1Cr11Ni2W2MoV不锈钢渗氮表面磨削后点状剥落问题研究

江珍艳，谢善，张诗佳，黄文东，张克疆
成都航利航空科技有限责任公司　四川成都　611900

摘要：1Cr11Ni2W2MoV不锈钢的零件渗氮处理后，零件渗氮表面磨削后发现渗氮面存在点状剥落现象。通过研究氮化物剥落形貌及分布、渗氮层金相组织及硬度，探讨了渗氮层磨削后出现点状剥落的原因，并提出了解决该问题的工艺解决措施。

关键词：渗氮；点状剥落；裂纹

Research on the problem of point-like peeling on the nitride surface of 1Cr11Ni2W2MoV material after grinding

JIANG Zhenyan, XIE Shan, ZHANG Shijia, HUANG Wendong, ZHANG Kejiang
Chengdu Hangli Aviation Technology Co., Ltd., Chengdu 611900, Sichuan, China

Abstract: After parts of 1Cr11Ni2W2MoV stainless steel were nitrided, point-like peeling was found on the nitrided surface after grinding. This paper studied the morphology and distribution of point-like peeling, the microstructure and hardness of the nitrided layer, and explored the reasons for the point-like peeling after grinding the nitrided layer. It also proposed a solution to the problem.

Keywords: nitride; spotting debris; crack

1　序言

渗氮是将N原子在高温下渗入零件表面，以获得高氮表层的化学热处理工艺。渗氮件表面具有高的硬度、耐磨性、疲劳强度、红硬性以及抗咬合性[1]。1Cr11Ni2W2MoV不锈钢是马氏体型热强不锈钢，其室温抗拉强度、持久强度极限及蠕变极限均较高，并具有更好的韧性和抗氧化性能，在淡水和湿空气中有较好的耐蚀性，近年来该材料在航空发动机零件中应用越来越广泛[2]，如航空发动机凸轮、螺母、衬套等结构件多采用1Cr11Ni2W2MoV不锈钢，需要渗氮来提高表面硬度和耐磨性。在生产中遇到了1Cr11Ni2W2MoV不锈钢渗氮件渗氮试样金相检验裂纹、渗氮表面磨削后出现点状剥落的情况，本文对该问题进行了相关的研究和探讨。

2　试验材料与方法

1）试验选用材料：采用1Cr11Ni2W2MoV不锈钢，执行GJB 5040—2001 《航空用钢锻件规范》，渗氮用氨气（NH_3）执行GB/T 10624—1995《高纯氨》。

2）试验用设备：用箱式加热炉进行热处理及加热，用尼萃斯渗氮炉进行渗氮，用蔡司金相显微镜进行金相检验，用体式显微镜观察缺陷形貌，用显

微维氏硬度计进行硬度检测。

3 问题描述

螺母零件材质为1Cr11Ni2W2MoV不锈钢，加工工艺流程：下料→锻造→调质热处理→机械加工→渗氮→磨削。零件结构如图1所示。由于渗氮过程中N原子由表面通过扩散进入基体，在渗氮表层容易出现渗氮层网状组织、化合物疏松层等缺陷，这些缺陷若不去除，则在使用过程中易剥落，影响产品的使用安全，因此航空产品在渗氮后一般通过磨削来去除渗氮面表层的富氮层。该零件工艺安排渗氮面表层去除0.03～0.08mm的氮化物。因此，工艺规定渗氮技术要求为：渗氮层深度0.28～0.43mm，渗氮层硬度HR15N＞89。

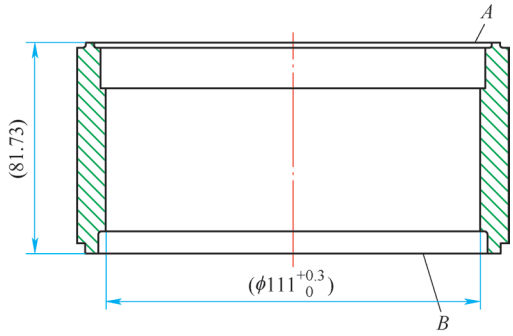

图1 零件结构（*A*面、*B*面渗氮）

按上述工艺流程加工零件，渗氮前采用镀铜法防止非渗氮面被渗氮，采用喷砂法去除不锈钢渗氮表面的钝化膜。渗氮后对渗氮面磨削0.05～0.08mm，发现磨削后的渗氮表面有点状剥落现象，采用体式显微镜观察点状剥落形貌，如图2、图3所示。未磨削渗氮层的试样做荧光和磁粉检测，渗氮表面均未发现裂纹和疏松缺陷。用体式显微镜观察和扫描电镜观察未磨削渗氮层，渗层表面未发现裂纹、疏松和剥落缺陷。因此，判断点状剥落是在磨削过程中产生的。

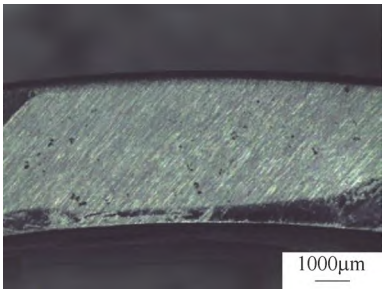

图2 体式显微镜观察点状剥落形貌（50×）

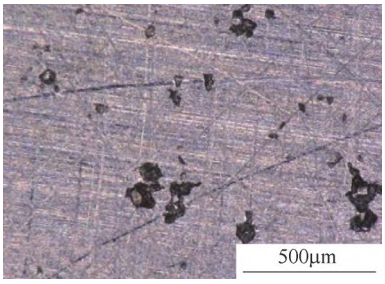

图3 体式显微镜观察点状剥落形貌（100×）

4 原因分析

相关资料显示，在渗氮过程中，由于原始组织粗大、氮势过高等原因，所以渗氮后渗层会出现表层化合物层疏松、脉状氮化物等缺陷[3]。为了查找点状剥落产生的原因，对渗氮后未磨削的渗氮层制备金相试样进行观察，采用金相显微镜在试样抛光状态下观察渗氮层，发现渗氮层距表面0.10mm内存在沿晶裂纹，如图4所示。采用扫描电镜观察金相试样裂纹形貌，如图5所示。试样腐蚀后在金相显微镜下观察渗氮层组织为氮化索氏体，未见沿晶网状氮化物和波纹状氮化物，如图6所示[4]。基体组织为回火马氏体，如图7所示。渗层硬度合格，脆性1级。通过对多批次试样统计分析，未磨削的渗氮层裂纹深度在0.10mm以内。由此判断，零件渗氮表面磨削后点状剥落与金相观察的渗氮层表面的沿晶裂纹有关。

为分析渗氮层外表层的沿晶裂纹，选取4个圆柱试件开展试验。首先按零件渗氮工艺对试样进行渗氮，渗氮结束后对4个试件进行荧光和磁粉检测，

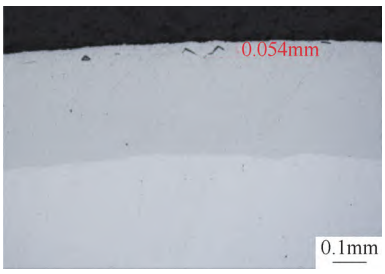

图4 金相显微镜下渗氮层抛光态沿晶裂纹形貌

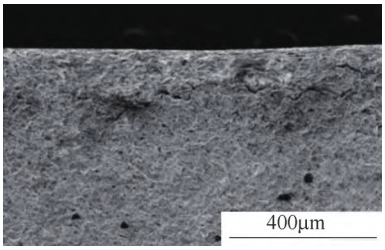

图5 扫描电镜下渗层裂纹形貌

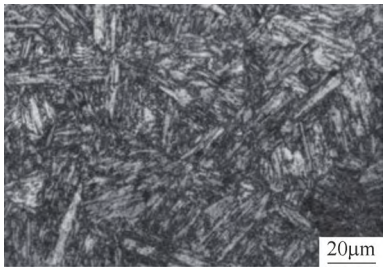

图6　渗氮层组织

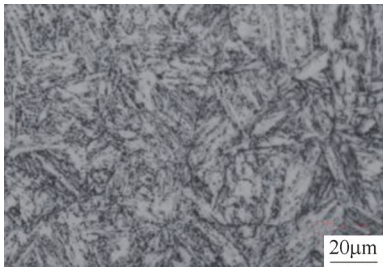

图7　基体组织

均未发现裂纹。采用体式显微镜在50倍和100倍下观察，也未发现渗氮层表面存在裂纹和剥落缺陷。由此说明，渗氮层在未经制备金相试样时是不存在裂纹的。

对4个渗氮试件制备金相试样，由于渗氮层脆性大，因此在金相制样过程中对金相试样进行了线切割和磨样，该过程中对试样施加的应力有可能使渗层产生裂纹。为验证线切割和磨样过程对渗层表面裂纹的影响，对4个试件中间部位用线切割方法切成两半后，对经线切割面、未经线切割的面分别制备金相试样后金相检查试样裂纹情况，试样的裂纹深度见表1。由表1可看出，未经线切割试件的金相试样的裂纹深度均比线切割后制备金相试样的渗氮层裂纹更深。分析认为，渗氮前未经线切割的渗氮面存在1mm的倒角，制样时试样磨削去除量约2mm，线切割试样的去除量约为1mm，未经线切割试件制备金相试样时磨削去除量大，磨削应力大，因此裂纹较线切割试样深，由此推出裂纹产生主要与制备金相试样时磨样的过程有关。

表1　不同试样制备工艺试验结果　（mm）

试样编号	1#	2#	3#	4#
渗层深度	0.386	0.372	0.378	0.361
最大裂纹深度（未线切割试样）	0.051	0.070	0.072	0.093
最大裂纹深度（线切割试样）	0.050	0.066	0.060	0.078

另外，在金相检测时还发现裂纹有延迟现象，在刚制样完成时观察，裂纹较少、深度浅，24h后再观察试样时又产生了新的裂纹，且原来较浅的细裂纹有加深、加粗的现象。

分析认为，零件加工时渗氮面的磨削与金相试样制备时磨样的加工原理一致，工程经验和相关理论说明磨削裂纹有延时现象，渗氮层金相裂纹也出现了延时现象，由此得出零件渗氮面磨削后点状剥落与金相试样观察的裂纹相一致，因此点状剥落缺陷是在渗氮面磨削加工中产生的，其原因与渗层组织脆性及磨削应力有关。

5　分析与讨论

在渗氮过程中，N原子是呈间隙型进入基体的，由于晶界上的缺位、位错和空穴比较多，因此N原子首先都集中在晶界上。当渗氮表层晶界处吸收了大量的N原子，来不及向晶内或基体内部扩散时，就会在晶界处形成大量的氮化物，导致渗氮表层晶界处N浓度过高[5]。还有研究认为，渗氮层内沿奥氏体晶界析出的第二相粒子产生的晶间应力对奥氏体晶界的削弱，是造成渗氮层剥落的根源[6]，且渗氮层较大的表面残余应力，加剧了渗氮层剥落的趋势。1Cr11Ni2W2MoV不锈钢含合金元素较多，在渗氮时形成大量的合金氮化物阻碍N原子的扩散，渗氮速度较慢，长时间渗氮造成大量的N原子在渗层表面堆积，且在晶界处堆积更严重，晶界上的氮化物与晶内差异较大，基体与晶界之间的结合力被大大减弱，因此在对渗氮表层磨加工过程中，若磨削参数不合适，磨削过程应力使晶界处产生沿晶裂纹或剥落。

6　改进措施

由上述分析认为，解决该问题需从减少渗氮过程中N原子在表层晶界的聚集和减少磨削过程中磨削应力两个方面开展工作，经分析可从以下方面采取工艺改进措施。

（1）细化渗氮前基体材料的晶粒度　在渗氮过程中，N原子会首先沿晶界及位错等缺陷位置往基体中心扩散，基体材料晶粒越粗大，单位面积上的晶粒越少，相应地晶界面积较少，N原子进入基体的优先通道较少，渗氮速度较慢，在晶界处聚集的氮化物越多，导致晶界处脆性大，晶界与晶内的氮化物差异较大，对渗氮表层磨加工过程中，晶界处产生沿晶裂纹越深，剥落现象也就越严重。当晶

粒较细时，单位面积内晶粒多，相应地晶界面积较多，N原子进入基体的优先通道较多，渗氮形成的氮化物较弥散，分布较均匀，相应地降低了晶界处氮化物的聚集，晶界与晶内氮化物差异变小，其晶界变脆就不太明显，对渗氮表层进行磨削越先于晶界处产生裂纹时间，沿晶剥落就越轻。

（2）降低渗氮过程氮势　相关研究表明，强渗阶段是N原子快速与合金元素结合的过程，强渗时间太长时，会明显提高零件脆性，适当缩短强渗时间可降低N浓度，降低渗氮层脆性，渗氮层的脱落和裂纹倾向将大大削弱[7]。在渗氮过程中，N原子是从表层向基体内部扩散的，当氮势较高时，渗氮速度较快，在基体材料表面聚集较多的N原子不能及时向内部扩散，渗氮的表层聚集的氮化物越多，晶内与晶界的氮化物差异越大；在对渗氮表层磨削加工过程中，晶界处产生的沿晶裂纹越深，剥落现象越严重。当氮势较低时，渗氮速度相对较慢，聚集在基体材料表层的N原子相对较少，N原子向基体材料扩散越充分，氮化物较弥散，晶界与晶内氮化物差异越小，其晶界变脆也就越不明显，在渗氮表层磨削时在晶界处产生裂纹越浅，沿晶剥落越轻。

（3）优化渗氮层磨削工艺　采用减小磨削去除量、加强磨削过程的冷却、采用磨削性能优良的立方氮化硼砂轮，以及磨削前按需要修整砂轮等措施，使磨削工艺与渗层表面的脆性相匹配。

采用上述措施开展验证试验，用尼萃斯渗氮炉分别对晶粒度为4级、6级和8级的试样进行渗氮，氮势分别为0.5%、0.3%和0.2%，渗氮后采用金相显微镜检查渗氮层的裂纹分布情况，试验结果见表2。从表2可看出，渗氮氮势相同时，晶粒越细，渗氮试样的裂纹越浅；相同晶粒度，氮势越低，渗氮试样的裂纹越浅。渗氮氮势为0.2%和0.3%时裂纹深度均在渗氮表面的工艺去除量0.08mm以内。对渗氮试样开展磨削验证，采用优化后的磨削工艺，对试样进行磨削，渗氮氮势0.2%和0.3%的试样未出现点状剥落现象。由试验可知，细化基体材料的晶粒度、降低渗氮过程氮势，以及优化磨削工艺，可有效解决1Cr11Ni2W2MoV不锈钢渗氮面磨削加工的点状剥落问题。

表2　验证试验结果

渗氮氮势（%）	检测项目	晶粒度/级		
		8	6	4
		检测结果/mm		
0.5	渗氮深度	0.386	0.382	0.381
	裂纹深度	0.059	0.070	0.093
0.3	渗氮深度	0.373	0.372	0.378
	裂纹深度	0.051	0.070	0.072
0.2	渗氮深度	0.374	0.379	0.380
	裂纹深度	0.020	0.033	0.064

7　结束语

通过对1Cr11Ni2W2MoV不锈钢渗氮表面磨削点状剥落问题的研究，可以得出以下结论。

1）1Cr11Ni2W2MoV不锈钢磨削后渗氮表面的点状剥落缺陷是在磨削过程中产生的，是氮化物的沿晶剥落，其原理与渗氮层金相检测表面的沿晶裂纹相一致。

2）1Cr11Ni2W2MoV不锈钢渗氮层金相观察的显微裂纹为制样过程的磨削应力裂纹，且有一定的延时现象。

3）细化渗氮前基体材料的晶粒度，降低渗氮氮势，优化磨削工艺，使磨削工艺与渗层表面的脆性相匹配，是解决1Cr11Ni2W2MoV不锈钢渗氮表层磨削剥落问题的有效措施。

参考文献：

[1] 《航空制造工程手册》总编委会. 航空制造工程手册（热处理）[M]. 2版. 北京：航空工业出版社，1998.

[2] 《中国航空材料手册》编辑委员会. 中国航空材料手册 第1卷：结构钢不锈钢[M]. 2版. 北京：清华大学出版社，2013.

[3] 李丽，焦文建，胡桂英，等. 4Cr14Ni14W2Mo零件渗氮后磨削掉块原因分析[J]. 航空维修与程，2020（12）：78-81.

[4] 机械工业部机电研究所. 钢铁材料渗氮层金相组织图谱[M]. 北京：机械工业出版社，1986.

[5] 中国航空学会. “探索 创新 交流——第六届中国航空学会青年科技论坛”论文集（上册）[C]. 北京：航空工业出版社，2014.

[6] 汤浩，程法嵩，刘依依，等. 4Cr14Ni14W2Mo钢零件晶间及表面残余应力对渗氮层剥落的影响[J]. 金属加工（热加工），2023（2）：77-80.

[7] 游平平，张志贵，徒玉龙. 不锈钢气体渗氮裂纹的控制[J]. 金属加工（热加工），2021（5）：5-8.

MW 20241030