doi:10. 3969/j. issn. 1674-7127. 2024. 02. 011

化学法去除热喷涂镍铬铝钇硅涂层的酸洗液成分和工艺研究

夏春阳[1,2,3],侯伟鹜[1,2],杨文超[1,2],章德铭[1,2]

(1. 矿冶科技集团有限公司,北京 100160;2. 北矿新材科技有限公司,北京 102206;
3. 东北大学,沈阳 110819)

摘要:为实现重要热端零件的循环再加工利用,以 DZ125 合金型高压涡轮外环块和叶片作为研究对象,针对涂层的物理化学特性以及基体的结合状态,研究化学法去除试片级热喷涂镍铬铝钇硅(NiCrAlYSi)涂层的去除效果,进行酸洗液成分和工艺研究,得到适宜的涂层去除工艺方法。对整个工艺过程中的界面状态和对基体组织的影响进行检测和评价,发现此种方法在去除了涂层后,酸洗液对于基材性能没有造成损伤,适合作为此类高温合金上 NiCrAlYSi 涂层去除的酸洗液。

关键词:高压涡轮外环;NiCrAlYSi 涂层;涂层去除;酸洗液
中图分类号:TG174. 442　　**文献标志码**:A　　**文章编号**:1674-7127(2024)02-0106-07

Study on Composition and Process of Pickling Liquid for Chemical Removal of Thermal Sprayed NiCrAlYSi Coating

XIA Chunyang[1,2,3], HOU Weiao[1,2], YANG Wenchao[1,2], ZHANG Deming[1,2]

(1. BGRIMM Technology Group, Beijing 100160, China;
2. BGRIMM Advanced Materials Science & Technology Co., Ltd., Beijing 102206, China;
3. Northeastern University, Shenyang 110819, China)

Abstract: In order to realize the recycling and reprocessing of important hot-end parts, this study takes the DZ125 alloy high-pressure turbine outer ring block and blades as the research objects. Based on the physical and chemical properties of the coating and the bonding state of the substrate, the chemical method to remove the specimen-level thermal sprayed NiCrAlYSi coating was studied. In order to determine the removal effect of the coating, research on the composition and process of the pickling solution was conducted to obtain a suitable coating removal process. The interface state and the impact on the matrix structure during the entire process were detected and evaluated. It is found that after the coating is removed by this method, the pickling solution does not cause damage to the properties of the substrate and is suitable for use as a coating on such high-temperature alloys.

Key words: high-pressure turbine outer ring; NiCrAlYSi coating; coating removal; pickling liquid

收稿日期:2024-06-17
第一作者:夏春阳(1992-),男,硕士,工程师。E-mail:xiacy521@126. com

0　引言

近年来，热喷涂作为表面强化的一种重要手段，其涂层制品既能够大幅度提高零件的热耐蚀性、耐磨性能以及使用效率，又不会影响基体的力学和热学性能，现今已被广泛用于燃气轮机、航空航天的涡喷涡扇发动机等重要的热端部件。目前航空、航天领域用零部件，面对复杂的使用工况，对于基体材料种类选择和工件尺寸加工精度的要求也十分严苛，带来了高昂的零件生产成本。无论是在首次加工过程中因涂层的均匀程度、厚度等指标未达到标准要求，还是在后续使用过程中涂层完成了服役、最终失效，都会造成零件的报废失效，产生高额的使用成本。因此，如何在不损伤零件基材的基础上，完成不合格或失效涂层的涂层去除，实现重要热端零件的循环再加工利用的目的，具备举足轻重的社会意义和经济价值。

目前，针对涂层去除的工艺，种类繁多，主要可以分为化学去除和物理去除两大类。其中，化学去除法主要是利用涂层和基材在去除液中化学活性的不同而使涂层和基材剥离的方法，其优势在于可以避免物理去除方法中如喷砂等磨损喷砂技术造成基材的损耗，避免零件壁尺寸减薄。通过将部件浸入腐蚀性溶液，可以调控腐蚀速率，更好地控制黏合层断裂过程，更适合尺寸精度高、结构复杂的零件的涂层去除，达到去除涂层且不伤基材的效果[1-2]。

国外开展了许多化学法去除损伤涂层的研究，尤其是应用于飞机蒙皮环氧、聚氨酯涂层材料以及航空发动机 MCrAlY 涂层、镀镍层等耐高温涂层材料的各种类型(酸、中性、碱、有机和无机)涂层去除产品的研发。以国外公司 GE 为例，其开发了专有的腐蚀去除工艺用于发动机维修后返回的高压涡轮外环和叶片[3-4]。国内对于此类涂层如 MCrAlY 涂层、镀镍涂层等的去除溶液体系研究开展得较晚。其中，MCrAlY 涂层作为一类典型的广泛应用涂层体系，可以提高高温合金叶片等热端部件的抗高温氧化、抗热腐蚀性能，也可作为叶片热障涂层的黏结层来延长发动机的使用寿命，其去除方案受到了广泛关注[5-6]。目前，对于基体为镍基合金时 MCrAlY 涂层的去除方案，国内发动机制造企业已经开展了多种技术方案，但目前针对可工程化应用的方案，仍然没有合适的工艺[7-12]。

因此，本文优先选用化学去除法，针对镍铬铝钇硅(NiCrAlYSi)涂层，通过调整溶液体系设计、优化化学去除效果，来实现高效的热喷涂 NiCrAlYSi 涂层的去除效率，并通过酸洗后的涂层去除后的效果，对不同体系的酸洗液体系的可靠性和效果做出评价和后续建议。

1　试验材料、设备及样片喷涂加工

1.1　试验原材料

试验基体材料为 DZ125 合金。基材加工成圆形试片，尺寸：直径 25 mm、厚度 3 mm，表面粗糙度小于 1.6 μm。等离子喷涂的原料粉采用美科 NiCrAlYSi 粉末。

选用化学法去除热喷涂 NiCrAlYSi 过渡层，其主要部件是针对航空发动机的涡轮外环和叶片组件，因此本次选用的基体材料与其材质完全一致，DZ125 合金主要元素的质量分数为(%)：Ni 余量、Cr 8.4～9.4、Al 4.8～5.4、Co 9.5～10.5、Mo 1.5～2.5、Ti 0.7～1.2、W 4.5～7.5、C 0.07～0.12、Fe ≤0.3、Ta 3.5～4.1、Hf 1.2～1.8。

NiCrAlYSi 涂层名义成分为(%)：Ni 余量、Cr 18～20、Al 8～10、Y 0.2～0.5、Si 1.2～1.8。

试验用酸洗液的原料如硝酸(68%)、盐酸(33%)、硫酸(98%)、氢氟酸(40%)、磷酸(85%)、铬酐、冰醋酸等辅助用品均为市售化学纯及以上等级的试剂。

1.2　试验设备

主要设备如表 1 所示。

表 1　试验设备

Table 1　Equipments used in the experiment

设备名称	设备精度	生产单位
BN2120 型精密电子天平	精度 0.000 1 g	上海民桥精密科学仪器有限公司
GA-1000 型压入式全自动喷砂机	粒度 140～270 目白刚玉砂	德国
PG-1A 型金相试样抛光机	—	上海金相机械设备有限公司
su5000 型扫描电子显微镜	精度 0.1 μm	日本株式会社

1.3　试片喷涂加工

对准备好的 DZ125 试片进行 NiCrAlYSi 涂层喷涂加工，喷涂设备为 Multicoat APS/HVOF 集成喷涂系统。

制样方法：将加工好的 30 个 DZ125 合金圆形试片进行酒精清洗，静置干燥。取出 3 个 DZ125 合

金圆形试片进行表面喷涂加工。喷涂开始前，首先对试片进行吹砂表面粗化处理，以增大试片与涂层间的结合强度，并用压缩空气将吹砂面吹干净，确保试片表面洁净，无油污与砂粒残留，然后对喷涂原料粉进行烘干处理，温度为 120 ℃，烘干时间 1 h。同时，利用工装夹持好表面粗化后的 3 个 DZ125 合金圆形试片，并利用等离子火焰对试片进行充分的预热处理，进一步降低试片表面污染和界面应力集中。

采用等离子喷涂加工 NiCrAlYSi 涂层，工艺参数：电流 450 A、电压 86 V、功率 36 kW、氢气 7 slpm、氩气 45 slpm、喷距 130 mm。所有涂层厚度控制为 30～50 μm，喷涂完成后取下试片开展后续研究。

2 化学法去除涂层的酸洗液成分和工艺研究

2.1 化学法去除涂层的原理

NiCrAlYSi 涂层不仅具有优异的抗高温腐蚀的能力，而且具有良好的抗氧化性等综合性能。在制备过程中通过调节涂层的成分及含量，也可以通过采用不同的制备工艺调整涂层的微观结构，决定抗氧化性的主要是 Al 元素的含量。

化学法酸洗法可以实现 NiCrAlYSi 涂层的有效去除。如图 1 所示，首先需要对 NiCrAlYSi 涂层进行喷砂预处理，来去除氧化铝膜。通过强酸与金属相之前的腐蚀作用，通过控制浓度、温度等因素，进一步探究涂层的退除工艺。继续探究当再次涂覆涂层后，基材在结合强度等性能方向上的影响，从而评价此种化学法去除对基材的性能影响。

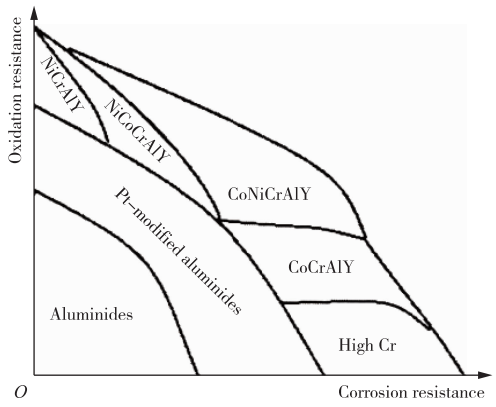


图 1 涂层设计成分与抗氧化及抗热腐蚀关系

Fig. 1 Relationship between coating design composition and oxidation resistance and thermal corrosion resistance

2.2 热喷涂涂层去除的酸洗液成分研究

因 NiCrAlYSi 涂层与镍基高温合金基材的结合强度高，既要保证涂层去除效果的有效性，又要保证高温合金基材不受酸洗液的腐蚀，这对酸洗液体系的成分和各组分间的浓度提出了较高的要求。

本文针对热喷涂 NiCrAlYSi 涂层的酸洗去除效果，分别从酸洗液主液成分选择、辅液添加剂的成分选择和酸洗液成分体系配方三个层面进行研究，通过研究整体槽液对于基体和涂层的反应情况，来进一步形成涂层去除的可行性工艺方案。具体流程设计如图 2 所示。

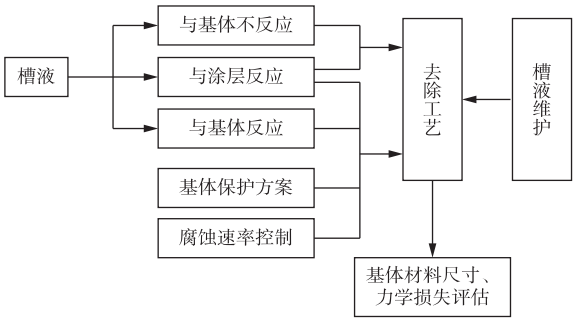


图 2 酸洗试验流程图

Fig. 2 Flow chart of pickling test

2.2.1 酸洗液主液成分选择和操作

因为基体材料是主要成分为 Ni-Co-Cr-Al 高温合金，常规低浓度酸与基材易发生金属腐蚀，因此为达到对基材的防护效果，考虑将高浓度酸性溶液用作酸洗液的主液。其原理是当其与基材进行浸润的过程中产生钝化作用，可以在合金基材表面完全形成一层钝化膜，对基材起到保护作用。本文综合考虑酸洗液种类和酸洗液浓度，设计三种不同的酸洗液体系，分别选择如下三组体系的酸洗液主液：1)200 g/L 盐酸溶液；2)50%(体积分数)硝酸溶液；3)50%(体积分数)硫酸溶液。

操作流程：将上述 3 种溶液分别置于 3 个完全相同的 PVC 槽的格槽中(图 3)，在室温 20～25 ℃下，将备用的 3 个 DZ125 合金圆形试片取出，分别编号 1#、2#、3#，采用 BN2120 型精密电子天平分别对 3 个试样进行称重计量。再将 3 个样品分别浸泡到上述 3 种溶液中，浸泡时间为 24 h。观察浸泡过程中，3 个 PVC 槽中试片的腐蚀情况，并分别进行过程现象记录。待浸泡时间达到 24 h 后，将 3 个试片从 PVC 槽中取出，用去离子水彻底清洗，并用碱性溶液中和后再次清洗、烘干，并进行称重、计量。并对上述 3 组试片表面进行观察。

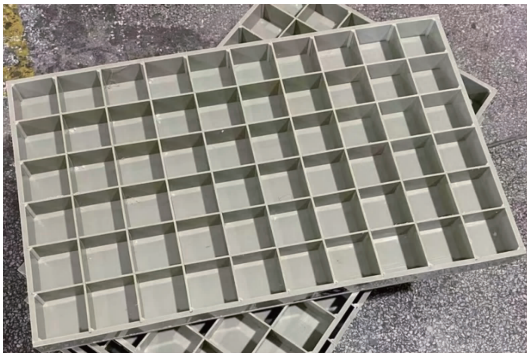


图 3　PVC 酸洗槽

Fig. 3　Diagram of PVC pickling tank

研究发现，上述酸洗液对基材的影响主要分以下两种情况：

对于 200 g/L 盐酸溶液及 50%（体积分数）硫酸溶液这两类酸洗溶液，浸泡过程中发现 1＃和 3＃试片表面均有少量气泡产生，且 1＃样品表面产生的气泡数量明显要多于 3＃试片。试片均存在减重，失重量分别为 0.31 g 和 0.11 g。另外，对两个试片清洗过的表面进行肉眼观察，可以看出表面有明显的腐蚀痕迹，且腐蚀程度上看，1＃样品明显比 3＃样品严重。因此，这两种酸洗液对于 DZ125 的合金基材表面均造成了部分腐蚀，并不适合作为酸洗液的主要成分。

对于 50%（体积分数）硝酸溶液，酸洗过程中，除开始阶段有微小气泡出现外，之后再无气泡产生。同时，试片酸洗前后失重量仅为 0.002 g，而且试片表面几乎没有腐蚀的痕迹。综上判断，此种酸洗液在 DZ125 的合金基材表面发生了钝化作用，在裸露的基材上面形成了一层完整的钝化膜，阻碍腐蚀的进一步发生，适合作为酸洗液的主酸成分。

然后将带有 NiCrAlYSi 涂层的试片，按照同样的方式进行相同的试验。结果发现，试片的总体失重量仅为 0.004 g，其损失量小。且基材未发生腐蚀，涂层的去除程度较弱，几乎无变化。原因是涂层中存在大量 Ni、Cr、Al 金属元素，可能与硝酸接触后发生局部钝化，降低了涂层与主酸洗液之间的腐蚀速率，导致涂层去除效果不明显。

综上所述，选择硝酸溶液作为酸洗液的主液成分。接下来再对酸洗液体系的辅液成分进行设计和研究。

2.2.2　辅液添加剂的成分选择和操作

为保证酸洗液体系对 NiCrAlY 涂层去除的高效性，在确定了酸洗液主液基础上，通过向主酸中加入合适的缓蚀剂。通过前期的基础调研和试验探索，初步制定以下三个酸洗液辅助液：①氢氟酸＋铬酐、②冰醋酸、③盐酸＋磷酸。

操作流程：取三份等量硝酸溶液，分别放置在装有抽风装置的 PVC 槽中。分别在三个槽液中加入等浓度和体积的氢氟酸＋铬酐、冰醋酸和盐酸＋磷酸辅助液，然后将 3 个带有 NiCrAlYSi 涂层的试片，浸泡 24 h、取出清洗、称量、表面观察，并采用金相显微镜对基材和涂层的腐蚀情况进行观察分析。

结果发现，以上 3 个酸洗槽液配方均可与涂层反应，其中槽液①基体有明显的晶间腐蚀和点蚀，涂层腐蚀速率较快；槽液②对基材未见腐蚀现象，与涂层反应有明显的气体析出现象，槽液③基体出现点蚀。因此，说明上述三种酸洗槽液配方，均加速了原有单一硝酸主液对 NiCrAlYSi 涂层的腐蚀速度，但由于添加槽液①和③辅助液造成了基材不同类型的腐蚀，因此，选择采用槽液②进行下一步涂层去除试验。

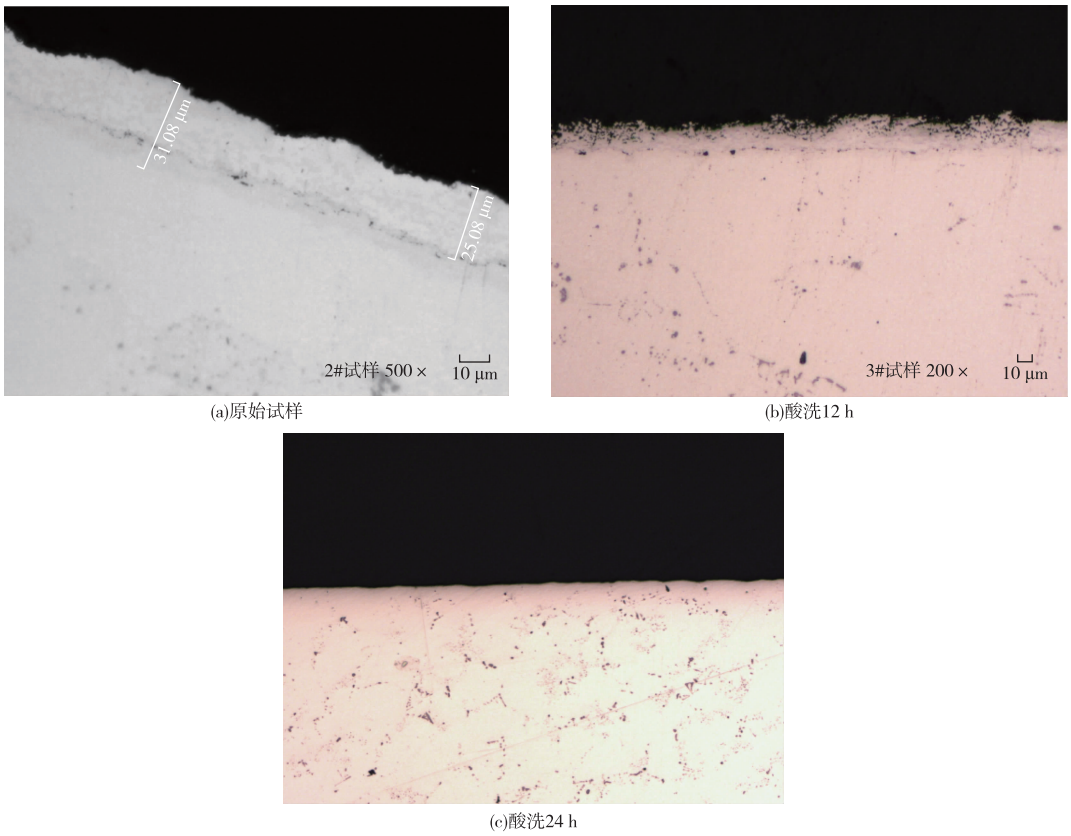
2.2.3　酸洗槽液②的酸洗效果研究

采用槽液②对 NiCrAlYSi 涂层的去除效果进行测试。包括对带涂层的试样进行酸洗完全去除涂层和酸洗去除部分涂层的试验。

试验过程：将同样的 1 片带涂层的试片，均匀切割成三份，取出 2 份置于槽液②中，在试片浸泡 12 h 后取出其中 1 份，在 24 h 后取出最后一份。并对试片进行清洗，干燥，磨抛和金相样制作。金相观察结果表明，在整个酸洗过程中，涂层从外表面开始发生均匀的化学溶解，至完全去除干净，原基材涂层界面未出现腐蚀迹象，如图 4 所示，槽液②对于 NiCrAlYSi 涂层具备良好的去除能力。

然后，用槽液②对不带涂层的基材试样进行酸洗试验。对试样局部用保护胶进行保护，酸洗 24 h 后进行金相检查，对比基材与槽液接触和非接触区域的微观形貌，微观形貌未见差异，如图 5 所示。另外，为了进一步确认槽液②的可靠性，将酸洗时间从 24 h 延长至 100 h。对酸洗前后试样进行称重，酸洗 100 h 后，试样未产生失重和增重。因此可得，槽液②对基材无腐蚀作用。

综上，槽液②既对基材无腐蚀作用，又同时对于 NiCrAlYSi 涂层具备良好的去除作用，适合作为热喷涂 NiCrAlYSi 涂层去除的酸洗液体系。

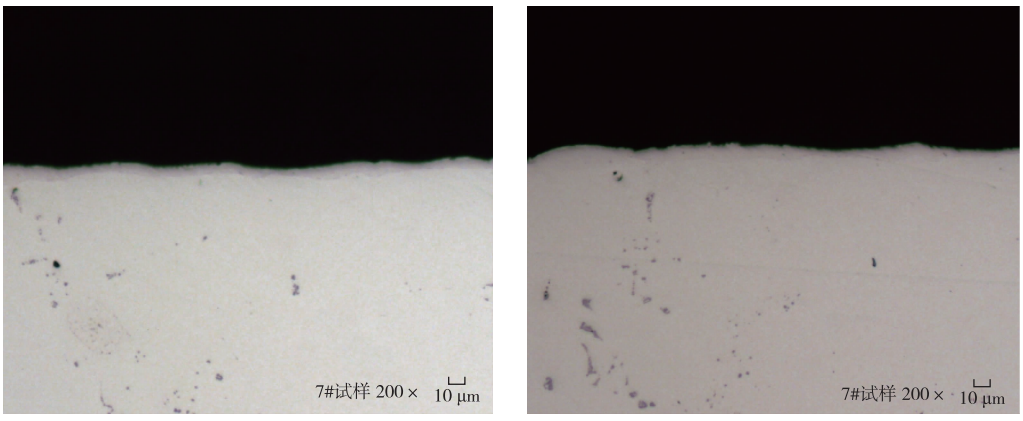


(a)原始试样 (b)酸洗12 h

(c)酸洗24 h

图 4 槽液②对于 NiCrAlYSi 涂层酸洗不同时间后的截面图

Fig. 4 Cross-section diagrams of NiCrAlYSi coating after pickling in bath solution ② for different time



(a)基体酸洗部分 (b)基体非酸洗部分B

图 5 不带涂层试样酸洗 24 h 后的截面

Fig. 5 Cross-section of uncoated sample after pickling for 24 hours

2.3 酸洗液体系配方工艺优化

通过正交试验对槽液②主液和辅助液的成分配比和环境温度进行探究。主液选用硝酸溶液，当其浓度较高时，会对金属基材产生钝化作用，虽然会减缓基材的腐蚀，对基材起到保护作用，但另一方面也会降低涂层的去除效率，因此硝酸浓度是正交试验的第一个因素点。而同样，冰醋酸辅助液的加入，对于酸洗液整体起到了加速活化的作用，同样对基材的腐蚀和涂层去除的效果均有影响，因此将冰醋酸的浓度作为正交试验的第二个因素点。最后，温度是影响腐蚀速率的一个关键因素，随着温度的提高，往往会加快腐蚀反应的进程，因此将温度作为正交

试验的第三个因素。本次试验的酸洗时间均为 24 h。

综上所述，通过三因素三水平正交试验，计算单位时间单位面积下的涂层腐蚀速率，得出涂层去除效率较高的最佳配方。正交试验参数及结果如表 2 所示。

表 2　酸洗液体系正交试验参数

Table 2　Orthogonal test parameters of pickling liquid system

试验号	硝酸/($g \cdot L^{-1}$)	冰醋酸/($g \cdot L^{-1}$)	温度/℃	涂层去除速率/($mm \cdot 4\ h^{-1}$)	基体反应速率/($mm \cdot 4\ h^{-1}$)
1	100	2	15	0.009	0.021
2	100	4	20	0.012	0.032
3	100	6	25	0.015	0.051
4	200	4	15	0.010	0.001
5	200	6	20	0.008	0.001
6	200	2	25	0.007	0.002
7	300	6	15	0.001	0.001
8	300	2	20	0.003	0.001
9	300	4	25	0.004	0.001

根据表 2 结果可以得出：

1)从酸洗液对 NiCrAlY 涂层的整体去除效率角度考虑，第三组的腐蚀速率最快，其涂层去除速度效率达到了 0.015 mm/4 h，其涂层去除的效果较好；

2)从酸洗液对基材的腐蚀速率来看，1～3 组的基材腐蚀速率较快，最大值第 3 组达到了 0.051 mm/4 h，表明基材受到了严重的腐蚀。而 4～9 组中，除了第 6 组腐蚀速度稍快外，其余 5 组的腐蚀速度较慢且相当，表明其对于基材的防护效果较好。

综上考虑上述两点因素，并考虑酸洗液的成本，最终选择的涂层最佳去除参数组合为第 4 组，即硝酸浓度 200 g/L、冰醋酸浓度 4 g/L、温度 15 ℃，同时酸洗时间为 24 h。并采用此组工艺进行后续验证。

2.4　涂层去除效果可靠性评价

为了验证本酸洗液是否会对涂层去除后基材表面的基本性能造成损伤，继续对涂层去除后的试片重新进行喷涂试验。取 3 个涂层去除后的试片和 3 个新试片，将试片再次进行喷砂处理，采用同样的喷涂工艺进行 NiCrAlYSi 涂层喷涂加工至同样的厚度，发现其外观与初始的试片均一性和颜色基本相同，并对其涂层的结合强度进行了拉伸测试，结果如表 3 所示，平均结合强度达到了 50 MPa 左右，再次证明其性能没有受到影响。本酸洗液对于基材性能没有造成损伤，适合作为此类高温合金上 NiCrAlYSi 涂层去除的酸洗液。

表 3　初次喷涂和涂层去除后再次喷涂的 NiCrAlYSi 涂层的结合强度

Table 3　Bonding strength of NiCrAlYSi coating after initial spraying and coating removal

试样编号	初次喷涂/MPa	涂层去除后再次喷涂/MPa
1	49	49
2	50	49
3	50	51

3　结论

采用化学酸洗法，以及正交试验对酸洗液其他条件进行工艺测试和优化，研发了用于 DZ125 合金表面去除等离子喷涂 NiCrAlYSi 涂层的酸洗液配方。实现了酸洗液既保证了涂层去除效果的高效性，又保证了基材不受酸洗液的腐蚀。最佳工艺参数为：硝酸浓度 200 g/L、冰醋酸浓度 4 g/L、温度 15 ℃、酸洗时间 24 h。性能对比测试结果表明，去除涂层后的基体上再喷涂的涂层在外观和结合力上与首次喷涂的涂层无明显差异。

参考文献

[1] 李长久. 热喷涂技术应用及研究进展与挑战[J]. 热喷涂技术，2018，10(4)：1-22.
LI C J. Thermal spray technology application，research progress and challenges[J]. Thermal Spray Technology，2018，10(4)：1-22.

[2] 李晗晔，袁福河，孙慧艳，等. 航空发动机涂层去除技术的研究现状[J]. 材料保护，2015，48(12)：37-41，8.
LI H Y，YUAN F H，SUN H Y，et al. Research status of aero-engine coating removal technology[J]. Materials Protection，2015，48(12)：37-41，8.

[3] CONNER J A，WEIMER M J. Coating rejuvenation：new repair technology for high pressure turbine blades[C]//ASME Turbo Expo 2000：Power for Land，Sea，and Air，2000.

[4] HAYES R H，MILLER M O，THOMPSON W R. Removing turbine component coatings without damage[J]. Power Engineering，2009，113(2)：56，58，60.

[5] 刘志强，梁莹，李晗晔，等. GH4169 高温合金上等离子喷涂 NiAl 涂层的去除[J]. 电镀与涂饰，2019，38(16)：870-874.
LIU Z Q，LIANG Y，LI H Y，et al. Removal of plasma sprayed NiAl coating on GH4169 superalloy[J]. Electroplating & Finishing，2019，38(16)：870-874.

[6] 裴丽艳. 高涡叶片表面 NiCrAlYSi 涂层工艺研究[J]. 中国新技术新产品，2021(8)：80-82.
PEI L Y. Research on NiCrAlYSi coating technology

on the surface of high-vortex blades[J]. China New Technologies and New Products,2021(8):80-82.

[7] 张彩云. 铂铝涂层的退除及再涂覆涂层的高温氧化性能研究[D]. 阜新:辽宁工程技术大学,2021.
ZHANG C Y. Research on the high-temperature oxidation properties of platinum aluminum coating removal and re-coating[D]. Fuxin: Liaoning Technical University, 2021.

[8] 冀红艳. MCrAlY涂层的电化学法退除与再涂覆后氧化性能研究[D]. 沈阳:东北大学,2020.
JI H Y. Study on the oxidation performance of MCrAlY coating after electrochemical removal and re-coating[D]. Shenyang: Northeastern University, 2020.

[9] 陈云鹏,程宗辉,蔡绪康,等. 激光清洗TC4钛合金表面吸波涂层工艺优化研究[J]. 航空精密制造技术,2024,60(2):5-9.
CHEN Y P, CHENG Z H, CAI X K, et al. Research on laser cleaning process optimization of TC4 titanium alloy surface absorbing coating[J]. Aviation Precision Manufacturing Technology, 2024, 60(2): 5-9.

[10] 李俊辰,郭双全,冯云彪,等. 航空发动机AHB封严涂层高压水射流绿色去除技术研究[J]. 航空维修与工程,2020(10):38-40.
LI J C, GUO S Q, FENG Y B, et al. Research on high-pressure water jet green removal technology of aircraft engine AHB seal coating[J]. Aviation Maintenance and Engineering, 2020(10): 38-40.

[11] 孙畅,李庆春,黄义辉,等. 化学法去除叶片表面涂层附着物研究[J]. 科学技术创新,2020(15):174-175.
SUN C, LI Q C, HUANG Y H, et al. Research on chemical removal of surface coating attachments on leaves[J]. Science and Technology Innovation, 2020(15): 174-175.

[12] 贺亚勇,肖细军,翟甲友,等. 一种电化学法去除超音速火焰喷涂WC涂层工艺研究[J]. 焊接技术,2022,51(9):70-72.
HE Y Y, XIAO X J, ZHAI J Y, et al. Research on an electrochemical method for removing supersonic flame sprayed WC coating[J]. Welding Technology, 2022, 51(9): 70-72.

(上接第105页)

[13] 马建龙,李国禄,王海斗,等. 等离子喷涂纳米 Al_2O_3-TiO_2 复合陶瓷涂层的研究现状[J]. 材料导报,2013,27(9):137-141.
MA J L, LI G L, WANG H D, et al. Research status of plasma spraying nano-Al_2O_3-TiO_2 composite ceramic coatings[J]. Materials Reports, 2013, 27(9): 137-141.

[14] HANSOL K, HYUNGKWON P, CHANGHEE L. Roles of particle size distribution in bimodal feedstocks on the deposition behavior and film properties in vacuum kinetic spraying[J]. Journal of Thermal Spray Technology, 2018, 27: 857-869.

[15] WANG Y, GUO H B, GONG S K. Thermal shock resistance and mechanical properties of $La_2Ce_2O_7$ thermal barrier coatings with segmented structure[J]. Ceramics International, 2009, 35: 2639-2644.

[16] 刘慧敏,王洪斌,杨滨,等. 原位TiC颗粒对喷射成形铝合金组织的影响[J]. 北京科技大学学报,2003,25(4):337-340.
LIU H M, WANG H B, YANG B, et al. Effect of in-situ TiC particles on the structure of spray-formed aluminum alloy[J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2003, 25(4): 337-340.

[17] 叶锡生,沙健,焦正宽,等. 板钛矿纳米 TiO_2 微晶的热分析特性研究[J]. 无机材料学报,1997,12(4):604-608.
YE X S, SHA J, JIAO Z K, et al. Study on thermal analysis behavior of nanocrystalline brookite TiO_2[J]. Journal of Inorganic Materials, 1997, 12(4): 604-608.

[18] YANG Q Q, SENDA T, OHMORI A. Effect of carbide grain size on microstructure and sliding wear behavior of HVOF-sprayed WC-12% Co coatings[J]. Wear, 2003, 254(1/2): 23-34.

[19] HU T, MA K K, TOPPING T, et al. Precipitation phenomena in an ultrafine-grained Al alloy[J]. Acta Materialia, 2013, 61(6): 2163-2178.

[20] GHASEMI R, VAKILIFARD H. Plasma-sprayed nanostructured YSZ thermal barrier coatings: thermal insulation capability and adhesion strength [J]. Ceramics International, 2017, 43(12): 8556-8563.

[21] WEN D, LI S J, HOU G L, et al. Comparative study on wear behavior of plasma sprayed Al_2O_3 coatings sliding against different counterparts [J]. Ceramics International, 2017, 43(9): 6976-6986.