

# 不同状态 NiCrAlY 涂层组织结构的研究

汝继来 王仁智

(北京航空材料研究院, 北京 100095)

**摘要:** 对 DD2 镍基单晶材料表面上采用阴极电弧镀(APD)方法获得 NiCrAlY 防护涂层的原始涂层、扩散处理涂层、塑变涂层以及塑变后时效处理涂层等的表面与内部的相结构进行了试验研究。结果表明,厚度约  $130\mu\text{m}$  的涂层中主要由  $\text{Ni}_3\text{Al}$  基体(有序或无序)、简单立方 NiAl 和 Cr 三种物相构成,但不同状态的涂层由不同的相结构组成,且沿着涂层深度有着各自不同的分布;塑变使扩散处理析出的 NiAl 新相又发生回溶,而在高温( $1100^\circ\text{C}$ )下对塑变涂层时效处理后, NiAl 相又重新析出。

**关键词:** 抗氧化涂层; 物相分析; 相转变; 表面形变处理

**中图分类号:** TG174.452 **文献标识码:** A **文章编号:** 1005-5053(1999)02-0027-08

采用表面防护涂层是改善高温部件抗氧化性能的有效措施之一。本试验采用阴极电弧镀(APD)方法,在 DD2 镍基单晶基体材料表面涂上厚约  $130\mu\text{m}$  的 NiCrAlY 涂层。这种涂层的抗高温氧化性能取决于涂层的组织结构和涂层的致密度<sup>[1]</sup>,因此应对不同状态涂层的相结构和组织结构进行系统的研究。本试验将对以下几种状态涂层的相结构进行试验研究:

- (1) 原始涂层(阴极电弧镀后不经任何处理);
- (2) 扩散处理涂层,简称扩散涂层(阴极电弧镀后经  $870^\circ\text{C}$ , 1h 扩散处理);
- (3) 塑变涂层(对扩散处理涂层进行表面喷丸形变处理);
- (4) 塑变与时效涂层(对喷丸形变涂层进行时效处理)。

## 1 材料与试验方法

### 1.1 材料

基体材料采用 DD2 镍基单晶,防护涂层为 NiCrAlY,其主要化学成份分别列于表 1 和表 2。

表 1 DD2 镍基单晶高温合金的主要化学成份, wt%

Table 1 Main chemical compositions of DD2 nickel base single crystal superalloy, wt%

Cr	Co	W	Mo	Ta	Ti	Ni
~ 8	~ 10	~ 6	~ 0.5	~ 6	~ 1	Remain

收稿日期: 1998-10-2; 修订日期: 1999-01-20

作者简介: 汝继来(1962-),男,硕士,高级工程师

表2 NiCrAlY涂层的化学成份, wt%

Table 2 Chemical compositions of NiCrAlY coating, wt%

Ni	Cr	Al	Y
66.9~69.9	22~23	8~10	0.1~0.3

## 1.2 X射线结构分析方法

在D/max~2400型Rigaku X-Ray衍射仪上进行各种涂层的物相测定与分析。

## 1.3 喷丸形变处理方法

在气动式喷丸机内对扩散处理涂层进行喷丸(SP)形变处理,采用的弹丸直径为0.15~0.25mm。采用不使涂层脱落的适宜的喷丸强度对涂层进行塑变处理。

## 2 试验结果与讨论

表3列出了原始涂层表面与不同深度上的相结构。

表3 原始涂层的表面与不同深度上的相结构

Table 3 The phase structures in the original coating at different depths

NSP-ND-0 $\mu$ m		NSP-ND-20 $\mu$ m		NSP-ND-50 $\mu$ m		NSP-ND-80 $\mu$ m		NSP-ND-130 $\mu$ m	
d	(hkl)	d	(hkl)	d	(hkl)	d	(hkl)	d	(hkl)
3.5701	Ni <sub>3</sub> Al (100)	3.5617	Ni <sub>3</sub> Al (100)	2.0616	Ni <sub>3</sub> Al (111)	2.0616	Ni <sub>3</sub> Al (111)	2.0697	Ni <sub>3</sub> Al (111)
2.5433	Ni <sub>3</sub> Al (110)	2.5280	Ni <sub>3</sub> Al (110)	1.7853	Ni <sub>3</sub> Al (200)	1.7860	Ni <sub>3</sub> Al (200)	1.7984	Ni <sub>3</sub> Al (200)
2.0643	Ni <sub>3</sub> Al (111)	2.0643	Ni <sub>3</sub> Al (111)	1.4427	Cr (200)	1.4439	Cr (200)	1.4305	Cr (200)
2.0343	Cr (110)	2.0343	Cr (110)	1.2613	Ni <sub>3</sub> Al (220)	1.2613	Ni <sub>3</sub> Al (220)	1.2627	Ni <sub>3</sub> Al (220)
1.7873	Ni <sub>3</sub> Al (200)	1.7847	Ni <sub>3</sub> Al (200)	1.1765	Cr (211)	1.1755	Cr (211)	1.1746	Cr (211)
1.4423	Cr (200)	1.4431	Cr (200)	1.0750	Ni <sub>3</sub> Al (311)	1.0750	Ni <sub>3</sub> Al (311)	1.0798	Ni <sub>3</sub> Al (311)
1.2613	Ni <sub>3</sub> Al (220)	1.2599	Ni <sub>3</sub> Al (220)	1.0290	Ni <sub>3</sub> Al (222)	1.0310	Ni <sub>3</sub> Al (222)	1.0344	Ni <sub>3</sub> Al (222)
1.1765	Cr (211)	1.1767	Cr (211)	0.9113	Cr (310)	0.9112	Cr (310)	0.9080	Cr (310)
1.0761	Ni <sub>3</sub> Al (311)	1.0759	Ni <sub>3</sub> Al (311)						
1.0305	Ni <sub>3</sub> Al (222)	1.0302	Ni <sub>3</sub> Al (222)						
0.9118	Cr (310)	0.9103	Cr (310)						

原始涂层的厚度为  $130\mu\text{m}$ 。在涂层开始沉积时,涂层中只形成两个相:  $\text{Ni}_3\text{Al}$  相和 Cr 相。由于沉积速率的影响,基体中的一部分形成无序  $\text{Ni}_3\text{Al}$  面心立方晶体相( $\gamma$ ) (见表 3 中第 4、5 列,图 1(c)和(d)),而基体的另一部分在衍射角  $2\theta \cong 20$  附近给出无定形散射峰(图 1(c)和(d))的为非(微)晶态  $\text{Ni}_3\text{Al}$  相。随着沉积厚度的增加并达到约  $100\mu\text{m}$  厚时,非(微)晶态  $\text{Ni}_3\text{Al}$  相消失(表 3 中第 1、2、3 列,图 1, (a)和(b)),这时生成的  $\text{Ni}_3\text{Al}$  基体相为有序相,衍射谱线中出现了超点阵线(100)、(110)、等(表 3 中第 1、2 列)。外表层( $\sim 20$ )内由有序的  $\text{Ni}_3\text{Al}$  相( $\gamma$ )和 Cr 相构成。

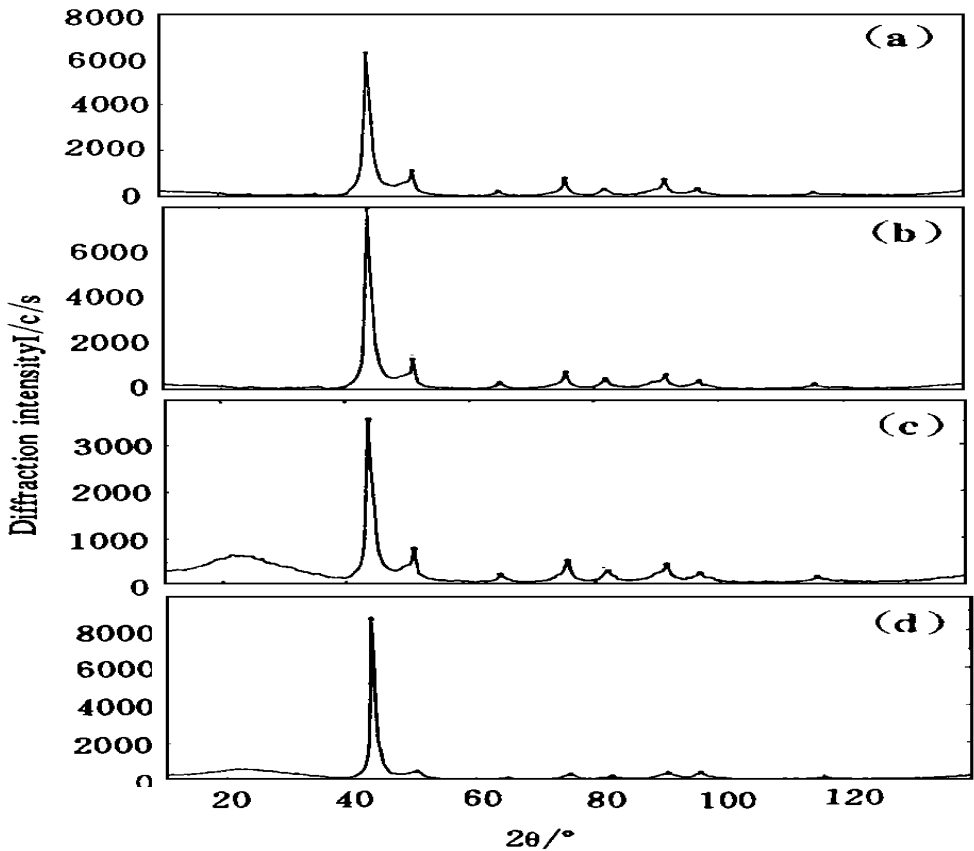


图 1 原始组织( $\sim 130$ )不同深度上的 X 射线衍射谱线:

Fig. 1 (200) diffraction lines at different depths of original coating

(a)  $0\mu\text{m}$ ; (b)  $50\mu\text{m}$ ; (c)  $80\mu\text{m}$ ; (d)  $130\mu\text{m}$

原始涂层经  $870^\circ\text{C}$  (1h) 扩散处理后(即扩散处理涂层),不同深度上的相结构发生以下变化(表 4)。首先,在整个涂层深度范围内  $\text{Ni}_3\text{Al}$  基体全部转变为有序相。其次,在深度约为

35 $\mu\text{m}$  的表层范围内出现了简单立方 NiAl 相的析出, 而超过 45 $\mu\text{m}$  深度后不再有 NiAl 相的析出。扩散处理似乎对 Cr 相的分布无明显影响, 它存在于整个涂层深度范围内。

表 4 扩散涂层表面与不同深度上的相结构

Table 4 The phase structures in the diffusion coating at different depths

NSP		NSP- 16 $\mu\text{m}$		NSP- 33 $\mu\text{m}$		NSP- 44 $\mu\text{m}$		NSP- 67 $\mu\text{m}$	
d	(hkl)	d	(hkl)	d	(hkl)	d	(hkl)	d	(hkl)
3. 5871	Ni <sub>3</sub> Al (100)	3. 5871	Ni <sub>3</sub> Al (100)	3. 5814	Ni <sub>3</sub> Al (100)	3. 5786	Ni <sub>3</sub> Al (100)	3. 5871	Ni <sub>3</sub> Al (100)
2. 8988	<b>NiAl</b> (100)	2. 8806	<b>NiAl</b> (100)	2. 8842	<b>NiAl</b> (100)	2. 5294	Ni <sub>3</sub> Al (110)	2. 5322	Ni <sub>3</sub> Al (110)
2. 5335	Ni <sub>3</sub> Al (110)	2. 5349	Ni <sub>3</sub> Al (110)	2. 5322	Ni <sub>3</sub> Al (110)	2. 0652	Ni <sub>3</sub> Al (111)	2. 0670	Ni <sub>3</sub> Al (111)
2. 0679	Ni <sub>3</sub> Al (111)	2. 0688	Ni <sub>3</sub> Al (111)	2. 0661	Ni <sub>3</sub> Al (111)	2. 0386	Cr (110) <b>NiAl</b> (110)	2. 0413	Cr (110)
2. 0413	Cr (110) <b>NiAl</b> (100)	2. 0421	Cr (110) <b>NiAl</b> (110)	2. 0404	Cr (110) <b>NiAl</b> (110)	1. 7873	Ni <sub>3</sub> Al (200)	1. 7892	Ni <sub>3</sub> Al (200)
1. 7873	Ni <sub>3</sub> Al (200)	1. 7905	Ni <sub>3</sub> Al (200)	1. 7886	Ni <sub>3</sub> Al (200)	1. 5989	Ni <sub>3</sub> Al (210)	1. 5999	Ni <sub>3</sub> Al (210)
1. 6004	Ni <sub>3</sub> Al (210)	1. 6009	Ni <sub>3</sub> Al (210)	1. 5999	Ni <sub>3</sub> Al (210)	1. 4593	Ni <sub>3</sub> Al (211)	1. 4605	Ni <sub>3</sub> Al (211)
1. 4609	Ni <sub>3</sub> Al (211)	1. 4613	Ni <sub>3</sub> Al (211)	1. 4601	Ni <sub>3</sub> Al (211)	1. 4411	Cr (200) <b>NiAl</b> (200)	1. 4419	Cr (200)
1. 4419	Cr (200) <b>NiAl</b> (200)	1. 4427	Cr (200)	1. 4419	Cr (200) <b>NiAl</b> (200)	1. 2639	Ni <sub>3</sub> Al (200)	1. 2645	Ni <sub>3</sub> Al (200)
1. 2646	Ni <sub>3</sub> Al (200)	1. 2650	Ni <sub>3</sub> Al (220)	1. 2645	Ni <sub>3</sub> Al (220)	1. 1765	Cr (211) <b>NiAl</b> (211)	1. 1769	Cr (211)
1. 1769	Cr (211) <b>NiAl</b> (211)	1. 1772	Cr (211) <b>NiAl</b> (211)	1. 1767	Cr (211) <b>NiAl</b> (211)	1. 0777	Ni <sub>3</sub> Al (311)	1. 0781	Ni <sub>3</sub> Al (311)
1. 0783	Ni <sub>3</sub> Al (311)	1. 0785	Ni <sub>3</sub> Al (311)	1. 0779	Ni <sub>3</sub> Al (311)	1. 0320	Ni <sub>3</sub> Al (222)	1. 0321	Ni <sub>3</sub> Al (222)
1. 0325	Ni <sub>3</sub> Al (222)	1. 0326	Ni <sub>3</sub> Al (222)	1. 0321	Ni <sub>3</sub> Al (222)	1. 0188	Cr (220)	1. 0191	Cr (220)
1. 0188	Cr (220)	1. 0191	Cr (220)	1. 0192	Cr (220)	0. 9556	<b>NiAl</b> (300)	0. 9114	Cr (310)
0. 9129	Cr (310)	0. 9558	<b>NiAl</b> (300)	0. 9558	<b>NiAl</b> (300)	0. 9112	Cr (310)	0. 8937	Ni <sub>3</sub> Al (400)
0. 8938	Ni <sub>3</sub> Al (400)	0. 9115	Cr (310)	0. 9116	Cr (310)	0. 8932	Ni <sub>3</sub> Al (400)	0. 8321	Cr (222)
0. 8318	Cr (222)	0. 8939	Ni <sub>3</sub> Al (400)	0. 8935	Ni <sub>3</sub> Al (400)	0. 8321	Cr (222)		
		0. 8318	Cr (222)	0. 8318	Cr (222)				
		0. 8203	Ni <sub>3</sub> Al (331)						

表 5 为扩散处理涂层经喷丸形变处理后外表面层(  $\sim 10\mu\text{m}$ ) 的相结构测定结果。喷丸过程是使涂层承受循环塑性变形的过程, 循环塑性变形使扩散处理涂层中的物相结构发生重大变化。首先, NiAl 相在强烈的塑变过程中已全部回落到  $\text{Ni}_3\text{Al}$  基体中; 其次, 塑变使有序相  $\text{Ni}_3\text{Al}$  转变为无序相, 但塑变不影响 Cr 相的形态和分布。

表 5 喷丸形变涂层的物相分析结果

Table 5 The phase structures on the plastic deformed surface layers

No	Measurement results		Analysis results					
			$\text{Ni}_3\text{Al}$			Cr		
	d (Å)	I	d (Å)	I	(hkl)	d (Å)	I	(hkl)
1	2.077	100	2.077	100	(111)			
2	2.043	67				2.039	100	(110)
3	1.809	24	1.799	70	(200)			
4	1.444	10				1.441	16	(200)
5	1.272	43	1.265	60	(220)			
6	1.179	23				1.177	30	(211)
7	1.084	1	1.078	60	(311)			
8	1.037	3	1.032	40	(222)			
9	1.0216	4				1.019	18	(220)
10	0.9136	5				0.912	20	(310)
11	0.8340	12				0.832	6	(222)
12	0.8245	8	0.819	70	(331)			

表 6 为喷丸形变涂层的相结构在时效过程中的变化。首先, 随着时效温度的增高, 形变  $\text{Ni}_3\text{Al}$  的有序度逐渐增高, 时效温度升至 500 时, 形变无序  $\text{Ni}_3\text{Al}$  相完全转变成有序  $\text{Ni}_3\text{Al}$  相(表 6)。由 500 至 1000 的时效温度范围内, 涂层的相结构基本保持不变, 即由有序  $\text{Ni}_3\text{Al}$  与 Cr 相构成。当时效温度升至 1100 时, NiAl 相开始析出, 并且为有序相(表 6)。

根据表 3~6 和图 1 的试验结果, 可以勾画出不同状态涂层的相结构沿深度的分布, 如图 2 和图 3 所示。由此可见, 原始涂层经 870 扩散处理后, 表层析出有序的 NiAl 相, 该相具有高的抗氧化性。塑变又使 NiAl 相回落到  $\text{Ni}_3\text{Al}$  基体中, 但在 1100 下对形变涂层进行时效处理时, 又重新析出 NiAl 有序相。如涂层的最终工艺为: 扩散处理+ 形变处理+ 时效处理(1100), 则在  $45\mu\text{m}$  深度内涂层的相结构由  $\text{Ni}_3\text{Al}$  有序基体+ NiAl 有序相+ Cr 相构成。是否在整个深度上均有 NiAl 相的析出, 尚有待试验证实。无疑, NiAl 相在时效中的析出, 有利于涂层抗氧化性能的提高。

表 6 喷丸形变涂层经时效处理后的表层相结构

Table 6 The changes of phase structures in plastic deformed coating with temperature

SP		SP+ 500		SP+ 600		SP+ 800		SP+ 1000		SP+ 1100	
d	(hkl)	d	(hkl)	d	(hkl)	d	(hkl)	d	(hkl)	d	(hkl)
2. 0742	Ni <sub>3</sub> Al(111)	3. 5814	Ni <sub>3</sub> Al(100)	3. 5814	Ni <sub>3</sub> Al(100)	3. 5786	Ni <sub>3</sub> Al(100)	3. 5786	Ni <sub>3</sub> Al(100)	3. 5786	Ni <sub>3</sub> Al(100)
2. 0456	<b>Cr (110)</b>	2. 5294	Ni <sub>3</sub> Al(110)	2. 5280	Ni <sub>3</sub> Al(110)	2. 5280	Ni <sub>3</sub> Al(110)	2. 5294	Ni <sub>3</sub> Al(110)	2. 8697	<b>NiAl (100)</b>
1. 8024	Ni <sub>3</sub> Al(200)	2. 0652	Ni <sub>3</sub> Al(111)	2. 0643	Ni <sub>3</sub> Al(111)	2. 0643	Ni <sub>3</sub> Al(111)	2. 0652	Ni <sub>3</sub> Al(111)	2. 5294	Ni <sub>3</sub> Al(110)
1. 4451	<b>Cr (200)</b>	2. 0404	<b>Cr (110)</b>	2. 0413	<b>Cr (110)</b>	2. 0413	<b>Cr (110)</b>	2. 0395	<b>Cr (110)</b>	2. 0652	Ni <sub>3</sub> Al(111)
1. 2688	Ni <sub>3</sub> Al(220)	1. 7873	Ni <sub>3</sub> Al(200)	1. 7873	Ni <sub>3</sub> Al(200)	1. 7873	Ni <sub>3</sub> Al(200)	1. 7879	Ni <sub>3</sub> Al(200)	2. 0386	Cr (110) <b>NiAl (110)</b>
<b>1. 1800</b>	<b>Cr (211)</b>	1. 5979	Ni <sub>3</sub> Al(210)	1. 5984	Ni <sub>3</sub> Al(210)	1. 5984	Ni <sub>3</sub> Al(210)	1. 5989	Ni <sub>3</sub> Al(210)	1. 7873	Ni <sub>3</sub> Al(200)
1. 0844	Ni <sub>3</sub> Al(311)	1. 4585	Ni <sub>3</sub> Al(211)	1. 4585	Ni <sub>3</sub> Al(211)	1. 4589	Ni <sub>3</sub> Al(211)	1. 4597	Ni <sub>3</sub> Al(211)	1. 6565	NiAl(111)
1. 0359	Ni <sub>3</sub> Al(222)	1. 4427	<b>Cr (200)</b>	1. 4427	<b>Cr (200)</b>	1. 4427	<b>Cr (200)</b>	1. 4415	<b>Cr (200)</b>	1. 5989	Ni <sub>3</sub> Al(210)
1. 0219	<b>Cr (220)</b>	1. 2636	Ni <sub>3</sub> Al(220)	1. 2630	Ni <sub>3</sub> Al(220)	1. 2630	Ni <sub>3</sub> Al(220)	1. 2639	Ni <sub>3</sub> Al(220)	1. 4597	Ni <sub>3</sub> Al(211)
0. 9134	<b>Cr (310)</b>	1. 1779	<b>Cr (211)</b>	1. 1772	<b>Cr (211)</b>	1. 1897		1. 1767	<b>Cr (211)</b>	1. 4415	Cr (200)
0. 8342	<b>Cr (222)</b>	1. 0774	Ni <sub>3</sub> Al(311)	1. 0768	Ni <sub>3</sub> Al(311)	1. 1774	<b>Cr (211)</b>	1. 0777	Ni <sub>3</sub> Al(311)	1. 2636	Ni <sub>3</sub> Al(220)
0. 8227	Ni <sub>3</sub> Al(331)	1. 0309	Ni <sub>3</sub> Al(222)	1. 0310	Ni <sub>3</sub> Al(222)	1. 0770	Ni <sub>3</sub> Al(311)	1. 0318	Ni <sub>3</sub> Al(222)	1. 1765	Cr (211)
		1. 0192	<b>Cr (220)</b>	1. 0191	<b>Cr (220)</b>	1. 0310	Ni <sub>3</sub> Al(222)	1. 0189	<b>Cr (220)</b>	1. 1708	<b>NiAl (211)</b>
		0. 9125	<b>Cr (310)</b>	0. 9120	<b>Cr (310)</b>	1. 0194	<b>Cr (220)</b>	0. 9112	<b>Cr (310)</b>	1. 0774	Ni <sub>3</sub> Al(311)
		0. 8932	Ni <sub>3</sub> Al(400)	0. 8922	Ni <sub>3</sub> Al(400)	0. 9123	<b>Cr (310)</b>	0. 8938	Ni <sub>3</sub> Al(400)	1. 0318	Ni <sub>3</sub> Al(222)
		0. 8322	<b>Cr (222)</b>	0. 8321	<b>Cr (222)</b>	0. 8923	Ni <sub>3</sub> Al(400)	0. 8315	<b>Cr (222)</b>	1. 0189	Cr (220)
		0. 8200	Ni <sub>3</sub> Al(331)	0. 8199	Ni <sub>3</sub> Al(331)	0. 8323	<b>Cr (222)</b>	0. 8200	Ni <sub>3</sub> Al(331)	0. 9550	<b>NiAl (300)</b>
						0. 8197	Ni <sub>3</sub> Al(331)			0. 9154	Cr (310)
										0. 9108	<b>NiAl (310)</b>
										0. 8932	<b>Ni<sub>3</sub>Al (400)</b>
										<b>0. 8318</b>	<b>Cr (222)</b>
										<b>0. 8198</b>	<b>Ni<sub>3</sub>Al (331)</b>

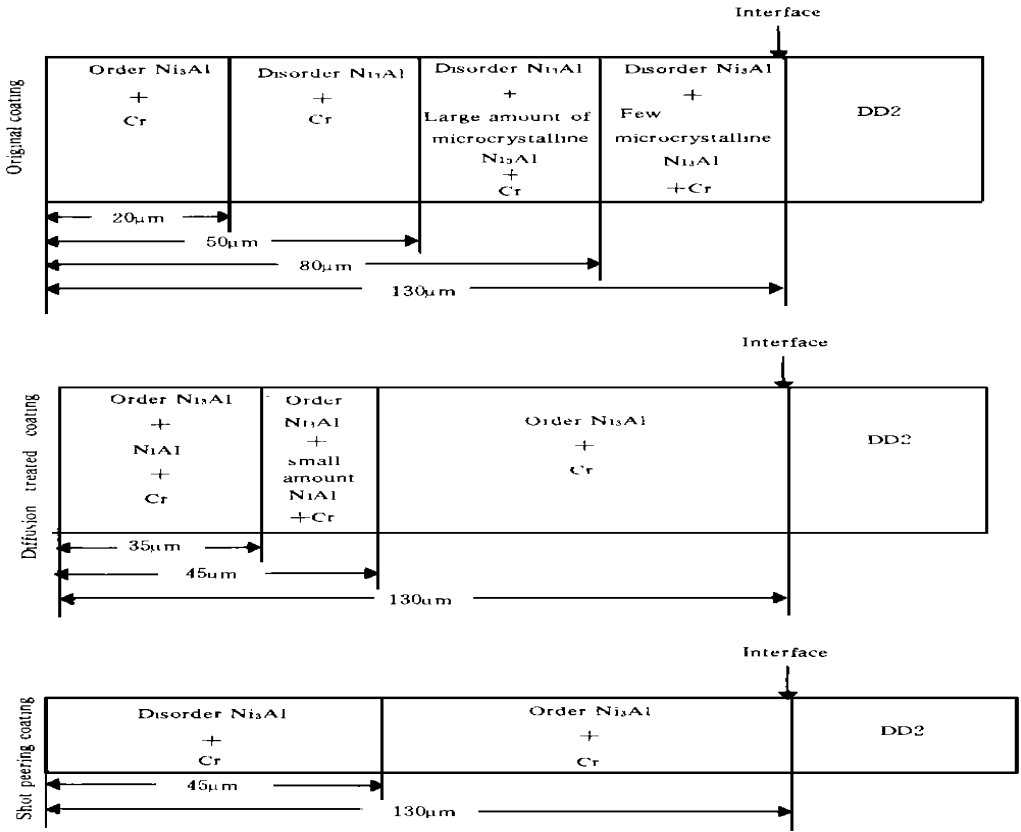


图 2 原始涂层、扩散涂层、喷丸形变涂层内的物相结构及其沿深度的分布

Fig. 2 The phase structures of original coating, diffusion coating and shot peening induced plastic deformed coating and their distribution along the depths

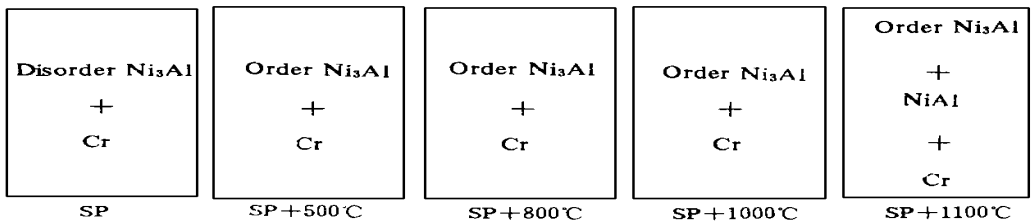


图 3 喷丸形变涂层经不同温度(1h)时效处理后表层 (~ 10µm) 的物相结构

Fig. 3 The changes of the phase structures on the surface layer (~ 10 µm) of plastic deformed coating with temperature (1h)

### 3 结 论

用阴极电弧镀(APD)方法获得的 NiCrAlY 涂层,其原始涂层与后期经不同处理的涂

层, 其中的相组成及沿深度的分布各不相同。

(1) 原始涂层的相组成及其沿涂层深度的分布为: 有序  $\text{Ni}_3\text{Al} + \text{Cr}$  无序  $\text{Ni}_3\text{Al} + \text{Cr}$  无序  $\text{Ni}_3\text{Al} +$  多量非(微)晶态  $\text{Ni}_3\text{Al} + \text{Cr}$  无序  $\text{Ni}_3\text{Al} +$  少量非(微)晶态  $\text{Ni}_3\text{Al} + \text{Cr}$  界面。

(2) 扩散处理涂层的相组成及其沿涂层深度的分布: 有序  $\text{Ni}_3\text{Al} + \text{NiAl} + \text{Cr}$  有序  $\text{Ni}_3\text{Al} +$  少量  $\text{NiAl} + \text{Cr}$  有序  $\text{Ni}_3\text{Al} + \text{Cr}$  界面。

(3) 喷丸形变涂层的相组成及其沿涂层深度的分布为: 无序  $\text{Ni}_3\text{Al} + \text{Cr}$  有序  $\text{Ni}_3\text{Al} + \text{Cr}$  界面。

(4) 喷丸形变涂层经时效处理的表层相组成为:

① 经 500 至 1000 时效处理表层的相组成为: 有序  $\text{Ni}_3\text{Al} + \text{Cr}$

② 经 1100 时效处理表层的相组成为: 有序  $\text{Ni}_3\text{Al} + \text{NiAl} + \text{Cr}$

参考文献:

- [1] 汝继来、王仁智. 循环塑性变形对  $\text{NiCrAlY}$  涂层的组织结构与密度影响的研究, 中国表面工程, 1998, 11: 3

## Investigation on the microstructure of $\text{NiCrAlY}$ deposition with different conditions

RU Ji-lai      WANG Ren-zhi

(Institute of Aeronautical Materials, Beijing 100095, China)

**Abstract:**  $\text{NiCrAlY}$  deposition produced by Arc Plasma Deposition was used to protect DD2, a nickel based single crystal materials, from high temperature oxidation. The surface and inner phase analysis of the deposition with different states including original, diffused, plastic deformation and aged after plastic deformation have been investigated. It has been showed that the main phases within  $\text{NiCrAlY}$  deposition with the depth of  $130\mu\text{m}$  are  $\text{Ni}_3\text{Al}$  matrix (ordered or non-ordered structure),  $\text{NiAl}$  and  $\text{Cr}$ , but the phase composition are different for different states. It has also been pointed out that the new phase  $\text{NiAl}$  precipitated during diffused treatment can be soluted by plastic deformation, while  $\text{NiAl}$  can be precipitated again from the plastic deformed deposition ageing at 1100 .

**Key words:** oxidation resistant deposition; phase analysis; phase transformation; surface plastic deformation treatment