

长时间隔热材料环境的稳态热流测量方法

涂建强 刘德英 陈海群

(中国航天空气动力技术研究院,北京 100074)

文 摘 介绍并研究了一种基于一维稳态热传导原理的三段稳态塞式量热计。该量热计通过测量探芯中间康铜段前、后表面上的温差来得到壁面热流密度。适合稳态、低热流状态下,驻点及大面积区长时间隔热材料上的多点测量。首先从理论上分析了三段稳态塞式量热计的稳态热流测量原理;然后采用超声速矩形湍流导管试验技术,利用等离子电弧加热器进行了表面热流测量试验。结果表明:在包含来流参数约 $\pm 4\%$ 的系统误差情况下,三段稳态塞式量热计的测量重复性偏差为 $\pm 7.6\%$,经误差分析得到该量热计的热流测量精度在 5% 以内。

关键词 隔热材料,稳态热流测量技术,气动热试验,电弧加热器

Steady-State Heat-Flux Measurement Method for Environment of Long-Time Insulation Materials

Tu Jianqiang Liu Deying Chen Haiqun

(China Academy of Aerospace Aerodynamics, Beijing 100074)

Abstract The three-segment steady-state plug-type calorimeter based on one-dimension heat transfer principle was introduced and in the paper. The wall-heat-flux was obtained by measuring temperature difference between the fore-and-aft surfaces of constantan segment. The calorimeter is suitable for long-time multi-point measurement of stagnation-point and local heat flux in the same big area of insulation material in steady-state and low-heat-flux. Firstly, the heat-flux measurement principle of the three-segment steady-state plug-type calorimeter was analyzed theoretically. Then, the supersonic rectangle turbulent duct technique and arc heater are used to measure the wall-heat-flux. The result indicates that including the flow parameters varying within about 4%, the heat-flux repetition deviation of the calorimeter is 7.6%. The error analysis result shows that the relative deviation of the calorimeter is less than 5%.

Key words Heat insulation material, Steady-State heat-flux measurement technique, Aerothermodynamics experiment, Arc heater

1 前言

高超声速飞行器热防护系统的防热结构以及防、隔热材料地面试验研究中,模型表面热流密度的大小是隔热试验的关键参数之一;因此热流密度的测量精度对热防护试验研究中材料隔热性能分析以及防、隔热结构可靠性评估以及材料隔热机理性能研究都有着重要的意义。进行材料隔热试验时,模拟材料表面热流密度的大小和热流剖面是至关重要的。

目前,在电弧加热试验研究中,对于模型表面热流密度的测量通常采用瞬态塞式量热计^[1]、水卡量热计^[2]和零点量热计^[3-4]。其中,瞬态塞式量热计和零点量热计(测量的热流范围为 $5.68 \sim 284 \text{ MW/m}^2$ 之间^[3])一般只能用于瞬态热流的测量,而且难以承

受长时间气动加热,只有水卡量热计能测量稳态热流。水卡量热计是基于能量平衡原理,具有测量热流范围广(测量的热流范围为 $10 \text{ kW/m}^2 \sim 60 \text{ MW/m}^2$ 之间^[2])、能够承受长时间加热的优点。但是,在稳态、低热流(几十、上百 kW/m^2 量级)试验状态下,只有当水卡量热计的量热截面积较大(20 mm 左右),冷却水流量很小(几 g/s 量级)时,才可能得到几度的温差,这样,必然会对冷却水流量以及温差的测量精度要求很高。

本文介绍的三段稳态塞式量热计是一种适用于稳态、低热流状态下的量热计。该量热计的探芯由三个圆柱叠在一起组成,各段材料分别为无氧铜-康铜-无氧铜,段与段之间的连接方式为真空扩散焊接

收稿日期:2007-12-09;修回日期:2008-02-15

作者简介:涂建强,1982年出生,硕士研究生,主要从事气动热试验技术研究工作。E-mail: tujianqiang@gmail.com

法。这种量热计通过测量中间康铜段前、后表面上的温差来得到壁面热流密度。它既可以承受某些试验场合难以避免的长时间加热,又保持了尺寸小、可以布点测量的优点,特别适合驻点和大面积区长时间隔热材料上的多点测量。

本文采用超声速矩形湍流导管试验技术,利用等离子电弧加热器进行试验,研究了三段稳态塞式量热计上隔热环材料、探芯中段康铜材料长度以及探芯截面面积对壁面热流密度的影响。

2 原理

在探芯前端有稳态热流输入,后端有稳定流量的冷却水冷却的条件下,探芯的热阻层上产生了温度梯度,通过空气或其他隔热材料在探芯上建立近似一维稳态导热模型。考虑三层平板无内热源的一维稳态导热问题^[5],如图 1 所示。

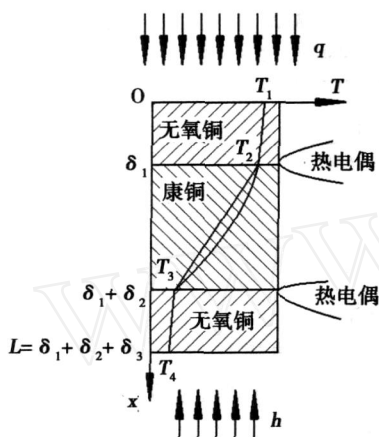


图 1 三段稳态塞式量热计的探芯示意图

Fig 1 Schematic drawing of probe

把材料的热导率作为常数来处理时,微分方程为:

$$\frac{d^2 T}{dx^2} = 0 \quad (1)$$

其边界条件为第一类边界条件:

$$x = 0 \text{ 时, } T = T_1;$$

$$x = \delta_1 + \delta_2 \text{ 时, } T = T_3;$$

从图 1 中不难看出,康铜段内的温度变化比无氧铜段内的大得多,因为康铜的热导率大约为无氧铜的 1/20。将探芯内温度的线性关系代入傅里叶定律,即可得壁面热流密度:

$$q_w = - \text{const} \frac{\partial T}{\partial x} = \text{const} \frac{T_2 - T_3}{\delta_2} \quad (2)$$

式中: T_2 、 T_3 分别为康铜段前、后两交界面上的温度, δ_2 为康铜段长度, const 是康铜的热导率。

康铜段的长度可以通过千分尺测量,误差为千分之一毫米量级。这样,康铜段的温差大些,温差的测量误差就会小,测量精度也会高些。但是温差也不能太大,不然会由于热导率取常数引入较大的误差。

根据文献 [3] 可知,无氧铜的综合热物性参数
宇航材料工艺 2008 年 第 2 期

(C_p)^{1/2} 以及热导率随温度变化不大,并且直接参与热流计算的是康铜的热导率,所以本文只考虑康铜热导率随温度变化时的情况。由于在 50 ~ 600 K 内,康铜的热导率几乎是随温度线性变化的,所以可以考虑康铜的热导率是温度的线性函数,即 $\text{const}(T) = \text{const}_0(1 + bT)$, 得到傅里叶定律的表达式为:

$$q_w = \frac{T_2 - T_3}{\delta_2} \cdot \text{const}_0 \left(1 + b \cdot \frac{T_2 + T_3}{2} \right) \quad (3)$$

因此,可以根据 T_2 和 T_3 得到康铜段上的平均温度,只要取该平均温度下的热导率值便可得到较精确的热流结果。另外,此时在康铜段内的温度已不再是线性分布了,而是变成图 1 所示的曲线部分。

由于无氧铜的热阻非常小,所以将测温热电偶布在靠近交界面的无氧铜上,即可近似认为该温度为交界面上的温度 T_2 和 T_3 了。这里利用了无氧铜的高导热性和康铜的高热阻特性。

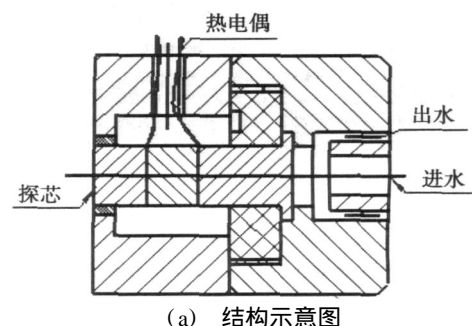
假如图 1 中三段式的探芯全为无氧铜,变成类似于文献 [6] 的探芯,那么用相同长度的探芯来测量相同的热流,得到的温差 ($T_2 - T_3$) 将很小 (大约为现在所选用的探芯温差的 1/20), 这样对测量的准确性很不利,势必要成倍的加长探芯的长度。

3 三段稳态量热计的结构设计

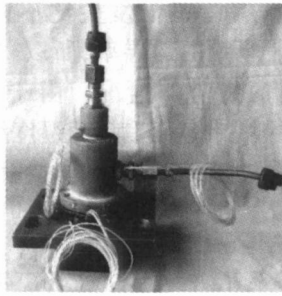
为了实现探芯上的稳态导热,必须满足探芯背面的恒温边界条件,所以在探芯背面安装了一套水卡量热计的水冷系统。水流量一定要够大,这样才能对探芯进行充分的强制水冷,缩短达到稳态所需的时间。实验开始阶段,探芯的温度会迅速升高。当探芯量热面和背面的温度几乎恒定不变时,即达到了理论假设的稳态导热状态。

为了实现探芯上的一维导热,必须保证探芯侧向绝热的假设。本文选用不锈钢、玻璃钢、高硅氧、氧化铝与水玻璃的混合物这些常用水卡量热计、瞬态塞式量热计等量热计探芯侧向隔热上的材料作隔热环。探芯的量热端面 and 隔热环端面齐平,两者之间设计成过盈的紧配合。若还有缝隙,可以用氧化铝与水玻璃的混合物填充。

平板三段稳态塞式量热计的设计主要集中在探芯上,目的就是要在探芯上建立近似的一维稳态导热,其结构示意图和安装后的全貌图见图 2。



(a) 结构示意图



(b) 安装后的全貌

图 2 三段稳态塞式量热计的结构示意图和全貌图

Fig 2 Structure schematic drawing and photo of three-segment steady-state plug-type calorimeter

试验设计的所有探芯总长都为 20 mm,康铜段长度为:5、6和 7 mm,探芯的截面直径为:6、8和 10 mm。

探芯为分段式的,各段之间的连接有以下两个原则:(1)各段之间必须充分接触,不能是空隙或点的连接,以此减小交界面的接触热阻;(2)各段之间的交界面要清晰,以免破坏中间康铜段的长度。为此,探芯的连接采用了真空扩散焊接法,即在真空中,在高于再结晶温度时施加不大的挤压力,使互相接触的试样在交界面上发生分子扩散运动,通过分子运动产生的少量质量迁移来达到焊接的目的。具体的焊接工艺参数见表 1。

表 1 真空扩散焊接工艺参数

Tab 1 Technical parameter of vacuum diffuse weld

数据	真空度 /mPa	温度 /	预压力 /MPa	焊接时间 /min
最佳规范值	1	950	0.2	15
实验值	1	950	0.1	60

从表中可以看出,预压力和焊接加热时间分别是文献 [7] 给出的最佳规范值的 0.5 倍和 4 倍。这是为了避免预压力过大使金属板被压缩,而改变康铜和无氧铜的密度,特别是康铜。同时,为了得到同样的焊接效果,则增大了焊接加热时间。这样就能增大分子扩散的时间,保证了交界面的焊接效果。焊接后经机械加工的探芯照片见图 3。

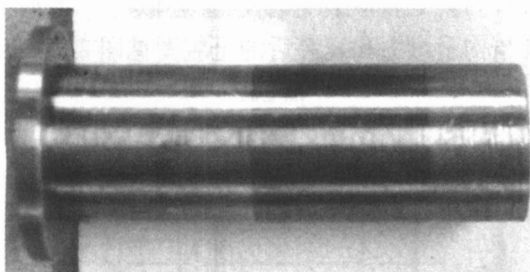


图 3 真空扩散焊后的探芯照片

Fig 3 Photo of plug after vacuum diffuse weld

从图 3 看出,焊接的交界面清晰明显,另外,车床上的机械切削也能反映出交界面的连接具有一定的

强度。

4 实验设备

试验在 FD - 04D/E 电弧加热器上进行,设备主要由直流管状电弧加热器、一次喉道、混合室、二次二元超声速喷管、超声速矩形湍流导管和引射器组成。

由于本试验状态属于低焓低热流试验,而电弧加热器本身的焓值都比较高,所以必须在电弧加热器后面接混合室,注入大量冷气,使高温等离子体和冷气在混合室内充分混合,降低焓值,再经过二元喷管加速到超声速湍流导管试验段。二元喷管的名义马赫数为 2.8,试验的马赫数约为 2.63。导管后端接低压风洞试验段,试验段配有三级空气引射器,以满足试验过程中导管内的静压要求。试验取三个热流状态,各状态的流场参数见表 2。

表 2 试验流场参数

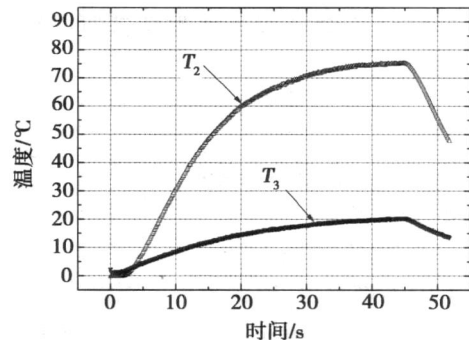
Tab 2 Test flow parameter

状态	总焓 /kJ·kg ⁻¹	导管内静压 /kPa	弧室压力 /MPa	壁面热流 /kW·m ⁻²
低	1570	27	0.948	218.0
中	2160	45	1.568	375.5
高	1970	27	0.967	615.6

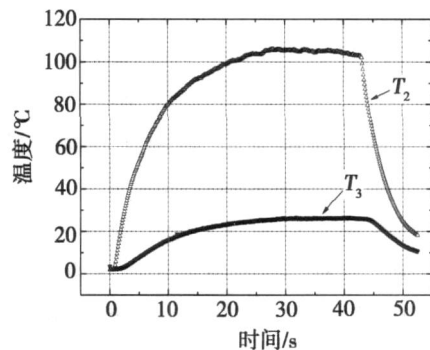
5 结果及分析

5.1 试验结果

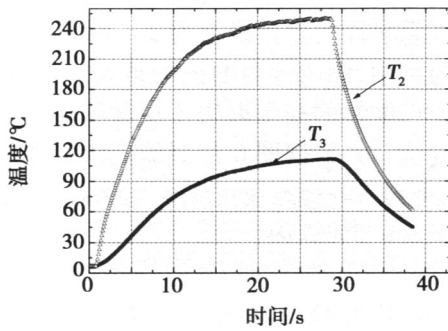
在表 2 的三个热流状态下,将设计的不同康铜段长度、不同截面面积的测试探芯分别进行超声速矩形湍流导管的热流测量试验。试验中三种状态的典型温度变化曲线见图 4。



(a) 低状态



(b) 中状态



(c) 高状态

图 4 各试验状态的典型温度曲线

Fig 4 Typical temperature curves in each test condition

对以上试验结果初步分析如下。

(1)当热流在低、中、高三状态时,达到稳态所需的时间大约分别为 40、25 和 20 s。显示出试验壁面热流密度越大,达到稳态所需的时间越小的趋势。另外,达到稳态所需的时间与探芯的热阻成正比,热阻越大,达到稳态所需的时间越长。

(2)从加热器关闭后温度开始下降的数据点来看, T_3 大约比 T_2 滞后 1~2 s。这主要是由于探芯的热阻 (L/λ)使探芯第三段上无氧铜的温度响应滞后的结果。

根据图 4 的温度曲线,将 T_2 和 T_3 直接代入式

(3)计算得到的各状态下典型的热流曲线见图 5。

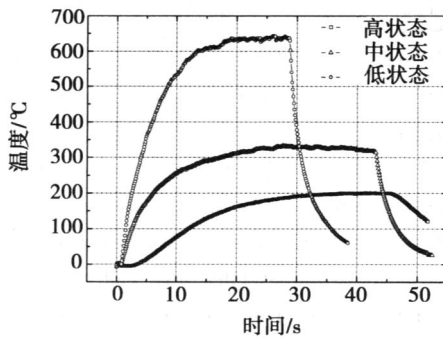


图 5 各试验状态下典型的热流曲线

Fig 5 Heat-flux curves of each test condition

根据热流曲线,当热流值恒定不变时,可以直接判读出稳态热流值。另外,还可以根据图 4 的温度曲线,判读出达到稳态状态下的 T_2 与 T_3 ,将这两个值代入式 (3),即可得到稳态热流值。如此计算得到的各状态下的稳态热流分布见图 6。

对热流曲线图 5 和热流分布图 6 分析结果如下。

(1)在低、中、高三状态下,所有不同探芯截面面积、不同康铜段长度探芯的测量值都分别集中在各状态的热流平均值 205、321.4、624.3 kW/m^2 的 $\pm 7.6\%$ 、 $\pm 7.6\%$ 、 $\pm 4.2\%$ 以内,并且参考热流值也在这些范围内,说明三段稳态量热计的重复性较好,同宇航材料工艺 2008 年 第 2 期

时也反映出本试验所选用的这几种探芯(康铜段长度为 5~7 mm)对 350~600 kW/m^2 (中、高状态)稳态热流的测量效果相对更好些(中状态的来流参数波动较大,热流波动大些是可以接受的)。

(2)结合图 4 的温度曲线来看,在低、中、高热流状态下,康铜段上的温差值大约为 50、90 和 150,而中、高状态下热流测量重复性较好,说明温差在 100~200 时测量的效果更好些,至少温度测量的相对误差会更小些。这对该量热计在工程使用上具有一定的指导意义。在今后的工程使用中,可以根据预测热流值选择合适的康铜段长度的三段稳态塞式量热计进行热流测量试验,尽量将康铜段上的温差控制在 100~200 之间,这样稳态热流的测量偏差会相对更小些。

(3)探芯的截面面积对热流测量值影响不大,从图中显示出来的变化都属于随机的,这也符合三段稳态塞式量热计一维稳态热传导的测量原理,说明侧向绝热的效果较好。

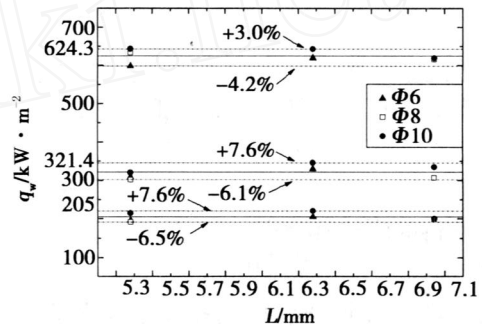


图 6 各试验状态下不同探芯的量热计测量值

Fig 6 Heat-flux of different plug in each test condition

5.2 误差分析

5.2.1 重复性偏差

首先,设备参数的重复性。图 7 显示的是所有试验状态下的电弧加热器的电弧功率。可以看出,在上述三种状态下,电弧功率在 $\pm 2\%$ ~ $\pm 6\%$ 内波动。另外,气体流量存在大约 $\pm 0.5\%$ 的波动,这必然会导致热流测量值的不重复。所以综合考虑,认为来流参数的重复性偏差为 $\pm 4\%$ 。

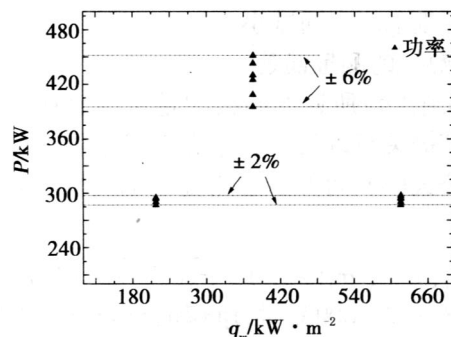


图 7 各试验状态下的电弧加热器的电弧功率

Fig 7 Electrical power of arc heater in each test condition

其次,冷却水流量的重复性。本次试验的水流量在 26.52 ~ 33.62 g/s 内波动,波动量为 $\pm 11.8\%$ 。另外,探芯第一段无铜表面氧化和气流污染沉积物也会造成探芯表面吸热和辐射换热的不同。

5.2.2 侧向热损失

探芯前缘空气隙中会由于外流的冲击产生漩涡,造成了附加的侧向加热。为了消除这种附加热交换,本文选用了不锈钢、玻璃钢、高硅氧、氧化铝和水玻璃的混合物作隔热环材料。试验测量结果见表 3(在该实验状态下,利用瞬态塞式量热计测试值为 375.5 kW/m^2)。

表 3 不同隔热环材料的量热计测量结果

Tab 3 Test results of calorimeter with different insulation material

隔热环材料	三段稳态塞式量热计 $q_w / \text{KW} \cdot \text{m}^{-2}$
不锈钢	72.68
玻璃钢	369.64
高硅氧	334.8
氧化铝+水玻璃	339.86

从表 3 数据可以看出,除不锈钢外,其他三种材料都能有效地实现三段稳态量热计探芯上的一维导热。其原因主要是不锈钢的热导率与康铜的相当,导致不锈钢材料的隔热环热阻比探芯的还小,使侧向导热很大,严重破坏了一维导热的假设。

使用玻璃钢、高硅氧、氧化铝和水玻璃的混合物材料做成的隔热环能起到很好的隔热效果。其中,氧化铝和水玻璃混合物材料做成的隔热环最实用、最方便,因为它的密封性和可塑性使安装更简单。

5.2.3 温度测量的误差

本试验使用的铜-康铜热电偶的热电势率较大,对于测量 $-200 \sim +400$ 的温度较准确。其标定结果是 100 以内超差不大于 1。但是读取数据时,由于温度曲线不可能做到理想的完全恒定不变,取温度值时可能存在 0.5 左右的偏差,综合考虑,认为对于温度的测量存在 1.5% 的偏差,但是这种相对偏差会随着温度的增大而减小。

5.2.4 量热计的测量误差

根据文献 [8] 所述的间接测量量与直接测量量的测量精度的关系以及三段稳态塞式量热计的稳态热流计算公式 (3),可知稳态热流 q_w 的测量误差的计算公式为:

$$\delta(q_w) = \sqrt{\delta^2(\text{cons}) + \delta^2(T) + \delta^2(\tau)} \quad (4)$$

当 $50 < T < 600$ 时,康铜的热导率与温度呈线性关系,根据温度的测量误差可以得康铜的热导率的相对误差可取为 1.5%。

康铜段的长度用千分尺度量,其长度测量的相对

误差可取为 0.1%。

将以上各测量量的相对误差代入式 (4),可得三段稳态塞式量热计的测量误差为 2.12%。但是在热流的测量过程中,侧向导热的损失是无法避免的,具体有多少侧向导热的损失取决于测量绝热材料的隔热性和密封性。并根据图 6 的热流曲线稳态热流变化的范围,得到三段稳态塞式量热计测量的稳态热流 q_w 的测量误差在 5% 以内。

6 结论

(1) 利用超声速矩形湍流导管试验技术,通过在电弧加热器上的多次试验,实验结果表明在来流参数的重复性误差为 $\pm 4\%$ 的情况下,三段稳态量热计的稳态热流测量的重复性偏差为 $\pm 7.6\%$,经误差分析得到该量热计的测量精度在 5% 以内。证明三段稳态量热计是一种特别适合稳态、低热流状态下的热流测量,且重复性较好的量热计。

(2) 用玻璃钢、高硅氧、氧化铝和水玻璃混合物材料作隔热环,并用氧化铝和水玻璃混合物填补安装后的小缝隙方法能有效地实现三段稳态量热计探芯上的一维导热,其中,氧化铝和水玻璃混合物作为隔热环材料最实用、最方便。

(3) 在探芯的选取上遵循以下原则:测量低热流时,选取的康铜段长度较小;而测量高热流时,选取的康铜段长度较大。尽量将康铜段上的温差控制在 $100 \sim 200$ 之间,这样测量的偏差会相对较小。但是具体的选取关系还有待进一步的研究。

参考文献

- 1 ASTM Standard: E 457 - 96 Standard test method for measuring heat-transfer rate using a thermal capacitance (slug) calorimeter 1996
- 2 ASTM Standard: 422 - 83 Standard test method for measuring heat flux using a water-cooled calorimeter 1983
- 3 ASTM Standard: E 598 - 96 Standard test method for measuring extreme heat-transfer rates from high-energy environments using a transient, null-point calorimeter 1996
- 4 Kidd C. T. High heat flux measurements and experimental calibrations/characterizations In: The 1992 NASA Langley measurement technology conference measurement technology for aerospace applications in high-temperature environments NASA - CP - 3161, 1992
- 5 杨世铭,陶文铨. 传热学 (第三版). 高等教育出版社, 1998
- 6 杨庆涛,王辉,吴礼恒等. 水冷塞式量热计的研制与实验. 第一届近代空气动力学与气动热力学会议论文集, CARS - 2006 0 0109: 618 - 621
- 7 . . 卡扎柯夫 [苏] 著,何康生译. 真空扩散焊接. 国防工业出版社, 1976
- 8 李振山. 测量误差与数据处理. 计量测试研究所, 1982

(编辑 任涛)

宇航材料工艺 2008年 第2期