

固体渗铝榫头防护工艺研究

丁志敏 彭国平 文钰 汪洋

【摘要】 榫头防护一直是渗铝工艺中的难点，热塑性型有机粘结剂A+陶瓷性粉末C配制的涂料防护效率较低。为提高榫头防护涂料的防护效率，缩短防护周期，采用了在原配方中加入金属粉末N和改用热固型粘结剂B的试验方案。通过对比试验发现，加入金属粉末N能显著提高涂料的防护效果，涂覆层数可以由7~8层减少至2层，防护周期缩短明显；而热固型粘结剂B，因黏度大，导致涂覆操作困难，涂层容易产生气泡，影响防护层致密性。最终选用了有机粘结剂A+陶瓷性粉末C+金属粉末N方案。

关键词： 渗铝；榫头防护；粘结剂；金属粉

随着现代航空工业发展，燃气涡轮工作温度也越来越高，为满足燃气涡轮高温、高转速、强腐蚀环境下的使用需求，燃气涡轮叶片广泛采用渗铝工艺。固体渗铝工艺由于涂层质量高，工艺相对简单被广泛采用，但是固体渗铝是包埋式渗铝，叶片榫头承受高应力，榫齿渗铝后会带来缺口敏感，易产生裂纹，因此需进行防护。高效的榫头防护工艺一直是渗铝工作者追寻的目标，然而榫头防护涂层配方一直被各大航空企业视为机密，在公开文献上未见发表。

近年来随国内直升机需求快速增加，我公司××机型生产任务快速增加，××固体渗铝叶片明显增多，然而目前使用的榫头防护工艺，需要每天涂覆1层防护涂料，共涂覆7~8层才能达到要求。该涂料防渗能力差、防护

周期较长，且加热易流动，遮挡渗铝面，严重影响了叶片渗铝合格率和交付进度。为提高固体渗铝榫头防护涂料的防护效率和渗铝质量，开展了固体渗铝榫头防护工艺研究。

1. 试验方案

原有榫头防护涂料为有机粘结剂A+陶瓷性粉末C，按一定比例配制成料浆，然后将料浆涂覆在榫头表面。陶瓷性粉末C具有熔点高、呈中性，且化学稳定性好的优点，是一种很好的防护材料^[4]。但采用陶瓷性粉末C调制的涂料，主要是阻止扩散的被动防御，随渗铝温度的升高，防护涂层的有效防护厚度显著提高。

为提高涂料防护效率，采用加入牺牲元素N的方案。在涂料中加入牺牲元素N，涂覆后在榫头表面形成连续的N粉包裹层，

使其首先与渗铝气氛中的Al原子反应，形成稳定的金属间化合物，从而避免Al快速向内渗入，由被动式防御改为主动防御。

有机粘结剂A在涂料中起黏接作用，但有机粘结剂A是一种热塑性材料，当有机粘结剂A比例较大时，涂料加热后会变软甚至流到渗铝面，可能导致渗铝面局部没有渗铝层。然而有机粘结剂B具有热固性，加热过程中不会变软流动，具有一定的优势。

改进方案与原有方法对比如表1所示。改进方案1是在现有工艺的基础上添加金属粉末N，考察金属粉末N的防护效果；改进方案2是在改进方案1的基础上将有机粘结剂A改为有机粘结剂B，考察热固性有机粘结剂的作用。

2. 试验方法

为保证试验的准确性，试料

状态和试验过程均保持与正式生产一致。试验材料均采用未渗铝的且加工完榫头的××废叶片，材料为镍基高温合金。整个过程均与正式零件同炉进行渗铝，主要加工流程如下：

榫头涂覆防护层→整体加热渗铝→清理榫头防护层→零件100%渗铝层质量检查。

榫头防护具体实施过程如表2所示，其余加工步骤均于正式零件同炉进行。

3. 试验结果

一种好的防护涂料应该具有操作简单、防渗有效、清理容易、不蚀基体、不污染渗剂、对渗铝面无影响且容易返修的特点。试验完成后重点考察了改进涂料的以下几个方面：操作难易程度、榫头表面有无漏渗、渗铝后涂料清理是否容易、榫头表面是否腐蚀、渗剂是否污染以及涂层返修去除是否容易，详细对比结果如表3所示。

试验结果表明，与原工艺相比，改进方案1和改进方案2，涂覆2次，都能满足榫头防护要求，对渗铝面无遮挡、基体无腐蚀、清理容易、对渗剂无污染。但改进方案1和改进方案2相比，热固性粘结剂对比热塑性粘结剂并无明显优势，反而因热固性粘结剂的黏度大易产生气孔的特点，大大增加了涂覆操作难度。

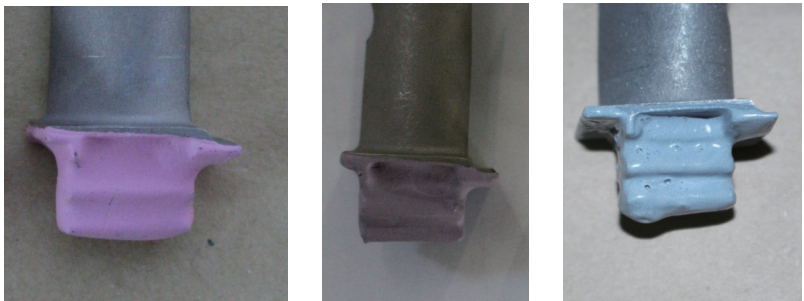
因此改进方案1更具有优势。对改进方案1试验叶片进行了渗铝层质量检查，以及金相和能谱分析。渗铝层质量检查方法是将叶片在空气中整体加热氧化，由于渗铝部位氧化后，形成

表1 改进方案与原有方案对比

项目	涂料配比	涂覆层数
原有方案	有机粘结剂A+陶瓷性粉末C	××系列叶片涂覆3层
改进方案1	有机粘结剂A+陶瓷性粉末C+金属粉末N	××系列叶片涂覆2层
改进方案2	有机粘结剂B+陶瓷性粉末C+金属粉末N	××系列叶片涂覆2层

表2 榫头防护具体实施过程

实施过程	原有方案	改进方案1	改进方案2
涂料配比	有机粘结剂A:陶瓷性粉末C=1:1（体积比）	有机粘结剂A:陶瓷性粉末C:金属粉末N=2:1:1（体积比）	有机粘结剂B:陶瓷性粉末C:金属粉末N=2:1:1（体积比）
涂覆过程	将榫头浸入涂料，涂覆3层，共4件，如图1a所示	将榫头浸入涂料，涂覆2层，共15件，如图1b所示	将榫头浸入涂料，涂覆2层，共15件，如图1c所示
干燥过程	涂第1遍干燥，24h后涂第2遍、干燥24h后涂覆第3遍，然后干燥24h进炉渗铝	涂第1遍干燥，6h后涂第2遍、干燥12h后涂覆第3遍，然后干燥24h进炉渗铝	涂第1遍干燥6h后涂第2遍、干燥12h后涂覆第3遍，然后干燥24h进炉渗铝



(a) 原有方案涂覆3层效果 (b) 改进方案1涂覆2层效果 (c) 改进方案2涂覆2层效果

图 1

表3 试验结果对比

检验项目	原有方案	改进方案1	改进方案2
操作是否简单方便	简单	简单，与原有方案相当	操作难，涂料黏度大，且易产生气孔
榫头表面有无漏渗	100%榫头表面有渗层	100%榫头表面无渗层	100%榫头表面无渗层
渗铝后清理是否容易	容易	容易，与原有方案相当	容易，与原有方案相当
渗剂是否有污染	无	无，沉积出炉时保护涂料形成一个完整的壳，如图2a所示	无，沉积出炉时保护涂料形成一个完整的壳
榫头表面是否有腐蚀	无	无，如图2b所示	无
对渗铝面有无影响	有	无	无
涂层返修去除是否容易	容易，丙酮浸泡即能去除	容易，丙酮浸泡即能去除	不容易，丙酮浸泡不能去除



(a) 改进方案1叶片渗铝后防护层效果 (b) 防护层去除后榫头表面

图 2

淡灰黄色的三氧化二铝层，而非渗铝部位形成蓝色的金属氧化物层。因此，合格叶身渗铝表面应呈浅黄色，合格榫头非渗铝表面应呈蓝色。

图3a为改进方案1叶片氧化后效果，可见叶片榫头明显成蓝色，与淡黄色渗铝区叶身。形成鲜明对比，可见榫头表面无渗铝层。同时对榫头进行剖切分析，图3b为改进组榫头扫描电镜观察照片，显然榫头表层无渗铝层。

对改进组榫头表层和基体进行成分检查（见表4），结果表明零件表面无污染，表面成分与基体成分基本一致，进一步证明

榫头表面没有被污染。

4. 分析与讨论

改进方案都采用了添加牺牲元素金属粉末N的方案，金属粉末N作为固体组分添加到料浆中，通过与有机粘结剂充分混合，然后均匀地涂覆在榫头的表面，这样在榫头的表面就形成了一层连续的N粉层，也就在榫头的表面形成了一个金属N防护层，N容易与Al原子反应，形成稳定的金属化合物NaAl。在沉积过程中N粉首先与渗剂中的活性Al原子反应，从而阻止了Al元素进一步向内扩散渗透，这样就有效地把Al原子与榫头隔开了，起

到了保护榫头的作用。同时金属粉末N的熔点高，呈中性，扩散系数小，且高温合金基体中含有金属N元素，因此金属粉末N的添加不会污染腐蚀榫头表面。

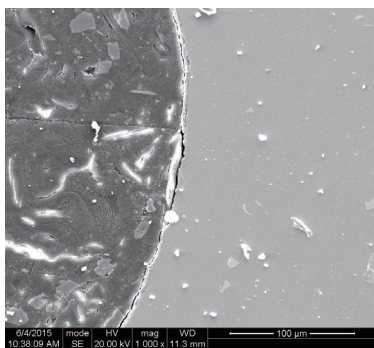
有机粘结剂A是涂料的重要组成部分，在涂覆干燥过程中，有机粘结剂A形成聚合物，该聚合物与榫头表面结合力好、强度大、韧性好，因此涂层不易破损，能将固体组分牢牢地固定在榫头表面。有机粘结剂A在渗铝加热过程中分解，由于有机粘结剂A分解后的残炭率较高^[5]，因此分解后会形成炭骨架，从而能固定涂料中的固体组分，防止溃散，有效防止涂层污染渗剂。另外，炭骨架较脆，渗铝后涂层剥除时也容易，且除去时成块状，榫头表面也不会有残留。

虽然有机粘结剂A具有热塑性，但是由于金属粉末N的加入，涂层厚度大幅减少，涂层加热后的流动性也就大幅削弱，因此改进方案1涂层在渗铝加热过程中不会流动到渗铝面，热固性粘结剂的优势不明显，反而因为热塑性粘结剂的高黏度提高了涂覆的操作难度，阻止了微小气泡的溢出，影响涂层的致密性。

陶瓷粉末的加入，可以起到一定防护作用，也可稀释分散金属粉末N。由于金属粉末N密度大，纯有机粘结剂黏度小，金属粉末N容易下沉，陶瓷粉末的加入可以调节有机粘结剂A的黏度，有效缓解金属N粉的下沉；同时陶瓷粉的粒径比金属N粉粒径要小，分数的陶瓷粉末可以有效地将N粉颗粒分开，防止金属N粉在渗铝过程中烧结，降低表



(a) 改进方案1叶片加热氧化后效果



(b) 改进组叶片榫头剖切后扫描照片

图 3

表4 改进方案1榫头表面成分和基体成分（质量分数）对比 (%)

元素	Al	W	Nb	Ti	Cr	Co	Ni
表层	4.72~5.14	11.85~12.07	0.93~1.05	1.80~1.94	8.61~9.65	10.04~10.06	60.07~61.41
基体	4.75~5.16	11.71~11.97	0.93~1.15	1.90~1.99	8.56~9.60	9.94~10.16	59.07~61.01

0Cr11Ni2MoVNb钢离子渗氮工艺研究

刘建平 王蔓

【摘要】 对0Cr11Ni2MoVNb钢的渗氮前热处理、离子渗氮工艺及防渗涂料进行了研究。试验结果表明：该材料按“1030℃淬火+650℃回火”的热处理工艺进行调质处理，所获得的组织适合渗氮。在离子渗氮试验中，当渗氮温度、氨气流量、电压、电流及保持时间等工艺参数合理匹配时，不但可在试样的外凸表面获得符合技术要求的渗氮层，还可在截面为6mm×6.5mm的凹形槽表面获得符合技术要求的渗氮层，渗氮组织符合标准要求。

关键词： 0Cr11Ni2MoVNb钢；调质；离子渗氮；渗氮层

0Cr11Ni2MoVNb 钢是一种新型马氏体热轧不锈钢，可通过热处理对其性能进行调整，可用来制造在较高温度下工作的零件。为了强化合金的表面层，提高它的耐磨性与在还原介质中的耐蚀性，采用渗氮技术是最有效的途径。该钢在组织与常规力学性能上与常用的13Cr11Ni2W2MoV很接近，但焊接性能比其好。该材料含有多种

强渗氮物形成元素（Cr、Mo、V、Nb），这些元素可增加材料表面吸收活性氮原子的能力，又可降低氮在金属中的扩散系数，且这些合金元素的氧化膜也会阻碍零件对氮的吸收。

燃气轮机的支承轴承座零件采用该材质制造，局部表面渗氮，要求渗氮层厚0.4~0.6mm，国内尚无该材料的渗氮数据，而13Cr11Ni2W2MoV材料经过

580℃×35h气体渗氮处理后，渗层深度只能达到0.26~0.30mm。因此，试验前推测该材料不易渗氮，如何使渗氮层达到规定厚度是本试验首先要解决的问题。

1. 试验

（1）材料 试验所用材料0Cr11Ni2MoVNb钢是由宝钢集团上海五钢提供，其化学成分如表1所示。试验所用的离子渗氮

面积，影响防渗效果。

5. 结语

试验结果表明，棒头防护涂料采用有机粘结剂A+陶瓷性粉末C+金属粉末N的方案，涂覆2层能满足使用要求。

参考文献：

[1] 李克，张正义.航空高温合金用新型气相渗铝工艺研究[J].

热处理，2009，24（05）：24-29.

[2] IT科洛梅采夫.耐热扩散涂层[M].马志春，译.北京：国防工业出版社，1988：218-221.

[3] 蔡煜.FAT-9防渗铝涂层研制总结[C].中国航空学会高温材料学术交流会论文集，1985.

[4] 何贤昶.陶瓷材料概论[M].上海：上海科普出版社，2005.

[5] 左瑞霖，李晨光，王慧.环氧类韧性耐烧蚀防热涂层的研究[J].宇航材料工艺，2011（02）：72-75.

作者简介：丁志敏、文钰、汪萍，中国航发南方工业有限公司；彭国平，陆军航空兵军事代表局驻株洲地区军事代表室。

MW 20170924