

综述·专论

## 多主元高熵合金涂层的研究进展

彭佳<sup>1,2</sup>, 颜子博<sup>1</sup>

(1. 四川建筑职业技术学院 材料工程系, 德阳 618000;  
2. 西南交通大学 材料科学与工程学院, 成都 610031)

**摘要:** 综述了高熵合金涂层的设计理念、制备方法和性能研究的进展。介绍了高熵合金金属涂层、化合物涂层和复合涂层的性能特点。高熵合金涂层表现出高强度、高硬度、耐高温、耐磨性和耐腐蚀等优异性质,有望在工具、刀具、模具等方面得到应用。

**关键词:** 多主元; 高熵合金; 涂层

**中图分类号:** TG174.445

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1001-3660(2013)06-0073-05

## Research Progress of High Entropy Alloy Coatings

PENG Jia<sup>1,2</sup>, YAN Zi-bo<sup>1</sup>

(1. Department of Materials, Sichuan College of Architectural Technology, Deyang 618000, China;  
2. School of Materials Science and Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

**ABSTRACT:** Research progress of high entropy alloys, including design concept, synthesis methods and the main properties, are summarized in this paper. The properties of metal coating, compound coating and composite coating are reviewed. HEA coatings present different properties from traditional coatings, especially in the strength, hardness, high temperature stability, wear and corrosion resistance, which have important academic research value and potential application in instruments, cutting tools and moulds.

**KEY WORDS:** multi-principal element; high entropy alloy; coatings

目前人类已开发并实际应用的传统合金体系只有 30 余种,每一种合金体系皆以某种金属元素为主元,通过添加少量其它合金元素而形成。如以铁为主的钢铁,以铝为主的铝合金等,合金的研发始终局限在以一元为主的思路内。

2004 年,台湾学者叶均蔚教授突破合金设计的传统观念,创新性地提出了多主元高熵合金(high-entropy

alloy, HEA)<sup>[1-2]</sup>。高熵合金是指包含 5 ~ 13 种主元,并能形成高熵固溶体的合金。高熵合金中没有质量分数超过 50% 的合金元素,没有主要元素和次要元素的区分。多主元高熵合金设计理念的提出,开辟了广阔的合金体系,如果任意选取 13 种常见金属,进行 5 ~ 13 元的组合,理论上 有 7099 种高熵合金体系。

收稿日期: 2013-07-01; 修订日期: 2013-08-18

Received: 2013-07-01; Revised: 2013-08-18

基金项目: 四川省德阳市 2012 年科技支撑计划项目(2012ZZ041-3)

Fund: Supported by the Science and Technology Support Program of DeYang(2012ZZ041-3)

作者简介: 彭佳(1981—),男,博士生,讲师,主要研究方向为涂层功能材料。

Biography: PENG Jia(1981—), Male, Doctoral student, Lecturer, the main research direction is the coating material.

## 1 高熵合金的设计理念

高熵合金具有四大效应<sup>[3]</sup>,即:

1) 高熵效应,决定了合金将形成简单的固溶体<sup>[4]</sup>。

2) 晶格畸变效应,由于元素间原子半径的差异,会出现晶格畸变,导致固溶强化,影响合金的导电性、磁性、导热性等。

3) 扩散迟缓效应,多种元素间的协同扩散十分困难,而且晶格畸变将减缓元素的扩散速率,故高温时相的分离很缓慢,甚至被抑制而延迟到低温,这是铸态高熵合金出现纳米析出物的根源。

4) 鸡尾酒效应,合金中各种元素间呈现出一种复合效应。

根据玻尔兹曼假设<sup>[5]</sup>,如果合金(固溶体)中有  $n$  种原子混合,则其摩尔混合熵可表述为公式(1):

$$\Delta S_{\text{mix}} = R \ln n \quad (1)$$

式中: $R$  为气体常数。

当  $n$  越大时,混合熵就越高。以熵值  $0.693R$  和  $1.61R$  为界线,可以把全部合金分为三大类,即低熵合金、中熵合金与高熵合金。传统合金为低熵合金,2~4 种元素的合金为中熵合金,5 种主元及以上的合金为高熵合金<sup>[6]</sup>。

根据热力学定律,吉布斯自由能与混合熵的关系为公式(2):

$$G_{\text{mix}} = H_{\text{mix}} - TS_{\text{mix}} \quad (2)$$

熵的增加会大大降低吉布斯自由能,而吉布斯自由能更低的结构将会优先形成<sup>[7]</sup>。高熵效应会导致自由能的降低,在凝固过程中将优先形成高熵固溶体。有学者提出,多主元只是形成高熵合金的必要条件,而不是充分条件。高熵合金是否能形成完全固溶体,还要考虑原子半径差、电负性差、混合焓等因素<sup>[8]</sup>。

## 2 高熵合金涂层的制备

随着工业的高速发展,要求耐磨涂层在更为极端工程环境下应用,对涂层材料的硬度、摩擦磨损、抗高温氧化以及抗腐蚀性能等提出了更高要求。传统的以 TiN 为代表的涂层材料已经难以适应现代工业需要,新型高熵合金涂层逐渐成为研究热点。

采用许多技术如激光熔覆<sup>[9]</sup>、钨极气体保护弧焊<sup>[10]</sup>、电化学沉积<sup>[11]</sup>和磁控溅射<sup>[12-13]</sup>等都能成功制备高熵合金涂层。激光熔覆、钨极气体保护弧焊的原理相似,都是先将混合的纯合金粉末涂覆在基片上,再

利用高温快速融化粉末,再快速冷却,从而制备高熵合金涂层,能实现涂层的现场生产,工艺简单。缺点是合金粉末的细度、混合均匀度要求高,容易产生比较大的应力,影响涂层的性质。另外,制作过程中要注意气体保护,防止氧化。电化学沉积的缺点是沉积速率慢,沉积体系限制大,不利于推广。磁控溅射沉积速率较高,合金成分容易控制,工艺简单,不需要后续处理。缺点是不能现场生产,仪器昂贵,生产成本较高。目前,实现磁控溅射的靶材解决方案有 2 个:利用熔铸法制作成单一的高熵合金靶材;利用 3 个以上的镶嵌靶同时溅射沉积,对设备要求很高,报道不多。随着高熵合金涂层制备技术的优化和发展,必将使其应用范围得到拓展。

## 3 高熵合金涂层的性能

高熵合金凝固后不仅不会形成数目众多的金属间化合物,反而呈现出简单的面心立方(FCC)或体心立方(BCC)结晶相,甚至是非晶相结构<sup>[14-15]</sup>。高熵合金在铸态和完全回火态都会析出纳米相结构,甚至是非晶质结构,呈现罕见的高温析出强化现象<sup>[16-17]</sup>。大量研究表明,高熵合金涂层具有高强度、高硬度、高耐回火软化、高耐磨性、高抗氧化性和耐腐蚀等优异性质<sup>[18-22]</sup>,在工具、刀具、模具应用方面展现出很大潜力。归纳起来,文献报道的高熵合金涂层可以分为 3 类:金属涂层、化合物涂层、复合涂层。

### 3.1 金属涂层

高熵合金金属涂层主要是利用熔覆的方法制备,研究比较成熟。Zhang Hui 等利用激光熔覆的方法在 Q235 表面制备了 FeCoNiCrCu<sup>[23]</sup> 和 6FeNiCoSiCrAlTi<sup>[24]</sup> 高熵合金涂层。研究发现 FeCoNiCrCu 的显微硬度达到了 375HV0.5,显微组织主要是柱状晶和等轴晶,但是薄膜质量差。如果添加少量的 Si, Mn 和 Mo,显微硬度能提高到 450HV0.5。FeCoNiCrCu 薄膜在 5% (质量分数)的 H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 溶液中比 Ni60 有更优异的耐腐蚀性。6FeNiCoSiCrAlTi 熔覆涂层中形成了简单的体心立方结构,其微观结构由等轴多边形晶粒、不连续的枝晶间区域和纳米析出物组成。激光熔覆的快速冷却减轻了元素间的偏析现象,提高了涂层的显微硬度,其强化机理可归结为细晶强化和固溶强化。6FeNiCoSiCrAlTi 的涂层硬度达到了 780HV0.5,并且具有奇特的软磁行为。Y. C. Lin 等通过钨极气体保护焊,在中碳钢表面制备了 NiCrAlCoMo<sup>[25]</sup>, NiCrAlCoW 和 NiCrAlCoSi<sup>[26]</sup> 高熵合金涂层。实验发现, NiCrAlCoMo 存在大量金属间化合物,使得硬度高达 1000HV0.5。在 262 MPa 的压力

下,经过 542.87 m 的滑动摩擦实验,NiCrAlCoMo 涂层的磨损体积仅为  $0.005 \text{ mm}^3$ ,摩擦系数小于 0.6。表现出优异的耐磨性,有望作为工件的保护涂层。NiCrAlCoW 和 NiCrAlCoSi 涂层的高硬度归结为析出强化。NiCrAlCoW 涂层因为有更强的机械连锁,所以其耐磨性明显好于 NiCrAlCoSi 涂层。

AlMoNbSiTaTiVZr 涂层因具有高熵效应和扩散迟缓效应,呈现出稳定的非晶结构<sup>[27]</sup>。AlMoNbSiTaTiVZr 涂层在 700 °C,30 min 内能有效阻止铜的硅化物形成,可以在半导体中应用于铜的扩散阻隔层。

### 3.2 化合物涂层

传统耐磨涂层是以 TiN, CrN, WC, SiC 等为代表的金属氮化物、碳化物或氧化物涂层。相对于金属涂层而言,化合物涂层能显著改善硬质耐磨方面的性质,这一思路为高熵合金涂层开辟了新领域。叶均蔚教授团队率先开展了高熵合金的氮化物薄膜研究,方法主要是磁控溅射。目前,大量文献报道了磁控溅射参数对薄膜的影响,如基底偏压、 $\text{N}_2$  流量比、基底温度等;测试了高熵合金薄膜的各种性质,如硬度和模量、微观形貌和结构、高温稳定性和耐磨性等。报道涉及 10 余个体系,如  $(\text{AlCrTaTiZr})\text{N}_x$ <sup>[28-29]</sup>,  $(\text{AlCrSiTiV})\text{N}_x$ <sup>[30]</sup>,  $(\text{AlCrMoSiTi})\text{N}_x$ <sup>[31-32]</sup>, 以及  $(\text{AlMoNbSiTaTiVZr})\text{N}_x$ <sup>[33]</sup> 等,这些体系大都呈现出高硬度,从 16 ~ 37 GPa 不等,并且还具有良好的高温稳定性和化学惰性<sup>[34]</sup>。其中,有代表性的  $(\text{AlCrNbSiTiV})\text{N}$  薄膜的硬度为 41 GPa,达到了超硬材料级别。在真空环境下 900 °C 退火 5 h,并未发现晶体结构、晶格参数和硬度发生改变<sup>[35]</sup>。Cheng Keng-hao 等利用射频磁控溅射的方法制备了  $(\text{AlCrMoTaTiZr})\text{N}_x$ <sup>[36]</sup>, 薄膜的厚度约 1.2 ~ 1.5  $\mu\text{m}$ ,残余应力约 1 GPa,最高硬度达到了 40.2 GPa。薄膜在 1000 °C 退火 10 h 保持稳定,在与 100Cr6 钢球的滑动磨损试验中表现出优异的耐磨性,磨损率仅为  $2.8 \times 10^{-6} \text{ mm}^3/\text{N}$ 。薄膜的强化机理归结为细晶强化和固溶强化。

Chen Ta-kun 等报道了  $\text{Al}_x\text{CoCrCuFeNi}$  ( $x$  为 0.5, 1, 2) 的金属和氧化物薄膜<sup>[37]</sup>。实验结果显示,高熵合金金属薄膜由简单的固溶相组成,随着  $x$  的增大从面心立方逐渐转变为体心立方结构。该体系的氧化物能形成简单的固溶相,随着铝和氧含量的增加,薄膜的硬度能提高,最高硬度达到了 22.6 GPa。Miao-L. Lin 等<sup>[38]</sup>发现  $(\text{AlCrTaTiZr})\text{O}_x$  薄膜甚至出现了非晶结构,硬度在 8 ~ 13 GPa。该薄膜在 800 °C 退火 1 h 仍能保持非晶结构,经过 900 °C 退火 5 h 后,薄膜表现出异常的析出强化现象,析出了  $\text{ZrO}_2$ ,  $\text{TiO}_2$  和  $\text{Ti}_2\text{ZrO}_6$ ,使得薄膜的机械性质进一步提高,硬度和模量分别达到了 20

GPa 和 260 GPa。

### 3.3 复合涂层

根据经典的 Veprek 的理论,获得超高硬度的途径是制备纳米复合膜。通常纳米复合膜是由过渡金属的氮化物以纳米尺度的晶粒嵌含在另一种非晶基体中,如著名的 nc-TiN/a-Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 体系。由此,有学者提出,在高熵合金氮化物薄膜中引入 C, B, Si 等元素,与氮化物形成类似共价键的结合,设计高熵合金纳米复合膜,有望进一步提高薄膜的性能。

Cheng Keng-hao 等在硅片上利用反应射频磁控溅射制备了  $(\text{AlCrTaTiZr})\text{-Si}_x\text{-N}$  薄膜<sup>[39]</sup>,并研究了硅含量变化对薄膜形貌、结构、力学性能的影响。实验发现:在硅含量低时,氮化物薄膜保持简单的面心立方结构;当硅的质量分数增至 7.9% 时,热力学驱动面心固溶体发生相分离, $\text{SiN}_x$  相分离出来并起到了强化作用。薄膜出现了面心结构的氮化物固溶体和非晶结构的  $\text{SiN}_x$  两相纳米复合膜,此时薄膜硬度达到了 34 GPa。将此薄膜在空气中 1000 °C 退火 2 h,仅仅形成了 330 nm 厚的氧化层,表现出极好的抗氧化能力。

人们还利用 AlCrTaTiZr 靶和碳靶同时溅射,成功制备了  $(\text{AlCrTaTiZr})\text{N}_x\text{C}_y$  薄膜<sup>[40]</sup>。 $(\text{AlCrTaTiZr})\text{N}_{0.6}$  薄膜具有松散的柱状和面心固溶结构,硬度为 20 GPa,稳态蠕变应变率为  $1.5 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ 。随着碳的引入,薄膜性质得到改善, $(\text{AlCrTaTiZr})\text{N}_{0.6}\text{C}_{0.2}$  的硬度达到了 32 GPa,蠕变速度降低为  $1.1 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ 。这归结为碳的引入形成类似共价键,使得晶粒细化,柱状结构更致密,以及形成了类似非晶和纳米复合结构。

## 4 结语

高熵合金的提出丰富了合金设计理念,有重要的学术价值和广阔的应用前景。高熵合金涂层的制备仍沿用传统方法,其中熔覆和磁控溅射是报道最多的方法。高熵合金涂层展现出区别于传统涂层的优异性质,尤其在硬度、耐磨性、高温稳定性方面有突出表现,有取代传统涂层的趋势。同时,也应该清楚认识到,高熵合金涂层的研究离真正意义的工业应用还有很大差距。目前报道的高熵合金涂层体系只有几十种,主要为五元和六元合金,涉及的金属元素只有 10 余种。高熵合金涂层所用的基片材料还很局限,大都是碳钢和硅片。高熵合金涂层的体系选择,功能化设计,精确控制,性能优化和机理研究等方面仍需大量的工作。沿用传统的硬质薄膜理论,设计研发新的高熵合金涂层仍是今后一段时间的工作重点。

## 参考文献:

- [1] YEH Jien-wei, CHEN Swe-kai, LIN Su-jien, et al. Nanostructured High Entropy Alloys with Multiple Principal Elements; Novel Alloy Design Concepts and Outcomes, Advanced [J]. Engineering Materials, 2004 (6): 299—303.
- [2] CANTOR B, CHANG I T H, KNIGHT P, et al. Microstructural Development in Equiatomic Multicomponent Alloys [J]. Materials Science and Engineering, 2004, A375—377: 213—218.
- [3] CHEN Shin-tung, TANG Wei-yeh, KUO Yen-fu. Microstructure and Properties of Age-hardenable  $\text{Al}_x\text{CrFe}_{1.5}\text{MnNi}_{0.5}$  Alloys [J]. Materials Science and Engineering, 2010, A527: 5818—5825.
- [4] CHEN Yu-liang, HU Ya-huei, TSAI Che-wei, et al. Alloying Behavior of Binary to Octonary Alloys Based on Cu-Ni-Al-Co-Cr-Fe-Ti-Mo during Mechanical Alloying [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2009, 477: 696—705.
- [5] YEH Jien-wei, CHEN Swe-kai, GAN J Y, et al. Formation of Simple Crystal Structures in Cu-Co-Ni-Cr-Al-Fe-Ti-V Alloys with Multiprincipal Metallic Elements Metall [J]. Mater Trans, 2004, A35: 2533—2536.
- [6] YEH Jien-wei, CHEN Yu-liang, LIN Su-jien, et al. High-entropy Alloys—A New Era of Exploitation [J]. Materials Science Forum, 2007, 560: 1—9.
- [7] WANG F J, ZHANG Y, CHEN G L. Atomic Packing Efficiency and Phase Transition in a High Entropy Alloy [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2009, 478: 321—324.
- [8] ZHANG Y, ZHOU Y J, LIN J P, et al. Solid-solution Phase Formation Rules for Multi-component Alloys [J]. Advanced Engineering Materials, 2008, 10(6): 534—535.
- [9] ZHANG Hui, PAN Ye, HE Yi-zhu, et al. Microstructure and Properties of 6FeNiCoSiCrAlTi High Entropy Alloy Coating Prepared by Laser Cladding [J]. Applied Surface Science, 2011, 257: 2259—2263.
- [10] LIN Y C, CHO Y H. Elucidating the Microstructural and Tribological Characteristics of NiCrAlCoCu and NiCrAlCoMo Multicomponent Alloy Clad Layers Synthesized in Situ [J]. Surface & Coatings Technology, 2009, 203: 1694—1701.
- [11] YAO Chen-zhong, ZHANG Peng, LIU Meng, et al. Electrochemical Preparation and Magnetic Study of Bi-Fe-Co-Ni-Mn High Entropy Alloy [J]. Electrochimica Acta, 2008, 53: 8359—8365.
- [12] VINCENT Dolique, ANNE-LISE Thomann, PASCAL Brault, et al. Complex Structure/Composition Relationship in Thin Films of AlCoCrCuFeNi High Entropy Alloy [J]. Materials Chemistry and Physics, 2009, 117: 142—147.
- [13] LAI Chia-han, LIN Su-jien, YEH Jien-wei, et al. Preparation and Characterization of AlCrTaTiZr Multi-element Nitride Coatings [J]. Surface & Coating Technology, 2006, 201: 3275—3280.
- [14] ZHOU Y J, ZHANG Y, WANG F J, et al. Phase Transformation Induced by Lattice Distortion in Multiprincipal Component CoCrFeNiCu<sub>x</sub>Al<sub>1-x</sub> Solid-solution Alloys [J]. Appl Phys Lett, 2008, 92: 241—2417.
- [15] TONG C J, CHEN Y L, CHEN S K, et al. Microstructure Characterization of Al<sub>x</sub>CoCrCuFeNi High Entropy Alloy System with Multiprincipal Elements [J]. Metall Mater Trans A, 2005, 36A: 881—893.
- [16] REN B, LIU Z X, CAI B, et al. Aging Behavior of a Cu-Cr<sub>2</sub>Fe<sub>2</sub>NiMn High Entropy Alloy [J]. Materials and Design, 2012, 33: 121—126.
- [17] SHUN Tao-tung, HUNG Cheng-hsin, LEE Che-fu. Formation of Ordered/Disordered Nanoparticles in FCC High Entropy Alloys [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2010, 493: 105—109.
- [18] VARALAKSHMI S, KAMARAJ M, MURTY B S. Processing and Properties of Nanocrystalline CuNiCoZnAlTi High Entropy Alloys by Mechanical Alloying [J]. Materials Science and Engineering A, 2010, 527: 1027—1030.
- [19] SHUN Tao-tung, HUNG Cheng-hsin, LEE Che-fu. The Effects of Secondary Elemental Mo or Ti Addition in Al<sub>0.3</sub>CoCrFeNi High-entropy Alloy on Age Hardening at 700 °C [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2010, 495: 55—58.
- [20] HSU Chin-you, JUAN Chien-chang, WANG Woei-ren, et al. On the Superior Hot Hardness and Softening Resistance of AlCoCr<sub>x</sub>FeMo<sub>0.5</sub>Ni High-entropy Alloys [J]. Materials Science and Engineering A, 2011, 528: 3581—3588.
- [21] LIN Chun-ming, TSAI Hsien-lung. Equilibrium Phase of High-entropy FeCoNiCrCu<sub>0.5</sub> Alloy at Elevated Temperature [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2010, 489: 30—35.
- [22] TSAI Che-wei, TSAI Ming-hung, YEH Jien-wei. Effect of Temperature on Mechanical Properties of Al<sub>0.5</sub>CoCrCuFeNi Wrought Alloy [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2010, 490: 160—165.
- [23] ZHANG Hui, PAN Ye, HE Yi-zhu. Synthesis and Characterization of FeCoNiCrCu High Entropy Alloy Coating by Laser Cladding [J]. Materials and Design, 2011, 32: 1910—1915.
- [24] ZHANG Hui, PAN Ye, HE Yi-zhu, et al. Microstructure and Properties of 6FeNiCoSiCrAlTi High Entropy Alloy Coating Prepared by Laser Cladding [J]. Applied Surface Science, 2011, 257: 2259—2263.
- [25] LIN Y C, CHO Y H. Elucidating the Microstructural and Tribological Characteristics of NiCrAlCoCu and NiCrAlCoMo Multicomponent Alloy Clad Layers Synthesized in Situ [J]. Surface & Coatings Technology, 2009, 203: 1694—1701.
- [26] LIN Y C, CHO Y H. Elucidating the Microstructure and Wear Behavior for Multicomponent Alloy Clad Layers by in Situ Synthesis [J]. Surface & Coatings Technology, 2008, 202: 4666—4672.
- [27] TSAI Ming-hung, YEH Jien-wei, GAN Jon-yiew. Diffusion

- Barrier Properties of AlMoNbSiTaTiVZr High-entropy Alloy Layer between Copper and Silicon [J]. Thin Solid Films 2008, 516:5527—5530.
- [28] LAI Chia-han, LIN Su-jien, YEH Jien-wei, et al. Effect of Substrate Bias on the Structure and Properties of Multi-element (AlCrTaTiZr)N Coatings [J]. J Phys D: Appl Phys, 2006, 39:4628—4633.
- [29] LAI Chia-han, TSAI Ming-hung, LIN Su-jien, et al. Influence of Substrate Temperature on Structure and Mechanical Properties of Multi-element (AlCrTaTiZr)N Coatings [J]. Surf Coat Technol, 2007, 201:6993—6998.
- [30] LIN C H, DUH J G, YEH J W. Multi-component Nitride Coatings Derived from Ti-Al-Cr-Si-V Target in RF Magnetron Sputter [J]. Surface & Coatings Technology, 2007, 201: 6304—6308.
- [31] CHANG Hui-wen, HUANG Ping-kang, ANDREW Davison, et al. Nitride Films Deposited from an Equimolar Al-Cr-Mo-Si-Ti Alloy Target by Reactive Direct Current Magnetron Sputtering [J]. Thin Solid Films, 2008, 516:6402—6408.
- [32] CHANG Hui-wen, HUANG Ping-kang, YEH Jien-wei, et al. Influence of Substrate Bias, Deposition Temperature and Post-deposition Annealing on the Structure and Properties of Multi-principal-component (AlCrMoSiTi)N Coatings [J]. Surface & Coatings Technology, 2008, 202:3360—3366.
- [33] TSAI Ming-hung, LAI Chia-han, YEH Jien-wei, et al. Effects of Nitrogen Flow Ratio on the Structure and Properties of Reactively Sputtered (AlMoNbSiTaTiVZr)N<sub>x</sub> Coatings [J]. Journal of physics D-applied physics, 2008, 41:235—402.
- [34] TSAI M H, WANG C W, LAI C H, et al. Thermally Stable Amorphous (AlMoNbSiTaTiVZr) (50)N (50) Nitride Film as Diffusion Barrier in Copper Metallization [J]. Appl Phys Lett, 2008, 92:52—109.
- [35] HUANG Ping-kang, YEH Jien-wei. Effects of Substrate Temperature and Post-annealing on Microstructure and Properties of (AlCrNbSiTiV)N Coatings [J]. Thin Solid Films, 2009, 518:180—184.
- [36] CHENG Keng-hao, LAI Chia-han. Structural and Mechanical Properties of Multi-element (AlCrMoTaTiZr)N<sub>x</sub> Coatings by Reactive Magnetron Sputtering [J]. Thin Solid Films 2011, 519:3185—3190.
- [37] CHEN T K, WONG M S. Structure and Properties of Reactively-sputtered Al<sub>x</sub>CoCrCuFeNi Oxide Films [J]. Thin Solid Films, 2007, 516:141—146.
- [38] LIN Miao-i, TSAI Ming-hung, SHEN Wan-jui. Evolution of Structure and Properties of Multi-component (AlCrTaTiZr)O<sub>x</sub> Films [J]. Thin Solid Films, 2010, 518:2732—2737.
- [39] CHENG Keng-hao, TSAI Che-wei, LIN Su-jien, et al. Effects of Silicon Content on the Structure and Mechanical Properties of (AlCrTaTiZr)-Si<sub>x</sub>-N Coatings by Reactive RF Magnetron Sputtering [J]. J Phys D: Appl Phys, 2011, 44:205—405.
- [40] CHANG Shou-yi, LIN Shao-yi, HUANG Yi-chung. Microstructures and Mechanical Properties of Multi-component (AlCrTaTiZr)N<sub>x</sub>C<sub>y</sub> Nanocomposite Coatings [J]. Thin Solid Films, 2011, 519:4865—4868.

(上接第 65 页)

实践摸索,涂层受焊接飞溅及热应力的影响较大,容易造成涂层局部崩裂,应在隔板组焊并精加工、喷丸后,进行喷涂处理。

## 4 结论

1) 超音速火焰喷涂 NiCr-Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> 涂层微观上由 NiCr 粘结相和 Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> 硬质相构成。涂层孔隙率低,显微硬度高,结合强度大。

2) 涂层的失效主要表现为锤击和犁削两种作用,小角度粒子犁削冲蚀是涂层加速失效的主要原因。

## 参考文献

- [1] HOOP P J, ALLEN C. The High Temperature Erosion of Commercial Thermally Sprayed Metallic and Cermet Coatings by Solid Particles [J]. Wear, 1999, 12:334—341.
- [2] 高丽华. 汽轮机部件固体颗粒侵蚀的原因分析与防止对策 [J]. 中国电力, 2003, 36(6):45—47.
- GAO Li-hua. Causes Analysis of Solid Particle Erosion on Components of Steam Turbine and Its Preventive Countermeasures [J]. Electric Power, 2003, 36(6):45—47.
- [3] MATTHEWS S, HYLAND M, JAMES B. Micro-hardness Variation in Relation to Carbide Development in Heat Treated Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>-NiCr Thermal Spray Coatings [J]. Acta Materialia, 2003, 51(14):4267—4277.
- [4] JI G C, LI C J, WANG Y Y, et al. Microstructural Characterization and Abrasive Wear Performance of HVOF Sprayed Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>-NiCr Coating [J]. Surface and Coatings Technology, 2006, 200(24):6749—6757.
- [5] MATTHEWS S, JAMES B, HYLAND M. High Temperature Erosion of Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>-NiCr Thermal Spray Coatings—The Role of Phase Microstructure [J]. Surface and Coatings Technology, 2009, 203(9):1144—1150.
- [6] KAWAGISHI H, KAWASAKI S, IKEDA K, et al. Protective Design and Boride Coating Against Solid Particle Erosion of First-stage Turbine Nozzles [C]//Proceedings of the ASME/IEEE Joint Power Generation Conference. Boston: ASME, 1990:23—29.