

真空热处理对 NiCrAlY 涂层组织与性能的影响

彭小敏¹, 夏长清², 吴安如¹, 董丽君¹, 李东锋^{1,2}, 陶友瑞¹

(1. 湖南工程学院 机械工程学院, 湘潭 411101;

2. 中南大学 材料科学与工程学院, 长沙 410083)

摘要: 采用电弧离子镀(AIP)技术在 TC4 (Ti-6Al-4V) 钛合金表面制备 NiCrAlY 涂层。利用扫描电镜(SEM)、透射电镜(TEM)、能谱(EDS)分析、X 射线衍射分析(XRD)及维氏硬度测量试验研究真空热处理对 NiCrAlY 涂层组织与性能的影响。结果表明: 真空热处理后涂层沉积残余应力得到有效释放, 涂层平均晶粒尺寸从沉积态的 200 nm 增加至 950 °C 真空热处理后的 500 nm; 真空热处理过程中发生 $\beta \rightarrow \gamma' \rightarrow \gamma$ 相转变, γ' 分布于 β 晶界或 γ 晶粒内; γ 晶粒内析出的 γ' 相呈细小弥散分布, 与基体 γ 保持共格起到强化作用; 经 700~750 °C 真空热处理后, 涂层可获得最佳的析出强化效果。

关键词: NiCrAlY 涂层; 真空热处理; 显微组织; 性能

中图分类号: TB43

文献标志码: A

Effect of vacuum heat treatment on microstructure and property of NiCrAlY coating

PENG Xiao-min¹, XIA Chang-qing², WU An-ru¹, DONG Li-jun¹, LI Dong-feng^{1,2}, TAO You-rui¹

(1. School of Mechanical Engineering, Hunan Institute of Engineering, Xiangtan 411101, China;

2. School of Materials Science and Engineering, Central South University, Changsha 410083, China)

Abstract: NiCrAlY coating was deposited on TC4 titanium alloy by arc ion plating (AIP). The effect of vacuum heat treatment on the microstructure and properties of NiCrAlY coating were studied by SEM, TEM, EDS, XRD and Vickers hardness test. The results show that, during the vacuum heat treatment, the deposition residual stress of the coating can be released effectually. The average grain size of the coating increases from 200 nm for the as-deposited state to 500 nm for the vacuum heat-treated state at 950 °C. $\beta \rightarrow \gamma' \rightarrow \gamma$ phase transformation happens during the vacuum heat treatment. γ' phase distributes along the β grain boundaries or in the γ grains. The fine and dispersing γ' phase in the γ grains is coherent with the substrate, which is able to strengthen the coating substrate. The best precipitation hardening effect for NiCrAlY coating can be obtained after vacuum heat treatment at 700–750 °C.

Key words: NiCrAlY coating; vacuum heat treatment; microstructure; property

自 20 世纪 70 年代来, MCrAlY (M=Ni, Co, NiCo) 涂层越来越广泛地被用作抗氧化涂层或热障涂层(TBC)基体与陶瓷涂层间的粘结层, 其优点是硬度高、抗氧化性能好, 其热膨胀系数与高温合金及陶瓷的接近^[1]。另外, MCrAlY 本身具有韧性好、强度高以及

良好的抗高温氧化与抗热腐蚀性能, 也可单独作为高温防护涂层使用^[2-4]。制备 MCrAlY 涂层的方法很多, 如真空等离子喷涂(VPS)、电子束物理气相沉淀(EBPVD)及磁控溅射等。电弧离子镀(AIP)是在蒸镀和溅射镀膜的基础上逐步改进和发展起来的新型镀膜技

基金项目: 国家自然科学基金青年基金资助项目(51101054); 新金属材料国家重点实验室开放基金资助项目(2012-Z03); 湖南工程学院科研启动资助项目

收稿日期: 2013-07-15; **修订日期:** 2013-10-20

通信作者: 彭小敏, 讲师, 博士; 电话: 0731-58688521; E-mail: tanfen1028@163.com

术^[5], 其在沉积过程中对基体的离子轰击作用能够改善涂层结构、提高涂层结合力, 因而在制备 MCrAlY 涂层中体现了众多优点^[6]。

钛合金材料密度小、比强度高、耐蚀性强、中低温性能稳定, 是极具应用前景的轻型高温材料之一^[7]。但是, 钛合金的不耐烧蚀、高温硬度低、易氧化, 且在合金表面形成不具保护作用的氧化物, 在氧化过程中氧化物层下基体易固溶大量的氧原子, 从而形成脆性富氧层等特性严重损害了合金的高温使用性能, 影响了合金的使用^[8-10]。为此, 采取了一系列的措施来提高钛合金的高温性能, 包括在合金中加入其他元素, 如 Nb、W 和 Mo^[11], 对合金进行表面改性如低压氧处理^[12], 如渗 Al^[13], 在合金表面涂覆抗氧化涂层, 如 TiAl₃、TiAlCr 和 MCrAlY^[14]等。

目前, MCrAlY 涂层虽然主要应用于超合金表面的防护, 但由于其良好的综合性能, MCrAlY 涂层在钛合金防护方面的应用也逐渐得到了关注^[3-4, 15-17]。但上述研究主要集中在 MCrAlY 涂层对钛合金抗高温氧化性能的改善^[3, 15-16], MCrAlY 涂层/钛合金基体体系间的元素互扩散和界面反应^[4, 17]等问题上。但对 MCrAlY 涂层在热处理或热暴露(高温氧化、热腐蚀等)对涂层的相变及性能的影响报道较少, 如 LI 等^[18-19]主要研究了 NiCrAlY/CrON/DSM11 体系高温氧化过程中涂层显微组织变化及其对涂层体系弹性模量及力学破坏行为的影响。目前, 关于真空热处理过程中 NiCrAlY 涂层显微组织变化对涂层硬度影响的报道较少。一般来说, NiCrAlY 涂层服役环境苛刻, 如航空航天发动机领域, 存在高温、高压、高速气流(含未燃尽固体颗粒、气流一般富含 O、S、C、N、H 等)的冲刷和烧蚀, 涂层往往除承受富 O、S、C、N、H 气体氧化及化学腐蚀外还要抵抗高速含固体颗粒气流的冲刷。因此, 提高 NiCrAlY 涂层硬度可改善涂层抗冲刷性能。另外, 对于物理气相沉积涂层来说, 涂层沉积后的后续热处理(Post heat treatment) 对于减少沉积缺陷、释放沉积残余应力、均匀化涂层元素分布及增强涂层与基体的冶金结合十分重要^[18, 20]。因此, 研究电弧离子镀 NiCrAlY 涂层真空热处理过程中的相变、稳定性及其对涂层硬度的影响具有理论意义和实践意义。

本文作者利用电弧离子镀在 $\alpha+\beta$ 两相钛合金 TC4 表面制备 NiCrAlY 涂层, 研究真空热处理对 NiCrAlY 涂层的显微组织及涂层硬度的影响。

1 实验

1.1 材料及涂层制备

选择 TC4 (Ti-6Al-4V, 质量分数, %) 钛合金轧制板材作为试验基材, 试样被加工成尺寸为 15 mm×10 mm×2.5 mm 的小片。基体试样先在砂纸上磨光, 去除表面氧化物, 然后依次在碱液、蒸馏水中清洗, 最后在丙酮溶液中超声清洗, 干燥后置于沉积设备。

采用电弧离子镀(AIP)技术在 TC4 基体表面沉积制备 NiCrAlY 涂层, 试验用靶材为 Ni30Cr12Al1Y(质量分数, %)。沉积工艺参数如下: 先抽真空至 5×10^{-3} Pa, 在沉积涂层前进行预溅射, 轰击偏压为 600~800 V, 轰击电流为 120~140 A, 时间为 5~10 min, 沉积涂层时, 加工作偏压为 160~180 V, 工作电流为 120~140 A, 沉积时间为 120 min。

1.2 真空热处理

将沉积好 NiCrAlY 涂层的试样置于真空炉中, 抽真空至 1.33×10^{-2} Pa, 升温至指定温度, 升温速率小于 8 °C/min。真空热处理参数如下: 热处理温度为 650、750、870 和 950 °C, 保温 3 h 后空冷至室温。

1.3 检测分析

采用 Rigaku D/Max 2500 型 X-ray 衍射仪对真空热处理前后试样相组成进行分析, 试验使用 Cu 靶 $K_{\alpha 1}$ 射线, 波长 0.154 056 nm, 加速电压 36 kV, 电流 30 mA, 扫描速率 4 (°)/min, 步宽 0.02°; 采用 Sirion200 场发射扫描电镜(SEM)观察试样表面及截面微观形貌。采用 TecnaiG²20 型透射电镜对真空热处理前后 NiCrAlY 涂层微观形貌进行观察, 利用电子衍射确定涂层相组成, 操作电压为 200 kV。透射试样由基体侧向涂层侧减薄至 30 μ m 后, 冲成 d 3 mm 圆片, 再进行离子减薄。利用 SHIMADZU HVM-2 维氏硬度测量仪测量真空热处理前后 NiCrAlY 涂层的显微硬度值, 试验载荷为 0.245 N, 加载时间 15 s, 其值用 HV 表示。

2 结果与讨论

2.1 涂层的相组成

为了研究真空热处理对 NiCrAlY 涂层相组成的影响, 对真空热处理后涂层表面进行 XRD 分析。图 1 所示为涂层在不同真空热处理温度下保温 3 h 后的

XRD谱。由图1可知,沉积态NiCrAlY涂层主要由 γ -Ni相(FCC)、 β -NiAl相(B2)以及过饱和的 α -Cr(FCC)固溶体组成;试样经650℃、3h真空热处理后,相比沉积态试样,XRD谱中出现 γ' 相衍射峰,说明NiCrAlY涂层中开始析出 γ' -Ni₃Al(L1₂, $a_0=0.356$ nm)相,而且 γ 相衍射峰明显变窄,说明热处理后 γ 相含量有所减少,同时 β 或 α 相衍射峰增强,表明热处理后 β 相或 α 相含量有所增加。当真空热处理温度升高至750℃时,涂层的XRD谱与650℃热处理后的相似,但 γ' -Ni₃Al相衍射峰强度稍有增加,说明 γ' -Ni₃Al相析出量有所增加。NiCrAlY涂层经870及950℃真空热处理3h后,涂层中 γ' -Ni₃Al相衍射峰强度明显减弱,表明 γ' -Ni₃Al相含量明显减少。从Ni-Cr-Al三元相图的等温截面可知:当温度由750℃升至850℃, γ' 相区减小, γ 相区显著增大,由杠杆定律可知,随温度由750℃升至850℃, γ' 相含量逐渐减少^[21]。 $\gamma \rightarrow \gamma'$ 相转变被认为与涂层中Al元素的扩散相关^[22]。在真空热处理过程中,随着Al元素向TC4基体方向扩散参与界面反应或固溶于钛合金基体,NiCrAlY涂层中Al含量降低。 γ -Ni脱溶与 β -NiAl发生反应导致 $\gamma + \beta \rightarrow \gamma' + \alpha$ 相转变^[18],形成Al含量相对较低的 γ' 相, α -Cr相的析出能促进上述转变过程的进行。因此,试样经650℃、3h真空热处理后 γ 相含量有所减少,而 α 相含量增加。随着热处理温度的提高,NiCrAlY/TC4体系元素互扩散及界面反应更加剧烈^[4],涂层中Al元素含量继续降低促使 $\gamma' \rightarrow \gamma$ 转变以形成不含Al元素的 γ 相。因此,当真空热处理温度提高至870℃及950℃时,NiCrAlY

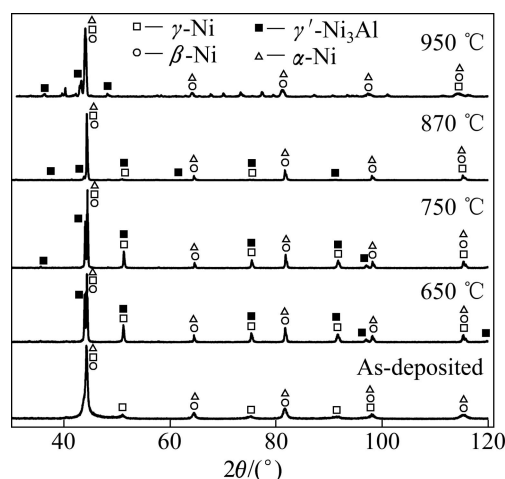


图1 NiCrAlY涂层经不同温度真空热处理3h前后的XRD谱

Fig. 1 XRD patterns of NiCrAlY coating before vacuum heat treatment and after vacuum heat treatment at different temperatures for 3 h

涂层中 γ' 衍射峰强度明显减弱,其含量减少。从Ni-Cr-Al合金中析出的 γ' 相细小弥散并且与基体保持共格关系,能够强化合金基体^[4, 23]。NiCrAlY涂层后续热处理的目的是为了消除在沉积过程中产生的残余应力,提高涂层致密度,促进涂层与基体的冶金结合,同时也是NiCrAlY合金的一个时效硬化过程。在700~750℃的温度范围内,即 γ' 相脱离母相温度区间,可以得到最大的沉淀硬化效果。如果时效温度接近 γ' 溶解界限时,沉淀过程会中断,沉淀相在原来的地方积聚;如果温度超过溶解线时,会引起沉淀相的重新溶解^[24]。

2.2 涂层的显微组织

在本实验中,从宏观上来看,沉积态电弧离子镀NiCrAlY涂层表面光洁平整,呈灰白色金属光泽,其显微结构如图2所示。由图2(a)可知,涂层表面由直径约为1~3 μm细小颗粒堆积而成,部分颗粒堆积成粗大粒子在涂层表面形成突起。由图2(b)可知,涂层连续致密、不含孔隙、气孔或裂纹等沉积缺陷,与钛合金基体结合紧密,涂层/基体界面平整,涂层厚度约为20 μm;但是在微观结构上,涂层表面凹凸不平,其内部呈现灰、白色层交替出现的层状结构。LI等^[19]认为灰色相为防护性能较佳的富铝 β -NiAl相,白色基体相为相对贫铝 γ -Ni或 γ' -Ni₃Al相。为进一步研究沉积态NiCrAlY涂层的微观结构和相组成,对沉积态NiCrAlY涂层试样进行透射电镜(TEM)观察。图2(c)为沉积态NiCrAlY涂层TEM明场相及选区衍射(SAD)斑点(插图)。由图2(c)可知,沉积态NiCrAlY涂层为多晶结构,由 γ -Ni、 β -NiAl及 α -Cr相组成(插图),其平均晶粒尺寸为200 nm左右。涂层多晶晶界并不明显,这与沉积态NiCrAlY涂层中存在残余应力有关。涂层中残余应力的存在对涂层的使用寿命是不利的,特别是在热暴露环境中(如高温静态和循环氧化等)残余应力的存在容易导致涂层开裂、剥落而失效。沉积残余应力普遍存在于物理气相沉积涂层中,一般来说,可以通过适当的真空热处理来消除涂层中的残余应力,促进元素的扩散和再分布,获得涂层与基体的冶金结合^[2, 20]。

图3所示为NiCrAlY涂层经750℃、3h真空热处理后TEM明场像及选区衍射(SAD)斑点。由图3(a)可知,NiCrAlY涂层经750℃、3h真空热处理后,由于残余应力的消除和元素的再分布,晶界明显,晶粒大小比沉积态更加均匀,其晶粒平均尺寸为300 nm左右。由涂层选区衍射(SAD)斑点(见图3(a)插图)可知:除 γ -Ni、 β -NiAl、 α -Cr相多晶衍射环外,出现了 γ' -Ni₃Al

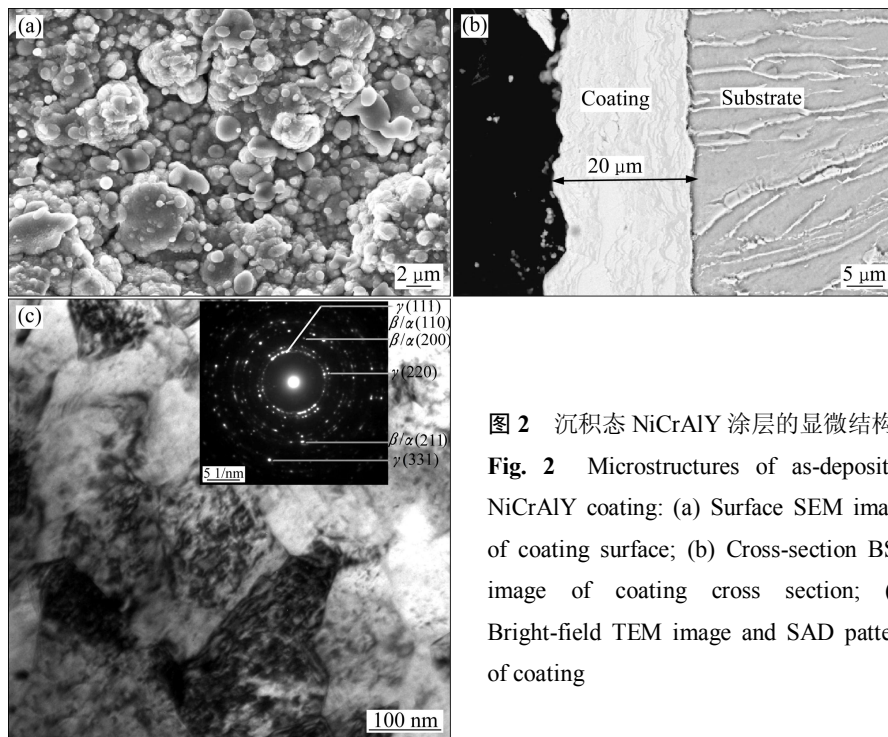


图 2 沉积态 NiCrAlY 涂层的显微结构

Fig. 2 Microstructures of as-deposited NiCrAlY coating: (a) Surface SEM image of coating surface; (b) Cross-section BSE image of coating cross section; (c) Bright-field TEM image and SAD pattern of coating

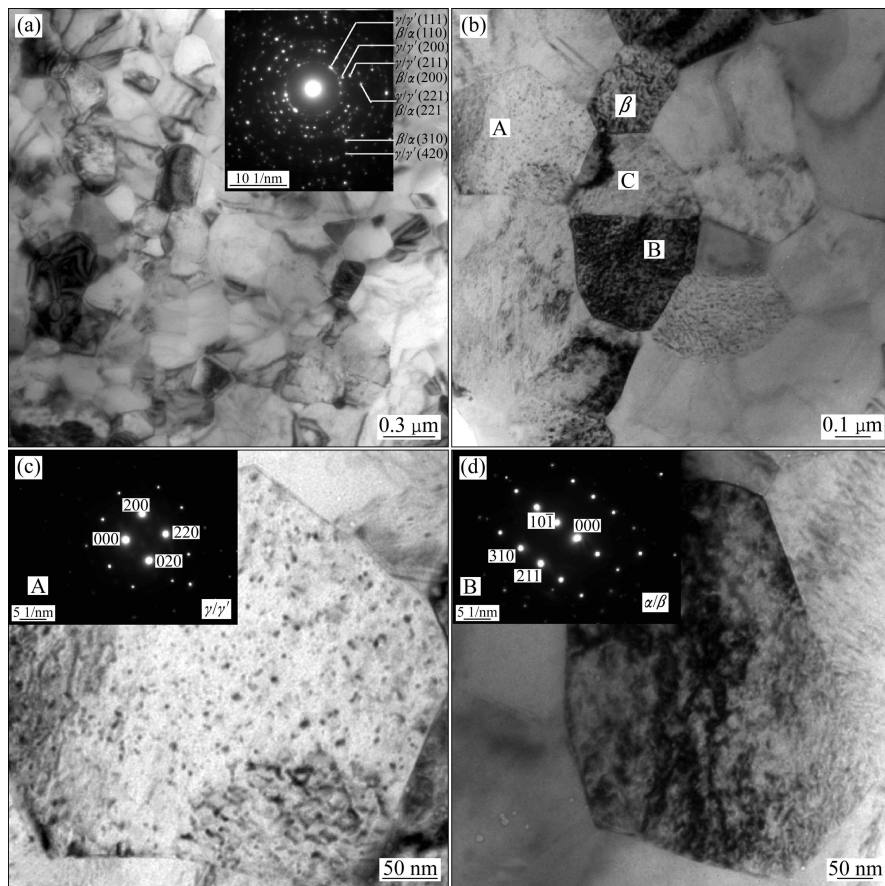


图 3 经 750 °C、3 h 真空热处理后 NiCrAlY 涂层的 TEM 明场像及选区衍射(SAD)斑点

Fig. 3 Bright-field TEM images and respective SAD patterns of NiCrAlY after vacuum heat treatment at 750 °C for 3 h: (a) Polycrystalline region; (b) Part of coating grains; (c) Grain A; (d) Grain B

相(111)、(200)、(211)、(221)及(420)晶面衍射斑点,说明热处理后涂层中形成了 γ' 相,与XRD谱分析结果相吻合。图3(b)所示为NiCrAlY涂层经750℃、3h真空热处理后TEM局部明场像,其晶粒A和B的明场相及选取衍射斑点(插图)分别如图3(c)和(d)所示。

由图3(c)可知,晶粒A的电子衍射斑点可标定为 γ/γ' 相,晶带轴为[004]。同时可观察到晶粒A基体上有细小粒状析出相弥散分布。POZE等^[20]在真空等离子溅射(VPS)CoNiCrAlY涂层中,也观察到了上述组织。因此,在真空热处理过程中随着Al元素在涂层内部及TC4基体的再分布, γ' 相可在NiCrAlY涂层的 γ -Ni基体中析出。由图3(d)可知,晶粒B的电子衍射斑点可标定为 α/β 相,晶带轴为 $[\bar{1}3\bar{1}]$ 。由于真空热处理过程中发生 $\gamma+\beta\rightarrow\gamma'+\alpha$ 相转变,可观察到 γ' -Ni₃Al相在 β 相晶界析出(见图3(b)晶粒C)。

图4(a)所示为沉积态NiCrAlY涂层经950℃、3h

真空热处理后TEM明场像及多晶衍射(SAD)斑点。由图4(a)可知,涂层经950℃、3h真空热处理后涂层仍为 γ -Ni、 β -NiAl、 α -Cr、 γ' -Ni₃Al多晶组织,晶粒大小均匀,其平均晶粒尺寸为500nm左右。随着真空热处理温度的提高,涂层元素扩散加剧并重新分布,涂层相长大。图4(b)所示为NiCrAlY涂层经950℃、3h真空热处理后TEM局部明场像及晶粒A选取衍射斑点(插图),B和C的明场像及选取衍射斑点(插图)分别如图4(c)和(d)所示。由图4(b)可知,晶粒A的电子衍射斑点可标定为 γ -Ni相,晶带轴为 $[02\bar{6}]$,尺寸约为500nm。晶粒B的电子衍射斑点可标定 α/β 相,晶带轴为 $[2\bar{2}7]$,结合元素能谱分析结果(Cr 92.3%, Ni 7.7%, 摩尔分数)可知晶粒B为 α -Cr。 α -Cr在 γ/γ' 晶界(晶粒A和晶粒C)析出或在 β 晶界析出能促进 $\gamma+\beta\rightarrow\gamma'+\alpha$ 相转变过程。图4(d)插图所示为典型的 γ/γ' 双晶沿 $\{111\}$ 晶面 $\langle 112 \rangle$ 方向的衍射斑点,晶粒C为 γ/γ' ,

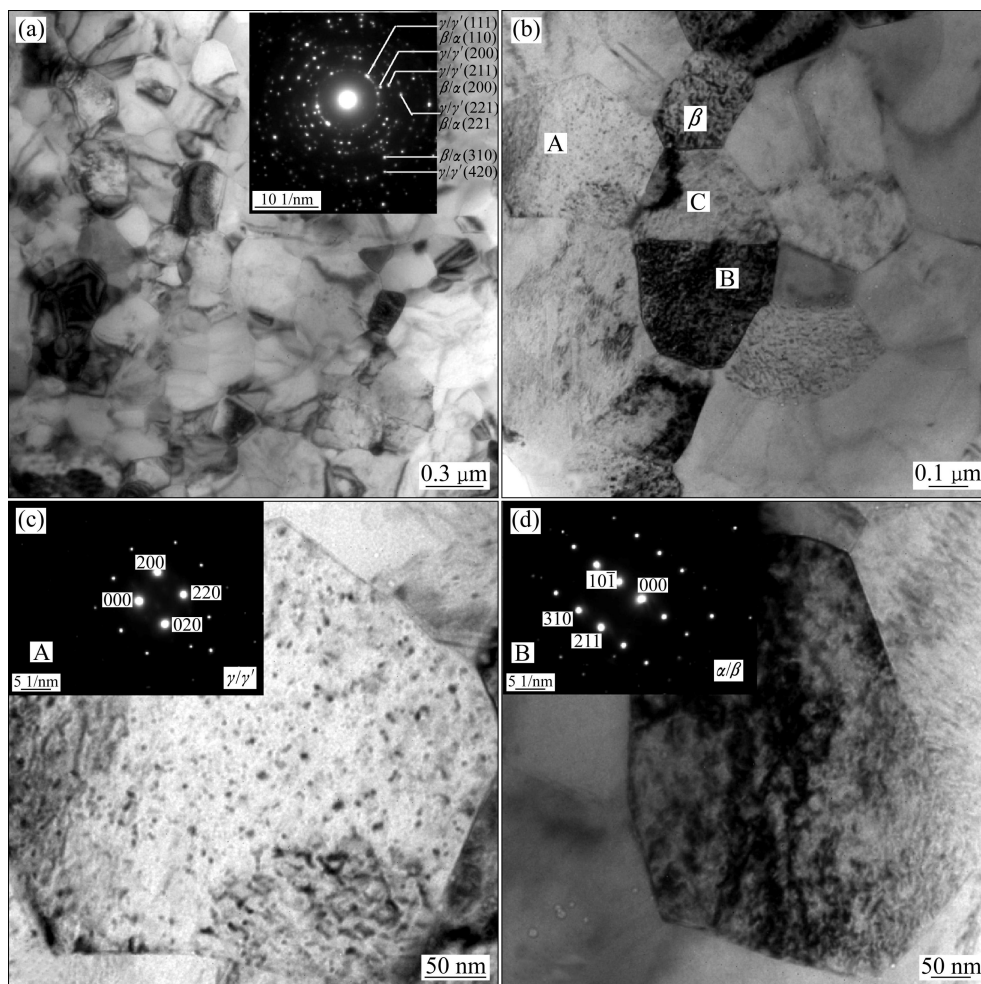


图 4 经 950℃、3h 真空热处理后 NiCrAlY 涂层 TEM 明场像及选取衍射(SAD)斑点(插图)

Fig. 4 Bright-field TEM images and corresponding SAD patterns (Insert) of NiCrAlY after vacuum heat treatment at 950 °C for 3 h: (a) Polycrystalline region; (b) Part of coating grains and SAD patterns of grain A; (c) Grain B; (d) Grain C

同时在晶粒 C 明场相中可观察到弥散细小的 γ' -Ni₃Al 相(见图 4(d)黑色点状相)在 γ -Ni 基体中析出。对比图 3(c)可知,涂层经 950 °C、3 h 真空热处理后在 γ -Ni 基体中析出的 γ' -Ni₃Al 相分布密度明显比 750 °C 时的要小,说明 950 °C 时涂层析出的 γ' 相明显减少,与 XRD 结果相吻合。

2.3 涂层的显微硬度

真空热处理对 NiCrAlY 涂层显微硬度的影响如图 5 所示。由图 5 可知,沉积态 NiCrAlY 涂层的显微硬度为 798.5HV,涂层经 650 °C、3 h 真空热处理后,其表面硬度值的提高不明显为 815.8HV;当真空热处理温度提高到 750 °C 时,涂层表面硬度值达到最大值 896.3HV;当真空热处理温度进一步升高时,涂层表面硬度值开始下降:当真空热处理温度为 870 °C 时,涂层表面硬度值为 830.4HV;当真空热处理温度为 950 °C 时,涂层表面硬度显著下降为 640.8HV。由图 2(c)可知,由于沉积态涂层中沉积残余应力的存在,涂层显微硬度值保持在较高值。由图 1、图 3(c)和图 4(d)的相关讨论可知:涂层经 650 °C、3 h 真空热处理后,开始析出 γ' -Ni₃Al 相;经 750 °C 真空热处理后, γ' -Ni₃Al 相析出量增加;进一步提高热处理温度至 870 及 950 °C 时,涂层中 γ' -Ni₃Al 相含量明显降低;从 Ni-Cr-Al 合金中析出的 γ' 相细小弥散并且与基体保持共格关系,能够强化合金基体。因此,涂层经 650 °C 真空热处理后,虽然涂层的残余应力得到释放,但随着 γ' -Ni₃Al 相的析出其硬度还是得到提高。经 750 °C 真空热处理后,涂层中 γ' -Ni₃Al 相析出量增加,涂层达到最大硬度值。但随着真空热处理温度的进一步提高,涂层中 γ' -Ni₃Al 相含量明显降低,同时,由于残余应

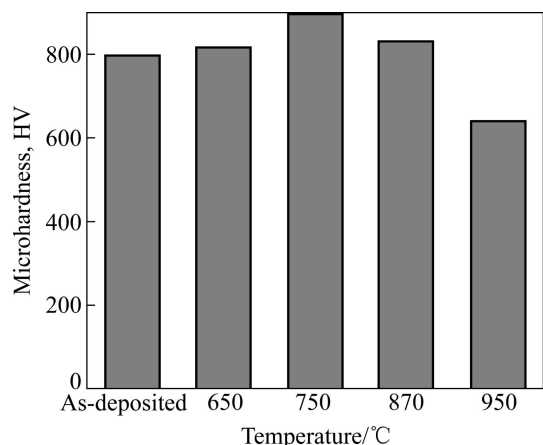


图 5 真空热处理对 NiCrAlY 涂层显微硬度的影响

Fig. 5 Effect of vacuum heat treatment on microhardness of NiCrAlY coating

力的充分释放及涂层元素分布的均匀化,涂层的硬度显著降低。文献[24]表明,在 700~750 °C 的温度范围内,即 γ' 相脱离母相的温度区间,可以得到最大的沉淀硬化效果。如果温度接近 γ' 溶解界限时,沉淀过程会中断,沉淀相在原来的地方积聚;如果温度超过固溶度线时,还会引起沉淀相的重新溶解。因此,电弧离子镀 NiCrAlY 涂层的后续热处理不但是减少涂层沉积缺陷、释放沉积残余应力、均匀化涂层元素及增强涂层与基体的冶金结合的过程,而且是 NiCrAlY 涂层的时效硬化过程。NiCrAlY 涂层最佳的析出硬化效果温度范围为 700~750 °C, NiCrAlY 涂层硬度的提高可改善涂层抗冲刷性能,延长涂层的使用寿命。

3 结论

1) 采用电弧离子镀技术在 TC4 钛合金表面沉积了约 20 μ m 厚 NiCrAlY 涂层,涂层连续、均匀、致密、与基体结合紧密。真空热处理过程中涂层沉积残余应力得到有效释放,由于元素的扩散及均匀化,涂层晶粒平均尺寸从沉积态的 200 nm 增加至 950 °C 的 500 nm。

2) 沉积态 NiCrAlY 涂层由 γ -Ni、 β -NiAl 及 α -Cr 相组成,真空热处理过程中涂层发生 $\beta \rightarrow \gamma' \rightarrow \gamma$ 相转变, γ' 分布于 β 晶界或 γ 晶粒内,经 650 °C 真空热处理后,涂层析出 γ' -Ni₃Al 相;当真空热处理温度为 750 °C 时,其含量增加;当温度进一步提高至 870 °C 或 950 °C 时,发生 $\gamma' \rightarrow \gamma$ 相转变导致 γ' 相含量明显减少。

3) 由于 γ 晶粒内析出的 γ' 相细小弥散与基体 γ 保持共格,对涂层起到析出强化作用,真空热处理过程中涂层硬度随 γ' 相含量的增加而提高,随 γ' 相含量的减少而下降,经 700~750 °C 真空热处理后, NiCrAlY 涂层可获得最佳析出强化效果。

REFERENCES

- [1] BOSE S, DEMASHI-MARCIN J. Thermal barrier coating experience in gas turbine engines at Pratt & Whitney[J]. Journal of Thermal Spray Technology, 1997, 6(1): 99-104.
- [2] 彭小敏, 夏长清, 王金惠, 刘莹颖, 刘娟. TC4 钛合金沉积 NiCrAlY 涂层的氧化行为[J]. 中国有色金属学报, 2008, 18(4): 601-607.
PENG Xiao-min, XIA Chang-qing, WANG Jin-hui, LIU Ying-ying, LIU Juan. Oxidation behavior of TC4 titanium alloy with NiCrAlY coating[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2008, 18(4): 601-607.
- [3] TANG Zhao-lin, WANG Fu-hui, WU Wei-tao. Effect of MCrAlY

- overlay coatings on oxidation resistance of TiAl intermetallics[J]. Surface and Coatings Technology, 1998, 99(3): 248–252.
- [4] PENG Xiao-min, XIA Chang-qing, MA Ke, DAI Xiao-yuan. Interaction of TC4 titanium alloy with NiCrAlY coating after vacuum heat treatment[J]. Materials Chemistry and Physics, 2008, 107(1): 158–163.
- [5] 王冰, 卢春燕, 孙超, 黄荣芳, 闻立时. NiCrAlY涂层对Ni基高温合金K17抗氧化性能的影响[J]. 腐蚀科学与防护技术, 2002, 14(1): 7–10.
- WANG Bing, LU Chun-yan, SUN Chao, HUANG Rong-fang, WEN Li-shi. Effect of NiCrAlY coatings on oxidation resistance of Ni-base superalloy K17[J]. Corrosion Science and Protection Technology, 2002, 14(1): 7–10.
- [6] VETTER J, KNOTEK O, BRAND J, BEELE W. MCrAlY coatings deposited by cathodic vacuum arc evaporation[J]. Surface and Coatings Technology, 1994, 68/69: 27–31.
- [7] 彭超群, 黄伯云, 贺跃辉, 王健农. TiAl基合金的抗氧化性及其改善[J]. 稀有金属材料与工程, 1999, 28(2): 93–96.
- PENG Chao-qun, HUANG Bai-yun, HE Yue-hui, WANG Jian-nong. Oxidation resistant and its improvement of the Ti-Al alloys[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 1999, 28(2): 93–96.
- [8] 夏长清, 李 佳, 古 一, 彭小敏, 武文花. NiCrAlY涂层/TC4基体界面反应机理[J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2005, 36(4): 550–553.
- XIA Chang-qing, LI Jia, GU Yi, PENG Xiao-min, WU Wen-hua. Interaction behavior between NiCrAlY coating and TC4 alloy substrate[J]. Journal of Central South University: Science and Technology, 2005, 36(4): 550–553.
- [9] 崔文芳, 罗国珍, 周 廉. 氧在Ti-1100高温钛合金氧化中的扩散规律[J]. 东北大学学报: 自然科学版, 1998, 19(1): 19–22.
- CUI Weng-fang, LUO Guo-zhen, ZHOU Lian. Diffusion kinetics of oxygen in oxidation of Ti-1100 high temperature titanium alloy[J]. Journal of Northeastern University: Natural Science, 1998, 19(1): 19–22.
- [10] 崔文芳, 罗国珍, 周 廉, 洪 权. 高温钛合金溅射NiCrAlY涂层氧化行为的研究[J]. 稀有金属材料与工程, 1998, 27(6): 348–351.
- CUI Weng-fang, LUO Guo-zhen, ZHOU Lian, HONG Quan. Oxidation behaviors of a sputtered NiCrAlY coating on the surface of a high temperature titanium alloy[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 1998, 27(6): 348–351.
- [11] SHIDA Y, ANADA H. The effect of various ternary additives on the oxidation behavior of TiAl in high-temperature air[J]. Oxidation of Metals, 1996, 45(1/2): 197–219.
- [12] YOSHIHARA M, TANAKA R, SUZUKI T, SHIMIZU M. Development of surface treatment techniques to improve oxidation resistance of titanium aluminide[C]//JOHNSON L A, POPE D P, STIEGLER J O. High-Temperature Ordered Intermetallic Alloys IV. Cambridge: Cambridge University Press, 1991: 975–980.
- [13] 沈嘉年, 江竹梅. Ti₃Al金属间合金渗铝涂层及其高温氧化行为[J]. 腐蚀科学与防护技术, 1992, 4(3): 139–143.
- SHEN Jia-nian, JIANG Zhu-mei. High temperature behavior of aluminizing coatings on Ti₃Al intermetallic alloy[J]. Corrosion Science and Protection Technology, 1992, 4(3): 139–143.
- [14] 郑传林, 徐 重, 谢锡善, 贺志勇, 董建新, 张麦仑. NiCrMoNb合金化层对TiAl金属间化合物抗氧化性能的影响[J]. 稀有金属材料与工程, 2003, 32(1): 32–36.
- ZHENG Chuang-lin, XU Zhong, XIE Xi-shan, HE Zhi-yong, DONG Jian-xin, ZHANG Mai-lun. Effect of NiCrMoNb alloying coating on the oxidation resistance of TiAl intermetallics[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2003, 32(1): 32–36.
- [15] WANG Q M, ZHANG K, GONG J, CUI Y Y, SUN C, WEN L S. NiCoCrAlY coatings with and without an Al₂O₃/Al interlayer on an orthorhombic Ti₂AlNb-based alloy: Oxidation and interdiffusion behaviors[J]. Acta Materialia, 2007, 55(4): 1427–1439.
- [16] LI H Q, WANG Q M, JIANG S M, MA J, GONG J, SUN C. Oxidation and interfacial fracture behaviour of NiCrAlY/Al₂O₃ coatings on an orthorhombic-Ti₂AlNb alloy[J]. Corrosion Science, 2011, 53(3): 1097–1106.
- [17] LI H Q, WANG Q M, JIANG S M, GONG J, SUN C. Ion-plated Al-Al₂O₃ films as diffusion barriers between NiCrAlY coating and orthorhombic-Ti₂AlNb alloy[J]. Corrosion Science, 2010, 52(5): 1668–1674.
- [18] LI W Z, WANG Q M, BAO Z B, YAO Y, GONG J, SUN C, JIANG X. Microstructural evolution of the NiCrAlY/CrON duplex coating system and its influence on mechanical properties[J]. Materials Science and Engineering A, 2008, 498(1/2): 487–494.
- [19] LI W Z, YAO Y, LI Y Q, LI J B, GONG J, SUN C, JIANG X. Damage behavior of the NiCrAlY coating systems with or without barrier layer during three-point bending[J]. Materials Science and Engineering A, 2009, 512(1/2): 117–125.
- [20] POZE P, GRANT P S. Microstructure evolution of vacuum plasma sprayed CoNiCrAlY coatings after heat treatment and isothermal oxidation[J]. Surface and Coatings Technology, 2006, 201(6): 2887–2896.
- [21] DAVIS J R. ASM specialty handbook: Nickel, cobalt and their alloys[M]. OH: ASM International Materials Park, 2000: 100–102.
- [22] BAUFELD B, SCHMUCKER M. Microstructural evolution of a NiCoCrAlY coating on an IN100 substrate[J]. Surface and Coatings Technology, 2005, 199(1): 49–56.
- [23] 刘桂兰, 邹宇超. 回火温度对Ni-Cr-Al硬弹合金组织和性能的影响[J]. 东北大学学报: 自然科学版, 1994, 15(4): 399–402.
- LIU Gui-lan, ZOU Yu-chao. Effect of tempering temperature on structures and properties of Ni-Cr-Al hard elastic alloys[J]. Journal of Northeastern University: Natural Science, 1994, 15(4): 399–402.
- [24] KOLOMATSEV P T. 耐热扩散涂层[M]. 马志春, 译. 北京: 国防工业出版社, 1988: 201–205.
- KOLOMATSEV P T. Hot-Resistant diffusion coatings[M]. MA Zhi-chun, transl. Beijing: National Defense Industry Press, 1988: 201–205.