底层粉末粒径对碳化铬-镍铬铝钇涂层性能影响

何斐

中国航发常州兰翔机械有限责任公司　江苏常州　213022

摘要：某中间扩散机匣零件局部表面需喷涂碳化铬-镍铬铝钇涂层以提高其耐磨性能，分别选用两种粒径（53~106μm及23~53μm）的镍铬铝钇粉末作为该涂层底层，并采用爆炸喷涂方法进行底层及面层的喷涂加工，利用扫描电镜（SEM）、显微硬度计和电子拉伸试验机对不同粒径底层粉末喷涂制备的涂层金相组织、组成成分、硬度以及结合强度进行分析比较。结果表明：两种粒径镍铬铝钇粉末制备的碳化铬-镍铬铝钇涂层性能均能达到技术要求，相较而言，较细粒径粉末制备的镍铬铝钇底层厚度均匀性较好，且未熔颗粒及界面污染含量稍低，而较粗粒径粉末喷涂后形成的底层凸起会产生遮挡效应，影响了底层与面层之间的界面结合，表现为粗粒径粉末制备的涂层结合强度为39.7MPa，硬度为598.1HV；而细粒径粉末制备涂层结合强度可达58.7MPa，硬度为615.9HV。

关键词：爆炸喷涂；镍铬铝钇底层；粉末粒径

1　序言

某航空发动机中间扩散机匣基体材料为K438高温合金，其局部表面需喷涂碳化铬-镍铬铝钇涂层以提高耐磨性能。碳化铬-镍铬铝钇涂层是一种常用的高温耐磨涂层，它不仅具有很强的耐磨性能，同时还有优良的抗热腐蚀和抗氧化性能，最高工作温度可达870℃，能够满足零件在高温、剧烈振动等工作环境下的性能要求。爆炸喷涂是一种先进的致密涂层制备技术，其气流温度高（达3500~4000℃）、冲击力大、粉末飞行速度快（达1200~1500m/s），制备的涂层具有片层状、结构细小、结合力强及孔隙率低等优点[1-3]。

因此，在中间扩散机匣的正式工艺中，采用了爆炸喷涂方法对该零件进行碳化铬-镍铬铝钇涂层的制备，并进行了多批次零件的生产加工。然而，在发动机研制前期试车过程中，部分中间扩散机匣碳化铬-镍铬铝钇涂层出现不同程度的开裂、剥落现象，失效分析发现涂层剥落处界面存在大尺寸镍铬铝钇底层残留，且底层局部存在较大未熔颗粒，初步结论为底层粉末粒径过大所致。为此，开展了粉末粒径对涂层性能影响的试验。

2　试验

制备两种碳化铬-镍铬铝钇涂层，所选用的面层材料均为Mecto 5546NS喷涂粉末，而底层材料则选用粒径尺寸不同的两种NiCrAlY喷涂粉末，见表1。

表1　涂层原材料使用

类别	涂层种类	化学成分（质量分数，%）					粒径/μm	原材料牌号
面层材料	Cr_3C_2-NiCrAlY	Cr_3C_2	Ni	Cr	Al	Y	5.5~45	美科：Metco 5546NS
		74~76	16~18	5~6	2~3	0.2~0.3		
底层材料	NiCrAlY	Ni	Cr	Al	Y		53~106	美科：Amdry 962
	NiCrAlY	余量	21~23	5~11	0.7~1.3		23~53	美科：Amdry 9624

使用爆炸喷涂设备（型号：CCDS 2000）并采用经固化稳定后的工艺对两组试片进行涂层制备。针对两种不同粒径NiCrAlY底层粉末制备涂层性能进行表征分析，具体分析如下。

（1）涂层金相组织　采用扫描电子显微镜（FEI Quanta 600）对涂层金相组织进行观察，在200倍下观察涂层的孔隙率、未熔颗粒和界面污染物。

（2）涂层成分　采用扫描电子显微镜自带的EDS能谱仪对涂层的成分组成进行分析。

（3）涂层厚度　采用扫描电子显微镜自带的尺寸测量软件对涂层厚度进行分析。

（4）涂层显微硬度　按HB 5486—1991采用显微硬度计对涂层的显微硬度进行检测，载荷300g（1kg=9.8N），保持时间15s。

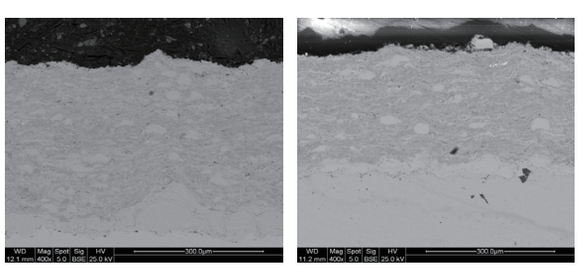
（5）涂层结合强度　按HB 5476—1991采用电子拉伸试验机对涂层的结合强度进行分析，加载速度1.27mm/min。

3　结果与讨论

3.1　涂层金相组织

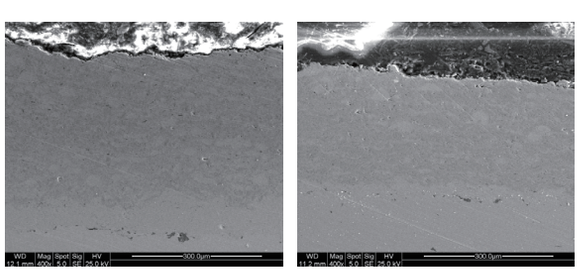
通过对不同涂层金相组织背散射照片（见图1）观察发现，两种不同底层粉末制备的涂层均连续致密，无裂纹、界面分离等现象出现。

不同涂层金相组织的二次电子照片如图2所示，表2为两种涂层具体孔隙率、未熔颗粒和界面污染物数值对比。从中可以看出，两种涂层的孔隙率、未熔颗粒及界面污染物差别不大，且均符合工艺要求值。相较而言，细粉制备的涂层未熔颗粒及界面污染物数值稍低。



a）粗粉底层　　b）细粉底层

图1　不同涂层金相组织背散射照片



a）粗粉底层　　b）细粉底层

图2　不同涂层金相组织二次电子照片

表2　不同涂层孔隙率、未熔颗粒和界面污染物数值（%）

项目	要求值	测试值	
		粗粉涂层	细粉涂层
孔隙率	≤3	0.22	0.29
未熔颗粒	≤10	3.36	3.11
界面污染物	≤25	2.92	1.91

3.2　涂层成分

图3为两种涂层面层成分分析图谱，从中可以看出所制备涂层主要成分为Cr、Ni、Al、Y，涂层为Cr_3C_2与NiCrAlY的混合组分，其中粗粉涂层成分分析区域由于存在较多浅灰色的NiCrAlY组分，Ni含量增加。

两种涂层底层成分分析图谱如图4所示。分析结果表明，两种粒径NiCrAlY粉末制备的底层成分基本一致，均符合粉末组成成分验收要求。

3.3　涂层厚度

从粗粉底层制备的涂层厚度分析（见图5）可以看出，粗粉底层厚度均匀性较差，底层某些部位厚度达0.122mm，超出了工艺要求值范围（0.01~0.08mm）。

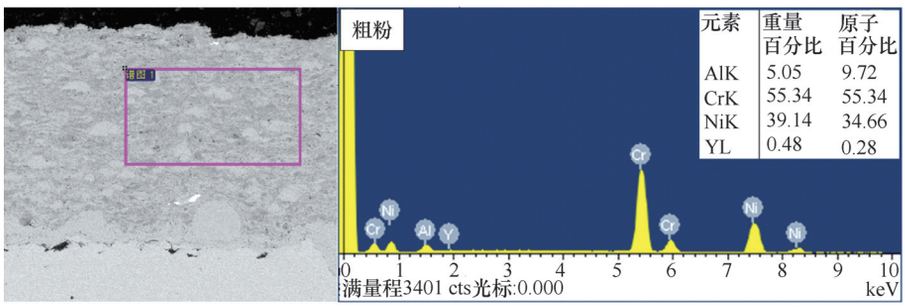
由细粉底层制备的涂层厚度分析（见图6）结果得出，细粉底层厚度均匀性较好，均在工艺要求值范围内（0.01~0.08mm）。

通过分析不同涂层底层厚度均值及偏差（见图7）可以看出，采用细粉喷涂底层的厚度均值及偏差均得到了显著改善。

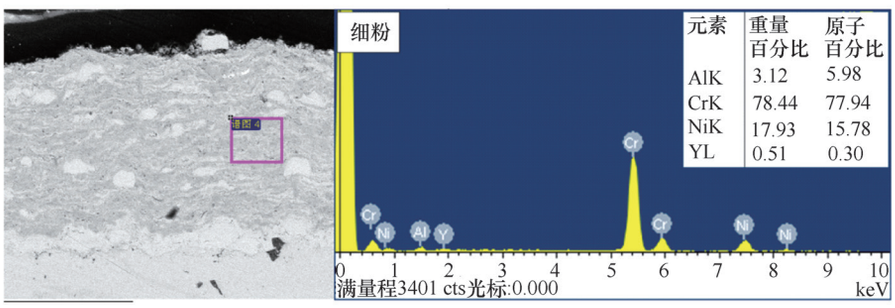
3.4　涂层显微硬度

鉴于涂层经高温使用后的硬度变化，除对两种涂层进行硬度检测对比外，增加了一组经800℃保持5h高温处理的粗粉涂层试样。表3及表4分别为两种底层、面层显微硬度检测值，表5为高温处理前后粗粉涂层显微硬度检测值。

从表3、表4中看出，两种粒径粉末制备的底层及面层显微硬度较为接近，差异不明显，细粉涂层硬度稍高。

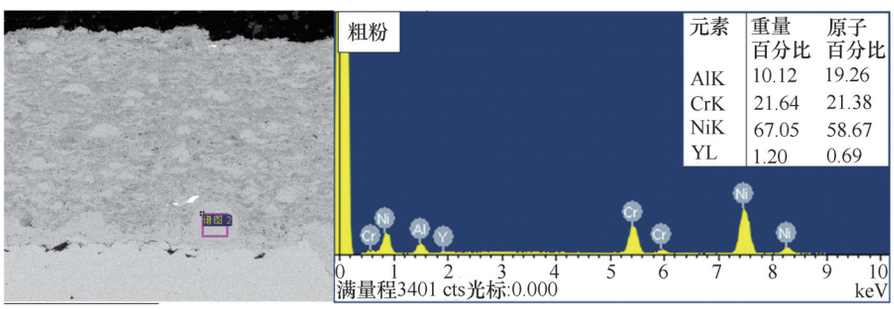


a）粗粉

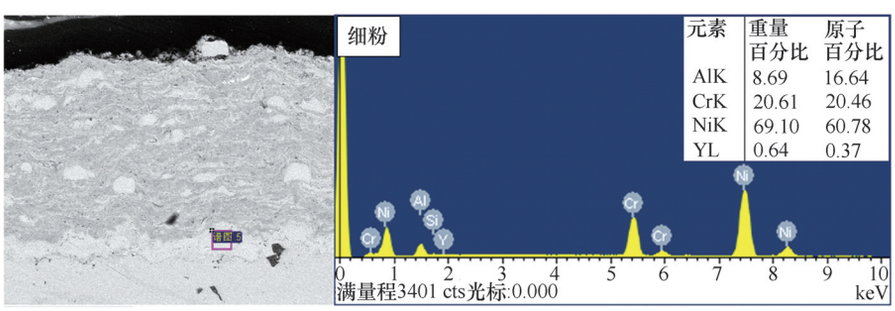


b）细粉

图3　两种涂层面层成分分析



a）粗粉



b）细粉

图4　两种涂层底层成分分析

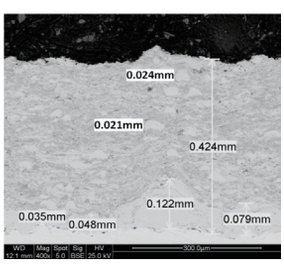


图5　粗粉涂层厚度

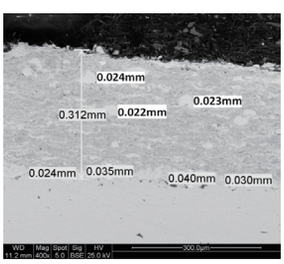


图6　细粉涂层厚度

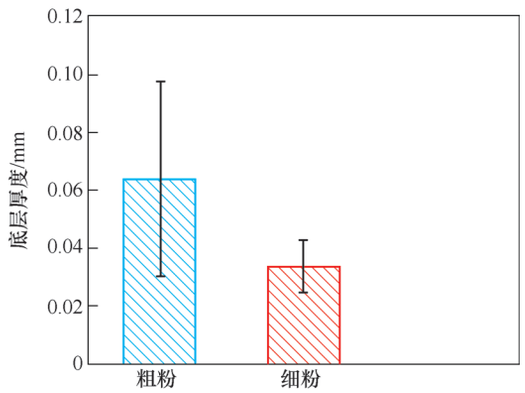


图7　两种涂层底层厚度均值及偏差

表3　两种涂层底层显微硬度　（HV）

类别	1	2	3	4	5	平均值
粗粉底层	456.6	364.7	418.4	441.1	404.8	430.1
细粉底层	492.6	470.5	388.3	456.6	428.5	447.3

表4　两种涂层面层显微硬度　（HV）

类别	1	2	3	4	5	平均
粗粉面层	650	550	626.3	624.2	539.7	598.1
细粉面层	575	555.2	605.8	684.7	659	615.9

表5　高温处理前后粗粉涂层显微硬度　（HV）

类别	状态	显微硬度					
面层	未处理	1	2	3	4	5	平均值
		650	550	626.3	624.2	539.7	607.0
		6	7	8	9	10	
		575	555.2	605.8	684.7	659	
	800℃×5h处理	1	2	3	4	5	平均值
		957.6	719.6	829.1	934.2	926.6	866.8
		6	7	8	9	10	
		780.1	949.7	926.6	875.8	768.6	
底层	未处理	1	2	3	4	5	平均值
		456.6	364.7	418.4	441.1	404.8	430.1
	800℃×5h处理	1	2	3	4	5	平均值
		598.5	559.6	619.4	657.3	593.2	605.6

由表5和图8可以看出，经热处理后无论是底层还是面层显微硬度均显著增加。

3.5　涂层结合强度

不同粒径粉末制备涂层的结合强度见表6、如图9所示，从中可以看出，两种涂层的结合强度均满足≥35MPa的技术指标要求，但底层采用细粉喷涂制备涂层的结合强度达58.7MPa，显著高于底层粗粉制备涂层结合强度（39.7MPa）。

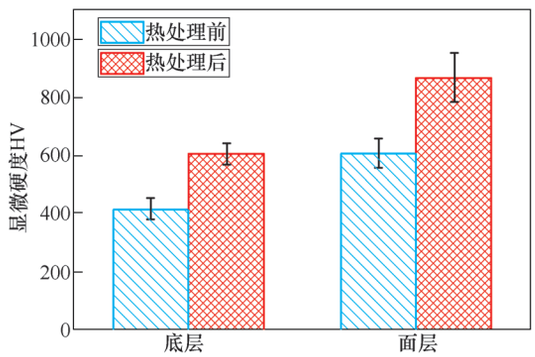


图8　热处理前后涂层硬度对比

表6　不同底层粉末制备涂层结合强度　（MPa）

类别	1	2	3	平均值
粗粉底层涂层	41.7	38.3	39.3	39.7
细粉底层涂层	58.8	60.4	57.0	58.7

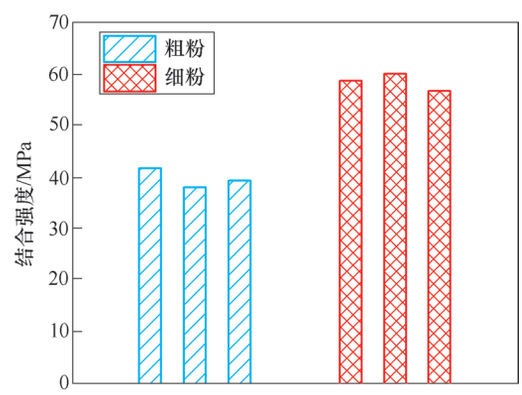


图9　底层粗、细粉制备涂层结合强度

3.6　分析讨论

在该零件中，对于涂层底层的厚度要求为10~80μm，实际喷涂加工过程中选用的NiCrAlY底层粉末牌号为Amdry962，其粒径为53~106μm，该粉末粒径较大且粒径分布范围较宽，单个粉末颗粒尺寸即可达到喷涂涂层厚度尺寸，而粒径大于106μm的粉末占到1.0%。在喷涂过程中，大于80μm粒径的粉末颗粒经喷涂后容易形成局部凸起形貌（见图1、图2中的底层凸起），而不规则的底层凸起形貌在后续喷面层时容易产生遮挡效应（见图

10），从而成为底层/面层界面处的薄弱点和裂纹源，导致在工作过程中涂层剥落。

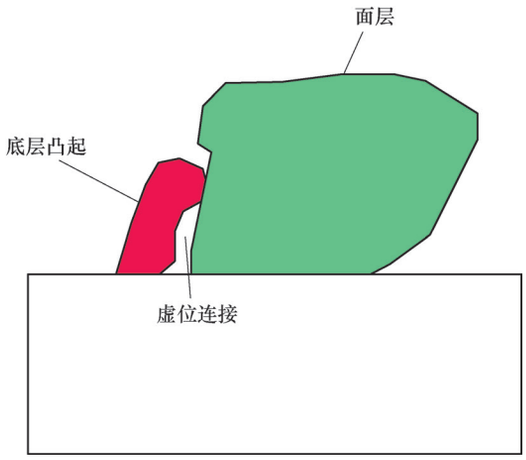


图10 底层凸起与面层之间连接

4 结束语

1）两种粒径底层粉末制备的涂层显微组织（孔隙率、未熔颗粒及界面污染物）、组成成分及显微硬度差别不大，均符合工艺要求值。相较而言，细粉制备的涂层未熔颗粒及界面污染物指标稍低，且显微硬度略高。

2）细粉底层的厚度均匀性显著优于粗粉制备底层的厚度均匀性。

3）底层采用细粉制备的涂层结合强度可达58.7MPa，显著高于粗粉制备涂层结合强度（39.7MPa）。

4）在零件后续喷涂加工中采用细粉制备涂层，零件涂层经试车后未再出现开裂、剥落问题，涂层质量稳定性显著提高。

参考文献：

[1] 杨细瑛.爆炸喷涂技术的现状及应用[J].焊接技术，2001，30（2）：8-9.

[2] 唐建新，张爱斌，陈建平，等.爆炸喷涂工艺原理分析[J].材料保护，2000，33（9）：33-34.

[3] 许磊，张春华，张松，等.爆炸喷涂研究的现状及趋势[J].金属热处理，2004，29（2）：21-25.

MW 20210315

（上接第66页）

3.3 教材内容修订

本次《焊工（高级工）》教材内容与2009年的《焊工标准》比较，变化内容包括：理论知识变为考核焊工职业功能1~9项中任意3项；操作技能：考核焊工职业功能（培训项目）1~9项中的1项必选项及其他任意2项。操作技能（培训项目）中异种钢管对接45°固定熔化极气体保护焊变为不锈钢管对接45°固定熔化极气体保护焊。另外，增加了铝及铝合金板对接仰焊手工钨极氩弧焊培训项目内容[2]。

4 教材的质量控制

在教材质量控制上，采用了“三重把关”。三重把关分别是教材大纲关、样章关和书稿关。即：教材大纲需经过专家审核通过后才可以编写样章；大纲和样章达到编写要求后，开始编写教材。教材的主审专家由来自企业、高校和出版社的专家组成；协会审稿专家主要包括焊接专业编辑、高校教师、企业从事焊工培训的工程师和焊接生产一线工程师等。经过层层审阅，教材的具体内容均对相关专业标准和行业规范进行核对。

5 结束语

新编的《焊工（高级工）》教材覆盖全部《焊工标准》（2018年版）的相关知识和技能要求内容，既无遗漏，不超出标准的难度，又遵循整体性、规范性、实用性和可操作性原则，可显著降低学员学习负担，快速提升学员职业能力，符合国家职业技能等级认定培训教材的相关要求。

参考文献：

[1] 人力资源和社会保障部.人力资源和社会保障部关于公布国家职业资格目录的通知[EB/OL].（2017-09-15）http://www.mohrss.gov.cn/gkml/zcfg/gfxwj/201709/t20170915_277385.html.

[2] 李连胜，方乃文，吕晓春，等.2018版《（焊工）国家职业技能标准》修订概况[J].焊接，2019（4）：1-4.

MW 20210302