Fourier and non-Fourier heat conduction analysis in the absorber plates of a flat-plate solar collector [J] . Solar Energy, 2012, 86(10): 3030-3039.
- [6] CALVO-SCHWARZWÄLDER M, MYERS T G, HENNESSY M G. The one-dimensional Stefan problem with non-Fourier heat conduction [J]. International Journal of Thermal Sciences, 2020, 150:106210.
- [7] 余宁,潘健生,顾剑锋,等. 瞬态非傅里叶导热效应判据的探讨[J]. 激光技术,2002,26(2): 156-158.
YU N, PAN J S, GU J F, et al. Transient criterion of non-Fourier heat conduction law [J]. Laser Technology, 2002, 26 (2) : 156-158. (in Chinese)
- [8] CATTANEO C. A form of heat-conduction equations which eliminates the paradox of instantaneous propagation [J]. Comptes Rendus, 1958, 247: 431-433.
- [9] VERNOTTE P. Les paradoxes de la theorie continue de l'équation de la chaleur[J]. Comptes Rendus, 1958, 246: 3154-3155.
- [10] TZOU D Y. The generalized lagging response in small-scale and high-rate heating [J] . International Journal of Heat and Mass Transfer, 1995, 38(17): 3231-3240.
- [11] TAMMA K K, NAMBURU R R. Hyperbolic heat-conduction problems-Numerical simulations via explicit Lax-Wendroff-based finite element formulations [J] . Journal of Thermophysics and Heat Transfer, 1991, 5(2): 232-239.
- [12] 王海东,曹炳阳. 热学中的相对论性动质量和动质能[J]. 中国科学(技术科学), 2021, 51(10): 1245-1250.
WANG H D, CAO B Y. Relativistic kinetic mass and kinetic energy in thermal science [J]. Scientia Sinica (Technologica) , 2021, 51(10): 1245-1250. (in Chinese)
- [13] CAO B Y, GUO Z Y. Equation of motion of a phonon gas and non-Fourier heat conduction [J] . Journal of Applied Physics, 2007, 102(5): 053503.
- [14] 过增元. 火积·热质能·相对论性动质能[J]. 中国科学(技术科学), 2021, 51(10): 1137-1154.
GUO Z Y. Entransy·thermomass energy·relativistic kinetomass energy [J]. Scientia Sinica (Technologica), 2021, 51(10): 1137-1154. (in Chinese)
- [15] 张渐,刘登瀛. 非傅里叶热传导研究进展[J]. 力学进展, 2000, 30(3):446-456.
ZHANG Z, LIU D Y. Advances in the study of non-Fourier heat conduction [J]. Advances in Mechanics, 2000, 30(3):446-456. (in Chinese)