

提高低导热材料表面温度均匀性方法的研究

辛春锁 何小瓦

(航天材料及工艺研究所,北京 100076)

摘要 比较了不同低导热材料的高温热导率测试装置特点,确定了在整体加热方式下试样表面温度均匀性差是限制测试准确度提高的一个原因,提出采用分区加热的方法改善试样表面温度均匀性。选取三种不同热导率范围的材料作为被测试样,分别做了试样整体加热和分区加热的模拟计算。结果表明,整体加热方式只能在试样表面中心有限区域形成均温区,而分区加热方式能显著改善试样表面温度均匀性。

关键词 表面温度 均匀性 导热性 加热方法

Research of Improving Surface Temperature Uniformity of Low Thermal Conductance Materials

XIN Chun-suo HE Xiao-wa

(Aerospace Research Institute of materials and processing Technology, Beijing 100076)

Abstract The characteristics of thermal conductivity measurement apparatus for high temperature with different low thermal conductance were compared, and one of the reasons leading to low measurement accuracy was concluded, that is mainly caused by the poor temperature uniformity with whole heating method. According to these analyses, the partition heating method was proposed for improving temperature uniformity of the specimen surface. Three materials with different thermal conductivity were used to experiment and simulation calculation through the whole heating and district heating method respectively. The experiment results show that a limited even surface temperature area can be formed on the center of the specimen with the whole heating method, and the entire surface temperature can be reached to a better uniformed state with the partition heating method.

Key words Surface temperature Homogeneity Thermal conductivity Heating method

1 引言

随着新型高效隔热材料技术的发展,使得新型高温隔热材料在固体导热、气体导热、对流换热以及热辐射等多种传热形式耦合作用下表现出更低的传热性能和更高的耐用温度。如何准确测试这些新型隔热材

料在高温下的有效热导率成为当前技术研究方向。

纵观国内外对高温隔热材料有效热导率测试方法,稳态热流计法是目前唯一可以实现 1 000℃ 以上有效热导率测试的成熟有效技术。基于这一技术,美国兰利研究中心 1999 年研制了一套变气氮压力高温有效热导率测试装置^[1],试样呈正方形,最大

边长为 8in(约 203mm), 试样的冷面温度为室温, 试样热面最高温度可达 1 800 °F(约 982°C), 采用薄膜热流计测试流经试样的热流密度, 测量装置的有效热导率测量不确定度范围为 5.5%~9.9%, 在常压环境下对 NIST 标准参考材料测试的不确定度在 5.5%以内。为了模拟金属热防护系统再入大气层时的瞬态压力及气动加热条件, 2002 年兰利研究中心又研制了一套可测更大尺寸试样(18in×18in, 约 457mm×914mm)的热真空试验装置^[2]。该装置采用石英灯进行辐射加热, 试样热面温度最高可达 1 100°C。为提高试样热面的温度均匀性, 该测试系统对石英灯辐照加热进行了特别的设计, 能保证试样热面上任意位置与中心位置之间的温差小于 100 °F(约 37.7°C)。2006 年, 哈工大张博明等人也依据热流计法研制了相应的高温变气氛压力等效热导率测试装置^[3]。该装置与美国兰利研究中心测量装置的不同之处在于它采用了平板型石墨加热体在试样上方对试样进行辐射加热, 从而将试样热面温度提高到 1 600°C, 试样最大尺寸为 450mm×150mm×(5~80)mm, 环境气压控制范围为(6.67×10⁻³~1.01×10⁵)Pa。2009 年, 航空 623 所任青梅等人采用薄膜热量计技术研制了一套热真空模拟试验装置, 可以对热防护系统的传热性能进行稳态热流计法热导率测试和瞬态热响应测试。试样尺寸为 200mm×200mm, 热面最高温度可高达 1 100°C。

通过对这些热流计法高温热导率测试系统的分析, 不难发现这些装置普遍采用单一热源将试样热面加热至高温。虽然这种整体加热方式易于实现, 但弊端是无法保证试样热面温度的均匀性, 限制了一维轴向热流区域的范围, 增加了热流密度测试难度, 不利于测试技术的推广和使用。为改善高温下试样表面温度的均匀性, 本文在对试样进行径向护热的条件下分别用有限元模拟计算了均热板整体加热和分区加热两种方式下试样热面温度的均匀程度, 以期能确定在试样更大范围形成一维稳定的轴向热流的加热方法, 从而有助于指导测试系统中均热板的设计和制作和热导率测试准确度的提高。

2 测量原理

热流计法热导率测量原理如图 1 所示。当被测试样的热面和冷面处于温度稳定状态下, 在被测试样的中心区域和热流测量装置的中心区域会建立起

单向稳态热流。假设此热流密度为 q , 试样的热面和冷面温度分别为 T_{hot} 和 T_{cold} , 试样厚度为 d , 则试样的等效热导率为

$$\lambda = \frac{qd}{T_{hot} - T_{cold}} \quad (1)$$

稳态热导率测试方法要求在试样有效测试面积上建立一维稳态热流。但在实际测试中, 虽然普遍采用径向护热措施, 但在测量装置安装调试完毕后, 侧向热阻基本上固定不变, 而试样热阻则会因被测试样导热性能的不同而不同(假设厚度不变)。由此, 若要使得均热板的温度均匀, 就要使得侧向热阻与试样热阻相等, 但这在工程实践上很难实现。一个可行方案是采用图 2 的方式对试样的侧面进行径向护热, 同时采用分区加热的方式。下面即针对这两种加热模式, 对不同导热能力的材料进行热模拟分析, 以判断两种加热方式的优劣。

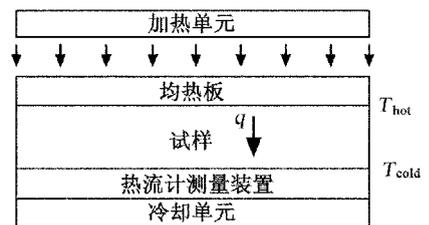


图 1 热流计法热导率测量原理图

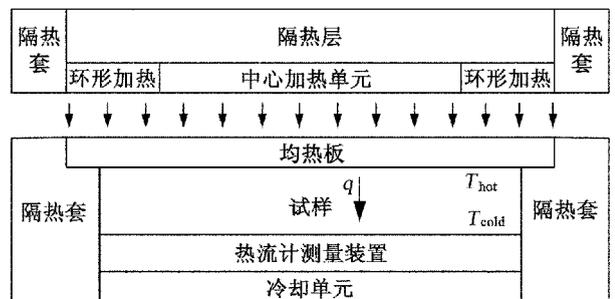


图 2 分区加热方式测量结构示意图

3 有限元分析模型和参数设定

3.1 有限元模拟计算模型

考虑到有限元法和有限差分法等数值模拟技术已在各种高温热物性测试的理论分析中得到广泛应用, 采用 ANSYS 有限元软件对两种加热方式的过程进行模拟计算。根据图 2 所示的热流计法热导率测量原理以及测量装置实际情况提炼出的有限元模拟计算模型如图 3 所示, 其中测试试样的标准尺寸是 200mm×200mm 的正方形, 均热板尺寸为 300mm×

300mm×10mm, 外围隔热套和水冷板的尺寸为 400mm×400mm。由于整个测量装置是以正方形中心轴形成对称, 为了降低有限元个数提高模拟计算效率, 有限元模拟计算选择四分之一结构作为计算模型。其中设定试样、中心加热板、侧向加热板及隔热套的相对侧表面、隔热套与外界环境相对的侧表

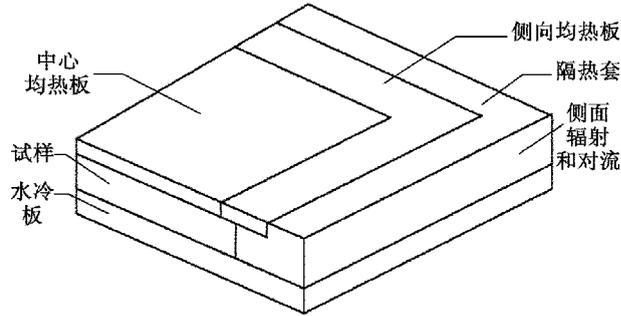


图 3 热流计法热导率测试有限元模拟计算模型

面具备对流和热辐射两种热传递方式, 对流系数 $25\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$, 辐射系数为 0.7, 不同温度下的热导率、比热和密度根据所选材料的不同而不同, 外界环境温度为 30°C ; 试样中心位置的两个侧面为绝热面, 各部件的上下接触表面接触良好, 通过热传导传递热量。

3.2 有限元模拟计算参数设定

(1) 试样: 根据实际材料的热导率情况, 选取三种不同热导率范围的材料作为被测试样, 它们的热导率随温度变化曲线和数据如图 4 所示。通过这种设定, 基本上覆盖了各种隔热材料热导率的变化范围。由于绝热材料比热容和密度随温度变化不大, 所以模拟计算中设定它们为常数, 三种材料的比热容都为 $1000\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$, 密度都为 $300\text{kg}/\text{m}^3$ 。

(2) 均热板: 均热板是保证整个测量达到一维热流的重要部件, 根据工程需要选用耐高温、抗氧化且热导率较高的碳化硅材料制成, 其典型数据如图 5 所示。

温度 °C	超低 热导率 W/mK	低 热导率 W/mK	高 热导率 W/mK
20	0.005 0	0.020 0	0.80
100	0.005 1	0.020 4	0.81
200	0.005 3	0.021 0	0.84
300	0.005 5	0.022 0	0.88
400	0.005 8	0.023 4	0.94
500	0.006 3	0.025 1	1.00
600	0.006 8	0.027 0	1.08
700	0.007 3	0.029 4	1.17
800	0.008 0	0.032 0	1.28
900	0.008 8	0.035 0	1.40
1000	0.009 6	0.038 3	1.53
1100	0.010 5	0.042 0	1.68
1200	0.011 5	0.045 9	1.84
1300	0.012 6	0.050 2	2.01
1400	0.013 7	0.054 9	2.19
1500	0.015 0	0.059 8	2.39

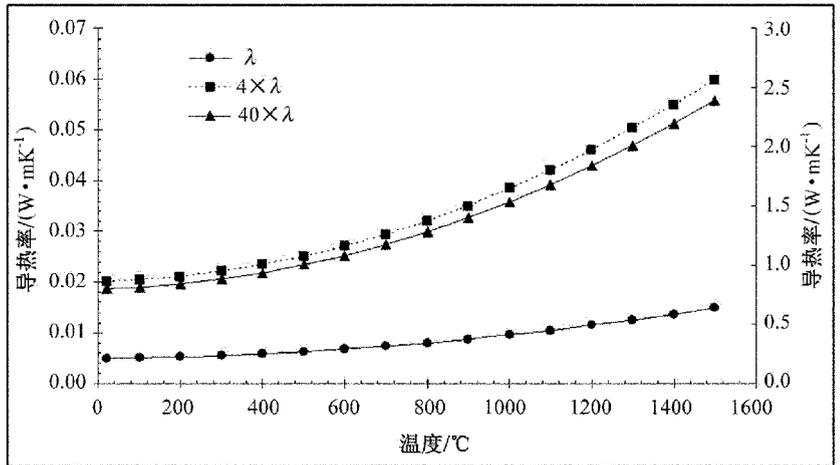


图 4 三种不同材料热导率随温度变化范围

温度	热导率 W/mK	比热容 J/kgK	密度 kg/m³
20	113.9	715	3 160
100	100.3	798	3 157
200	85.7	889	3 153
300	73.5	966	3 149
400	63.5	1 031	3 144
500	55.3	1 085	3 139
600	48.9	1 130	3 134
700	43.9	1 167	3 129
800	40.1	1 197	3 123
900	37.2	1 222	3 117
1 000	35.0	1 244	3 112
1 100	33.3	1 262	3 106
1 200	31.7	1 280	3 100
1 300	30.1	1 297	3 094
1 400	28.3	1 316	3 088
1 500	25.9	1 338	3 082

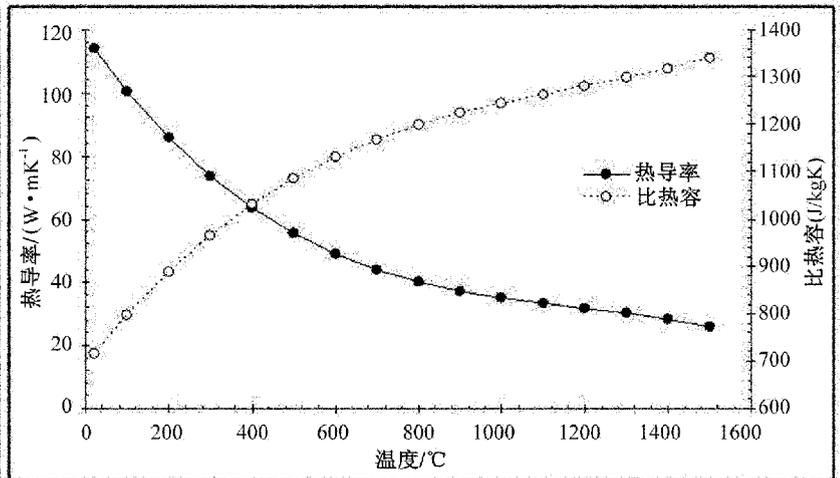


图 5 碳化硅热物理性能数据

(3) 隔热材料: 隔热材料的作用是抑制试样径向热损的发生, 根据实际测量装置中隔热套的材料选取情况, 计算模型中选取上述低热导率材料的热导率数据。

(4) 水冷板: 水冷板是通过恒温水浴进行强制冷却和恒温控制的装置, 要求水冷板采用热导率较高的金属材料, 在有限元计算中选用常用的铝合金材料, 它的热导率是 $200\text{W}/(\text{mK})$ 。

4 模拟计算和结果分析

4.1 试样热阻较小情况下的模拟计算

为了模拟试样热阻较小的情况, 选择图 4 中高热导率材料作为被测试样, 并且假定被测试样处于最厚的情况 (30mm)。由此来模拟计算均热板整体加热和分区加热时试样均温区的变化。

4.1.1 均热板整体加热

在试样热阻较小时, 采用 400W 功率加热均热板, 均热板和试样内部的表面温度分布如图 6 所示。从图中可以看出, 相对于侧向热阻来说, 试样热阻较小, 使得均热板和试样的中心位置温度要远小于它们的边缘温度。由于均热板热导率较高, 均热板厚度方向上的温差很小, 但均热板表面方向的温差很大, 在均热板边缘达到近 1500°C 时, 均热板中心温度只有 1328°C , 相差近 180°C 。对应的试样中间平面内的温差最大也达到了近 60°C , 整个均热板和试样同一表面存在很大温度梯度。

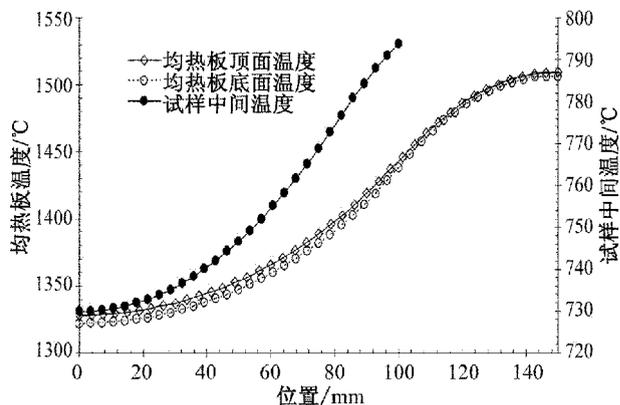


图 6 试样热阻较小情况下均热板和试样表面温度分布

4.1.2 均热板分区加热

在试样热阻较小采用分区加热均热板时, 均热板中心区域和侧向区域的加热功率分别为 235W 和 30W, 均热板的表面温度分布如图 7 所示。从图中可以看出, 采用分区加热后, 均热板不同位置的表面温度最大差值不超过 0.5%, 整个均热板和试样的温

度均匀性都非常好。

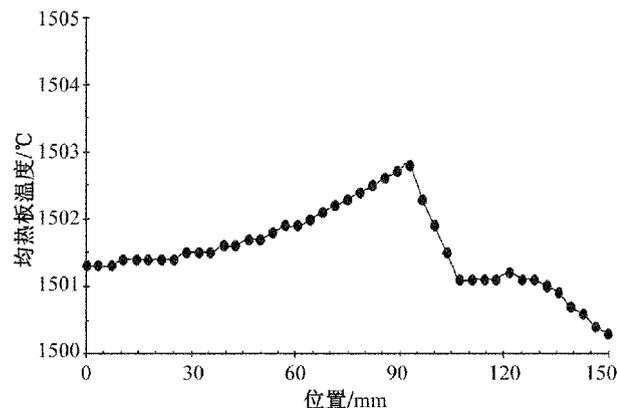


图 7 试样热阻较小时分区加热情况下均热板的温度分布

4.2 试样热阻较大情况下的模拟计算

为了模拟试样热阻较大的情况, 选择图 4 中低热导率和超低热导率两种材料作为被测试样, 并且假定被测试样处于最厚的情况 (30mm)。由此来模拟计算均热板整体和分区加热的情况。

4.2.1 低热导率被测试样时均热板整体加热

在试样热阻较小时, 采用 50W 功率加热均热板, 均热板和试样内部的表面温度分布如图 8 所示。从图中可以看出, 相对于侧向热阻来说试样热阻较大, 使得均热板和试样的中心位置温度要高于它们的边缘温度。由于均热板热导率较高, 均热板厚度方向上的温差很小, 但均热板表面方向有一定的温差, 在均热板中心达到近 1509°C 时, 均热板边缘温度只有 1503°C , 相差 6°C 左右, 不超过 0.5%。对应的试样中间平面内的温度分布, 试样中心位置温度近 984°C , 试样边缘温度为 981°C , 温差最大也只有 3°C 左右, 不超过 0.5%, 可见整个均热板和试样的温度均匀性较好。

4.2.2 超低热导率被测试样时均热板整体加热

在超低试样热阻时, 采用 36W 功率加热均热板, 均热板和试样内部的表面温度分布如图 9 所示。从图中可以看出, 相对于侧向热阻来说试样热阻很大, 使得均热板和试样的中心位置温度要高于它们的边缘温度。由于均热板热导率较高, 均热板厚度方向上的温差很小, 但均热板表面方向有一定的温差, 在均热板中心达到近 1502°C 时, 均热板边缘温度只有 1489°C , 相差 13°C 左右, 不超过 1%。对应的试样中间平面内的温度分布, 试样中心位置温度近 950°C , 试样边缘温度为 966°C , 温差最大为 16°C 左右, 总体波动为 1.6%, 但在 80% 的试样区域内温度波动不超过 1°C , 只是越靠近试样边缘温度波动越大, 由此可见测

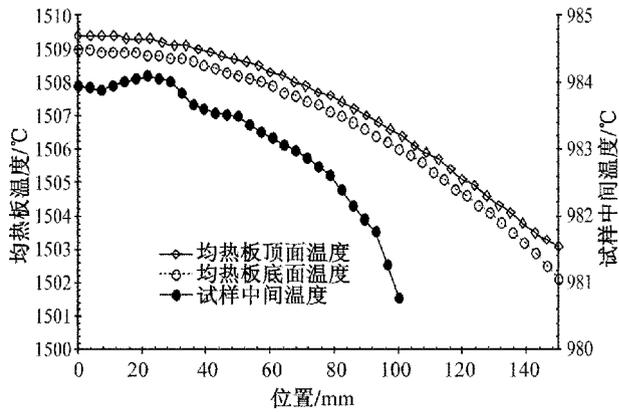


图8 试样热阻较大情况下(低热导率试样)均热板和试样表面温度分布

量超低热导率被测试样,在整个均热板和试样的80%区域内基本处于较好的温度均匀状态。

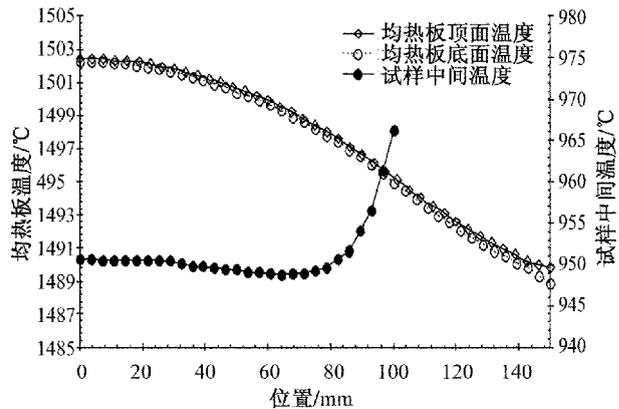


图9 试样热阻较大情况下(超低热导率试样)均热板和试样表面温度分布

4.2.3 试样热阻较大时均热板分区加热

在试样热阻较大时,采用分区加热均热板方法。对于低热导率被测试样,均热板中心区域和侧向区域的加热功率分别为30W和10.5W;对于超低热导率被测试样,均热板中心区域和侧向区域的加热功率分别设置为21.2W和9W。在这两种分区加热情况下,均热板的表面温度分布如图10所示。从图中可以看出,采用分区加热后,均热板不同位置的表面温度最大差值不超过0.5%,均热板和试样整个区域的温度均匀状态都非常好。

5 结束语

通过以上分析,可以得出以下结论:

(1)在均热板整体加热方式下,当隔热材料所代表的侧向热阻大于试样热阻时,均热板上不同位

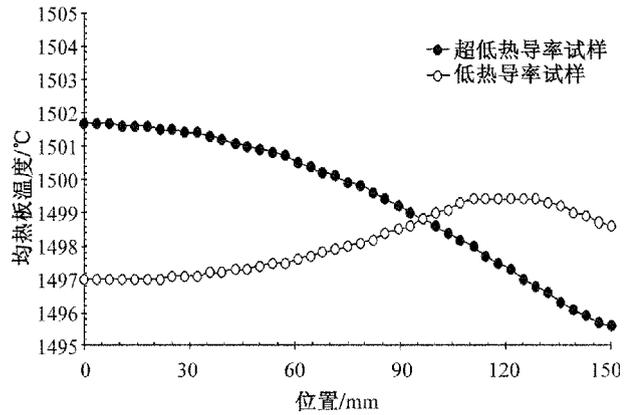


图10 试样热阻较大时均热板分区加热情况下的温度分布

置的最大温差超过10%以上,温度均匀性很差。当侧向热阻接近试样热阻时,均热板上会有很好的均温区,均热板上不同位置最大温度偏差不超过0.5%。当侧向热阻小于试样热阻时,均热板中心区域80%均热板面积内的温度均匀性很好,均热板不同位置最大温差不超过1%。

(2)在均热板分区加热方式下,对于各种侧向热阻和试样热阻情形,整个均热板和试样的整个区域的温度均匀性都非常好,均热板不同位置的最大温度偏差不超过0.5%。

(3)从以上计算分析结果可以看出,对于整体加热方式,均热板和试样四周隔热套材料的热阻对一维热流的形成至关重要,而且整体加热方式只能在试样的中心区域内形成一定的均温区。

(4)采用分区加热方式可以很好的消除各种因素对均温区的影响,尽管分区加热方式在工程实现上有一定难度,但这种加热方式可以规避很多其他隐形影响因素。

参考文献

- [1] Kamran Daryabeigi. Effective Thermal Conductivity of High Temperature Insulations for Reusable Launch Vehicles[R]. NASA/TM-1999-208972, 1999.
- [2] Kamran Daryabeigi, Jeffrey R Knutson and Joseph G Sikora. Thermal Vacuum Facility for Testing Thermal Protection Systems[R]. NASA/TM-2002-211734, 2002.
- [3] 解维华,张博明,杜善义等. 高温绝热毡有效热导率的理论分析与实验研究[J]. 材料研究学报, 2006, 20(6): 571~575.
- [4] 任青梅,刘一鸣,成竹等. 热防护系统热真空模拟试验技术[J]. 装备环境工程, 2009, 6(6): 64~68.
- [5] 冯焱,曾祥坡,张涤新等. 小孔流导法材料放气率测量装置的设计[J]. 宇航计测技术, 2010, 30(6): 66~69.