

动力技术

大温差测试条件下热防护材料高温 导热系数试验方法

秦强 蒋军亮 王琦 张婕

(中国飞机强度研究所全尺寸飞机结构静力/疲劳航空科技重点实验室,西安 710065)

摘要 热防护材料高温导热系数是进行高超声速飞行器设计不可或缺的参数。通过热防护材料导热系数理论分析以及传统稳态法试验原理数学推导,说明了热防护材料导热系数物理本质。探讨了试验温差对热防护材料导热系数测试的重要性和传统稳态法在测试热防护材料高温导热系数时的技术局限性。基于热防护材料内部温度分层特征以及导热系数-温度非线性关系函数形式直接假设,提出并分析证明了两种适用于大温差测试条件的热防护材料高温导热系数试验方法。对热防护材料高温导热系数获取有重要的参考价值。

关键词 高超声速飞行器 热防护材料 高温导热系数 大温差 试验方法
中图分类号 TK124; **文献标志码** A

热防护是研制高超音速飞行器的一项关键技术^[1],而热防护材料(本文特指隔热材料)导热系数,尤其是1 000 °C以上的高温导热系数是高超音速飞行器热防护设计不可或缺的参数,而且对高温导热系数的获取可以有效提升我国的热防护材料量化评价技术水平^[2]。

文献[3—6]利用理论计算获取了多种热防护材料的导热系数,但是计算过程较为复杂;文献[2—14]应用不同的稳态法对多种热防护材料进行了试样平均温度低于1 000 °C的导热系数试验测试。但是对于内部高孔隙率特征明显的热防护材料而言,GB/T 10295—2008指出:“通过测量热流、温差及厚度尺寸,利用稳态 Fourier 导热公式计算得到的材料传热性质(导热系数或有效导热系数),可能并不是材料自身固有特性。因为它很大程度上可能取决于测试条件例如试验过程中材料试样热、冷面温差大小”。因此很多试验标准对热防护材料导热系数测试温差进行了规定:GJB 329—87 规定测试温差应控制在10~50 °C;GB/T 10295—2008 建议温差控制在5~10 °C;ASTM 相关标准规定该温差应不大于25 °C。文献[2—14]研究过程中由于多种因素导致热防护材料高温导热系数测试温差均大于试验标准规定的温差,例如文献[14]的最大测试

温差达到了900 °C左右。在如此大的测试温差条件下如果仍然沿用传统的 Fourier 导热计算公式获取导热系数,势必造成较大的误差,然而大温差测试条件又是热防护材料高温导热系数实际试验过程中最容易实现的。因此适用于大温差测试条件的热防护材料高温导热系数测算方法成为了工程上迫切需要解决的问题。

通过热防护材料导热系数简要理论分析及传统稳态法试验原理数学推导,说明了热防护材料导热系数物理本质、试验温差对热防护材料导热系数测试的重要性以及传统试验方法在测试热防护材料高温导热系数时的技术局限性,并创新提出了两种适用于大温差测试条件的热防护材料高温导热系数试验原理或方法。

1 热防护材料导热系数理论分析

对热防护材料导热系数进行理论分析,有助于了解热防护材料导热物理本质和对试验测试结果的理解。因此在参考相关研究的基础上,以典型热防护材料—陶瓷纤维隔热材料为例,进行简要理论分析如下。

实际服役过程中的高孔隙率热防护材料内部传热机制是固相/气相介质导热、热辐射及自然对流的耦合。在多数情况下热防护材料内部孔隙的几何尺寸非常小,通常可忽略自然对流。因此热防护材料导热系数一般由三部分构成^[14]:固相介质等效导热系数 k_s 、气相介质等效导热系数 k_g 及热辐射等效导

2014年3月26日收到

第一作者简介:秦强(1983—),男,河南林州人,硕士研究生,工程师。研究方向:高超声速飞行器热防护/热结构。E-mail:qq623_4@ sina.com。

热系 k_r , 即

$$k = k_s + k_g + k_r \quad (1)$$

式(1)中

$$k_s = F_s f_s^* k_s^* (T) \quad (2)$$

$$k_r = \frac{16\sigma}{3\beta} T^3 \quad (3)$$

$$k_g(T, P) = \frac{k_{g0}(T)}{\Phi + 2\psi \frac{\varphi}{Pr} Kn} \quad (4)$$

式(2)~式(4)中相关参数与固相介质(陶瓷纤维)温度、直径、纤维排布状态以及热防护材料内部孔隙几何尺寸、纤维间接触状况等有较大关系,具体物理意义及测算方法,见文献[2、4、14]。

由上面分析可以看出,采用理论计算的方式去获取热防护材料导热系数,需要确定较多的宏/微观参数,而这些参数的确定并非易事,因此试验测试成为了目前获取热防护材料导热系数的主要途径。同时,简要理论分析表明热防护材料导热系数物理本质是多种传热机制耦合作用下表征热防护材料宏观传热性能的当量参数,是热防护材料内部热辐射等效导热系数、气相介质等效导热系数以及固相介质等效导热系数的叠加,并非材料固有属性。

2 测试温差的重要性

通过研究传统热流计法导热系数试验原理,来阐述测试温差的重要性以及在测试热防护材料高温导热系数时的局限性,得出的相关结论也适用于其他稳态法。

热防护材料导热系数尽管与温度呈高度非线性关系,但是在较小的温度区间例如图 1 中的 $[T_c, T_H]$ 区间,导热系数与温度的关系可以近似为线性关系,即导热系数可以表示为如下表达式

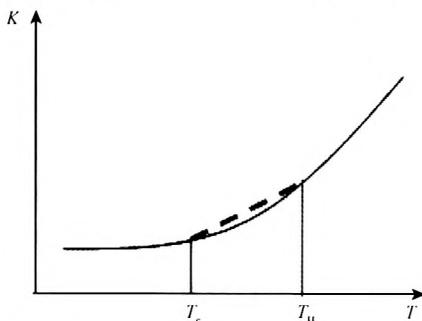


图 1 导热系数与温度非线性关系

Fig. 1 Nonlinear relation between thermal conductivity and temperature

$$k = AT + B \quad (5)$$

式(5)中 k 为热防护材料导热系数, A 、 B 为待定常数。

Fourier 导热定律可以表示为

$$q = -k \frac{dT}{dx} \quad (6)$$

式(6)中 q 为传过热防护材料厚度方向的热流。

导热系数测试过程中热防护材料试样的热、冷面边界条件可以表示为

$$x = 0; T = T_H \quad (7)$$

$$x = L; T = T_C \quad (8)$$

式(8)中 L 为热防护材料试样厚度, T_H 、 T_C 分别为试验过程中热防护材料试样热、冷面温度。联立式(5)~式(8),可得

$$\frac{qL}{T_H - T_C} = A \frac{T_H + T_C}{2} + B \quad (9)$$

比较式(5)与式(9)可知: $\frac{qL}{T_H - T_C}$ 即为导热系数计算公式,即

$$k = \frac{qL}{T_H - T_C} \quad (10)$$

而且式(10)得出的导热系数 k 对应温度为 $(T_H + T_C)/2$ 即热防护材料试样的平均温度。

利用式(10)测试热防护材料导热系数的试验原理典型示意图如图 2 所示。实际试验过程中利用可控的辐射加热器,使材料试样热面(图 2 中与匀热板紧密贴合的材料试样表面)温度维持在 T_H ;在材料试样自身隔热及水冷板主动冷却作用下材料试样冷面(图 2 中与匀热板紧密贴合的材料试样表面)温度维持在 T_C ;材料试样的热面温度 T_H 、冷面温度 T_C 分别由匀热板、水冷板上若干温度传感器测量值进行平均计算获得;热流 q 由水冷板上的若干热流传感器测量值进行平均计算获得,然后结合材料试样厚度 L 以及式(10)就可获取热防护材料的导热系数。

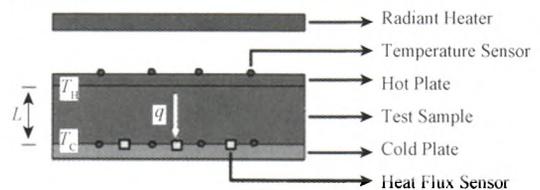


图 2 热流计法试验原理

Fig. 2 Test principle of heat flux gage method

由上述导热系数计算公式推导过程可知,利用式(10)进行导热系数计算的前提是温度区间 $[T_c, T_H]$ 跨度应较小即试验过程中试样热、冷面温差 $\Delta T = T_H - T_C$ 应较小。上述导热系数计算公式推导过程可以看作是前文所述相关试验标准对测试温差条件规定的理论依据。由此看出导热系数试验过程中测试温差条件的重要性。

对于热防护材料较低温度的导热系数测试,例如如图2中的 $T_H = 50\text{ }^\circ\text{C}$ 、 $T_C = 30\text{ }^\circ\text{C}$,当传热状况达到稳态时即可测试出相应的热流密度 q ,然后利用式(10)即可得出温度为 $(T_H + T_C)/2 = 40\text{ }^\circ\text{C}$ 的导热系数,因为热、冷面温差仅为 $\Delta T = T_H - T_C = 20\text{ }^\circ\text{C}$ 符合式(10)应用的小温差前提或相关试验标准要求。但是对于较高温度的导热系数测试,例如需要获取 $(T_H + T_C)/2 = 1\ 000\text{ }^\circ\text{C}$ 的热防护材料导热系数,如果按照GJB329—87标准进行试验,则需要令图2中的材料试样热、冷面温差控制在 $50\text{ }^\circ\text{C}$ 以内,如令 $T_H = 1\ 025\text{ }^\circ\text{C}$ 、 $T_C = 975\text{ }^\circ\text{C}$ 。尽管利用常规的石英灯辐射加热器即可把材料试样的热面 T_H 加热到 $1\ 025\text{ }^\circ\text{C}$,但是令材料试样的冷面维持在 $975\text{ }^\circ\text{C}$ 较为困难,而且与材料试样冷面紧密贴合接触的热流传感器工作温度上限一般较低,也限制了材料试样冷面温度上限。所以在测试热防护材料高温导热系数时经常出现的现象是材料试样热面温度较高($T_H > 1\ 000\text{ }^\circ\text{C}$),但是材料试样冷面温度一般较低($T_C < 100\text{ }^\circ\text{C}$),一方面这种大温差测试条件将导致材料试样平均温度 $(T_H + T_C)/2$ 较低,另一方面这种大温差测试条件不满足应用式(10)的前提或者说在大温差测试条件下利用式(10)计算的值并不是热防护材料导热系数,而是导热系数在 T_C 、 T_H 范围内的积分平均值(很多相关研究忽略了这点,即使在大温差测试条件下仍然用式(10)进行导热系数测算),简要证明如下:结合热边界条件式(7)和式(8),对式(6)进行分离变量积分求解可得

$$\frac{qL}{T_H - T_C} = \frac{\int_{T_C}^{T_H} k(T) dT}{T_H - T_C} \quad (11)$$

由式(11)可知, $qL/(T_H - T_C)$ 是导热系数 k 在 T_C 、 T_H 范围内的积分平均值。由于在上述推导过程中未做任何假设,因此温差 $\Delta T = T_H - T_C$ 较小或较大式(11)都成立。但式(5)~式(8)的推导过程表明,只有在小温差测试条件下利用式(10)中的 $qL/(T_H - T_C)$ 得出的值才是导热系数 k ;如果温差较大,由式(11)可知,利用式(10)中的 $qL/(T_H - T_C)$ 得出的值仅是导热系数 k 在 T_C 、 T_H 范围内的积分平均值。

由以上分析可看出:利用传统的热流计法进行导热系数试验时,需要使材料试样的热、冷面温差尽量小即小温差测试条件要求。如果在不能满足小温差测试条件仍用类似式(10)的公式进行导热系数计算,得到结果只能是导热系数在热、冷面温度之间的积分平均值,而非热防护材料真实导热系数。目前在测试热防护材料高温导热系数时满足试验标准规

定的小温差测试条件是困难的(热流计耐温极限较低、冷面温度不易达到高温等),这也是传统稳态法在测试热防护材料高温导热系数时的技术局限性。针对该问题提出了大温差测试条件下导热系数试验原理或方法,可以实现热防护材料高温导热系数测试。

3 导热系数试验新方法

3.1 均匀温度层虚拟引入法

尽管热防护材料内部微观结构极其不均匀,使得热防护材料试样在进行稳态传热试验时,材料内部将出现微观不均匀的温度层,但是宏观上材料内部可以看作是连续不间断的均匀温度层,即处于温度区间为 $[T_C, T_H]$ 的材料试样内部存在 N 个均匀温度层(温度分层特征明显如图3)使得

$$T_C < T_1, T_2, \dots, T_N < T_H \quad (12)$$

且总存在一个均匀温度层 T_N ,满足

$$T_H - T_N \leq T_0 \quad (13)$$

式(13)中 T_0 是相关标准规定的试验温差限定值。在考虑各项试验标准对测试温差要求的基础上,并结合多次实际试验情况及热流传感器灵敏度等因素,现在认为对于热防护材料高温导热系数测试,一般 $T_0 = 50\text{ }^\circ\text{C}$ 即可满足工程要求。

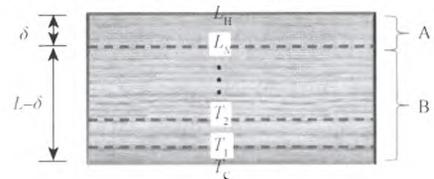


图3 温度分层

Fig. 3 layered temperature

图3中的A部分区域是小温差区,满足应用式(10)求解导热系数的前提条件,即图3中A部分区域导热系数可以根据以下公式求解

$$k = \frac{q\delta}{T_H - T_N} \quad (14)$$

式(14)获取的导热系数对应温度为 $(T_H + T_N)/2$,而非 $(T_H + T_C)/2$ 。该式中难以确定的量就是图3中的 δ 即均匀温度层 T_N 与热防护材料试样热面的垂直距离。针对 δ 值确定,现给出以下求解步骤。

第一步:令热防护材料试样热面温度为 T_H 、冷面温度为 T_C ,进行稳态传热试验,利用热流计测试出稳态热流 q_1 ,同时结合式(11)可以针对处于 $[T_C, T_N]$ 区间的热防护材料(图3中B部分)建立如下方程

$$\frac{q_1(L - \delta)}{T_N - T_C} = \frac{\int_{T_C}^{T_N} k(T) dT}{T_N - T_C} \quad (15)$$

第二步:令热防护材料试样热面温度为 T_N ,冷面温度为 T_C ,进行第二次稳态传热试验,利用热流计可以测试出此次热流密度为 q_2 ,并结合式(11)针对热防护材料试样可以建立如下方程

$$\frac{q_2 L}{T_N - T_C} = \frac{\int_{T_C}^{T_N} k(T) dT}{T_N - T_C} \quad (16)$$

联立式(15)与式(16),可得

$$\delta = \left(1 - \frac{q_2}{q_1}\right)L \quad (17)$$

将式(17)代入式(14),可得热防护材料导热系数的最终计算表达式为

$$k = \frac{(q_1 - q_2)L}{T_H - T_N} \quad (18)$$

同时需要说明的是,应用式(18)时要考虑式(13)限制条件。

由以上分析可知,利用提出的均匀温度层虚拟引入法,可以在热防护材料试样总体大温差测试条件下通过求解热防护材料试样内部局部小温差高温区导热系数,来最终获取热防护材料高温导热系数。

3.2 非线性关系直接假设法

文献[15]详细给出了多种典型热防护材料:Q-Felt、AFRSI、LI-900、AETB-12、Saffil及Cerrachrome等在不同气压环境下、不同温度下的导热系数数据。其中针对Saffil热防护材料更是给出了温度高达1600℃的导热系数数据。对这些数据进行统计分析表明:大多数热防护材料的导热系数与温度的非线性关系都可以用一元三阶多项式描述,即:

$$k(T) = A_0 + A_1 T + A_2 T^2 + A_3 T^3 \quad (19)$$

式(19)中 A_0 、 A_1 、 A_2 及 A_3 是与材料自身特性有关的待定常数。例如根据文献[15]给出的常压下不同温度的Saffil导热系数数据点,利用三阶多项式进行拟合可得

$$k(T) = -9.19 \times 10^{-2} + 6 \times 10^{-4} T - 7 \times 10^{-7} T^2 + 6 \times 10^{-10} T^3。$$

而且反映拟合函数与原始数据相关性的 R^2 值高达0.9996(最大值为1),表明拟合函数与原始数据的相关性程度非常高,满足工程要求。同时,ASTM相关标准也提到:对于低导热特征明显的热防护类材料,其导热系数与温度关系可以用一元三阶多项式(19)描述。

将式(19)直接代入与试验温差无关的式(11),并结合热边界条件式(7)和式(8)可得

$$\frac{qL}{T_H - T_C} = A_0 + A_1 (T_H + T_C)/2 + A_2 (T_H^2 + T_H T_C + T_C^2)/3 + A_3 (T_H^2 + T_C^2)(T_H + T_C)/4 \quad (20)$$

式(20)可知,理论上通过调整4次 T_H 值,进行4次稳态传热试验,得出4组相应的 q 、 T_C 值,就可建立4个方程,从而求出4个待定常数 A_0 、 A_1 、 A_2 及 A_3 的值,最终得到导热系数与温度的关系表达式,而且式(20)等号左边不对温差条件进行限制,因此可以在容易实现的大温差测试条件下进行相应测算。为了提高该方法的准确性,在选取 T_H 值时应尽可能接近所需要的温度值。例如需求1000℃的材料导热系数,选取的4个 T_H 值中至少应有一个值为1000℃或大于1000℃。如果需要某一特定温度段的导热系数,比如需要500~1000℃之间的材料导热系数,那么4个 T_H 值建议选取为500℃、1000℃以及介于500℃与1000℃之间的2个数据。同时,需要说明的是本方法不是利用低温导热系数进行高温导热系数简单外推,而是在掌握大温差测试条件下热防护材料高温传热相关数据的基础上通过确定所假设的函数待定常数来最终获取热防护材料高温导热系数,并且假设的函数形式是统计分析得出的结论以及ASTM相关标准认可的。

3.3 两种试验方法比较

均匀温度层虚拟引入法需要进行两次稳态传热试验,才可以获取一个高温导热系数,而且选取的 T_N 与 T_H 较为接近,进行第2次稳态传热试验时测得的 q_2 可能与第1次传热试验获取的 q_1 相差很小,所以测试热流密度的传感器需要较高的灵敏度。同时,为了使两次稳态传热试验中的 T_C 保证一致,需要根据试验状况调整图2中水冷板的冷却能力。因为如果两次稳态传热试验中的 T_C 不一致,则在联立式(15)和式(16)时,无法获取图3中A部分的厚度 δ ,最终导致均匀温度层虚拟引入法无法实施。同时,均匀温度层虚拟引入法仅适合微观不均匀但宏观均匀的热防护材料,因此不适合内置热反射箔的多层隔热材料(IMI)。均匀温度层虚拟引入法最大的优点是不需要预先假设导热系数与温度的函数关系形式,因此测试结果的准确度相对有保证,但是可能需要进行较多的试验才能得到温度与导热系数的关系曲线。

非线性关系直接假设法理论上通过4次稳态传热试验即可获取温度与导热系数的关系曲线,而且不需要保证4次试验中的 T_C 完全一致,但是唯一的不足是需要预先假设温度与导热系数的函数关系形式,如果该关系不符合所测材料的实际特征,将导致偏差较大的测试结果,尽管大多数热防护材料导热系数与温度关系是符合式(19)特征的。

在实际导热系数测试过程中,应根据经验对热防护材料特征进行初步判断,然后考虑导热系数测

试温度需求以及测试数量来选取相应的试验方法。当然,两种试验方法也可同时应用,选取两组数据的平均值作为最终结果。

4 结论

热防护材料导热系数物理本质是多种传热机制耦合作用下表征宏观传热性能的当量参数,并非材料自身固有特性;测试温差对基于传统稳态法的热防护材料导热系数测试有重要影响。在利用传统稳态法进行热防护材料导热系数测试时,要特别注意热防护材料试样热、冷面间的温差控制,在条件允许的情况下该测试温差应尽可能的小;基于热防护材料内部温度分层特征以及热防护材料导热系数与温度非线性关系的一元三阶多项式假设,提出并证明了两种适用于大温差测试条件的热防护材料高温导热系数试验方法。

下一步的工作主要是利用提出的试验方法对典型热防护材料进行高温导热系数测试,并对测试精度进行评估。

参 考 文 献

- 1 杨亚政,李松年,杨嘉陵.高超音速飞行器及其关键技术简论.力学进展,2007,37(4):537—550
Yang Yazheng, Li Songnian, Yang Jialing. A review on hypersonic vehicles and key technologies. *Advances in Mechanics*, 2007; 37(4): 537—550
- 2 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.材料研究学报,2006,20(6):571—575
Xie Weihua, Zhang Boming, Du Shanyi, et al. A theoretical analysis and experimental study of effective thermal conductivities of high temperature insulations. *Chinese Journal of Materials Research*, 2006; 20(6): 571—575
- 3 陈则昭,倪海涛,陈梅英.多孔介质等效导热系数的较高精度通用计算式.工程热物理学报,1999,112(3):305—308
Chen Zeshao, Ni Haitao, Chen Meiyang. A new formula for calculating effective thermal conductivity of porous media with comparatively high precision. *Journal of Engineering Thermophysics*, 1999; 112(3): 305—308
- 4 赵淑媛,张博明,赫晓东.热防护系统高温纤维隔热毡传热及有效热导率分析.宇航材料工艺,2006;(增刊I):23—27
Zhao Shuyuan, Zhang Boming, He Xiaodong. Analysis of heat transfer and effective thermal conductivity of high temperature fibrous insulation for thermal protection system. *Aerospace Materials & Technology*, 2005; (S I): 23—27
- 5 Hager N E, Steere R C. Radiant heat transfer in fibrous thermal insulation. *Journal of Applied Physics*, 1967; 38(12): 4663—4668
- 6 Pawel R E, McElroy D L, Weaver F J, et al. High temperature thermal conductivity of a fibrous alumina ceramic. New York: Plenum Press, 1985; 301—313
- 7 周详发,冯 坚,肖汉宁,等.二氧化硅气凝胶隔热复合材料的性能及其瞬态传热模拟.国防科技大学学报,2009,31(2):36—40
Zhou Xiangfa, Feng Jian, Xiao Hanning, et al. Performance and heat transfer simulation of silica aero-gel composites. *Journal of National University of Defense Technology*, 2009; 31(2): 36—40
- 8 薛叶叶,殷小玮.超轻质ZrO₂纤维隔热材料的热物理性能研究.热加工工艺,2011,40(12):67—70
Xue Yeye, Yin Xiaowei. Study on thermo-physical properties of ultra-light weight ZrO₂ fibrous insulation material. *Hot Working Technology*, 2011; 40(12): 67—70
- 9 梅鸣华,张秀华,田志宏,等.耐火材料水流量平板法导热系数的测试及其不确定度分析.工程与试验,2010,50(1):15—17
Mei Minghua, Zhang Xiuhua, Tian Zhihong, et al. Test and uncertainty analysis on water flow plate method of refractory thermal conductivity coefficient. *Engineering & Test*, 2010; 50(1): 15—17
- 10 吴大方,王岳武,潘 兵,等.高速飞行器轻质隔热材料高温环境下的隔热性能研究.强度与环境,2011,38(6):1—7
Wu Dafang, Wang Yuewu, Pan Bing, et al. Research on insulation properties of high-speed aircraft lightweight heat-resistant materials in high-temperature environment. *Structure & Environment Engineering*, 2011; 38(6): 1—7
- 11 Daryabeigi K. Design of high temperature multi-layer insulation for reusable launch vehicles, Ph D Dissertation, University of Virginia, Charlottesville, VA, 2000
- 12 Daryabeigi K. Effective thermal conductivity of high temperature insulations for reusable launch vehicles. NASA/TM-1999-208972, 1999
- 13 Daryabeigi K, Knutson J R. Heat transfer measurement and modeling in rigid High-temperature reusable surface insulation Tiles. AIAA—2010
- 14 Daryabeigi K, Cunnington G R, Miller S D, et al. Combined heat transfer in high-porosity high-temperature fibrous insulations: Theory and Experimental Validation. AIAA-2010
- 15 Myers D E, Martin C J, Blosser M L. Parametric weight comparison of advanced metallic, ceramic tile and ceramic blanket thermal protection system, NASA/TM-2000-210289

(下转第75页)

height with X-Band nautical radars. Proceedings of OMAE '99 St
John's, Newfoundland. 1999: 11—16
10 Ziemer F, Gunther H. A system to monitor ocean wave fields. Pro-

ceedings of the Second International Conference on Air-Sea Interac-
tion and Meteorology and Oceanography of the Coastal Zone, Lisbon,
Portugal, 1994

Improved Algorithm of Detecting Significant Wave Height Based on the Incoherent Navigation Radar

LU Xiong-jiu¹, FU Wei¹, WU Xiong-bin^{1*}, LIN Hang², WANG Li¹, MA Ke-tao¹, TIAN Yun¹

(School of Electronic Information, Wuhan University¹, Wuhan 430072, P. R. China; Fujian Marine Forecasts², Fuzhou 350003, P. R. China)

[**Abstract**] In the light of the sea clutter imaging using X-band incoherent navigation radar, the detection method of the significant wave height based on signal to noise ratio (SNR) and Bragg scattering is studied. An algorithm that maximum velocity of band-pass filter is used to split the signal and noise to obtain SNR is presented. Combination of SNR and effective wave height, through relevant calibration processing, continuous effective wave height can be gotten. Comparing with the conventional significant wave height detection method of incoherent navigation radar, this new algorithm is simple and efficient without accurate current velocity. The comparison with the significant wave height data of Zhoushan buoy shows that it effectively improves the conveniences and stability of the radar.

[**Key words**] X-band navigation radar significant wave height SNR maximum velocity band-pass filter

(上接第 60 页)

Experimental Method of High Temperature Thermal Conductivity of Thermal Protection Materials under the Big Temperature Difference Test Conditions

QIN Qiang, JIANG Jun-liang, WANG Qi, ZHANG Jie

(Aeronautics Science and Technology Key Laboratory of Full Scale Aircraft Structure and Fatigue,
Aircraft Strength Research Institute of China, Xi'an 710065, P. R. China)

[**Abstract**] High temperature thermal conductivity of thermal protection materials are key parameters when hypersonic vehicles are designed. Physical essence of thermal protection materials thermal conductivity is revealed based on its theoretical analysis, the importance of temperature difference between hot side and cold side on test samples and technical limitations of traditional steady-state thermal conductivity measurements are investigated by researching general experimental principles. According to the Layered characteristic of temperature in test samples and the function hypothesis of nonlinear relations between thermal conductivity and temperature, two test methods of high temperature thermal conductivity of thermal protection materials which are suitable for big temperature difference test conditions are proposed and proved.

[**Key words**] hypersonic vehicle thermal protection materials high temperature thermal conductivity big temperature difference experimental Method