

文章编号: 1004-0609(2004)09-1477-06

粘结层中 Cr 对热障涂层界面结合因子的影响^①

李志林, 吴远启

(北京化工大学 材料科学与工程学院, 北京 100029)

摘 要: 结合固体与分子经验电子理论(EET)和改进的TFD理论,计算了在不同粘结层Cr含量下热障涂层的陶瓷层/粘结层界面的界面结合因子,以预测Cr对该界面结合的影响。结果表明,当粘结层的取向为(111)和(100)时,加Cr可以改善该界面的界面结合。当粘结层取向为(110)、Cr含量低于10%(质量分数)时,Cr可以改善该界面的结合;Cr含量高于10%(质量分数)时,Cr将破坏该界面的结合。因此在目前工艺条件控制组织比较困难的情况下,从界面结合考虑,Ni基粘结层含Cr量应尽量降低。该结果可作为粘结层成分设计的依据。

关键词: 热障涂层; Cr; 粘结层; 界面结合因子

中图分类号: TG 111.1

文献标识码: A

Influence of bonding layer Cr content of thermal barrier coatings on its interface conjunction factors

LI Zhi-lin, WU Yuan-qi

(College of Materials Science and Engineering,

Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029, China)

Abstract: Interface conjunction factors of the ceramic layer/ binding layer interface of thermal barrier coatings were calculated on various bonding layer Cr contents with the combination of the empirical electron theory of solid and molecule (EET) and improved Thomas-Fermi Dirac theory. The influence of Cr on the conjunction state of the interface can be predicted with the factors. The results show: When the orientation of the surface of the binding layer is (111) or (100), Cr will improve the interface conjunction; If the orientation is (110), Cr will improve the interface conjunction only when the Cr content is less than 10%; and Cr will decrease the interface conjunction when the Cr content is greater than 10%. Therefore, in the case that the orientation of the surface is difficult to be controlled technologically nowadays, the Cr content of Ni based binding layers should be as low as possible. Those results can be a foundation of the composition design of the binding layer.

Key words: thermal barrier coatings; Cr; binding layer; interface conjunction factors

热障涂层(thermal barrier coatings, TBC)主要用于航空发动机高温工作部分的隔热,保护高温合金基体。目前热障涂层多为高温合金基底+粘结层+陶瓷隔热层的双层结构,粘结层为MCrAlY(M= Ni, Co, Ni+Co)合金。该合金不仅提高抗氧化性,更重要的是改善陶瓷涂层与基体高温合金物理相容性,从热膨胀系数、力学性能、界面结合等方面起过渡作用^[1-3]。研究表明虽然Ni-35Cr-6Al-0.95Y涂层的

抗氧化性不如Ni-18Cr-12Al-0.3Y涂层,但其热循环寿命却更长。因为前者具有低的热膨胀系数和较高的抗蠕变能力,从而使界面在热循环时更稳定,使热循环寿命提高。因此,综合考虑粘结层的力学性能是粘结层成分优化的一个发展方向^[3]。提高热障涂层的力学性能的关键之一是对粘结层的成分进行优化,使其与基体和陶瓷层都具有良好的界面结合。由于破坏一般在陶瓷层/粘结层界面发生,对

① 基金项目:教育部重点研究资助项目(02018);北京化工大学青年教师科研基金资助项目

收稿日期:2003-12-02;修订日期:2004-03-06

作者简介:李志林(1964-),男,教授,博士。

通讯作者:李志林,教授;电话:010-64433716(O),010-64411283(H);E-mail:zhilinlibj@sohu.com

粘结层的成分进行优化的关键是改善陶瓷层/粘结层界面的界面结合。从实验上系统研究粘结层成分与涂层的性能、寿命关系是一项令人生畏的工作,因此从理论上预测成分对性能的影响是一项有意义的工作。

刘志林等将余氏固体与分子经验电子理论^[4-6]与程氏改进的 TFD 理论^[7]结合起来,提出了合金中具有 $A_{(hkl)} \parallel B_{(uvw)}$ 位向关系的异相界面价电子结构的计算方法^[8]和界面结合因子的概念,其中包括界面两侧的电子密度 $\rho_{(hkl)}$, $\rho_{(uvw)}$, 电子密度差 $\Delta\rho_{\min}$, 使界面电子密度保持连续的原子状态组数 σ 。并且认为 $\rho_{(hkl)}$, $\rho_{(uvw)}$ 越大, 界面结合越强; $\Delta\rho_{\min}$ 越小, 界面应力越小; σ 越大, 界面越稳定^[9, 10]。通过对合金相之间大量界面的界面结合因子的计算, 从电子结构层次揭示了相变增韧、加工硬化、弥散强化、表面改性、再结晶细化等现象的本质, 提出了从界面结合因子出发进行合金成分设计的方法, 并设计了多种工业合金^[10-12]。文献[13]将界面结合因子的概念扩展到了涂层, 计算了不同 Al 含量下的 $t\text{-ZrO}_2/\text{Ni-Al}$ 合金界面的界面结合因子, 发现从前为提高抗氧化性在 MGrAlY 粘结层中片面地提高 Al 含量不一定有利于提高涂层寿命, 并从理论上印证了目前粘结层成分优化中 5%~8% (质量分数) 的低 Al 含量的发展方向^[3]。本文作者在上述工作的基础上研究了 Cr 对热障涂层的陶瓷层/粘结层界面的界面结合因子的影响。

1 陶瓷层/粘结层界面的界面结合因子的计算

虽然涂层与基体无固定的位向关系, 但涂层在不同的工艺条件下形成不同的织构则是常见的现象^[14]。为简化计算, 据文献[13]的方法, 认为陶瓷层为 $t\text{-ZrO}_2$, 粘结层为 Ni 基含 Cr 固溶体 (γ 相, fcc 结构), 二者之间存在 $t\text{-ZrO}_2$ 的 (110) 晶面分别平行于 Ni-Cr 固溶体的 (100), (111), (110) 晶面的位向关系。以此为基础进行陶瓷层/粘结层界面的界面结合因子的计算。

1.1 粘结层价电子结构及其相应晶面的电子密度

1.1.1 粘结层的价电子结构

根据 Ni-Cr 合金的晶格常数随 Cr 含量变化的曲

线^[15], 回归出 Cr 含量与 Ni-Cr 固溶体的晶格常数的关系为

$$a = a_0 + 0.000\,936e^{0.048\,61w} - 0.000\,8$$

式中 w 为 Cr 的质量分数; a_0 为 Ni 的点阵常数, nm。

按平均原子模型^[16], Cr 加入后所有的点阵位置都是由一种 X 原子所占据, X 原子既不是 Ni 原子, 也不是 Cr 原子, 而是一种假设的 Ni+Cr 原子混合成的原子, 其单键半距、共价电子数等性质为组成固溶体的各种元素的原子的加权平均值, 即

$$R_X(1) = x_{\text{Ni}}R_{\text{Ni}}(1) + x_{\text{Cr}}R_{\text{Cr}}(1)$$

$$n_c^X = x_{\text{Ni}}n_c^{\text{Ni}} + x_{\text{Cr}}n_c^{\text{Cr}}$$

式中 $R(1)$ 代表单键半距; x 代表 Ni 和 Cr 的摩尔分数; n_c 代表原子的共价电子数。

至此, 可确定粘结层的 BLD 分析模型如图 1 所示, 其 (100), (110), (111) 晶面也在该图中同时给出。其中不可忽略的共价键仅有 2 种, 其键名、键距和等同键数分别为

$$B_A^{X-X}, D_A = \frac{\sqrt{2}}{2}a, I_A = 1 \times 12 \times 1 = 12;$$

$$B_B^{X-X}, D_B = a, I_B = 1 \times 6 \times 1 = 6$$

据此可对粘结层合金进行 BLD 分析, 得出其价电子结构。表 1 示出该合金价电子结构的一个例子。由表 1 可见, 当 Ni 和 Cr 分别处于 A 种杂化第 13 阶和 A 种杂化第 18 阶时, 含 2% Cr 的 Ni-Cr 固溶体中的 A, B 键上分别有 $n_A = 0.519\,72$ 和 $n_B = 0.009\,95$ 个共价电子对。

1.1.2 粘结层相应晶面的电子密度

晶面上的电子密度 ρ 为晶面参考单元的总价电子数 $\sum n_c$ 除以该参考单元的面积 S 。如图 1 所示, 粘结层 (100) 晶面上有 B_A^{X-X} 和 B_B^{X-X} 2 种共价键, 在 $S_{(100)} = a^2$ 的面积内, 其晶面上的等同键数分别为: $I_A^1 = 2 \times 4 \times 1 = 8$; $I_B^1 = 2 \times 4 \times 1 = 8$ 。 $\sum n_c^{(100)} = I_A^1 n_A + I_B^1 n_B$ 。各共价键上的共价电子对数已由 BLD 分析给出。如对含 2% Cr 的 Ni-Cr 固溶体, 其 (100) 晶面的 $\sum n_c^{(100)} = 8 \times 0.519\,72 + 8 \times 0.009\,95 = 4.237\,36$, $S_{(100)} = 0.351\,94^2 \approx 0.123\,86\text{ nm}^2$, 所以该晶面的电子密度 $\rho_{(100)} = 4.237\,36 / 0.123\,86 \approx 34.210\,88\text{ nm}^{-2}$ 。

类似地, (110) 晶面上也有 B_A^{X-X} 和 B_B^{X-X} 2 种共价键, 在 $S_{(110)} = \sqrt{2}a^2$ 的面积内, 其晶面上的等同键数分别为: $I_A^1 = 2 \times 2 \times 1 = 4$; $I_B^1 = 2 \times 2 \times 1 = 4$ 。

表 1 含 2% Cr 的 Ni-Cr 固溶体的价电子结构

Table 1 Valence electron structure of Ni-Cr solid solution with 2% Cr

Bond name	I_a	D_{na}/nm	$\overline{D}_{na}/\text{nm}$	n_a	$\Delta D_{na}/\text{nm}$	$\sum I_r$	$\sum n_c$	β
B_A^{X-X}	12	0.248 86	0.248 57	0.519 72	0.000 29	12.114 9	6.296 32	0.060 0 nm
B_B^{X-X}	6	0.351 94	0.351 65	0.009 95	0.000 29			

$a = 0.351\ 94\ \text{nm}$; Ni: A13; $n_c^{13} = 6.372\ 27$; $R(1)^{13} = 0.115\ 58\ \text{nm}$; Cr: A18; $n_c^{18} = 3.000\ 00$; $R(1)^{18} = 0.123\ 37\ \text{nm}$

$\sum n_c^{(110)} = I_A^R n_A + I_B^R n_B$ 。故可求出 $\rho_{(110)}$ 。

(111) 晶面上仅有 B_A^{X-X} 键, 在 $S_{(111)} = \frac{\sqrt{3}}{2} a^2$ 的面积内, 其晶面上的等同键数 $I_A^R = 2 \times 6 \times 1 = 12$;
 $\sum n_c^{(111)} = I_A^R n_A$ 。故可求出 $\rho_{(111)}$ 。

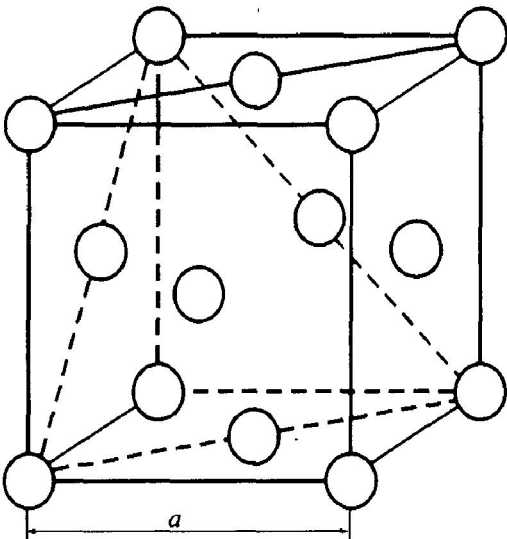


图 1 粘结层的晶胞及其 (100)、(110)、(111) 晶面

Fig. 1 Crystal cell of bonding layer and its (100), (110), (111) planes

面电子密度差 $\Delta\rho_{\min}$ 的计算结果。可见当粘结层的表面为 (100) 和 (111) 晶面时, $\Delta\rho_{\min}$ 是随 Cr 含量的增加单调降低的。按界面的电子密度差越大, 界面应力越大的观点, Cr 的加入有利于缓解这两种界面的应力。当粘结层的表面为 (110) 晶面时, $\Delta\rho_{\min}$ 在含 2% Cr 和含 24% Cr 左右时趋于极小。

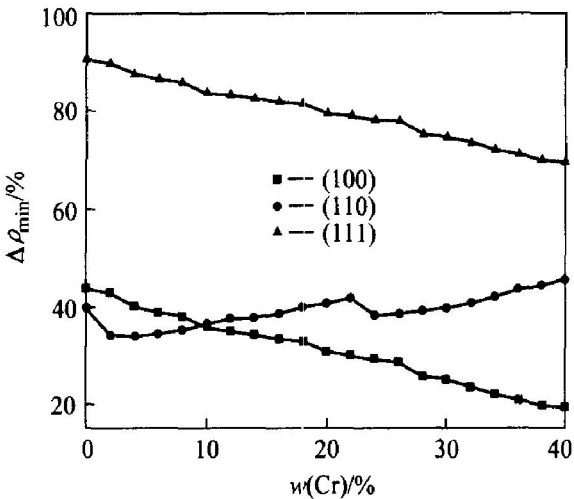


图 2 $t\text{-ZrO}_2$ 的 (110) 晶面与 Ni-Cr 固溶体不同晶面的电子密度差

Fig. 2 Electrons density difference between(110) plane of $t\text{-ZrO}_2$ and various planes of Ni-Cr solid solution

1.2 陶瓷层/粘结层界面的界面结合因子的计算

文献[13]已计算了 $t\text{-ZrO}_2$ 的价电子结构及其 (110) 晶面的电子密度。所以陶瓷层/粘结层界面两侧的共价电子密度 ρ_A , ρ_B 都已求出, 界面的电子密度差可用以下公式求出:

$$\Delta\rho = \frac{|\rho_A - \rho_B|}{(\rho_A + \rho_B)/2}$$

对 Ni, Cr, Zr, O 试取所有杂阶, 用计算机进行循环计算, 就可以求出界面上最小电子密度差 $\Delta\rho_{\min}$ 以及在最小电子密度差下的共价电子密度 ρ_A , ρ_B 和使界面电子密度保持连续的原子状态组数 σ (当 $\Delta\rho_{\min} < 10\%$) 或 σ' (当 $\Delta\rho_{\min} > 10\%$)。

2 计算结果及讨论

2.1 Cr 含量与陶瓷层/粘结层界面的电子密度差的关系

图 2 所示为不同 Cr 含量下的陶瓷层/粘结层界

2.2 Cr 含量与陶瓷层/粘结层界面电子密度连续性的关系

计算表明, 不论基体合金处于何种位相, 加 Cr 后使陶瓷层/粘结层界面电子密度保持连续的原子状态组数 σ' 都比不加 Cr 增加至少一个数量级。因此在外界条件改变时, Cr 的加入有利于使界面电子密度保持连续, 例如当应力引起界面上的原子尺寸变化时, 有更多的原子状态可以适应这一变化保持界面电子密度的连续性, 提高界面的稳定性。但如果 Cr 的加入在提高了界面适应外界条件变化能力的同时又使界面应力升高, 则难于判断其对界面的综合作用。为此仿文献[13]考察加 Cr 后电子密度差 $\Delta\rho_{\min}$ 与未加 Cr 时相近(偏差不超过 10%) 以及明显比不加 Cr 时小(偏差小于 -10%) 的原子状态组数 σ_{equal} 和 σ_{super} , 其计算结果如图 3 所示。

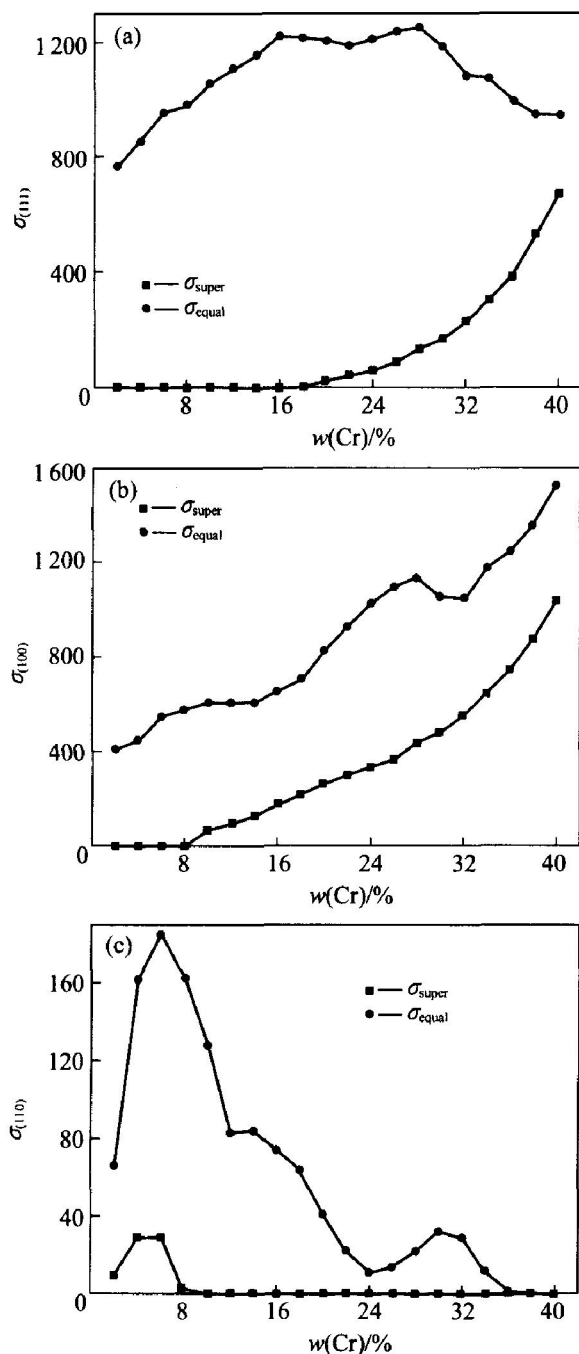


图 3 不同 Cr 含量合金的 σ_{equal} 和 σ_{super}

Fig. 3 σ_{equal} and σ_{super} for alloy with different Cr content

- (a) —Surface of bonding layer being (111);
 (b) —Surface of bonding layer being (100);
 (c) —Surface of bonding layer being (110)

由图 3 可见, 当粘结层取向为 (111) 时, σ_{equal} 在 7691 252, 在含 16% 26% Cr 时较高, 即有数百到上千组原子状态使界面应力与不加 Cr 时相近; 当 Cr 含量超过 20% 时, σ_{super} 才大于 0, 即此时才有使界面应力明显比不加 Cr 时小的原子状态组合, 且 σ_{super} 随 Cr 含量的增高而增大。当粘结层取向为 (100) 时与取向为 (111) 时相似, 不同的是 σ_{equal} 在含

26% Cr 时有一极大值, 且从 Cr 含量超过 8% 时起 σ_{super} 就大于 0。因此, 当粘结层为这两种取向时, 由于 Cr 的加入导致的 σ' 升高、界面稳定性提高的作用不会由于应力的升高受到破坏。当粘结层取向为 (110) 时, σ_{equal} 的最大值 (在含 6% Cr 时出现) 才 192, 含 10% Cr 后即降至 100 以下, 含 36% Cr 后降至 0; σ_{super} 的最大值不到 40, 含 10% Cr 后即降至 0。所以, 在此种取向, 只有含 10% Cr 以下时才能保证界面应力比不加 Cr 时小; 含 10% 36% Cr 时也有一些原子状态使界面应力与无 Cr 时相近; 含 36% Cr 以上时, Cr 引起的 σ' 升高、界面稳定性提高的作用将由于应力的升高受到破坏。

2.3 Cr 含量与陶瓷层/粘结层界面电子密度的关系

按界面电子密度越大, 界面结合力越大的观点, 界面的结合力应取决于电子密度较低的一侧。当基底取向为 (100) 和 (111) 时, 陶瓷层的电子密度较低, 不论粘结层 Cr 含量如何变化, 陶瓷层的电子密度始终是 $\rho = 20.440\ 00\ \text{nm}^{-2}$, 所以 Cr 含量的变化不会导致界面结合力的变化。粘结层取向为 (110) 时, 粘结层的电子密度较低, Cr 含量对其影响的计算结果如图 4 所示。

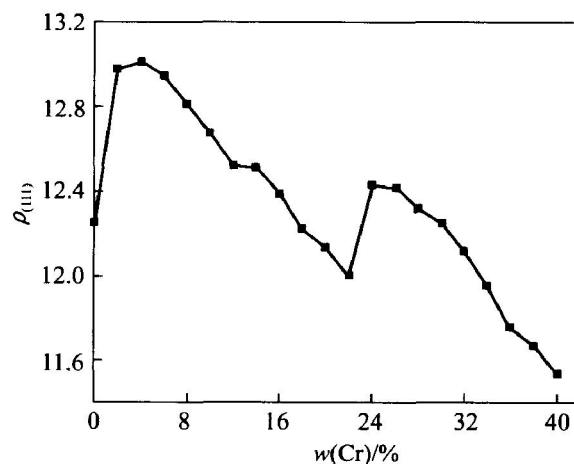


图 4 Ni-Cr 固溶体 (110) 晶面电子密度与 Cr 含量的关系

Fig. 4 Relationship between electron density of (110) plane of Ni-Cr solid solution and Cr content

由图 4 可见, 除在 4% 以下的低 Cr 范围外, $\rho_{(110)}$ 总的趋势是随含 Cr 量降低的, 只在含 22%-24% Cr 时有一波动。所以粘结层取向为 (110) 时, 除在低 Cr 范围外, Cr 含量的提高一般导致界面结合力的降低。

2.4 综合分析

当粘结层的取向为(111)和(100)时,陶瓷层/粘结层界面的最小电子密度差 $\Delta\rho_{\min}$ 均随 Cr 含量升高而降低,界面应力降低;加 Cr 后使该界面电子密度保持连续的原子状态组数 σ' 都比不加 Cr 至少增加一个数量级,且从 σ_{equal} 和 σ_{super} 分析 Cr 导致的 σ' 升高、界面稳定性提高的作用不会由于应力的升高受到破坏;界面电子密度 ρ 则不受 Cr 含量的影响。所以粘结层为这两种取向时,加 Cr 可以改善该界面的界面结合。但当粘结层取向为(110)时,只有 Cr 含量低于 10% 时才有 $\Delta\rho_{\min}$ 比无 Cr 时小, $\sigma_{\text{super}} > 0$, 即存在使界面应力明显降低的原子状态组合, Cr 导致的 σ' 升高、界面稳定性提高的作用不会由于应力的升高受到破坏, ρ 也比无 Cr 时高, Cr 可以改善该界面的结合。当 Cr 含量高于 10% 时 $\Delta\rho_{\min}$ 比无 Cr 时大, $\sigma_{\text{super}} = 0$, σ_{equal} 也明显降低, ρ 一般也比无 Cr 时低, Cr 将破坏该界面的结合。当 Cr 含量超过 36% 时, $\sigma_{\text{equal}} = 0$, 即没有一组原子状态可以使界面电子密度差与未加 Cr 时相近, Cr 导致的 σ' 升高、界面稳定性提高的作用必然受到应力升高的破坏。

粘结层中加入 Cr 主要是为了提高涂层的抗氧化性和抗热腐蚀性,并促进 Al_2O_3 保护膜的形成^[3, 17]。若从这些方面考虑 Cr 含量应尽量高。上述分析表明,如能控制工艺因素,使粘结层出现表面为(111)或(100)的织构,则加 Cr 可以改善热障涂层的陶瓷层/粘结层界面的界面结合。在目前工艺条件控制织构比较困难的情况下,从界面结合考虑,热障涂层的 Ni 基粘结层含 Cr 量应尽量降低,尤其不能超过 36%。尽管如此,实际应用的粘结层 Cr 含量却不能低于 10%,实际应用的 Co 基粘结层的 Cr 含量甚至达 35%~38% 以满足抗氧化性和抗热腐蚀性的需要^[13]。本研究结果表明 Ni 基粘结层的 Cr 含量也那样高则是不适当的。实际应用 Ni 基粘结层的 Cr 含量都在 15%~28%^[13], 则兼顾了界面结合和提高抗氧化、热腐蚀性的需要。虽然设计上述成分时界面结合并不是首要的考虑因素,但对界面结合因子的计算说明了上述成分设计的合理性并为以后的成分设计提供了依据。

3 结论

1) 粘结层的取向为(111)和(100)时,陶瓷层/粘结层界面的最小电子密度差 $\Delta\rho_{\min}$ 均随 Cr 含量升高而降低,界面应力降低;加 Cr 后使该界面电子密度保持连续的原子状态组数 σ' 都比不加 Cr 至少增

加一个数量级,且从 σ_{equal} 和 σ_{super} 分析可知,这种 σ' 升高、界面稳定性的提高不会受到应力升高的破坏;界面电子密度 ρ 则不受 Cr 含量的影响。

2) 粘结层取向为(110)时, Cr 含量低于 10%, $\Delta\rho_{\min}$ 比无 Cr 时小, $\sigma_{\text{super}} > 0$, Cr 导致的 σ' 升高、界面稳定性提高的作用不会受到应力升高的破坏, ρ 也比无 Cr 时高, Cr 可以改善该界面的结合; Cr 含量高于 10%, $\Delta\rho_{\min}$ 比无 Cr 时大, $\sigma_{\text{super}} = 0$, σ_{equal} 也明显降低, ρ 一般也比无 Cr 时低, Cr 将破坏该界面的结合。

3) 如能控制工艺因素,使粘结层出现表面为(111)或(100)的织构,则加 Cr 可以改善热障涂层的陶瓷层/粘结层界面的界面结合。在目前工艺条件控制织构比较困难的情况下,从界面结合考虑, Ni 基粘结层含 Cr 量应尽量降低。本文研究计算结果说明了目前使用的 Ni 基粘结层成分设计的合理性,并为今后成分设计提供了依据。

REFERENCES

- [1] XU Hu-bin, GONG Sheng-kai, DENG Liang. Preparation of thermal barrier coatings for gas turbine blades by EB-PVD [J]. Thin Solid Films, 1998, 334: 98 - 102.
- [2] Movchan B A, Malashenko I S, Yu K, et al. Two and three-layer coatings produced by deposition in vacuum for gas turbine blade protection [J]. Surface and Coatings Technology, 1994, 67: 55 - 63.
- [3] 徐惠彬, 宫声凯, 刘福顺. 航空发动机热障涂层材料体系的研究 [J]. 航空学报, 2000, 21(1): 7 - 11.
XU Hu-bin, GONG Sheng-kai, LIU Fu-shun. Research on the materials system of the thermal barrier coatings of aeronautics turbine [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2000, 21(1): 7 - 11.
- [4] 余瑞璜. 固体与分子经验电子理论 [J]. 科学通报, 1978, 23(4): 217 - 224.
YU Rui-huang. Empirical electron theory in solids and molecules [J]. Chinese Science Bulletin, 1978, 23(4): 217 - 224.
- [5] GUO Yong-quan, YU Rui-huang, ZHANG Rui-lin, et al. Calculation of magnetic properties and analysis of valence electron structures of $\text{LaT}_{13-x}\text{Al}_x$ ($T = \text{Fe, Co}$) compounds [J]. J Phys Chem B, 1998, 102(1): 9 - 16.
- [6] LIU Zhi-lin, LI Zhi-lin, SUN Zheng-guo. Catalysis mechanism and catalyst design of diamond growth [J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 1999, 30(11): 2757 - 2766.
- [7] CHENG Kai-jia. Application of the TFD model and Yu's theory to material design [J]. Progress in Natural Science,

- 1993, 3(3): 211 - 230.
- [8] LIU Zhi lin, LI Zhi lin, SUN Zhen guo. Electron density of austenite/ martensite biphas interface[J]. Chinese Science Bulletin, 1996, 41(5): 367 - 370.
- [9] LIU Zhi lin, SUN Zhen guo, LI Zhi lin. Application of Yu's theory and Cheng's theory in alloy research[J]. Progress in Natural Science, 1998, 8(2): 134 - 146.
- [10] 刘志林, 李志林, 刘伟东. 界面电子结构与界面性能[M]. 北京: 科学出版社, 2002. 163 - 240.
- LIU Zhi lin, LI Zhi lin, LIU Wei dong. Electron Structure of Interfaces and Their Properties[M]. Beijing: Science Press, 2002. 163 - 240.
- [11] LI Zhi lin, LIU Zhi lin, LIU Wei dong, et al. Interface conjunction factors of the second phase particles in alloys and their effects[J]. Science in China(Series E), 2002, 45 (2): 195 - 205.
- [12] LI Zhi lin, LIU Zhi lin, LIU Wei dong. Valence electron structures of cementite phase and its interface and the tempering phenomenon[J], Science in China(Series E), 2002, 45(3): 282 - 290.
- [13] LI Zhi lin, XU Hui bin, GONG Sheng kai. Interface conjunction factors of thermal barrier coatings and the relationship between factors and composition[J]. Science in China (Series E), 2003, 46: 234 - 244.
- [14] Sohn Y H, Biederman P P, Sisson R D. Microstructural development in physical vapour deposited partially stabilized zirconia thermal barrier coatings[J]. Thin Solid Films, 1994, 250: 1 - 7.
- [15] 冶 军. 美国镍基高温合金[M]. 北京: 科学出版社, 1978. 8 - 49.
- YE Jun. Nickel Based High Temperature Alloys in American[M]. Beijing: Science Press, 1978. 8 - 49.
- [16] 张瑞林. 固体与分子经验电子理论[M]. 长春: 吉林科学技术出版社, 1993. 314 - 315.
- ZHANG Rui lin. Empirical Electron Theory in Solids and Molecules[M]. Changchun: Jilin Science and Technology Press, 1993. 314 - 315.
- [17] Hecht R J, Goward G W, Elam R C. High Temperature NiCoCrAlY Coatings[P]. United States Patent 3928026, 1975 - 07 - 28.

(编辑 陈爱华)