

# 低膨胀高温合金抗氧化性能预测的研究

## An Investigation on Prediction of Oxidation Characteristic of Low Thermal Expansion Superalloys

林 政, 张绍维, 吴学仁, 颜鸣皋 (北京航空材料研究院, 北京 100095)

LIN Zheng, ZHANG Shao-wei, WU Xue-ren, YAN Ming-gao  
(Institute of Aeronautical Materials, Beijing 100095, China)

[摘要] 通过测定六种不同成分的低膨胀高温合金氧化增重曲线, 提出合金元素作用系数的概念, 利用分析得到的合金元素作用系数对实验合金的氧化增重进行预测计算, 其结果与实验结果吻合得很好。利用合金元素作用系数的概念和本研究所提出的方法可对低膨胀高温合金的氧化增重提供预测计算, 借此可减少研究低膨胀高温合金氧化特性的试验工作量, 为今后低膨胀高温合金的发展打下了基础。

[关键词] 低膨胀高温合金; 氧化特性; 合金元素的作用系数

[中图分类号] V 250.2 [文献标识码] A [文章编号] 1001-4381 (1999) 09-0034-03

**Abstract:** This paper has put forward the conception about the coefficient of effect of alloy element on oxidation by oxidation increased-weight curves of six low thermal expansion superalloys with different composition. The oxidation increased weight of experiment alloys can be predicted by the coefficients, and it coincides with the experiment result perfectly. The prediction of oxidation increased weight for low thermal expansion superalloys can be made by the coefficients of effect of alloy elements and the method in this study. It can decrease the expenditure and time of studying low thermal expansion superalloys oxidation characteristic and establish the foundation for the development of the low thermal expansion superalloys.

**Key words:** low thermal expansion superalloys; oxidation characteristic; coefficient of alloy element

近年来, 国外低膨胀高温合金仍在向提高使用温度和强度方向发展, 获得应用的有 In 783 合金。我国研制与应用低膨胀高温合金较晚, 曾研制了 GH903 和 GH907 合金, 并开展了 GH909 合金的研究, 用以满足新型发动机研制的需要。

Incoloy 909 合金比起含有 Cr 的高温合金在高温下更容易被氧化, 所以, 在某些应用中它需要涂层的保护以避免被过分地氧化<sup>[1~4]</sup>。因此, 低膨胀高温合金的抗氧化性能差严重影响了它的使用。人所共知, 低的膨胀系数和良好的抗氧化性能取决于合金成分, 是低膨胀高温合金中的一对矛盾, 相互影响。合金研究的目的是既要保持较低的膨胀系数, 又要得到较好的抗氧化性能,

这是研究和发新型低膨胀高温合金的难点之一。本文通过对不同合金成分的研究, 找出其与抗氧化性能间的规律, 确定一个简便预测合金抗氧化能力的计算方法, 为今后抗氧化型低膨胀高温合金的发展奠定科学基础。

### 1 实验用料及方法

选择六种不同的低膨胀高温合金成分, 如表 1 所示。1 号为标准的 GH909 成分。样品是经 10kg 真空感应炉冶炼成 8kg 钢锭, 经 1050 锻造成 22mm 棒材, 再经标准热处理后提供。

氧化性能试验采用氧化增重法。实验按 HB5258-83 标准方法<sup>[5]</sup>来进行。实验温度选择为 700 。

表 1 所选择的低膨胀高温合金的成分 (wt%)

Table 1 Chemical composition of low thermal expansion superalloys selected

方案	C	Si	Ni	Co	Cr	Al	Ti	Nb	Fe	B	La	S	P
1	0.013	0.43	37.67	14.44	0	0	1.56	4.51	41.356	0.006	0	0.005	0.01
2	0.018	0.29	28.18	21.43	1.93	0.59	1.32	3.72	42.489	0.007	0.01	0.006	0.01
3	0.03	0.39	30.12	23.72	3.91	0.57	1.26	3.85	36.118	0.008	0.01	0.004	0.01
4	0.022	0	28.88	32.68	2.89	5.24	0.25	2.82	27.188	0.007	0.01	0.003	0.01
5	0.028	0.27	34.12	19.68	1.79	5.26	1.28	2.69	34.852	0.007	0.01	0.003	0.01
6	0.018	0.45	29.92	19.68	1.54	0.61	1.34	3.82	42.592	0.008	0.01	0.002	0.01

## 2 实验结果分析与讨论

实验结果如图1所示。标准的GH909合金不含Cr,其抗氧化能力较低,随着时间的增加氧化增重显著增大。合金中添加少量Cr元素后,合金的抗氧化性能得到显著提高,氧化增重曲线明显下移。并且随着Cr元素添加量的增加,曲线下移的幅度也加大。

由图1的实验结果分析可知,合金的氧化增重量 $f$ (t)随时间 $t$ 的变化可近似地用抛物线表示:

$$f(t) = \sum_{j=0}^2 a_j t^j \quad (1)$$

$$a_j = \sum_{i=1}^n b_{ij} c_i \quad (2)$$

式中, $a_j$ 为抛物线参量; $c_i$ 为第 $i$ 个合金元素的原子百分量; $b_{ij}$ 为与 $a_j$ 对应的第 $i$ 个合金元素的作用系数。经分析研究得到合金元素的作用系数如表2所示。

由表2可以看出,合金元素的作用系数有的为正,有的为负,故不同程度地导致抛物线参量的升高与降低,决定曲线上升速率的程度及在图中位置的不同,反映出合金抗氧化性能的优劣。

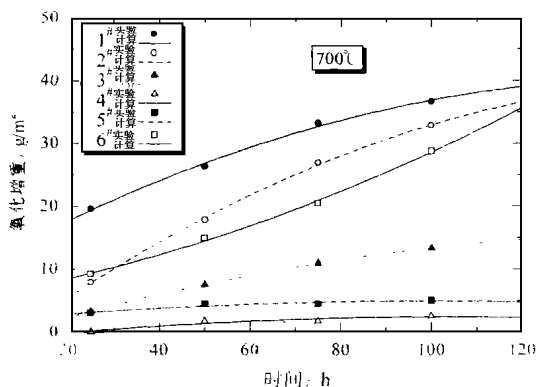


图 1 几种低膨胀高温合金的温度-氧化增重动态实验曲线

Fig. 1 Oxidation increased-weight curves of some low thermal expansion superalloys

表 2 合金元素的作用系数

Table 2 Coefficients of effect of alloys elements

元素	$b_{a0}$	$b_{a1}$	$b_{a2}$
C	- 592.0585	23.2517	- 6.957 × 10 <sup>-2</sup>
Si	122.1059	- 4.5625	1.544 × 10 <sup>-2</sup>
Ni	- 0.8283	0.03085	- 4.601 × 10 <sup>-5</sup>
Co	- 0.3805	0.01249	3.414 × 10 <sup>-5</sup>
Cr	16.3200	- 0.6979	1.240 × 10 <sup>-3</sup>
Al	6.7969	- 0.2657	6.033 × 10 <sup>-4</sup>
Ti	- 23.8045	0.8448	- 3.031 × 10 <sup>-3</sup>
Nb	3.7570	- 0.07881	- 4.557 × 10 <sup>-5</sup>
Fe	0.2181	- 0.006242	- 7.571 × 10 <sup>-5</sup>
B	- 444.3687	25.7078	- 8.401 × 10 <sup>-2</sup>
La	- 3473.4130	93.6989	0.1509
S	3354.9332	- 103.6964	0.2089
P	- 1288.9070	48.0769	1.537 × 10 <sup>-2</sup>

将表1的数据进一步转化为合金元素的原子百分含量后,再利用表2的数据以及运用(1)式和(2)式就可计算出各种低膨胀高温合金的氧化增重的计算曲线,将其绘制于图1中,可见计算曲线与实验结果吻合得很好。显然,利用表2的数据以及(1)式和(2)式,将对今后新研制的低膨胀高温合金的抗氧化性能提供预测结果,可用于指导验证研究工作。

## 3 结论

(1) Cr元素的添加可以显著使合金的抗氧化性能得到提高,氧化增重曲线下移。并且随着Cr元素添加量的增加,曲线下移的幅度也加大。

(2) 采用合金元素作用系数的概念,并利用分析得到的合金元素作用系数对实验合金进行了预测计算,与

实验结果吻合得很好。

(3) 4<sup>#</sup> 和 5<sup>#</sup> 成分具有最佳的抗氧化性能, 六种成分的抗氧化顺序为 4, 5, 3, 6, 2, 1。

(4) 利用合金元素作用系数的概念和本研究所提出的方法可对低膨胀高温合金的氧化增重提供预测计算, 借此可减少研究低膨胀高温合金氧化性能的试验工作量, 为今后低膨胀高温合金的发展打下了基础。

致谢: 本工作, 得到了北京航空材料研究院周瑞发研究员的热心协助, 实验工作得到了赵宇新高级工程师和支敏学研究生的大力支持。在此一并表示感谢。

参考文献

[1] Incoloy Alloy 909, INCO Alloys International, 1987, NO. IAI-18.  
[2] Incoloy Alloy 909 Cryogenic Data, provided by J. M. Martin, INCO Alloys International 1988, 10.  
[3] Heck, K. A., Smith, D. F. Smith, J. S., Wells, D.

A., and Holderby, M. A. The Physical Metallurgy of a Silicon-Containing Low Expansion Superalloy. Paper presented at Conference on Superalloys, Champion, PA, The Metallurgical Society AIME, 1988, 9.

[4] Smith, D. F. Low-Expansion Superalloys, INCO Alloys International 1, TR-21M, 1985, 10.  
[5] 余霞飞, 任金兰, 李金桂. 钢及高温合金的抗氧化性测定试验方法. 中华人民共和国航空工业部部标准, HB5258-83, 1984-01-01实施.

[作者简介] 林政 (1961-), 男, 博士, 高级工程师。1986年至1988年, 参加了低膨胀 GH903 变形高温合金研制和应用研究 (911277), 并获得部级科学技术进步三等奖; 1988年至1992年组织、协调了运12飞机材料英国适航审查 (921410), 获得部级科学技术进步三等奖; 现在北京航空材料研究院博士后流动站工作。联系地址: 北京81信箱3分箱 (100095)

\*\*\*\*\*

(上接第33页)

不同 (表1) 的氧化铝多孔膜, 分别测定红外反射光谱结果示于图6。从图中可明显看出随孔隙度的增加, 在 1250~417cm<sup>-1</sup> 波段反射光谱呈下降趋势, 这与张光寅等人的研究结果相一致。因此进一步提高孔隙度, 可获得性能更好的吸波材料。

表1 氧化铝多孔膜的孔隙度

Table 1 The porosity of porous alumina film

编号	1	2	3
孔隙度/%	2.87	9.86	15.8

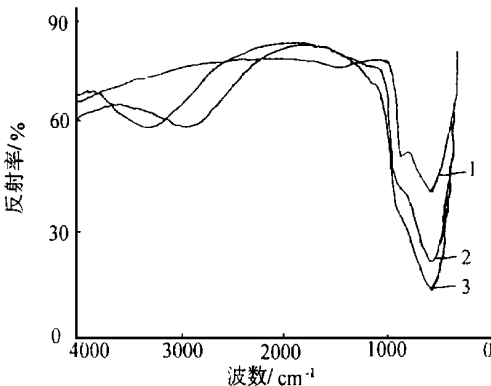


图6 不同孔隙度的氧化铝多孔膜的红外反射光谱

Fig.6 IR reflection spectra of porous alumina film of the different porosities

(1) 直流恒压铝阳极氧化法可制备纳米级氧化铝多孔膜。

(2) 直流恒压铝阳极氧化法制备的纳米级氧化铝多孔膜具有红外吸波性能。

(3) 随氧化铝多孔膜孔隙度的增加, 1250~417cm<sup>-1</sup>波段的红外反射光谱呈下降趋势。

参考文献

[1] 万梅香, 李素珍, 李军朝等. 微波与红外兼容的新型隐身材料. 宇航材料工艺, 1991, 6: 26~29.  
[2] 康青. 红外隐身技术的现状与发展. 红外技术, 1995, 17(6): 28~30.  
[3] 张光寅, 戴松涛, 张存洲等. 多孔材料红外反射光谱的下塌现象. 红外与毫米波学报, 1995, 14(4): 283~288.  
[4] 高云震, 任继嘉, 宁福元编译. 铝合金表面处理. 冶金工业出版社, 1991.

[作者简介] 巩运兰 (1963-), 女, 讲师。联系地址: 天津市津霸公路天津商学院食品系, (邮编 300400)