

瞬态平面热源法热物理性能测量精度 和适用范围的标定

——常温下标准材料奥氏体不锈钢的热物理性能对比测试

何小瓦

(航天材料及工艺研究所, 北京 100076)

文 摘 瞬态平面热源法作为一种非稳态热物理性能测试技术, 其测量范围、测量精度和试验参数的确定是正确评价和应用这种测试技术的前提条件。本文详细描述了采用瞬态平面热源法测量装置对热物理性能标准材料奥氏体不锈钢所进行的对比测试, 并由此考察这种测试方法和测试装置的测量精度和适用范围。

关键词 瞬态平面热源法, 热物理性能, 热导率, 标准材料, 测量精度

Verification Measurement Precision and Test Range of Thermophysical Properties of Transient Plane Source (TPS) Method

He Xiaowa

(Aerospace Research Institute of Materials & Processing Technology Beijing 100076)

Abstract Transient plane source (TPS) is one of the thermophysical properties measurement methods. Confirming the test range, precision and operation parameters is the precondition of its application and evaluation. The paper describes the measurements results of standard materials austenitic stainless steel using TPS apparatus, and verifies the test precision and measurement range.

Key words Transient plane source, Thermophysical property, Thermal conductivity, Standard material, Measurement precision

1 引言

传统的材料热性能测试方法, 通常要求大尺寸的试样, 测量过程比较费时以及测试装置过于复杂, 已逐渐不能满足实际生产和质量监控的需求。因此开发出各种实用的接触式非稳态测量方法, 也称作瞬态法或动态法。非稳态法具有快速、准确等许多优点, 一次测量可同时得到多个参数, 方式灵活多样, 测试范围可覆盖多种材料、较宽的温度和参数区间。

非稳态测试仪器应该使用标准材料试样进行标定和验证, 另外实验方法及数据处理方法也应当规范和标准化, 以便尽可能的控制测量结果的偏差和不一致性, 因此建立国际上通用的非稳态法测量标准就显得尤为迫切和重要。

瞬态平面热源技术做为非稳态测量方法的一个分支得到了越来越多的研究和应用, 很多文献报道了瞬态平面热源测试方法在性能测试评价方面的应用, 但对于瞬态平面热源测试方法的准确性和适用范围的报道较少。为了对瞬态平面热源测试方法进行准确的评估以及对这项技术的深入了解和合理运用, 对这种测试方法的测量精度和适用范围进行标定是十分必要的。

文献 [1] 详细介绍了瞬态平面热源法的测量原理以及常温下的测量装置, 描述了采用 Pyroceram 9606 热物理性能标准材料研究瞬态平面热源法在实际测试中各种试验参数对测量精度的影响, 并最终确定选用高精度桥路瞬态平面热源法 (TPS) 测量装置

收稿日期: 2007-09-30

作者简介: 何小瓦, 1963年出生, 高级工程师, 主要从事材料物理性能测试技术的研究工作

作为标准的测量装置。本文在前期研究工作的基础上,采用此高精度桥路 TPS测量装置对标准材料奥氏体不锈钢进行了对比测试,并给出瞬态平面热源法的测量精度和适用范围。

2 标定试验

2.1 标准材料奥氏体不锈钢

标准材料奥氏体不锈钢是美国 NIST SRM1460号标准参考材料,其基本的成分为: 62% Fe 20.2% Ni 16.2% Cr 1.2% Mn 0.28% S和小于 0.01% 的 C。它的密度为 $(8.007 \pm 0.002) \text{ g/cm}^3$ 。在 $-100 \sim 850^\circ\text{C}$, SRM1460的热物理性能参数如表 1所示。在此标定测试中,选用的试样尺寸为 $\Phi 50.8 \text{ mm} \times 25.4 \text{ mm}$ 。

表 1 奥氏体不锈钢热物理性能随温度变化的标准数据

Tab 1 Data table for standard reference material of austenitic stainless steel

温度 / $^\circ\text{C}$	热导率 / $\text{W} \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1}$	热扩散率 / $\text{mm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$	比热容 / $\text{J} \cdot (\text{g} \cdot \text{K})^{-1}$	温度 / $^\circ\text{C}$	热导率 / $\text{W} \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1}$	热扩散率 / $\text{mm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$	比热容 / $\text{J} \cdot (\text{g} \cdot \text{K})^{-1}$
-100	11.56	3.48	0.413	350	19.54	4.62	0.538
-50	12.73	3.66	0.433	400	20.20	4.73	0.544
0	13.78	3.86	0.445	450	20.83	4.82	0.552
50	14.77	4.01	0.461	500	21.43	4.94	0.556
100	15.69	4.13	0.476	600	22.57	4.99	0.583
150	16.55	4.20	0.495	700	23.63	5.21	0.589
200	17.36	4.29	0.510	750	24.13	5.30	0.593
250	18.13	4.41	0.520	800	24.61	5.37	0.598
300	18.85	4.51	0.530	850	25.07	5.46	0.601

2.2 测试仪器

标定测试中采用高精度桥路 TPS测量装置,对半径为 2.001 mm、6.403 mm和 9.719 mm的三种 TPS探测器进行标定测试。

3 结果和讨论

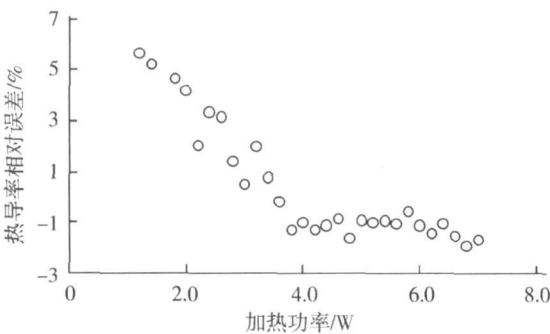
由于 TPS技术在测试过程中,需要对加热功率和测量时间的选取范围进行初步的判断和尝试,即测试结果不是唯一确定的,选择不同的试验参数会得出不同的测试结果。因此,本文描述了每一种尺寸的 TPS探测器,在选取不同加热功率和测量时间时所获得的测量结果,由此来确定这些不同的试验参数对测

量精度所产生的影响。同时,在标定测试中,还考虑了试样尺寸对试验参数选取的各种影响因素。

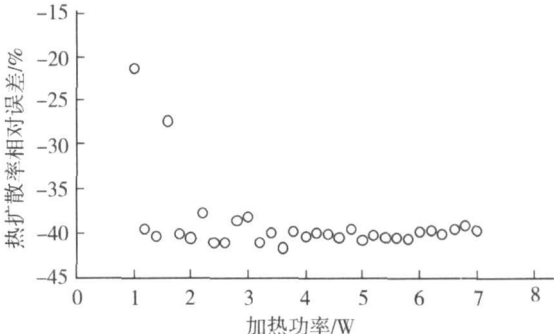
3.1 半径为 2.001 mm的 TPS探测器的标定

小尺寸的探测器,由于其热容小,测量时所需要的加热功率和测量时间都比较小,所以常用于测量液体(甚至失重状态下液体)的热性能参数。

对于半径为 2.001 mm的 TPS探测器,在能获得有效试验数据的前提下,仅有 2.5 s一种测量时间可供选择。在标定测试中,选择不同的加热功率,由此来标定这些试验参数变化对测量误差的影响。测量结果见图 1。



(a) 热导率标定



(b) 热扩散率标定

图 1 加热时间 2.5 s时热导率和热扩散率标定测量的相对误差

Fig 1 Relative errors for thermal conductivity and diffusivity based on heating time of 2.5 s

根据以上的标定测量结果,选择能达到热导率最小测量误差的试验参数进行了 10 次的重复性测量,

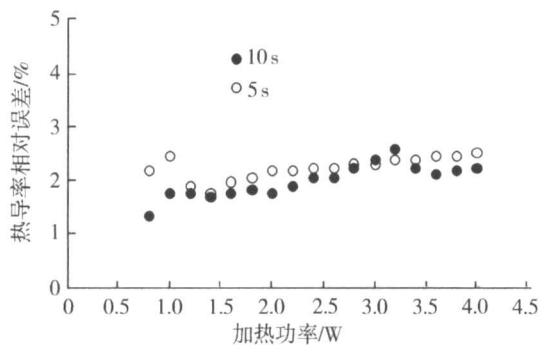
测量结果如表 2 所示。

表 2 采用半径 2 001 mm TPS探测器的重复性测量结果
Tab 2 Repeating measurement result of 2 001 mm TPS sensor

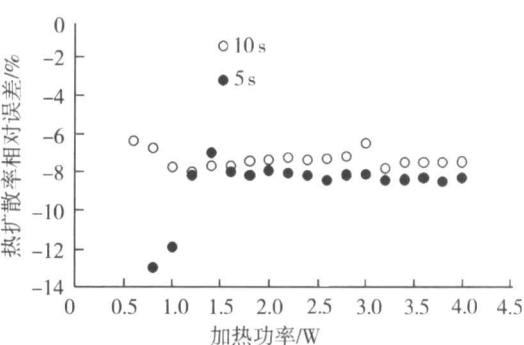
加热功率 /W	测试时间 /s	热导率平均值 /W (m K) ⁻¹	热扩散率平均 值 /mm ² ·s ⁻¹	探测深度平均 值 /mm	温度增益 平均值 /℃	特征时间 平均值	拟合偏差 平均值	热导率相对 误差范围 /%	热扩散率相对 误差范围 /%
4	2 5	14 38	2 08	4 93	1 19	1 14	1. 067× 10 ⁻³	0 7~2 1	-46 3 ~ -48 1

根据整个标定测试结果,采用半径为 2 001 mm 的 TPS探测器,随着加热功率的增大,热导率的测量误差逐渐减小,但热扩散率的测试误差快速增大。因此,对于这种 TPS探测器,如果仅仅是为了测量材料的热导率而不关心材料的热扩散率,测量中可以选择较大的加热功率,这样热导率参数的测量误差基本上

可以控制在 ±3%以内。
3 2 半径为 6 403 mm的 TPS探测器的标定
对于半径为 6 403 mm的 TPS探测器,仅有 5和 10 两种测量时间可供选择。在标定测试中,选择不同的测量时间和加热功率,由此来标定这些试验参数变化对测量误差的影响(图 2)。



(a) 热导率标定



(b) 热扩散率标定

图 2 加热时间 5 和 10 s 时热导率和热扩散率标定测量的相对误差

Fig 2 Relative errors for thermal conductivity and diffusivity based on heating time of 5 s and 10 s

从测试结果可以看出,采用半径为 6 403 mm的 TPS探测器,加热功率和测量时间的变化对热导率的测量误差影响不大,较短的加热时间(10 s)可以使得热扩散率的测试误差更小。因此,对于这种 TPS探测器,各种试验参数的选择总能保证热导率在 ±3%

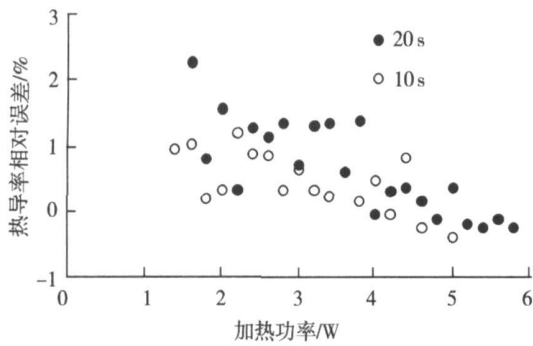
以内、热扩散率在 ±10%以内的测量相对误差。
根据以上的标定测量结果,选择能达到最小测量误差的试验参数进行了 10 次重复性测量,测量结果见表 3。

表 3 采用半径 6 403 mm TPS探测器的重复性测量结果
Tab 3 Repeating Measurement result of 6 403 mm TPS sensor

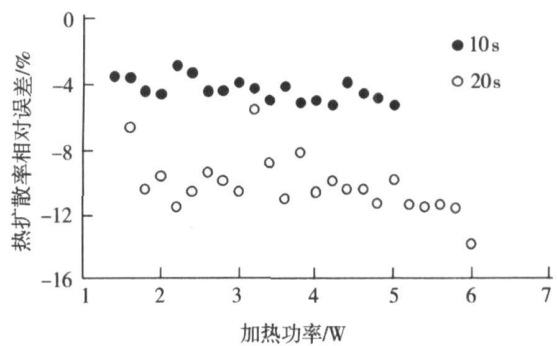
加热功率 /W	测试时间 /s	热导率平均值 /W (m K) ⁻¹	热扩散率平均 值 /mm ² ·s ⁻¹	探测深度平均 值 /mm	温度增益 平均值 /℃	特征时间 平均值	拟合偏差 平均值	热导率相对 误差范围 /%	热扩散率相对 误差范围 /%
2	10	14 53	3. 65	12 6	1 00	0 89	1. 077× 10 ⁻⁴	2 11~2 81	-5 59~-8 14

3 3 半径为 9. 719 mm的 TPS探测器的标定
对于半径为 9. 719 mm的 TPS探测器,在能获得有效试验数据的前提下,仅有 10 s和 20 s两种测量时间可供选择。在标定测试中,选择不同的加热功率来标定这些试验参数变化对测量误差的影响(图 3)。
从测试结果可以看出,采用半径为 9. 719 mm的

TPS探测器,加热功率和测量时间的变化对热导率的测量误差影响不大,较短的加热时间(10 s)可以使得热扩散率的测试误差更小,而较长的加热时间(20 s)会给热扩散率的测量带来很大误差。因此,对于这种 TPS探测器,选择较短的加热时间总能保证热导率在 ±3%以内、热扩散率在 ±6%以内的测量相对误差。



(a) 热导率标定



(b) 热扩散率标定

图 3 加热时间 10 s 和 20 s 时热导率和热扩散率标定测量的相对误差

Fig 3 Relative errors for thermal conductivity and diffusivity based on heating time of 10 s and 20 s

根据以上的标定测量结果,选择能达到最小测量误差的试验参数进行了 10 次重复性测量,测量结果如表 4 所示。

表 4 采用半径 9.719 mm TPS 探测器的重复性测量结果
Tab 4 Repeating Measurement result of 9.719 mm TPS sensor

加热功率 /W	测试时间 /s	热导率平均 值/ $\text{W}\cdot(\text{m}\cdot\text{K})^{-1}$	热扩散率平均 值/ $\text{mm}^2\cdot\text{s}^{-1}$	探测深度 平均值/mm	温度增益 平均值/ $^{\circ}\text{C}$	特征时间 平均值	拟合偏差 平均值	热导率相对 误差范围/%	热扩散率相对 误差范围/%
1	10	14.02	3.70	12.1	1.41	0.912	2.047×10^{-4}	$-0.67\sim-1.52$	$4.57\sim 6.99$

4 结论

通过本文标定工作可以看出,对测试热导率在 $14\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 左右的未知材料时,为了保证测量误差达到基本的工程应用要求(热导率测试误差小于 $\pm 3\%$,热扩散率测试误差小于 $\pm 6\%$),需要在具体的测试过程中针对不同的探测器选择合适的加热时间和加热功率。同时,针对具体的被测材料,测试过程中除选择合适的探测器和试验参数之外,还应注意一定要设法保证被测样品温度的恒定。由于 TPS 探测

器本身在测试过程中会产生热量,因此相邻的两次测试一定要间隔一定时间以等到被测样品温度趋于稳定。

参考文献

- 何小瓦,黄丽萍.瞬态平面热源法热物理性能测量精度和适用范围的标定——常温下标准 Pyroceram 9606 材料热物理性能测量.宇航计测技术,2006,26(4):31~42

(编辑 李洪泉)