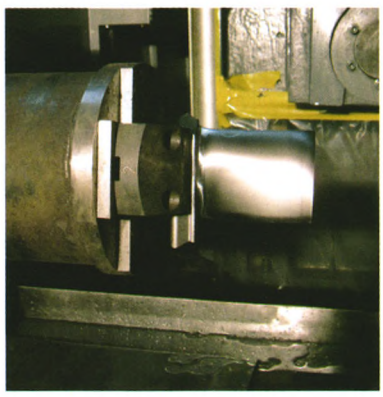
# 压气机薄壁叶片变形自适应数控砂带磨削试验研究

■ 郑州煤矿机械集团股份有限公司 （河南 450016） 吴海龙
■ 重庆三磨海达磨床有限公司 （400021） 张 美

**摘要：** 基于压气机薄壁叶片结构特点及其抛光工艺要求，为实现叶片型面自动化抛光，满足其型面尺寸精度和表面质量要求，对数控砂带磨削工艺装备技术进行研究，提出薄壁叶片变形自适应恒压磨削控制方法，并对变形自适应磨削控制系统进行设计。通过对叶片磨削加工刀具轨迹生成方法的研究和走刀路径的优化选择，最终实现了叶片变形自适应数控砂带磨削。磨削试验结果验证了叶片变形自适应恒压磨削控制方法的合理性，得到了较高的叶片表面质量及型面尺寸精度，且磨削效率显著提高。



叶片是压气机、航空发动机和汽轮机等动力及能源装置的关键核心零件，其通常由具有一定强度的难加工材料制成，且型面属空间自由曲面，因此加工难度大。制造出几何精度高和表面质量好的叶片型面对于提高各类轮机的工作效率具有重要作用。叶片薄壁型面常采用五轴联动数控铣削加工，但铣削本身所能达到的加工精度和表面质量与叶片最终要求还有很大差距，使得其对叶片推进效率和疲劳强度影响较大，加之叶片存在铣削加工的变形，叶片表面必须磨削或抛光加工。

应用砂带磨削技术对叶片型面进行精加工是当前国际上叶片精整加工的最先进技术。欧美及日本等工业发达国家已普遍采用数控叶片磨床加工叶片，如英国Cyril Adams生产的窄涡轮叶片砂带磨床和Rolls-Royce生产的涡轮叶片宽砂带型面砂带磨床、德国Metabo公司的CNC控制透平叶片的六轴联动砂带磨床、日本三菱重工、美国罗格以及GE等公司也开发了类似砂带磨床，使叶片整体加工效率、叶片型面几何精度及叶片质量得到大幅度提高。而目前国内叶片制造企业普遍采用手工打磨方法，其加工效率极低，叶片之间一致性差，制造精度很难保证，严重制约了叶片的量产进度和质量，进而严重制约了国内发电及航发装备制造业整体水平提升。

国内科研机构对叶片砂带磨削技术进行了大量研究，其中以重庆大学、华中科技大学和吉林大学为代表，但除了重庆大学联合重庆理工大学和重庆三磨海达磨床有限公司针对大型汽轮机叶片进行了六轴数控叶片砂带磨床的研制并实现产业化外，其他均限于基础研究层面，尚未实现工程应用。

然而，与大型汽轮机叶片不同，压气机薄壁叶片加工时易产生变形，实现其磨削抛光则更为困难。本文以压气机薄壁叶片为研究对象，在大型汽轮机叶片数控砂带磨削技术基础上，展开其数控磨削方法研究，并经过大量磨削试验，验证其方案可行性，为压气机薄壁叶片的生产加工提供技术基础。

### 1. 压气机叶片结构特点和抛光工艺要求

图1所示为某压气机15级动叶片，主要由叶身、榫根和榫板三部分组成，叶身分为叶盆、叶背、进气边和排气边，其叶身型面部分为复杂空间自由曲面，各部分的曲率、扭转变化较大，是典型的薄壁件。

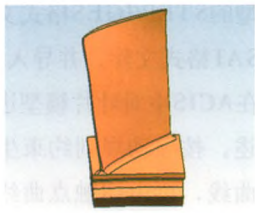


图1 叶片三维模型

该叶片总长112.5mm，最大弦宽约72mm，进排气边圆弧半径为0.19～1.29mm。叶身曲面由23个截面给定，每个截面由叶盆、叶背两条样条曲线和进排气边圆弧光顺拼接。良好的气动性能要求叶片的表面光顺，一般要求表面粗糙度值$R_a \leqslant 0.8\mu m$，截面间的型面应平滑过渡，并有轮廓度的要求，轮廓度规定了进排气边厚度的变化速度。

从叶片的结构不难看出，该叶片具有壁薄、型面复杂的特点，叶片在前道铣削工艺过程中，由铣刀切削力和切削表层残余应力作用所引起的叶片弹性变形和扭曲变形是不可避免的。在后续砂带磨削抛光过程中，若按照铣削后的理论轮廓进行磨削抛光，由于叶片型面已产生铣削变形，容易产生欠磨和过磨现象，影响叶片型面精度甚至造成叶片报废。

### 2. 变形自适应恒压磨削控制方法的提出

叶片磨削过程中磨削接触区砂带磨粒的受力情况如图2所示，分别为接触轮与工件的接触压力$F_p$、工件施加给磨粒的法向力$F_n$和切向力$F_t$。磨削过程中，$F_p$与$F_n$为一对关系密切的作用力，$F_n$与$F_t$也具有一定比例关系。为实现叶片表面恒压磨削，需保证接触轮与工件接触压力$F_p$恒定，进而法向力$F_n$和切向力$F_t$应该是相对稳定的，考虑到叶片型面变形，如果出现欠磨或过磨现象，磨削深度$a_p$会发生改变，切向力$F_t$也会发生相应变化，从而体现在磨头电动机的输出转矩和输出功率也发生相应变化。那么如果能控制磨头电动机的输出功率，进而控制接触轮与工件的接触压力，就能实现叶片变形的恒压自适应磨削。

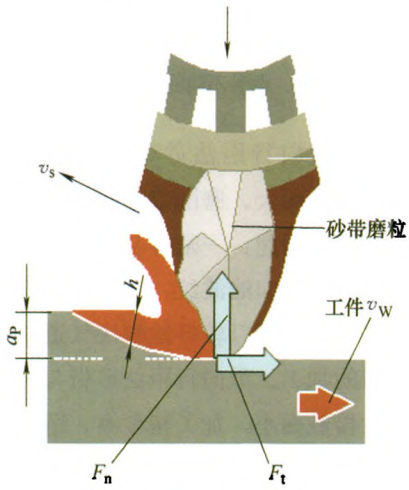



图2 砂带磨粒的受力情况

本文提出了如图3所示的叶片变形自适应恒压磨削控制方法。其控制原理为：在六轴联动叶片数控砂带磨床基础上，在磨头上增加接触轮与曲面切触主法线控制轴（$N$轴）和磨削功率传感器。通过磨削功率传感器对磨头电机电流信号进行采集，并反馈至自适应PID控制器，经运算后控制主法线轴气缸压力输出，从而控制接触轮与工件的接触压力，实现对叶片型面变形的自适应恒压磨削。

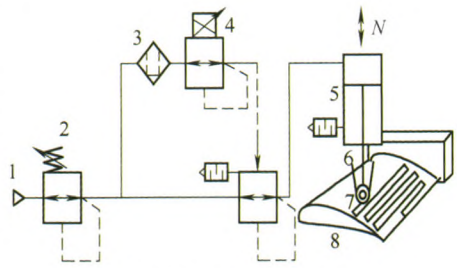



图3 变形自适应恒压磨削控制原理

1.气压源 2.减压阀 3.微雾分离器 4.电气比例压力阀 5.精密气缸 6.砂带 7.接触轮 8.叶片

### 3. 数控砂带磨削装备及关键技术

（1）工艺装备结构。根据压气机薄壁叶片结构特点和加工工艺要求，建立数控磨削工艺装备结构如图4所示。该设备以砂带为磨具，采用七轴六联动形式，提供3个直线运动轴、3个回转轴和1个主法线轴。这些运动轴包括：与磨头垂直、沿被加工叶片长度方向的运动轴（$X$轴），与磨头垂直沿被加工叶片宽带方向的运动轴（$Y$轴），与磨头平行的运动轴（$Z$轴），工件回转轴（叶片旋转）为$A$轴，磨头摆动轴（磨头倾斜）为$B$轴，围绕$Z$轴旋转的轴（磨头扭转）为$C$轴，主法线轴

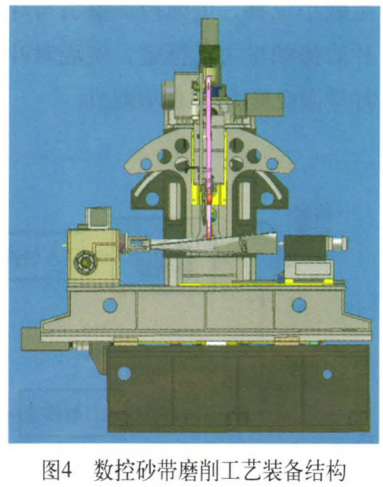


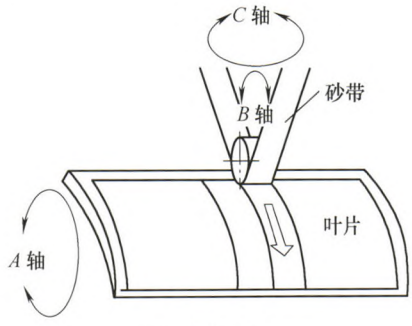
图4 数控砂带磨削工艺装备结构

为*N*轴。叶片置于回转工作台的专用夹具上，随着转台的旋转，叶片一次装夹可依次实现内外弧面和叶片边缘的磨削，其磨削方式可以进行横向、纵向、干式及湿式等多种选择。

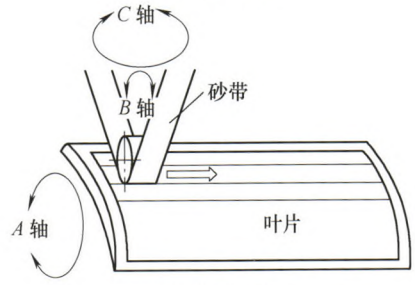
（2）叶片变形自适应恒压磨削控制系统。如图5所示，该系统由自适应PID控制器、气源发生装置和磨头电动机功率检测组成闭环控制，其中控制器用于对被控电流信号的采集、处理运算和输出相应控制信号，以便对比例压力阀进行实时控制；比例压力阀为电-气转换元件，它将输出的电信号转变为压力信号控制气缸动作；磨削功率传感器检测磨头电动机电流大小，并将检测信号反馈至控制器。

其控制过程为：首先在主控界面上输入期望的控制磨削压力（代表了给定磨削深度的电流值），磨削加工过程中，与电动机电流的实测值（代表了实际磨削压力）进行比较，再根据自适应PID控制器进行计算，得出比例阀阀口开度值，然后经D/A转换输出到比例阀控制其阀口开度，从而控制气缸动作，使得与气缸活塞杆连接在一起的磨头产生微小位移，进而控制磨头与叶片的接触压力$F_p$恒定，实现对叶片型面变形力-位自动调节。

（3）走刀路径与磨削加工刀具轨迹的生成。不同叶片砂带磨削时的走刀路径对保证型面精度十分重要，通常采用横向行距法或纵向行距法，如图6所示。




（a）横向行距法




（b）纵向行距法

图6　两种不同的磨削路径

横向行距法砂带与叶片型面接触面大，磨削效率高，但存在两个问题：一是容易产生沿叶片长度方向的波纹，加工精度不高；二是难以较好地解决气道边缘的加工。纵向行距法砂带与叶片接触面小，加工精度高，适合于有很薄的气道边缘的叶片加工，但加工效率低一些。针对压气机薄壁叶片表面质量和加工精度要求高的特点，本试验采用纵向行距法。

叶片砂带磨削加工刀具轨迹的生成是数控编程中最关键的部分，加工运动轨迹的生成能力直接决定叶片加工程序的质量。磨削加工刀具轨迹的生成过程如图7所示。首先，用PROE/UG设计软件对压气机叶片进行造型设计；然后，通过InterOp接口，将叶片模型的STEP/IGES格式文件转换为SAT格式文件，并导入ACIS中；在ACIS中对叶片模型进行曲面描述，按导动规则约束生成切触点曲线，再由切触点曲线按砂带磨头刀具偏置计算方法生成刀具轨迹曲线。

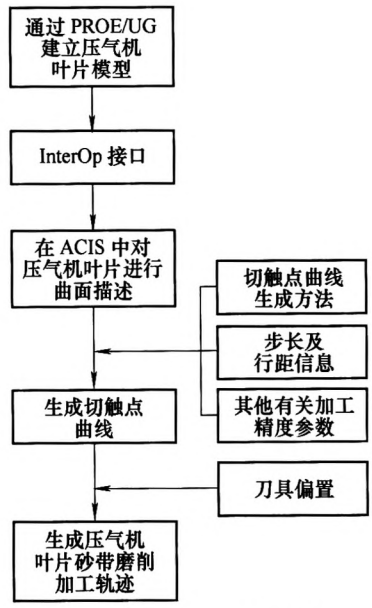



图7　磨削加工刀具轨迹生成过程

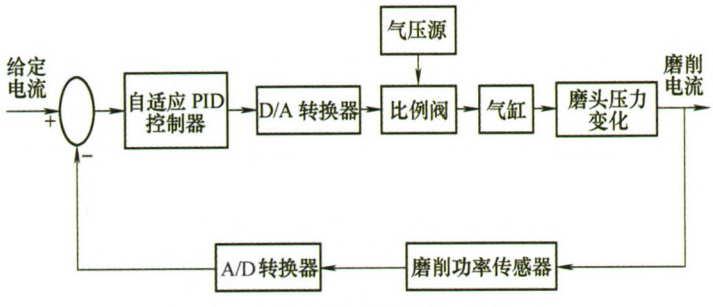



图5　自适应恒压磨削控制系统框图

## 4. 叶片数控砂带磨削试验及结果

对图1所示压气机15级动叶片进行磨削试验，依次对其内弧、背弧和进排气边缘进行磨削，其磨削过程现场如图8所示，砂带磨削工艺参数如附表所示。

磨削后的叶片表面如图9所示。叶片经过多轴联动砂带磨削后，需对其几何形状和尺寸进行

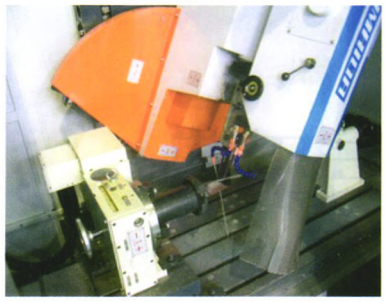


图8　叶片砂带磨削试验

**叶片磨削试验工艺参数表**

| | 内（背）弧 | 进排气边 |
|---|---|---|
| 砂带规格（宽/mm×周长/mm） | 10×3 000 | |
| 磨料及粒度 | 3M尼龙砂带240# | |
| 磨削速度/($m \cdot s^{-1}$) | 15 | 13 |
| 进给速度/($mm \cdot min^{-1}$) | 1 500 | 2 000 |
| 磨削力/N | 1.2 | 0.3 |
| 切削液 | 无机磷酸盐中和液 | |

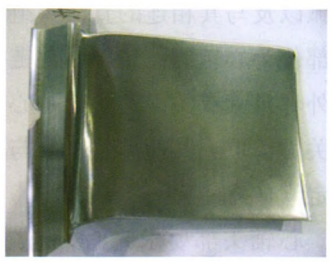


图9　磨削后叶片表面

检测。利用三坐标测量仪对磨后叶片进行截面轮廓型线误差检测，经扫描和软件数据处理得出测试结果如图10所示，完全符合型面±0.12mm、边缘±0.06mm的技术要求。利用粗糙度仪对叶片表面粗糙度值进行测量，$R_a$=0.24～0.30μm，远优于叶片加工表面粗糙度技术指标要求。在提高叶片型面尺寸精度及降低表面粗糙度值的同时，磨削效率较人工打磨方法显著提高，劳动强度大大降低。磨削试验结果表明叶片变形自适应恒压磨削控制方法是合理可行的。

## 5. 结语

（1）本文提出了压气机薄壁叶片变形自适应恒压磨削控制方法，建立了七轴六联动数控砂带磨削装备，对叶片变形自适应磨削控制系统进行设计，使整个磨头系统的压力恒定，实现了磨削对叶片型面变形的力-位自动调节。

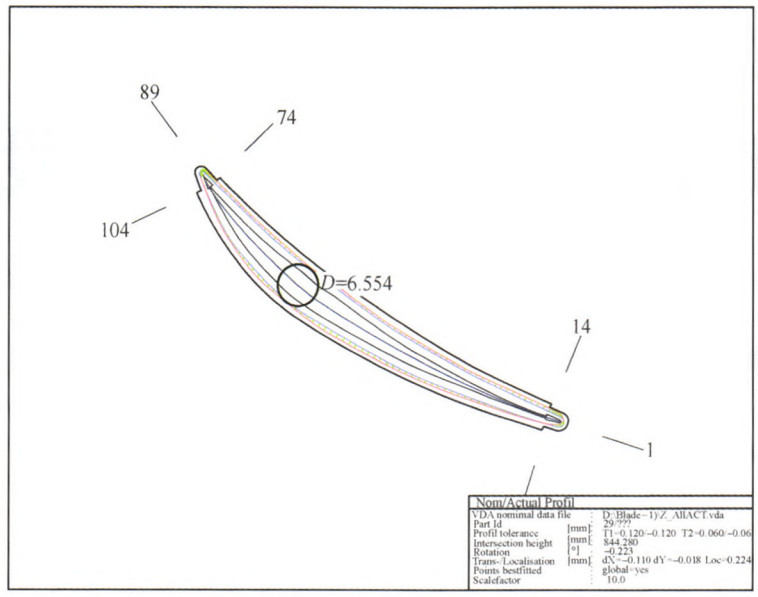



图10　磨后叶片型面轮廓检测结果

（2）对压气机叶片磨削加工刀具轨迹的生成和计算方法进行了研究，并对磨削走刀路径进行了优化选择。经过磨削试验，验证了叶片变形自适应恒压磨削控制方法的合理性，得到较高的叶片表面质量及型面尺寸精度，同时加工效率显著提高。

**参考文献**：

[1] 刘艳. 叶片制造技术[M]. 北京：科学出版社，2002.

[2] 朱凯旋，陈延君，黄云，等. 叶片型面砂带磨削技术的现状和发展趋势[J]. 航空制造技术，2007（2）：102-104.

[3] Z. W. Zhong. Recent Advances in Polishing of Advanced Materials[J]. Materials and Manufacturing Processes, 2008（23）：449-456.

[4] 黄云，黄智. 现代砂带磨削技术及工程应用[M]. 重庆：重庆大学出版社，2008.

[5] 黄智，黄云，张明德，等. 自由曲面六轴联动砂带磨削机床试验[J]. 重庆大学学报，2008，31（6）：598-602.

MW（收稿日期：20150909）

## 专家点评

文章写得较严谨、规范，体现了数控技术和砂带磨削技术组合使用的新工艺。文章中的图较清晰地体现了这种新工艺的具体操作使用情况。该方法可以代替人工砂轮打磨，降低工人的劳动强度，保证较好的表面质量。该研究用的是专用的砂带磨床，也可以设计为单独的机床附件，可以提高机床的利用率。