

刀片断裂分析与疲劳寿命综合评估研究

李成林

杭州九阳小家电有限公司，浙江杭州，310082；

摘要：本文针对 4 叶型刀片在加速寿命测试中出现的单例根部断裂现象，开展了一项全面、系统的可靠性研究。研究综合运用了实验测试、理论计算与数值仿真三种技术手段。实验部分包括断刀激发测试、高周疲劳测试、材料硬度测试以及第三方金相组织分析；理论部分进行了静力学及冲击载荷下的应力计算与安全系数校核；仿真部分则通过有限元分析（FEA）获取了刀片的模态参数以评估其共振风险。研究结果表明：4 叶刀片的疲劳寿命、材料硬度、静动态强度及抗共振性能均满足并优于设计指标，其最小疲劳寿命（35,473 次循环）显著高于同类机型。综合判定，该单例断裂属于典型的疲劳断裂，根源在于制造过程中产生的微观缺陷（内伤）所引发的应力集中，而非设计缺陷。最终结论认为 4 叶刀片整体设计可靠，性能优异，同时为生产制程的质量控制提出了具体的改进建议。

关键词：刀片断裂；疲劳寿命；应力分析；金相分析；质量控制

DOI: 10.69979/3041-0673.26.02.043

引言

在现代工业体系，尤其是食品加工、化工搅拌及材料切割领域，旋转刀片作为核心执行部件，其工作的可靠性与耐久性直接关系到整台设备的生产效率、运行稳定性与维护成本。刀片在高速旋转中持续承受交变的机械载荷与热载荷，其失效模式主要为疲劳断裂，一旦发生，不仅会导致设备非计划停机，造成经济损失，还可能引发一系列连锁的生产安全问题。因此，对新型号刀片进行充分的可靠性验证与失效分析，是产品导入市场前不可或缺的关键环节。

4 叶型刀片是我司为新一代设备研发的关键部件。在其定型前的可靠性测试中，一组共计 30 片刀片的加速寿命测试（1.5 倍额定负载）中出现了一例于刀片根部断裂的异常情况。尽管失效比例（1/30≈3.33%）在可接受的工程风险范围内，但秉承对产品质量零缺陷的追求，必须对该现象的根源进行深入探究。

本研究立足于该单例断裂事件，旨在通过多维度的分析，达成以下目标：(1)全面评估 4 叶刀片的疲劳寿命性能，并与前代产品进行横向对比；(2)从理论计算与仿真分析角度，验证其结构设计与材料选型的合理性；(3)精准定位该单例断裂的根本原因，并区分其是设计问题还是制程偶发问题；(4)基于研究结论，形成对设计优化与制程质量控制的指导性意见，从而提升产品的整体可靠性水平。

1 测试内容与方法

为确保分析结果的科学性与准确性，本研究采用了

“实验-理论-仿真”三位一体的研究框架。

1.1 寿命测试与断刀激发测试

寿命测试是评估刀片耐久性的最直接方法。本项目测试在两个层面展开：

整机寿命测试：在 32 台装配 4 叶刀片的整机上，进行额定工况下的长期寿命考核，模拟真实工作环境。

断刀激发测试（Overstress Testing）：为加速暴露潜在缺陷，抽取 30 片刀片（PCS）在更为严苛的条件下进行测试——即施加 1.5 倍额定热功能循环载荷。这是一种常用的可靠性验证手段，旨在通过加大应力水平快速筛选出存在薄弱环节的样品。

测试结果：30 片激发测试样品中，有 1 片于刀片根部发生断裂，失效发生时的循环次数约为额定寿命的 1.5 倍。该结果首先说明绝大多数刀片（96.7%）能够承受超负荷工况，但也明确指出了个别产品存在一致性或缺陷问题。

1.2 刀片尺寸与几何参数对比

结构尺寸是影响零件强度的首要因素。我们对同样使用 4 叶刀的几款机型进行了详细的几何参数测绘与对比。发现 4 叶刀片的总直径和折弯角度均小于其他机型，这意味着其整体载荷承受能力理论上会有所不同。然而，更为关键的刀片根部形状，即应力最集中的区域，所有机型均保持了高度一致的设计。这一对比排除了因 4 叶刀根部结构设计变更而引入新的应力集中风险的可能性，将分析焦点引向了其他方面。

1.3 疲劳寿命测试

疲劳寿命是衡量刀片在交变载荷下长期工作能力的核心指标^[2]。我们 4 叶刀片进行了专项的高周疲劳测试。

测试参数：设定振动振幅为 1.5mm，远高于实际工作工况，以加速测试。

测试结果：测试刀片在运行 66 万次循环后仍完好无损，无任何裂纹或塑性变形。该性能远超设计要求的 20 万次循环，其耐久性裕度高达 330%。这充分证明了 4 叶刀片的疲劳寿命设计是充裕且可靠的。

1.4 硬度测试

材料硬度是其强度、耐磨性和抗疲劳性能的重要相关指标。我们对同一批次生产的 4 叶刀片、与其他参考机型刀片样品进行了洛氏硬度（HRC）检测。

测试结果：4 叶刀片硬度值为 41.8HRC。所有数值均落在设计要求范围（36-42 HRC）之内，且批次内材料硬度均匀性良好。这表明材料的热处理工艺稳定，硬度并非导致该单例断裂的因素。

1.5 理论应力计算与安全系数校核

通过经典材料力学公式进行理论计算，对刀片根部的应力水平进行量化评估^[3]：

静态弯矩应力：根据弯矩公式计算得出，刀片在最大静态工作载荷下，根部的应力 $\sigma = 12.3 \text{ MPa}$ 。该值极低。

最大冲击应力：模拟设备工作中可能遇到的瞬时冲击工况，计算出刀片根部的最大冲击应力 $\sigma_{\text{冲}} = 258.3 \text{ MPa}$ 。

安全系数评估：4 叶刀片所用材料的屈服强度为 760 MPa。取行业通用^[6]的安全系数 $n=2$ ，则其许用应力 $[\sigma] = 760 / 2 = 380 \text{ MPa}$ 。无论是静态应力（12.3 MPa）还是最大冲击应力（258.3 MPa），都远低于许用应力（380 MPa）。理论计算强有力地证明，即使在最恶劣的工况下，刀片的应力水平也处于绝对安全范围内，其强度设计是保守且可靠的。

1.6 有限元仿真分析（FEA）

为避免结构发生共振从而急剧加速疲劳失效，我们采用有限元分析软件对刀片进行了模态分析和谐响应分析^[3]。

模态分析结果：提取了刀片的前四阶固有频率，分别为：1287.6 Hz、1288.5 Hz、1413.0 Hz 和 1445.5 Hz。

外界激励频率：设备工作时，刀片所受的主要外界激励频率来源于电机转速及其谐波，经计算其主频约为 183.3 Hz。

共振风险分析：对比可知，外界激励频率（183.3 Hz）与刀片的最低阶固有频率（1287.6 Hz）相差甚远，频率比远大于 4，不存在任何耦合风险^[4]。仿真结论明确：刀片在工作过程中不可能发生共振，排除了共振导致疲劳断裂的可能性，分析结果见图 1。

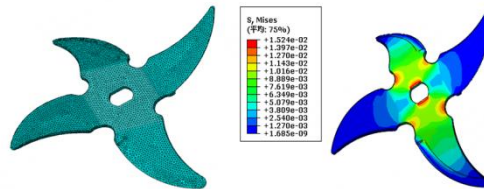


图 1 刀片有限元分析

1.7 第三方金相组织分析

为探查材料内部的微观缺陷，我们将断裂刀片和正常刀片的样本送至权威第三方实验室进行金相分析^[7]。

分析结果：实验室报告显示，刀片材料的金相组织正常^[8]，主要为回火马氏体，组织均匀细小，未发现大块的夹杂物、气泡、微裂纹或明显的成分偏析等冶金缺陷。这表明材料的冶金质量是合格的，断裂并非由原材料本身的质量问题引起。

2 结果与综合分析

整合所有测试与分析数据，我们可以得出清晰且相互印证的结论。

2.1 断裂性质与根本原因判定

该断裂刀片的宏观断口具有典型的疲劳断裂特征：通过图 2 可见清晰的贝壳状疲劳辉纹和瞬断区。结合金相分析未发现材料缺陷，以及理论计算和仿真排除了过载与共振的可能，最终判定该断裂为起源于制造缺陷的疲劳断裂^[1]。其失效机理是：在刀片制造过程（如冲压、折弯或热处理）中，个别刀片根部区域引入了微小的微观划伤、裂纹或应力集中点（统称为“内伤”）。该缺陷点在后续的服役过程中成为疲劳源，在交变载荷下不断扩展，最终在达到一定循环次数后发生断裂。

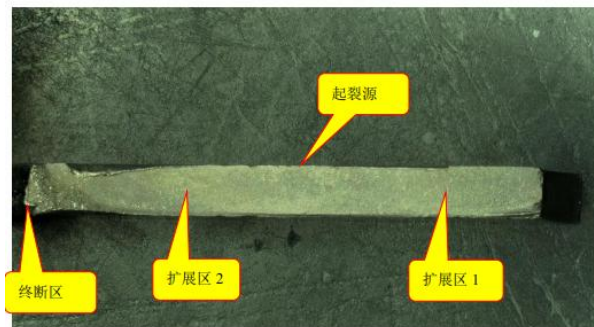


图 2 断口宏观分析

2.2 产品性能总体评价

疲劳寿命：刀片表现优异，裕度充足，优于同类产品。

机械性能：硬度达标且均匀，静态和动态强度理论安全系数高。

动态性能：固有频率远离激励频率，无共振风险。

2.3 断裂事件定性

该单例断裂事件属于小概率的偶发事件，其根源在于生产制程中的个别质量控制环节失效，导致产生了带有“内伤”的缺陷产品。这是一个制造质量问题，而非产品设计问题。

3 讨论与建议

基于“治标且治本”的原则，我们不仅分析了原因，更旨在预防此类事件的再次发生。

3.1 对断裂事件的深入讨论

“设计裕度”与“制造缺陷”的关系在此案例中得到充分体现。即使设计留下了充足的安全裕度（如高达 330% 的疲劳寿命），但仍无法完全免疫于严重的制造缺陷。这凸显了先进设计与精密制造必须相辅相成。应深入剖析具体是哪个制程环节（下料、冲压、折弯、热处理、喷砂等）引入了缺陷，并制定永久纠正措施。

3.2 制程质量优化建议

（1）加强无损检测（NDT）：在现有检验基础上，对 100% 的刀片根部应力集中区域引入荧光渗透检测（FPI）或涡流检测等无损探伤手段，确保能有效识别微米级的表面裂纹。

（2）优化关键工艺：与供应商协同，评审并优化折弯模具的圆角设计及磨损更换标准，确保折弯过程中不拉伤材料；严格控制热处理过程的升温、保温和冷却曲线，减少热应力与变形^[9]。

（3）强化供应商管理：将本次分析的结论和标准传递给供应商，并将其制程控制与出厂检验标准纳入我们的采购协议中，提升来料质量等级^[10]。

3.3 设计端的持续优化空间

虽然当前设计已满足要求，但从技术进取的角度，仍可考虑：

进一步优化根部几何：采用基于拓扑优化的设计，

或进一步增大过渡圆角半径，从根本上降低应力集中系数。

材料升级：在成本允许的情况下，可试用疲劳性能更优的高韧性材料，如某些高级别的弹簧钢或工具钢。

4 结论

本研究通过系统性的多维分析，得出以下核心结论：

（1）叶刀片综合性能卓越：其疲劳寿命、静态与动态强度、抗共振性能及材料硬度均满足并远超设计指标，整体设计稳健可靠。

（2）断裂原因定性：本次单例断裂的根本原因是制造过程中引入的微观缺陷（内伤）所导致的疲劳断裂，属于制程质量控制范围内的偶发事件，而非设计缺陷。

（3）根本解决途径：建议通过加强无损检测、优化关键制造工艺和强化供应商质量管理来彻底消除此类隐患。

参考文献

- [1] Suresh S. Fatigue of Materials[M]. 2nd ed. Cambridge: Cambridge University Press, 1998.
- [2] 熊峻江. 疲劳断裂可靠性工程学[M]. 北京: 国防工业出版社, 2008.
- [3] Logan D. L., A First Course in the Finite Element Method[M]. 5th ed. Toronto: Cengage Learning, 2011.
- [4] 王勖成. 有限单元法[M]. 北京: 清华大学出版社, 2003.
- [5] Gere J. M., Goodno B. J. Mechanics of Materials[M]. 8th ed. Stamford: Cengage Learning, 2012.
- [6] 刘鸿文. 材料力学[M]. 第 5 版. 北京: 高等教育出版社, 2011.
- [7] ASTM E3-11(2017), Standard Guide for Preparation of Metallographic Specimens[S]. West Conshohocken: ASTM International, 2017.
- [8] 李炯辉. 金属材料金相图谱[M]. 北京: 机械工业出版社, 2006.
- [9] Juran J. M., Gryna F. M. Juran's Quality Control Handbook[M]. 5th ed. New York: McGraw-Hill, 1999.
- [10] 张公绪, 孙静. 现代质量控制与诊断工程[M]. 北京: 中国经济出版社, 1999.