

# MCrAlY 涂层的研究进展

门引妮, 李进, 卢金文, 徐研, 郭阳阳\*

(西安瑞鑫科金属材料有限责任公司, 西安 710016)

**摘要:** 随着发动机的服役温度日益升高, 工作环境日益恶劣, 涡轮叶片极易在高温环境中氧化, 大大降低了叶片的使用寿命。如何在低成本下制备保护性能好的高温防护涂层, 是当前国内外研究的重点。MCrAlY 包覆涂层可分为 NiCrAlY 涂层、CoCrAlY 涂层和 NiCoCrAlY 涂层, 这 3 类涂层的抗氧化性能和抗腐蚀性能较好, 又有很好的塑韧性和抗热疲劳性能, 因此可作为涂层或热障涂层的黏结层材料。综述了涂层中主要元素 (Al、Cr、Co、Y)、掺杂合金元素 (Ta、Re、Si、Pt)、涂层制备工艺和预处理工艺对 MCrAlY 涂层性能的研究进展。结果表明, 可以通过调节 MCrAlY 涂层的成分来实现涂层性能的调控。向 MCrAlY 涂层中掺入 Si、Ta 和 Re 等活性元素, 可显著提高涂层的抗高温氧化性能, 以进一步提高发动机的工作效率和满足高温的工作环境需求。总结了采用细化涂层晶粒、掺杂纳米颗粒和制备梯度复合涂层等方法来提高 MCrAlY 涂层的抗氧化性能和抗腐蚀性能的研究现状, 对 MCrAlY 涂层的发展趋势进行了展望。

**关键词:** MCrAlY 涂层; 活性元素; 制备工艺; 抗氧化性能; 抗腐蚀性能

**中图分类号:** TG174 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-3660(2024)07-0031-09

**DOI:** 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2024.07.003

## Research Progress of MCrAlY Coatings

MEN Yinni, LI Jin, LU Jinwen, XU Yan, GUO Yangyang\*

(Xi'an Rarealloys Co., Ltd., Xi'an 710016, China)

**ABSTRACT:** With the rapid development of aerospace industry, the service temperature of the engine rises gradually, and the working environment gets worse. Turbine blades are easily oxidized in high temperature environment, which greatly reduces the service life of the blades. How to prepare high temperature protective coating with good protective performance at low cost is the focus of research in China and abroad, which is of great strategic significance to national defense security and national economic development. The work aims to present a comprehensive overview of research progress on MCrAlY coatings, which are widely used to protect substrates against oxidation and corrosion in high temperature environment. MCrAlY coating is subdivided into NiCrAlY coating, CoCrAlY coating and NiCoCrAlY coating. These three kinds of coatings have good oxidation resistance and corrosion resistance, as well as good plastic toughness and thermal fatigue resistance, so they can be used as bonding layer materials for coatings or thermal barrier coatings. The research progress on the properties of MCrAlY coating, such as the main elements (Al, Cr, Co, Y), the addition of alloy elements (Ta, Re, Si, Pt), the coating preparation process and the pretreatment process was reviewed. The results showed that different compositions and structures would affect the performance and application range of the coating. The control of coating properties could be realized by adjusting the composition of MCrAlY coating. The addition of alloy elements such as Si, Ta and Re into the MCrAlY coating could significantly improve the

收稿日期: 2023-04-16; 修订日期: 2023-09-07

Received: 2023-04-16; Revised: 2023-09-07

基金项目: 陕西省 2023 年度秦创原引用高层次创新创业人才项目 (QCYRCXM-2023-020)

**Fund:** The 2023 Qin Chuangyuan Citation High-level Innovative and Entrepreneurial Talents Project of Shaanxi Province (QCYRCXM-2023-020)

引文格式: 门引妮, 李进, 卢金文, 等. MCrAlY 涂层的研究进展[J]. 表面技术, 2024, 53(7): 31-39.

MEN Yinni, LI Jin, LU Jinwen, et al. Research Progress of MCrAlY Coatings[J]. Surface Technology, 2024, 53(7): 31-39.

\*通信作者 (Corresponding author)

high temperature oxidation resistance of the coating, which was critical for improving the working efficiency of the engine and met the requirements of high temperature working environment. The preparation process and process parameters of the coating would affect its quality and stability. Moreover, various methods were summarized to improve the oxidation resistance and corrosion resistance of MCrAlY coatings, including refining the coating grain size, doping with nanoparticles and preparing gradient composite coatings. By optimizing the coating structure (coating thickness, grain size distribution, etc.), its oxidation resistance and corrosion resistance could be improved. The introduction of nanoparticles into the coating could improve its mechanical properties and spalling resistance. The development trend of MCrAlY coatings was prospected. In conclusion, MCrAlY coatings have exhibited excellent high temperature oxidation and corrosion resistance, making them suitable for harsh working environment. The properties of MCrAlY coatings can be controlled by adjusting their composition and utilizing advanced preparation and pretreatment processes. At present, due to the deterioration of the use environment, higher requirements are put forward for the use temperature of the coating, and the density and porosity of the coating need to be improved by one step. The future development direction of MCrAlY coating includes improving high temperature stability and mechanical properties, developing new coating materials, studying the preparation process and process parameters of coating, exploring its application in new fields, improving the precision control and consistency of coating, exploring the multifunctional application of coating, developing new coating preparation technology and promoting the digital design, prediction and simulation of coating. These directions will bring more opportunities and challenges to the application and development of MCrAlY coatings.

**KEY WORDS:** MCrAlY coating; active element; preparation process; oxidation resistance; corrosion resistance

发动机防护涂层到目前已经历了 4 个发展阶段：第一阶段为简单铝化物涂层；第二阶段为改性铝化物涂层；第三阶段为 MCrAlY (M=Co、Ni 或 NiCo) 包覆涂层；第四阶段为热障涂层 (TBCs)，如图 1 所示，底层为 MCrAlY 黏结层，表层为氧化钪、氧化镁或氧化钙稳定的氧化锆陶瓷涂层<sup>[1-2]</sup>。MCrAlY 涂层通常用于保护金属基材免受氧化，并提高 TBCs 的附着力，主要功能是隔热，用于热端部件热防护领域，例如涡轮叶片、燃烧室等<sup>[3]</sup>。涂层的氧化过程可分成 3 个阶段：开始，处于快速氧化阶段，此时主要形成  $\theta$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$ ；随着氧化反应的继续进行， $\theta$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$  不断转变为

$\alpha$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$ ，形成具有保护作用的  $\alpha$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$  薄膜（热生长氧化物，TGO）<sup>[4]</sup>。在涂层使用过程中，致密的 TGO 可以防止氧扩散到黏结层中，从而保护金属衬底免受快速高温氧化攻击。TBCs 的寿命与 TGO 的形成有关，而失效通常发生在氧化膜/金属界面之间，因此 MCrAlY 涂层的氧化行为非常重要<sup>[5]</sup>。

目前，MCrAlY 涂层抗氧化性能取决于涂层的组织和结构。高质量的 MCrAlY 涂层要求涂层致密，成分纯度高，结合力和均匀性好，表面粗糙度低，此外还需有足够高的沉积速率<sup>[6]</sup>。因此，下面将从合金元素的影响、制备工艺及预处理工艺的影响和提高抗氧

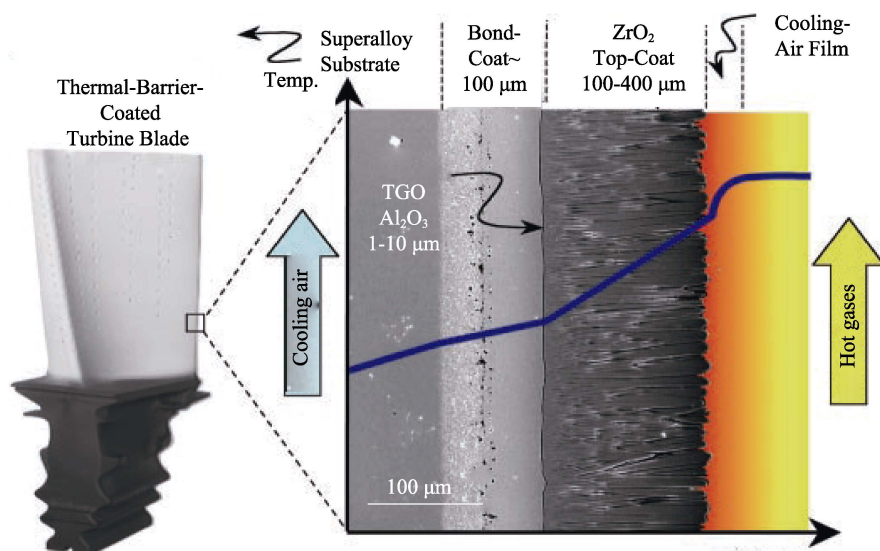


图 1 涡轮叶片及 TBCs 的横截面示意图<sup>[1]</sup>

Fig.1 Schematic diagram of cross-section of turbine blades and TBCs<sup>[1]</sup>

化性能的方法 3 个方面综述其研究进展。

## 1 合金元素对 MCrAlY 涂层的影响

涂层的合金成分对其抗氧化性能有很大的影响。传统的商业 MCrAlY 涂层 ( $M=\text{Ni}$  或/和  $\text{Co}$ ) 的成分(质量分数)为:  $\text{Al}$  8%~12%,  $\text{Cr}$  <10%,  $\text{Co}$  20%~26%,  $\text{Y}$  0.5%~1.0%, 其他为  $\text{Ni}$  和添加元素 ( $\text{La}$ 、 $\text{Hf}$ 、 $\text{Zr}$ 、 $\text{Ca}$ 、 $\text{Si}$  等), 以确保涂层具有良好的抗腐蚀性能和抗高温氧化性能<sup>[7]</sup>。同时 MCrAlY 涂层优异的高温防护性能和力学性能得益于精妙的成分设计, 因此有必要研究合金元素的加入和含量变化对涂层性能的影响。

### 1.1 MCrAlY 涂层中主要元素的作用

MCrAlY 涂层中  $\text{Al}$ 、 $\text{Cr}$  元素显著影响涂层的抗氧化和抗热腐蚀性能。涂层中  $\text{Al}$  和  $\text{Cr}$  同时存在会形成稳定连续的  $\text{Al}_2\text{O}_3$  膜, 降低了形成连续氧化膜所需的  $\text{Al}$  含量。 $\text{Cr}$  含量对黏结层的抗腐蚀性能起关键性作用。一般来说, 当  $\text{Cr}$  质量分数大于 15% 时, 含量越高, 抗腐蚀性能越好<sup>[8]</sup>。兰昊等<sup>[9]</sup>研究了  $\text{Al}$  含量对  $\text{CoNiCrAlYRe}$  合金氧化行为的影响。结果显示, 涂层中富  $\text{Cr}$  相在  $\gamma$ 、 $\beta$  相界面处的析出会随着  $\text{Al}$  含量的增加而增加, 尖晶石氧化物的形成被抑制, 同时富  $\text{Cr}$  层的存在有利于致密  $\text{Al}_2\text{O}_3$  膜的形成, 从而降低了氧化速率, 提高了合金的抗氧化性能。研究表明,  $\text{Al}$  含量较低时, 涂层中难以形成致密  $\text{Al}_2\text{O}_3$  膜, 导致涂层的抗氧化性能变差; 较高的  $\text{Al}$  含量能够改善 MCrAlY 合金的抗氧化性能, 但会使涂层的韧性降低<sup>[10]</sup>。同时  $\text{Cr}$  含量对黏结层/陶瓷层的界面结合有重要影响。李志林等<sup>[11]</sup>研究结果表明黏结层的取向与黏结层/陶瓷层的界面结合有关。黏结层的取向为 (111) 和 (100) 时,  $\text{Cr}$  可显著改善黏结层/陶瓷层的界面结合。当黏结层取向为 (110)、 $\text{Cr}$  质量分数小于 10% 时,  $\text{Cr}$  可以改善该界面的结合;  $\text{Cr}$  质量分数大于 10% 时,  $\text{Cr}$  的添加不利于界面结合。由于目前黏结层取向控制比较困难, 从界面结合角度来说黏结层中的  $\text{Cr}$  含量应尽量小。

加入  $\text{Co}$  可以提高耐热腐蚀性能 (与  $\text{Cr}$  一起), 并使涂层更具延展性。 $\text{Co}$  含量较高可以改善涂层的抗热腐蚀/抗硫化性能, 因此  $\text{CoCrAlY}$  比  $\text{NiCrAlY}$  具有更好的抗硫化性<sup>[12]</sup>。李志林等<sup>[13]</sup>研究表明, 黏结层中的  $\text{Co}$  也可对热障涂层的陶瓷层/黏结层的界面结合起积极作用。

加入微量元素  $\text{Y}$  可使涂层中的氧化物与基体的结合力加强, 还会细化涂层中的晶粒。此外,  $\text{Y}$  可促进形成连续的氧化层以减轻基体金属氧化<sup>[10]</sup>。Tawancy 等<sup>[14]</sup>研究了  $\text{Y}$  在 MCrAlY 涂层高温氧化中的作用。结果显示,  $\text{Y}$  可以通过多种机制改变涂层的氧化行为。一方面, 在氧化条件下  $\text{Y}_2\text{O}_3$  与  $\text{Al}_2\text{O}_3$  产

生的  $\text{Y-Al}$  相形成“钉扎作用”, 提高其与涂层的机械黏附性; 另一方面,  $\text{Y}$  优先富集在晶界处, 抑制  $\text{S}$  等有害元素在晶界处偏析及  $\text{Al}$  原子沿晶格扩散, 使  $\text{Al}_2\text{O}_3$  呈细晶结构, 提高涂层的高温力学强度。

### 1.2 MCrAlY 涂层中掺杂合金元素的作用

在 MCrAlY 涂层研究中, 掺杂合金元素对高温氧化的作用主要有两方面: 降低氧化速度和提高氧化膜的结合力。掺杂合金元素可降低  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  的生长速率, 改善  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  或  $\text{Al}_2\text{O}_3$  膜的抗剥落性能, 促进  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  和  $\text{Al}_2\text{O}_3$  膜的选择性氧化, 降低合金形成  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  或  $\text{Al}_2\text{O}_3$  膜的临界  $\text{Cr}$  或  $\text{Al}$  含量等, 显著改善了涂层的抗氧化性能<sup>[15]</sup>。掺杂合金元素后, 形成的相应的化合物可降低氧化膜内应力, 界面处氧化物“钉子”的形成可增加氧化膜与基体的实际接触面积, 提高氧化膜的结合能力<sup>[16]</sup>。

涂层中加入  $\text{Ta}$  能显著增加中低温抗拉屈服强度, 降低热膨胀系数。但过量的  $\text{Ta}$  会促进  $\text{CoCr}$  相的生成, 对涂层的抗氧化性能不利<sup>[10]</sup>。Sun 等<sup>[17]</sup>向  $\text{NiCoCrAlY}$  中添加  $\text{Ta}$  元素, 研究该黏结涂层的热腐蚀行为。结果表明,  $\text{Ta}$  元素的加入有利于黏结涂层的耐热氧化性能, 显著提高了合金的耐热腐蚀性能。 $\text{NiCoCrAlTaY}$  黏结层经 1 100 °C 氧化 100 h 后, 在表层  $\text{Cr}$ 、 $\text{Ni}$ 、 $\text{Al}$ 、 $\text{Co}$  混合氧化物下形成了连续的  $\text{Al}_2\text{O}_3$  薄膜, 并且该涂层与镍基高温合金基体结合良好。

研究表明,  $\text{Re}$  元素可降低涂层的氧化速率, 提高涂层的抗氧化能力以及抗热循环疲劳性能<sup>[18]</sup>。Liu 等<sup>[19]</sup>研究表明  $\text{Re}$  的添加会明显减小涂层的氧化速率, 同时在长期氧化过程中会影响热生长氧化层的生长, 加速  $\theta\text{-Al}_2\text{O}_3$  向  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$  的转变速率。韦华等<sup>[20]</sup>采用电弧离子镀制备了  $\text{NiCrAlY}$  和  $\text{NiCrAlYRe}$  涂层。研究发现,  $\text{NiCrAlYRe}$  涂层的抗剥落能力强于  $\text{NiCrAlY}$  涂层, 并且  $\text{Re}$  的添加也提高了  $\text{NiCrAlY}$  涂层的抗热腐蚀性能。

$\text{SiO}_2$  本身具有抗氧化、热腐蚀和高温自愈合特性, 因此向 MCrAlY 涂层中加入  $\text{SiO}_2$  可以提高涂层的抗氧化性和热腐蚀性能<sup>[10]</sup>。任先京等<sup>[21]</sup>研究  $\text{Si}$  对  $\text{CoCrAlY}$  涂层高温氧化性能的影响。研究表明,  $\text{Si}$  元素通过影响氧化膜结构及形成动力学条件、抑制涂层的内氧化发生, 对提高  $\text{CoCrAlY}$  涂层在 1 000 °C 以上的抗氧化性能作用显著;  $\text{Si}$  元素趋于在晶界处富集, 并且可提高氧化膜应力。但过高的  $\text{Si}$  含量会对涂层高温抗氧化性能产生不利影响。杨莘丽<sup>[22]</sup>制备了  $\text{MCrAlYSiB}$  涂层, 发现  $\text{Si}$ 、 $\text{B}$  元素可促进形成致密且连续的  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$  层, 明显改善热腐蚀过程中氧化层对涂层的黏附性能, 同时涂层的抗热腐蚀性能也得到了提高。

$\text{Pt}$  可明显降低 MCrAlY 涂层的热膨胀系数, 提高合金组织的稳定性、氧化膜的致密度和涂基结合

力, 增强涂层的塑性及抗氧化、抗蠕变和抗腐蚀能力<sup>[23-24]</sup>。Hao 等<sup>[25]</sup>研究添加 3%和 5% (质量分数) Pt 改性 CoNiCrAlY 合金的显微组织、硬度和等温氧化行为。结果表明, Pt 通过形成  $\beta$ -(Ni, Pt)Al 相对合金组织有显著影响, 提高合金的硬度, 并且会加速亚稳态  $\theta$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$  向稳定态  $\alpha$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$  的转变。此外, Pt 的加入可以促进 Al 迁移, 从而抑制  $\beta$ -(Ni, Pt)Al 相的消耗, 消除内部氧化。

综上所述, 合适的元素种类和元素含量对 MCrAlY 涂层的性能起积极的促进作用。MCrAlY 涂层中主要合金元素对性能的影响主要体现在元素含量变化方面, 掺杂的合金元素 (如稀土元素等) 对涂层性能的影响主要体现在元素的种类及元素含量变化两方面。目前, MCrAlY 涂层的使用温度为 1 150  $^{\circ}\text{C}$ , 在该温度之上涂层氧化比较迅速, 热障涂层会产生剥落现象。因此, 可通过调控 MCrAlY 涂层的元素种类和成分, 来进一步提高 MCrAlY 涂层的使用温度。

## 2 制备工艺和预处理工艺对 MCrAlY 涂层的影响

### 2.1 制备工艺对 MCrAlY 涂层的影响

常见的制备方法有大气等离子喷涂 (Atmospheric Plasma Spray, APS)、低压等离子喷涂 (Low Pressure Plasma Spraying, LPPS)、超音速火焰喷涂 (High Velocity Oxy-Fuel, HVOF)、磁控溅射沉积 (Magnetron Sputtering Deposition, MSD) 和电弧离子镀技术 (Arc Ion Plating, AIP) 等。表 1 列出了 MCrAlY 涂层不同制备方法的优缺点。

采用不同制备工艺对 MCrAlY 涂层结构和性能有重要影响。由于在热喷涂过程中 MCrAlY 容易吸收氧气, 因此要在低压惰性气体条件下利用 LPPS 技术制备黏结涂层<sup>[27]</sup>。Zhang 等<sup>[28]</sup>采用爆轰枪喷涂 (DS) 和 LPPS 2 种热喷涂技术制备了 NiCrAlY 涂层。结果表明, 2 种涂层虽然具有相同的飞溅层结构, 但 DS 过程中发生氧化反应,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  夹在晶片之间, DS 制备的涂层的抗氧化性能比 LPPS 的差。Wang 等<sup>[29]</sup>研究了 HVOF 和 DS 分别制备 NiCrAl/WC-Co 粉末多层涂层的磨损性能。结果表明, HVOF 涂层的力学性能和热冲击性能均优于 DS 涂层。沉积的涂层也表现出更好的耐磨性。田玉亮等<sup>[30]</sup>研究了不同喷涂工艺 (超音速、爆炸喷涂工艺) 对 MCrAlY 涂层组织的影响。结果表明, 超音速制备涂层分布均匀性差, 致密度高, 显微硬度大; 而爆炸喷涂工艺制备的涂层中除 Al 元素外, 分布较均匀, 涂层致密度和显微硬度较低, 结合强度二者一致。

AIP 技术是在真空环境下, 利用电弧将通入的 Ar 或  $\text{N}_2$  离子化, 在电和磁场交替作用下, 轰击靶材产生原子或分子, 然后通过负偏压沉积在基体材料表面生成涂层的工艺技术。研究表明, AIP 是近年来制备 MCrAlY 涂层比较热门的工艺技术。将 NiCrAlY 合金制成靶材, 通过真空电弧镀方法, 可以制备均匀的 NiCrAlY 涂层, 对涂层进行真空扩散处理, 可以在热强合金基体表面形成交互扩散的合金化防护涂层<sup>[31]</sup>。李民等<sup>[32]</sup>研究了 AIP 技术制备的 NiCrAlY 涂层的抗氧化性能。结果表明, 涂层致密度高, 涂基结合好, 其抗恒温氧化和抗循环氧化性能 (图 2a 和图 2b) 明显比成分相近的超音速火焰喷涂、爆炸喷涂和大气等离子喷涂的 NiCrAlY 涂层好。

表 1 MCrAlY 涂层制备方法及其优缺点<sup>[1-2,26]</sup>

Tab.1 Preparation method of MCrAlY coating and its advantages and disadvantages<sup>[1-2,26]</sup>

Preparation method	Advantages	Disadvantages
APS	Stable process. High quality coating. The matrix heating less, the sample is not easy to deformation	High porosity. Hot metal particles fly from plasma gun to substrate during the spraying process will be seriously oxidized
LPPS	Effectively prevent oxidation of various elements during processing	Poor adhesion of deposited coatings
AIP	The target material can be arranged in any direction in the vacuum chamber. Improve the adhesion of coating. High deposition efficiency. High target utilization rate, simple process and low cost. The target has high ionization rate and good coating property	The deposition of large particles will affect the mechanical properties and continuity of the film layer
HVOF	The spraying particle speed can reach more than 1 000 m/s. The coating bonding strength is high, dense, strong oxidation resistance	Fuel consumption is large. The cost is relatively high
MSD	The coating composition is not affected by the vapor pressure of the elements in the alloy and is easy to control. The MCrAlY coating is dense and has a high finish	Low deposition rate

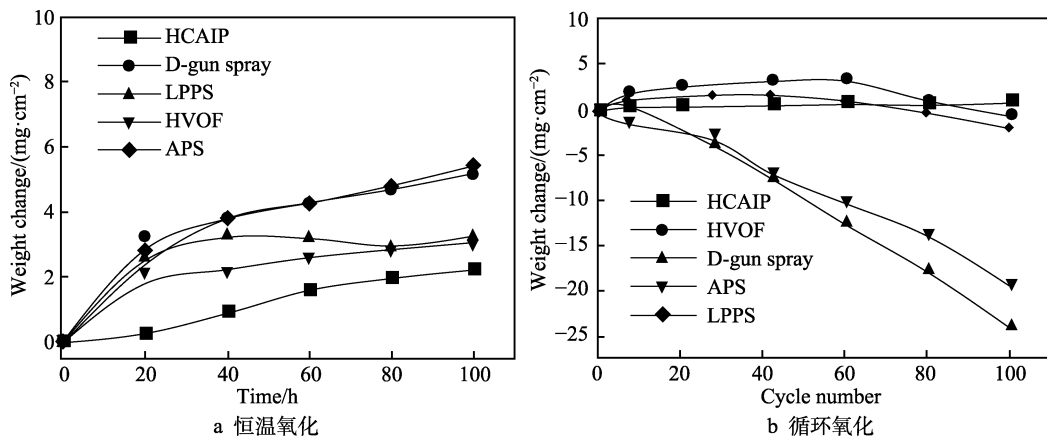


图 2 NiCrAlY 涂层在 1100 °C 下的氧化动力学曲线<sup>[32]</sup>  
Fig.2 Oxidation kinetics curve of NiCrAlY coating at 1100 °C<sup>[32]</sup>.  
a) constant temperature oxidation; b) cyclic oxidation

同一成分及制备工艺,不同 AIP 制备参数,得到的涂层结构不同。杨苹丽<sup>[22]</sup>利用电弧离子镀制备 MCrAlY 涂层,研究了不同制备参数(偏压和靶基距)下涂层的结构和性能。发现沉积过程中偏压对 MCrAlY 涂层的相结构没有影响,偏压的升高,涂层与基体的结合强度先增加后下降,涂层的硬度值逐渐增加。另外,由于距离弧靶越近,离子和微粒密度越大,涂层的沉积速率越高。龚颖勇<sup>[31]</sup>采用真空电弧镀膜技术制备了 NiCrAlYSi 防护涂层,并研究涂镀电流((620±10)、(670±10)、(720±10) A)对涂层组织与厚度的影响。发现电弧电流较小时,会产生电弧不稳和熄弧现象,导致涂层组织结构不均匀,内部存在孔隙、空洞等缺陷;电弧电流较大时,靶材会被轻微损坏;电弧电流适中时,涂镀过程处于相对稳定的状态,涂层组织均匀致密。

对于 AIP 制备的 MCrAlY 涂层,靶材的结构也会严重影响涂层的结构,进而影响涂层的性能。靶材的纯度、致密度越高,结构与成分越均匀,涂层的均匀性越好,性能越好<sup>[33-34]</sup>。国内供应的 MCrAlY 靶材普遍规格较小,存在纯净度不高、组织成分不均匀和内部微缺陷过量等问题,这对于后续高性能热障涂层的制备和高温叶片的服役寿命带来不利影响。目前,虽在改善靶材性能方面已经开展了一定的研究工作,但侧重于元素变化对靶材制备后续涂层的抗氧化性能和抗高温氧化腐蚀性能的影响,而靶材仍存在规格较小、成分不均匀、纯度不高、内部存在缺陷等问题。生产高纯 MCrAlY 靶材的国内企业,一方面需要加大研发投入,另一方面还需升级生产装备,为生产更高品质高温热障涂层用高纯 MCrAlY 靶材打下基础。以北京钢研高纳科技股份有限公司、西安瑞鑫科金属材料有限责任公司、有研亿金新材料有限公司为代表的部分企业,持续在科研创新和生产工艺上取得突破。西安瑞鑫科金属材料有限责任公司通过一些研究已制备出成分均匀、缺陷少的大规格高纯净度 MCrAlY 靶材(图 3),这对于提高发动机效率、降低油耗、提高发动机热端部件



图 3 大规格 MCrAlY 靶材  
Fig.3 Large size of MCrAlY target

使用寿命具有重要意义,预期整个行业也会向高端化的方向发展。

## 2.2 预处理工艺对 MCrAlY 涂层的影响

为了降低或消除内应力,改善 MCrAlY 涂层的组织结构并使涂层中合金成分均匀化,需对涂层进行真空热处理。对 MCrAlY 涂层进行真空热处理通常用于稳定  $\beta$ -NiAl 相,并在涂层表面形成薄而均匀的  $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>。这种预氧化层可以在氧化早期抑制不必要的混合氧化物和尖晶石的形成,从而控制高温暴露时 TGO 的增长速度。另外,在 MCrAlY 涂层中 Y 的整体分布可以通过适当的真空热处理来调整,以增强涂层的抗氧化性<sup>[35]</sup>。根据 Xie 等<sup>[36]</sup>的研究,采用冷喷涂技术在 Ni 基体上沉积了一种 NiCoCrAlY 涂层,然后在真空(10<sup>-3</sup> Pa)、1080 °C 下对涂层进行热处理 4 h,并对涂层表面进行预氧化。结果表明,真空热处理后涂层的结构不连续度降低,并在热处理后的 NiCoCrAlY 涂层表面形成了一层较薄的  $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 氧化层,平均厚度为 450 nm。另外真空热处理可以降低在 1050 °C 和 1100 °C 等温和循环氧化试验中形成的氧化层的总体增长速度。这种还原可归因于 TGO 的控制,即在真空热处理涂层表面形成 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 氧化层。等温氧化 400 h 后,真空热处理形成的预氧化层的晶粒尺寸大于喷涂 NiCoCrAlY 涂层,从而限制了氧和金属离子的扩散途径。因此,热处理 NiCoCrAlY 涂

层的氧化物生长速度较慢,瞬态/混合氧化物和尖晶石含量较低。兰昊等<sup>[37]</sup>研究了热处理对 CoNiCrAlY (Re)合金氧化行为的影响,发现热处理促进合金较快进入稳定氧化阶段,降低了合金的氧化速率,1 000 °C 恒温氧化 100 h 增重量由 0.4 mg/cm<sup>2</sup>降为 0.32 mg/cm<sup>2</sup>。

综上所述,不同的制备及预处理工艺所得到的涂层的微观组织及结构的差异较大,导致不同工艺条件下制备的涂层在服役过程中生成的  $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 膜的厚度、均匀性不同。因此,涂层的制备工艺和预处理工艺的选择对其高温抗氧化性能具有十分重要的影响,可在未来研究制备 MCrAlY 的新工艺。

### 3 提高 MCrAlY 涂层性能的方法

#### 3.1 细化涂层晶粒

对于热障应用,典型的 MCrAlY 涂层厚度为 100~150  $\mu\text{m}$ <sup>[38-39]</sup>。MCrAlY 涂层通常通过真空等离子喷涂、低压等离子喷涂、大气等离子喷涂以及高速氧燃料 (HVOF) 喷涂来沉积<sup>[40-41]</sup>。这些技术可用于不同的 MCrAlY 组成。然而,如何控制涂层的晶粒尺寸是一个技术难题。Liu 等<sup>[38-39]</sup>研究了 MCrAlY 涂层的组成以及晶粒尺寸的变化。这些研究人员利用 MSD 技术研究了组分的组成和晶粒尺寸对 NiCrAl 涂层氧化行为的影响。通过 MSD 沉积的涂层晶粒尺寸较小。另外也发现形成 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 膜的致密度与涂层的晶粒大小存在关系。晶粒越小,涂层顶部会形成致密的氧化铝层<sup>[38-39]</sup>。

#### 3.2 掺杂纳米颗粒

纳米颗粒增强金属基复合涂层与普通涂层相比,在强度、韧性、耐热性等方面具有诸多优势<sup>[42-43]</sup>。CeO<sub>2</sub> 掺入到 MCrAlY 涂层中可提高涂层的硬度,使界面处产生裂纹的时间滞后,降低界面区域的应力集中,阻碍其他合金元素的扩散,从而提高涂层的耐磨损和耐腐蚀性能<sup>[44-45]</sup>。Wang 等<sup>[44]</sup>研究了 CeO<sub>2</sub> 纳米颗粒的加入对激光熔覆 NiCoCrAlY 涂层组织及性能的影响。结果表明,添加纳米 CeO<sub>2</sub> 的涂层的微观结构和性能均优于未添加纳米 CeO<sub>2</sub> 的涂层,其中添加 2.0% (质量分数) 纳米 CeO<sub>2</sub> 的涂层的改善效果最为显著。Kamal 等<sup>[45]</sup>研究 CeO<sub>2</sub>+NiCrAlY 涂层的显微组织和力学性能。CeO<sub>2</sub> 的加入使涂层的微观结构得到细化,夹杂物的比例更低,涂层的厚度为 200~250  $\mu\text{m}$ ,与基体具有良好的结合力,显微硬度在 697~920HV 范围内,平均孔隙率小于 0.58%。Ghadami 等<sup>[46]</sup>利用 HVOF 制备 CeO<sub>2</sub> 和 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 纳米颗粒 (纳米 CeO<sub>2</sub> 和纳米 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 的质量分数分别为 0.5% 和 1.0%) 改性 NiCoCrAlY 涂层。研究发现,与其他 NiCoCrAlY 涂层相比, NiCoCrAlY+1%CeO<sub>2</sub>+0.5%Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 涂层的孔隙

率更低。经过高温等温氧化测试, NiCoCrAlY+1.0%CeO<sub>2</sub>+0.5% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 涂层的增重比其他所有类型涂层的增重小 (在 1 000 °C 下 500 h 后抗氧化性能提高 41%)。Singh 等<sup>[47]</sup>研究了在纳米颗粒中加入 SiC 来提高 NiCrAlY 涂层的热腐蚀性能和显微硬度。结果表明,所开发的涂层具有更小的多孔性,使表面性能得到提高。SiC 的加入也提高了涂层与基体的黏附性。

#### 3.3 制备梯度复合涂层

研究表明,涂层厚度、涂层中  $\beta$ -NiAl 的含量和涂层氧化速率共同决定涂层的使用寿命。涂层厚度的增加和涂层中  $\beta$ -NiAl 含量的提高,目的是提高涂层中的 Al 含量<sup>[48]</sup>。然而当涂层中 Al 和 Cr 的含量增加到一定值时,涂层的脆性增加、熔点降低<sup>[49]</sup>。研究者们发现采用梯度涂层设计可以解决这一问题,另外梯度涂层的设计还可改善应力分布,明显提高界面结合,因此梯度复合 MCrAlY 涂层成为目前研究热点之一<sup>[50]</sup>。Guo 等<sup>[51]</sup>采用电弧离子镀法制备 NiCoCrAlYSiB 涂层,采用电弧离子镀和磁控溅射相结合法制备 Al、Cr 梯度 NiCoCrAlYSiB 涂层。结果表明,Al 和 Cr 在 NiCoCrAlYSiB 涂层中分布均匀,而在梯度涂层的表层则呈梯度分布。NiCoCrAlYSiB 涂层和梯度涂层均显著提高了基体的抗氧化性能,但梯度涂层的耐蚀性最佳。

综上所述,涂层的成分和形貌会对涂层的抗氧化性能、抗热腐蚀性能及使用寿命产生重要影响。细化涂层晶粒、掺杂纳米颗粒和制备梯度复合涂层这 3 种方法是通过改变 MCrAlY 涂层的相组成和形貌,进而影响涂层的性能和寿命。

### 4 结论与展望

影响 MCrAlY 涂层性能的因素有主要元素的含量、活性元素的添加及含量、制备工艺及预处理工艺等。还有一些方法可提高 MCrAlY 涂层性能,如细化涂层的晶粒尺寸、掺杂纳米颗粒、制备梯度涂层等。目前,由于使用环境的恶化,对涂层的使用温度提出了更高的要求,涂层致密度、孔隙率等方面有待提高。

基于目前的研究现状,MCrAlY 涂层在未来的发展可关注以下几个方面:

1) 提高涂层的精密控制和一致性。随着高温合金材料的应用范围不断扩大和变化,对涂层的质量和一致性要求也越来越高,因此需要在涂层制备过程中加强精密控制,提高涂层的一致性和质量稳定性。

2) 探索涂层的多功能化应用。除了提供高温防护的功能外,MCrAlY 涂层还可在其他方面发挥作用,如防腐、防磨、导热等,未来可进一步探索涂层的多功能化应用,提高其实用价值。

3) 开发新的涂层制备技术。传统的涂层制备技术主要包括热喷涂、电弧喷涂、等离子喷涂等, 未来可研发新的制备技术, 如化学气相沉积, 以提高涂层的制备效率和涂层质量。

4) 推动涂层的数字化设计和预测模拟。随着计算机科学和模拟技术的不断发展, 可以利用数字化设计和预测模拟的方法来优化涂层的组成、结构和性能, 提高涂层的研发效率和成功率。

综上所述, MCrAlY 涂层在未来的发展方向包括提高高温稳定性和机械性能、研发新的涂层材料、研究涂层的制备工艺和工艺参数、探索其在新领域的应用、提高涂层的精密控制和一致性、探索涂层的多功能化应用、开发新的涂层制备技术以及推动涂层的数字化设计和预测模拟。这些方向将为 MCrAlY 涂层的应用和发展带来更多的机遇和挑战。

#### 参考文献:

- [1] PADTURE N P, GELL M, JORDAN E H. Thermal Barrier Coatings for Gas-Turbine Engine Applications[J]. *Science*, 2002, 296(5566): 280-284.
- [2] 杜伟. 电弧离子镀 MCrAlY 涂层的组织结构及抗高温氧化性能研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2018.  
DU W. Study on Microstructure and High Temperature Oxidation Resistance of MCrAlY Coating by Arc Ion Plating[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2018.
- [3] 谢世明. 电弧离子镀 NiCoCrAlYTaNi 涂层的制备及抗氧化性研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2017.  
XIE S M. Research on Preparation and Oxidation Resistance of NiCoCrAlYTaNi Coating Deposited by Arc Ion Plating[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2017.
- [4] 刘文开, 林小娉, 路学成, 等. 等离子喷涂 MCrAlY 涂层高温氧化过程分析[J]. *功能材料*, 2011, 42(S5): 947-949.  
LIU W K, LIN X P, LU X C, et al. Analysis of High Temperature Oxidation Process of Plasma Sprayed MCrAlY Coating[J]. *Journal of Functional Materials*, 2011, 42(S5): 947-949.
- [5] NAUMENKO D, SHEMET V, SINGHEISER L, et al. Failure Mechanisms of Thermal Barrier Coatings on MCrAlY-Type Bondcoats Associated with the Formation of the Thermally Grown Oxide[J]. *Journal of Materials Science*, 2009, 44(7): 1687-1703.
- [6] 范瑞麟, 纪艳玲. 磁控溅射沉积 MCrAlY 涂层技术研究[J]. *真空科学与技术*, 1994, 14(1): 21-26.  
FAN R L, JI Y L. Study on the Technology of Magnetron Sputtering Deposition (MSD) MCrAlY Coating[J]. *Chinese Journal of Vacuum Science and Technology*, 1994, 14(1): 21-26.
- [7] NICHOLLS J R, SIMMS N J, CHAN W Y, et al. Smart Overlay Coatings-Concept and Practice[J]. *Surface and Coatings Technology*, 2002, 149(2/3): 236-244.
- [8] 刘建明, 陈美英, 任先京, 等. 合金元素在 MCrAlY 涂层中的作用[J]. *热喷涂技术*, 2010, 2(4): 30-34.  
LIU J M, CHEN M Y, REN X J, et al. The Effects of Alloy Elements on the MCrAlY Coatings[J]. *Thermal Spray Technology*, 2010, 2(4): 30-34.
- [9] 兰昊, 杨志刚, 张玉朵, 等. Al 含量变化对 CoNiCrAlYRe 合金氧化行为的影响[J]. *稀有金属材料与工程*, 2011, 40(1): 85-89.  
LAN H, YANG Z G, ZHANG Y D, et al. Influences of Al Content on Oxidation Behavior of CoNiCrAlYRe Alloys [J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2011, 40(1): 85-89.
- [10] 杨晓剑, 田玉亮, 刘海飞, 等. MCrAlY 涂层国内外发展概况[C]//全国表面工程学术会议暨青年表面工程学术论坛. 北京: 出版者不详, 2010.  
YANG X J, TIAN Y L, LIU H F, et. Overview of MCrAlY Process at Home and Abroad[C]//National Academic Conference on Surface Engineering and Youth Academic Forum on Surface Engineering. Beijing: [s. n.], 2010.
- [11] 李志林, 吴远启. 黏结层中 Cr 对热障涂层界面结合因子的影响[J]. *中国有色金属学报*, 2004, 14(9): 1477-1482.  
LI Z L, WU Y Q. Influence of Bonding Layer Cr Content of Thermal Barrier Coatings on Its Interface Conjunction Factors[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2004, 14(9): 1477-1482.
- [12] PACE M T, THOMSON R C. Oxidation of MCrAlY Coatings on Ni Based Superalloys[J]. *Energy Materials*, 2007, 2(3): 181-190.
- [13] 李志林, 吴远启. 黏结层中的 Co 对热障涂层界面结合因子的影响[J]. *北京化工大学学报(自然科学版)*, 2004, 31(4): 36-40.  
LI Z L, WU Y Q. Influence of Co Content of the Bonding Layer of the Thermal Barrier Coatings on Its Interface Conjunction Factors[J]. *Journal of Beijing University of Chemical Technology*, 2004, 31(4): 36-40.
- [14] TAWANCY H M, ABBAS N M, BENNETT A. Role of Y during High Temperature Oxidation of an M-Cr-Al-Y Coating on an Ni-Base Superalloy[J]. *Surface and Coatings Technology*, 1994, 68/69: 10-16.
- [15] 李美栓, 张亚明. 活性元素对合金高温氧化的作用机制[J]. *腐蚀科学与防护技术*, 2001, 13(6): 333-337.  
LI M S, ZHANG Y M. A Review on Effect of Reactive

- Elements on Oxidation of Metals[J]. Corrosion Science and Technology Protection, 2001, 13(6): 333-337.
- [16] 宋鹏, 陆建生, 赵宝禄, 等. 活性元素影响 MCrAlY 涂层氧化性能的研究进展[J]. 材料导报, 2007, 21(7): 59-62.
- SONG P, LU J S, ZHAO B L, et al. The Effects of Reactive Element Additions on the Oxidation Properties of MCrAlY Coating[J]. Materials Review, 2007, 21(7): 59-62.
- [17] SUN J, ZHAO D. Thermal Corrosion Behavior of NiCoCrAlTaY Coating for a Ni Base Superalloy Prepared by Low Pressure Plasma Spraying[J]. Procedia Engineering, 2012, 27: 983-988.
- [18] 兰昊. 热处理和合金元素对 MCrAlY(Re)黏结层材料高温氧化行为的影响[D]. 北京: 清华大学, 2011.
- LAN H. Effects of Heat Treatment and Alloying Elements on the High Temperature Oxidation Behaviors of MCrAlY (Re) Bond Coat Materials[D]. Beijing: Tsinghua University, 2011.
- [19] LIU C T, SUN X F, GUAN H R, et al. Effect of Rhenium Addition to a Nickel-Base Single Crystal Superalloy on Isothermal Oxidation of the Aluminide Coating[J]. Surface and Coatings Technology, 2005, 194(1): 111-118.
- [20] 韦华, 黄粮, 梁静静, 等. Re 对 NiCrAlY 涂层热腐蚀行为的影响[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2010, 30(2): 150-154.
- WEI H, HUANG L, LIANG J J, et al. Effect of Re on the Hot-Corrosion Behavior of a NiCrAlY Overlay Coating[J]. Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection, 2010, 30(2): 150-154.
- [21] 任先京, 张淑婷, 杜开平, 等. Si 对 MCrAlY 涂层高温性能的影响[J]. 热喷涂技术, 2016, 8(1): 11-16.
- REN X J, ZHANG S T, DU K P, et al. Effect of Si on High Temperature Performance of MCrAlY Coatings[J]. Thermal Spray Technology, 2016, 8(1): 11-16.
- [22] 杨莘丽. 电弧离子镀 NiCoCrAlY(SiB)涂层的组织结构及性能研究[D]. 长春: 吉林大学, 2006.
- YANG P L. Microstructure and Properties of AIP NiCoCrAlY(SiB) Coatings[D]. Changchun: Jilin University, 2006.
- [23] VANDE PUT A, OQUAB D, PÉRÉ E, et al. Beneficial Effect of Pt and of Pre-Oxidation on the Oxidation Behaviour of an NiCoCrAlYTaN Bond-Coating for Thermal Barrier Coating Systems[J]. Oxidation of Metals, 2011, 75(5): 247-279.
- [24] VANDE PUT A, LAFONT M C, OQUAB D, et al. Effect of Modification by Pt and Manufacturing Processes on the Microstructure of Two NiCoCrAlYTaN Bond Coatings Intended for Thermal Barrier System Applications[J]. Surface and Coatings Technology, 2010, 205(3): 717-727.
- [25] LAN H, YANG Z G, ZHANG Y D, et al. Influence of Pt on Oxidation Behavior of CoNiCrAlY Alloy[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2012, 41(2): 194-198.
- [26] 刘书彬. 改性 MCrAlY(M=Ni, NiCo)涂层的制备及性能研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2021.
- LIU S B. Preparation and Properties of Modified MCrAlY(M=Ni, NiCo) Coating[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2021.
- [27] MAUER G, VABEN R, STÖVER D. Controlling the Oxygen Contents in Vacuum Plasma Sprayed Metal Alloy Coatings[J]. Surface and Coatings Technology, 2007, 201(8): 4796-4799.
- [28] ZHANG Y J, SUN X F, ZHANG Y C, et al. A Comparative Study of DS NiCrAlY Coating and LPPS NiCrAlY Coating[J]. Materials Science and Engineering: A, 2003, 360(1/2): 65-69.
- [29] WANG J, LI K, SHU D, et al. Effects of Structure and Processing Technique on the Properties of Thermal Spray WC-Co and NiCrAl/WC-Co Coatings[J]. Materials Science and Engineering: A, 2004, 371(1/2): 187-192.
- [30] 田玉亮, 解峰, 石长江, 等. 喷涂工艺对 MCrAlY 涂层组织影响[J]. 热喷涂技术, 2012, 4(3): 52-55.
- TIAN Y L, XIE F, SHI C J, et al. Spraying Process Effects on MCrAlY Coating[J]. Thermal Spray Technology, 2012, 4(3): 52-55.
- [31] 龚颖勇. 镍基单晶合金表面 NiCrAlYSi 涂层真空电弧镀工艺及高温性能研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2016.
- GONG Y Y. Study on Vacuum Arc Deposition and High Temperature Properties of NiCrAlYSi Coatings on Surface of Nickel-Based Single Crystal Alloy[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2016.
- [32] 李民, 袁福河, 牛昌安, 等. 空心阴极电弧镀 NiCrAlY 涂层的抗氧化性能[J]. 中国表面工程, 2012, 25(2): 86-91.
- LI M, YUAN F H, NIU C A, et al. Oxidation Resistance of the NiCrAlY Coating Prepared by Hollow Cathode Arc Ion Plating Technique[J]. China Surface Engineering, 2012, 25(2): 86-91.
- [33] 张花蕊, 张虎. 一种航空发动机叶片黏结涂层用 MCrAlY 靶材: CN109536819A[P]. 2019-03-29.
- ZHANG H, ZHANG H. MCrAlY Target Material for Bonding Coating of Aviation Engine Blade: CN1095-36819A[P]. 2019-03-29.
- [34] 龙安平, 张建庭, 熊江英, 等. 一种制备 CoCrAlY 合金靶材的方法: CN107099700A[P]. 2017-08-29.
- LONG A, ZHANG J, XIONG J, et al. Preparation Method for CoCrAlY Alloy Target: CN107099700A[P]. 2017-

- 08-29.
- [35] GHADAMI F, SABOUR ROUH AGHDAM A, GHADAMI S. Microstructural Characteristics and Oxidation Behavior of the Modified MCrAlX Coatings: A Critical Review[J]. *Vacuum*, 2021, 185: 109980.
- [36] XIE S F, ZHANG L W, NING X J, et al. Effect of Pre-Oxidation on the Isothermal and Cyclic Oxidation Behaviour of Cold-Sprayed NiCoCrAlY Coating[J]. *Materials Research Innovations*, 2015, 19(9): S9-258-S9-262.
- [37] 兰昊, 杨志刚, 张玉朵, 等. 热处理对 CoNiCrAlY(Re) 合金氧化行为的影响[J]. *稀有金属材料与工程*, 2010, 39(7): 1224-1229.
- LAN H, YANG Z G, ZHANG Y D, et al. Influence of Heat-Treatment on Isothermal Oxidation Behavior of CoNiCrAlY(Re) Alloy[J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2010, 39(7): 1224-1229.
- [38] LIU Z Y, GAO W, DAHM K, et al. The Effect of Coating Grain Size on the Selective Oxidation Behaviour of Ni-Cr-Al Alloy[J]. *Scripta Materialia*, 1997, 37(10): 1551-1558.
- [39] LIU Z Y, GAO W, DAHM K L, et al. Oxidation Behaviour of Sputter-Deposited Ni-Cr-Al Micro-Crystalline Coatings[J]. *Acta Materialia*, 1998, 46(5): 1691-1700.
- [40] BRANDL W, TOMA D, KRÜGER J, et al. The Oxidation Behaviour of HVOF Thermal-Sprayed MCrAlY Coatings[J]. *Surface and Coatings Technology*, 1997, 94/95: 21-26.
- [41] TOMA D, BRANDL W, KÖSTER U. The Characteristics of Alumina Scales Formed on HVOF-Sprayed MCrAlY Coatings[J]. *Oxidation of Metals*, 2000, 53(1): 125-137.
- [42] 徐滨士, 刘世参, 梁秀兵. 纳米表面工程的进展与展望[J]. *机械工程学报*, 2003, 39(10): 21-26.
- XU B S, LIU S C, LIANG X B. Progress and Prospect of Nano-Materials Surface Engineering[J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2003, 39(10): 21-26.
- [43] 张晖, 何宜柱. 纳米颗粒增强金属基复合涂层的研究进展[J]. *安徽工业大学学报(自然科学版)*, 2006, 23(1): 21-25.
- ZHANG H, HE Y Z. Research Progress on Nano-Particle Reinforced Metal Matrix Composite Coatings[J]. *Journal of Anhui University of Technology (Natural Science)*, 2006, 23(1): 21-25.
- [44] WANG H Y, ZUO D W, LI X F, et al. Effects of CeO<sub>2</sub> Nanoparticles on Microstructure and Properties of Laser Cladded NiCoCrAlY Coatings[J]. *Journal of Rare Earths*, 2010, 28(2): 246-250.
- [45] KAMAL S, JAYAGANTHAN R, PRAKASH S. Mechanical and Microstructural Characteristics of Detonation Gun Sprayed NiCrAlY + 0.4wt.% CeO<sub>2</sub> Coatings on Superalloys[J]. *Materials Chemistry and Physics*, 2010, 122(1): 262-268.
- [46] GHADAMI F, SABOUR ROUH AGHDAM A, ZAKERI A, et al. Synergistic Effect of CeO<sub>2</sub> and Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Nanoparticle Dispersion on the Oxidation Behavior of MCrAlY Coatings Deposited by HVOF[J]. *Ceramics International*, 2020, 46(4): 4556-4567.
- [47] SINGH G, BALA N, CHAWLA V. Microstructural Analysis and Hot Corrosion Behavior of HVOF-Sprayed Ni-22Cr-10Al-1Y and Ni-22Cr-10Al-1Y-SiC (N) Coatings on ASTM-SA213-T22 Steel[J]. *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*, 2020, 27(3): 401-416.
- [48] LEE E Y, CHARTIER D M, BIEDERMAN R R, et al. Modelling the Microstructural Evolution and Degradation of M-Cr-Al-Y Coatings during High Temperature Oxidation[J]. *Surface and Coatings Technology*, 1987, 32(1/2/3/4): 19-39.
- [49] TANG F, AJDELSZTAJN L, SCHOENUNG J M. Influence of Cryomilling on the Morphology and Composition of the Oxide Scales Formed on HVOF CoNiCrAlY Coatings[J]. *Oxidation of Metals*, 2004, 61(3): 219-238.
- [50] SURESH S. Graded Materials for Resistance to Contact Deformation and Damage[J]. *Science*, 2001, 292(5526): 2447-2451.
- [51] GUO M H, WANG Q M, GONG J, et al. Oxidation and Hot Corrosion Behavior of Gradient NiCoCrAlYSiB Coatings Deposited by a Combination of Arc Ion Plating and Magnetron Sputtering Techniques[J]. *Corrosion Science*, 2006, 48(9): 2750-2764.