

鼓风机转子叶轮失效分析

Failure Analysis of Blower Wheel

张 峥, 苏 梅, 钟群鹏 (北京航空航天大学材料科学与工程系, 北京 100083)

ZHANG Zheng, SU Mei, ZHONG Qun-peng

(Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

摘要: 通过材质、断口宏微观和腐蚀产物成分分析, 确定鼓风机转子叶轮失效模式为腐蚀疲劳, 鼓风机转子叶轮上裂纹起源于腐蚀坑。分析结果为防止类似事故的再次发生提供了技术依据。

关键词: 鼓风机转子叶轮; 失效分析; 腐蚀疲劳

中图分类号: TG113.25+5 文献标识码: A 文章编号: 1001-4381 (2001) 05-0041-03

Abstract: The failure of blower wheel is caused by corrosion fatigue with the analysis of material, macro and micro fracture appearance, and composition of corrosion material. The crack initiated from the corrosion pits. The analysis result provides the technological support to prevent the same accident.

Key words: blower wheel; failure analysis; corrosion fatigue

某焦化厂鼓风机是煤气生产的关键设备之一, 主要负责输送煤气。一台鼓风机转子叶轮曾出现过裂纹, 修复后又投入使用, 随后第二台鼓风机出现了相同的失效现象, 该鼓风机转子上安装了两级叶轮, 每级叶轮有 18 个叶片, 电机功率为 630kW, 增速比为 1.944, 使用了 5 年多, 累积运行近 14000h。振动超标紧急停车后, 发现第二级叶轮表面有三条裂纹。根据制造厂提供的资料, 该叶轮是由马氏体沉淀硬化不锈钢 FV 520 (B) 锻造而成。我们通过材质分析, 断口宏微观分析和腐蚀产物的化学分析来判定该叶轮的失效原因。

1 裂纹宏观形貌

转子上第二级叶轮的三条裂纹集中在叶轮的四个相邻叶片之间, 三条裂纹都是从叶轮的边缘向转子的轴心方向扩展。用汽油反复清洗, 去除了叶轮表面的附着物, 露出了叶轮表面的金属光泽, 如图 1 所示。从图中可以看出, 叶轮外表面比较光滑, 无变形, 边缘除两条主裂纹外, 未见任何细小的裂纹和缺口。两条裂纹起始位置均有明显的摩擦痕迹。图中的摩擦痕迹都是沿着叶轮的切线方向, 可以确定, 摩擦痕迹是在裂纹形成以后, 叶轮高速旋转时发生变形与某一固定金属构件相摩擦产生的。对比叶轮的内外表面可以看出, 叶轮的外表面几乎没有腐蚀坑, 而内表面有明显的腐蚀坑 (点蚀), 并且分布比较均匀^[1], 如图 2 所示。

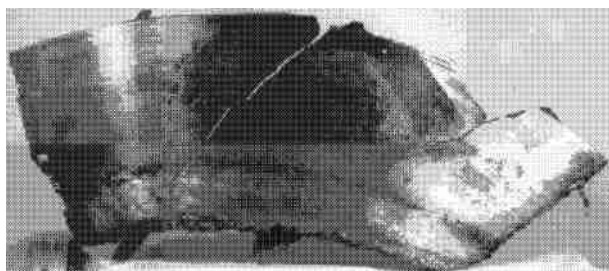


图 1 清洗后叶轮外表面裂纹形貌

Fig. 1 The cracks on the outside surface of blower wheel



图 2 叶轮内表面形貌

Fig. 2 The inside surface of blower wheel

2 母材化学成分分析

在远离焊缝处取样对母材进行化学成分分析, 得到叶轮材料的部分化学成分, 如表 1 所示。表 1 同时

列出了 FV520(B) 的标准化学成分。从表中可以看出, 叶轮的 Cr 含量较低。

表 1 叶轮的化学成分 (wt%)

Table 1 Chemical composition of blower wheel

元素	Mn	Cr	Ni	Cu	Si	S
含量	0.78	11.53	6.01	1.46	0.43	0.0062
FV520 (B) 标准值	1.0	13.0 ~ 14.5	5 ~ 6	1.3 ~ 1.8	0.70	0.003

3 焊缝及母材金相检验

对焊缝、母材和焊缝与母材相邻的区域分别进行了金相检验, 未见未熔合和未焊透等焊接缺陷。

4 母材力学性能测试

对失效叶轮的母材进行拉伸性能测试, 以检验其拉伸性能指标是否合格。三条裂纹的方向都是沿着径向方向扩展, 所以, 选择垂直于裂纹方向, 也就是叶轮的切线方向取样。由于叶轮的叶片间距较小, 并且厚度只有 5mm 左右, 因此, 采用板材标准试样进行常温拉伸性能测试。试验结果如表 2 所示。表中同时列出了硬度测试结果及 FV520(B) 材料三种状态切向的力学性能标准值。从表中可以看出, 失效叶轮的抗拉强度较高, 延伸率、断面收缩率偏低。

表 2 力学性能试验结果

Table 2 Test results of mechanical properties

试样编号	屈服强度 / MPa	抗拉强度 / MPa	延伸率 / %	断面收缩 率 / %	硬度/ HRC
1	606.0	1126.4	14.4	32.5	39
2	706.6	1105.0	14.5	34.3	38
3	631.2	1092.9	14.4	33.1	40
平均值	647.9	1108.1	14.4	33.3	39
FV520 (B) -S1	686 ~ 800	931	15	45	31
FV520 (B) -S2	686 ~ 827	950	15	45	31
FV520 (B) -S3	588 ~ 735	931	15	45	31

5 断口微观形貌及腐蚀产物成分

为了深入分析断裂的原因, 使用 Hitachi 530 和 JSM -5800 扫描电子显微镜对断口表面进行微观形貌分析, 使用 Link ISIS 能谱仪对腐蚀产物的成分进行分析。

5.1 断口微观形貌

首先对叶轮内表面进行低倍观察, 可以清楚地看

到有大量的腐蚀坑 (点蚀) 存在, 并且分布比较均匀, 如图 3 所示。对两条裂纹清洗后进行观察, 可以看到裂纹均起源于叶轮的內表面靠近叶轮边缘处的腐蚀坑处, 如图 4 所示。扩展区形貌如图 5 所示, 断口形貌以准解理为主, 并且可以看到沿晶特征和沿晶的二次裂纹^[2]。

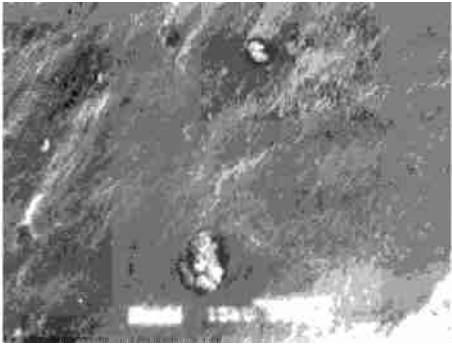


图 3 叶轮内表面腐蚀坑形貌

Fig.3 Pit on the inside surface

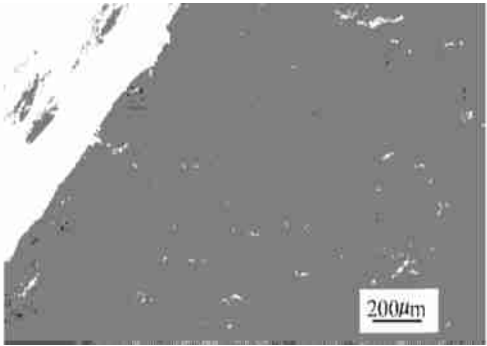


图 4 裂纹从腐蚀坑处起裂

Fig.4 The cracks propagation from pit

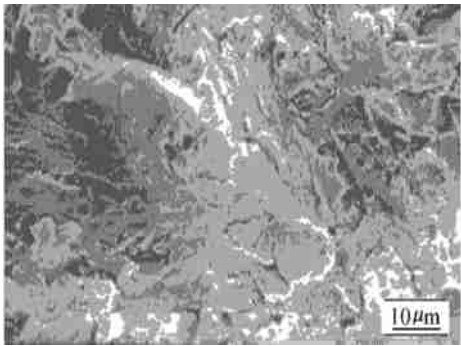


图 5 扩展区准解理形貌

Fig.5 The quasi-cleavage fracture surface

5.2 腐蚀产物的化学成分

将叶轮内表面断口边缘处腐蚀坑放大, 可以看出腐蚀坑比较深, 并且可以看到腐蚀产物存在, 如图 6 的形貌, 用能谱对任意选择的两个腐蚀坑内的腐蚀产

物进行微区成分分析，其化学成分分析结果如表 3 所示。从表 3 中可以看出，腐蚀坑中含有 S、Cl 和 K 等元素。

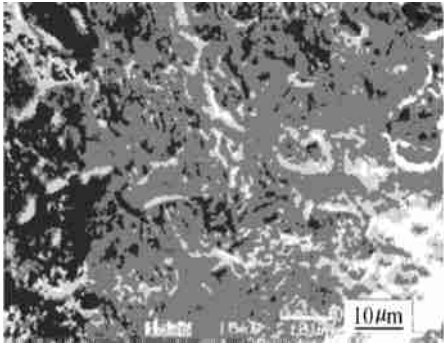


图 6 腐蚀坑内腐蚀产物
Fig. 6 Corrosion product in the pit

表 3 腐蚀产物化学成分能谱分析结果 (wt%)
Table 3 Chemical composition of corrosion product

元素	C	Al	Si	S	Cl	K	Cr	Fe	Ni	Cu	Nb
正常区域	0.500	0.010	0.220	0.24	—	—	15.0	77.8	4.78	1.43	—
腐蚀坑 1	19.30	222.93	10.3	2.04	0.41	23.0	27.3	2.50	1.71	10.1	
腐蚀坑 2	9.470	242.70	13.6	1.51	0.28	41.7	19.5	4.20	4.22	2.52	

6 断裂原因分析

6.1 叶轮内表面出现点蚀现象的原因及影响因素

叶轮长期使用后，虽然大部分表面未受腐蚀或腐蚀程度较小，但在叶轮的內表面上均匀地分布着大量的腐蚀坑（点蚀），这些腐蚀坑是由于鼓风机转子叶轮工作在腐蚀性介质中产生选择性腐蚀造成的。

从电化学角度来看，当金属浸入电解质溶液时，在金属表面上由于特定的活化阴离子（如 Cl^- 等）的存在，促进了阳极反应的发展，而氧化剂的存在和具有低极化性能的有效阴极面积，又促进了阴极反应。此时，只要腐蚀电位达到或超过某一临界值——点蚀电位（击穿电位），就可能击穿表面膜导致点蚀核的产生。点蚀电位比过钝化电位低，位于金属的钝化区。若点蚀是由于活化阴离子（特别是 Cl^- ）吸附在表面膜中某些缺陷处引起的，则达到点蚀电位时，表面膜最薄弱部分的电场强度较高，使氯化物的阴离子穿透薄膜而形成氧化物-氯化物。随后氧化膜发生局部溶解立即形成了点蚀源。

在点蚀发生的初始阶段，由于阳极溶解下来的金属离子发生水解而生成 H^+ ，因此，蚀孔中溶液的 pH 值下降，具有强酸性，这样又加速了金属的溶解，从

而造成了蚀孔的扩大与加深。随着腐蚀的不断进行，在蚀孔上形成了腐蚀产物，致使孔内外的物质迁移难以进行。这样一来，蚀孔金属盐愈来愈浓缩，因水解而使 pH 值愈来愈低，同时为了维持电荷平衡， Cl^- 不断地通过腐蚀产物向蚀孔内迁移，导致孔内 Cl^- 进一步富集，如表 3 所见。因此，点蚀发展过程是一个自催化过程。

叶轮材料的晶界、夹杂物和位错等表面缺陷使表面膜某些部位较为薄弱，成为点蚀容易形核的部位。叶轮材料的点蚀电位与溶液的氯离子活度、pH 值及温度都有很大的关系。当溶液中氯离子活度增加时，点蚀电位向负方向移动，而当 pH 值降低及温度升高时，点蚀电位均向负方向移动，也就是说增加了产生点蚀的敏感性。另外，生产时几台鼓风机交替使用，有时处于停止状态，在静止的溶液中容易形成点蚀，因为此时不利于阳、阴极区间的溶液交流。

6.2 母材中 Cr 含量较低，降低了抗蚀性

叶轮选用的是 FV520(B) 材料，这种材料是一种马氏体型沉淀硬化不锈钢。它兼有奥氏体不锈钢的耐腐蚀性和马氏体不锈钢的强度，而且该牌号材料也是鼓风机叶轮制造时推荐使用的材料之一，因此，选用 FV520(B) 来制造叶轮是正确的。但从化学成分分析来看，Cr 含量只有 11.53%，大大低于 FV520(B) 材料标准中的 Cr 含量（13~14.5），因此，该叶轮所用材料的抗蚀性能会下降，导致在煤气生产这样的恶劣环境下工作时容易出现点蚀现象。

6.3 叶轮开裂原因分析

从腐蚀坑的形貌可以看出，腐蚀坑的直径和深度都不很大，只有几百微米，转子叶轮边缘处受力最严重，靠近边缘这些腐蚀坑是裂纹的发源地。通过对裂纹和断口的宏微观分析，可以看到同时有三条裂纹存在，其中切取的部分叶轮上的两条裂纹都是沿着焊缝的热影响区扩展的，宏观断口上放射状非常明显，但微观上是解理形貌。叶轮是一个高速旋转的转动部件，在起停或调速过程中容易产生振动，从点蚀坑处扩展产生裂纹，因此，可以认为叶轮的破坏是腐蚀疲劳造成的。而叶轮的共振，即当外部激振力的频率接近或达到叶轮的固有频率时，叶轮的振动将急剧增加也可能导致叶轮失效。

2 台鼓风机转子叶轮都有相同的结构、相同的投入使用时间、大致相同的累积运行时间、相同的破坏位置、相同的破坏过程，这充分说明叶轮的破坏不是一个偶然事件，而是一个必然事件，其中可能与设计、选材、制造或使用等方面有关。

续缓慢施加，粒子赤道局部基体先发生塑性形变，当拉应力大于粒子与基体的粘结力时，粒子在平行于拉伸方向的两极开始发生界面脱粘空化；空化现象是树脂基体发生塑性形变的一个标志；拉应力继续增加，空化进一步发展，与此同时，粒子的赤道面受基体挤压，促使基体发生更大塑性形变，最终形成丝束状结构，直至断裂。整个过程服从微观空化和剪切屈服机制。而在高速拉伸时，粒子只起到应力集中体的作用，迅速发生界面脱粘形成大量空洞；随形变的进一步发展，空洞很快转化为裂纹并穿透未能发生充分屈服的基体，导致复合材料准脆性断裂，此时裂纹机制占据支配地位。

3 结论

(1) 由于改性后纳米 SiO₂ 表面接枝分子链与基体大分子链之间的链缠结，加强了界面相互作用。团聚体的尺寸明显减少，且团聚体内的接枝高分子链有效地阻止了粒子间直接接触，加强了粒子间的相互作用。

(2) 经辐照接枝改性后的纳米 SiO₂ 使聚丙烯的模量和强度均有所提高，韧性也显著增大，说明本工作制备的纳米复合材料同时呈现增强和增韧效应。

(3) 复合材料的拉伸性能对拉伸速度具有强烈的依赖性，从所试结果看，10mm/min 拉伸曲线下面积最高为强和塑性的最佳配合。

(4) 复合材料的拉伸断裂形态表明，复合材料韧性的提高，是由于基体大面积剪切屈服所致。

参考文献

[1] Rong M Z, Zhang M Q, Zheng Y X, Zeng H M, Walter R, Friedrich K. Polymer, 2001, 42: 167.

[2] Wei Y, Bakthavatchalam R, Whitecar C. Chem Mater, 1990, 2 (4): 337.

[3] Giannelis E. P Adv Mater, 1996, 8 (1): 29.

[4] Sumita M, Tsukumo Y, Miyasaka K. J Mater Sci, 1983, 18: 1758.

[5] Tsubokawa N, Yoshio S. J Polym Sci, Part A Polym. Chem, 1995, 33: 561.

[6] Nicolais L, Nicodemo L. Polym Eng Sci, 1973, 13: 469.

[7] 容敏智, 章明秋, 郑永祥, 曾汉民. 复合材料学报 (即将发表)

基金项目: 教育部科学技术重点项目 (99198), 广东省自然科学基金项目 (990277) 和广东省自然科学基金研究团队项目。
收稿日期: 2000-11-28; 修订日期: 2001-02-28
作者简介: 吴春蕾 (1972-), 男, 汉族, 出生于山东, 博士研究生, 主要从事聚合物复合材料研究. 联系地址: 广州中山大学材料科学研究所 (510275)。

本文编辑: 李海霞

* * * * *

(上接第 29 页)

[4] M G Lakshmikantha, A Bhattacharya, J A Sekhar. Numerical Modeling of Solidification Combustion Synthesis [J]. Metall. Trans. 1992, 23A: 23-34.

[5] В В А лекандр ов, М А Коргогин, В В Болды-рев. Механизм и макрокінетика взаимо-действия компонентів в порошкових системах [J]. Докл АН СССР. 1987, 292 (4): 879-881.

[6] H J Fend, John J, Moor, D G Wirth. Combustion Synthesis of Ceramic-Metal Comosite Materials: the TiC-Al₂O₃-Al System [J]. Metall Trans A, 1992, 23A: 2373-2379.

[7] Yoon Choi, Shi-Woo Rhee. Reaction of TiO₂-Al-C in the Combustion Synthesis of TiC-Al₂O₃ Composite [J]. J Am Ceram Soc, 1995, 78 (4): 986-992.

[8] 张二林. Al/TiC 复合材料反应生成热力学和动力学过程的研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学博士论文, 1996.

基金项目: 航空基金资助项目
收稿日期: 2000-12-25; 修订日期: 2001-02-28
作者简介: 杨波 (1971-), 男, 北京航空材料研究院博士后, 主要从事 SHS 合成、铝合金阻尼材料的研究, 联系地址: 北京航空材料研究院二室 (100095)。

本文编辑: 李海霞

* * * * *

(上接第 43 页)

7 结论

(1) 叶轮的內表面均匀地分布着大量的腐蚀坑 (点蚀)。

(2) 母材中 Cr 含量低于 FV520(B) 材料标准中的 Cr 含量, 这样会降低叶轮的抗蚀性能。

(3) 裂纹起源于最靠近叶轮边缘的点蚀坑。

(4) 叶轮的失效模式为腐蚀疲劳。

8 建议

(1) 从叶轮结构设计、选材、制造或使用等方面进一步分析共振产生的原因, 并对共振加以控制。

(2) 采取电化学保护、添加缓蚀剂或更换耐点蚀材料等方法消除或减缓点蚀的发生。

参考文献

[1] 中国腐蚀与防护学会编委会编. 金属腐蚀手册 [M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1987.

[2] 上海交通大学编写组. 金属断口分析 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1979.

收稿日期: 2000-11-10; 修订日期: 2001-02-10
作者简介: 张峥 (1965-), 男, 博士, 联系地址: 北京航空航天大学一系八研 (100083)。

本文编辑: 孙常青