

光整加工

涡轮盘榫槽边缘的 数控复合光整加工

本文对涡轮盘榫槽边缘的光整加工工艺进行了专题研究，在新引进的数控倒角机上，采用专用铣刀数控铣削和专用端面刷自动抛光的复合加工方法，突破了榫槽边缘光整加工数控化的技术瓶颈。首次实现了榫槽边缘光整加工数控化、减轻了工人的劳动强度、改善了操作环境、优化了榫槽边缘的表面质量并提高了生产效率。

文 | 隋景丛、史前凯、于洁、郑飞，中航工业沈阳黎明航空发动机（集团）有限责任公司

涡轮盘是航空发动机涡轮转子的关键部件，在高温高压及复杂动载荷下高速旋转，工作环境极其恶劣。涡轮盘榫槽部位与叶片榫头部位相配合，由于叶片受力复杂，对盘榫槽的接触面相互作用，使得涡轮盘榫槽边缘成为产生应力集中的薄弱环节，如何提高涡轮盘榫槽边缘的表面质量显得尤为重要。

图1为某高温合金涡轮盘，其零件结构复杂、棕树型榫槽加工空间狭小、榫槽与端面的过渡圆角设计要求为 $R0.4 \sim 0.6$ 、表面粗糙度要求高达 $R_a0.8$ 、榫槽扭角和狭小

棕树型榫槽轮廓使得榫槽边缘倒圆与光整加工难度极大。

涡轮盘榫槽边缘复合光整加工的功能及特点

为了改善零件的外观质量，提高零件表面的耐磨性，充分发挥每个零件的功能，保证产品的整机性能，零件在获得规定的尺寸精度、几何精度之后，如尚未达到表面质量的要求，还要根据需要进行去除毛刺、飞边、刀痕，以降低表面粗糙度值，改善表面应力状态，消除零件表面上残留的各种缺陷等工

作。因此，在机械加工中旨在提高零件表面质量的各种加工，称为光整加工。涡轮盘零件经拉削加工后形成了棕树型榫槽，对其边缘进行棱边倒圆、抛光，以降低表面粗糙度值、改善物理力学性能，这称为涡轮盘榫槽边缘的光整加工。

涡轮盘榫槽边缘光整加工的主要功能为：去除棱边毛刺，进行倒角、倒圆，并保证表面之间的光滑过渡，提高零件的装配工艺性。最终降低零件表面粗糙度值、提高零件表面质量和实现精度稳定。

涡轮盘榫槽边缘光整加工的主要特点为：通过倒角铣刀与固定刷，按预先编制好的数控程序轨迹，并以一定的切削参数实现对涡轮盘榫槽边缘表面的加工。其倒角、倒圆的一致性好，对降低表面粗糙度值的效果明显。不接触高精度的榫槽拉削表面，大大优于磨粒流及自由磨料的光整加工法。特别适合光整榫槽边缘倒角、

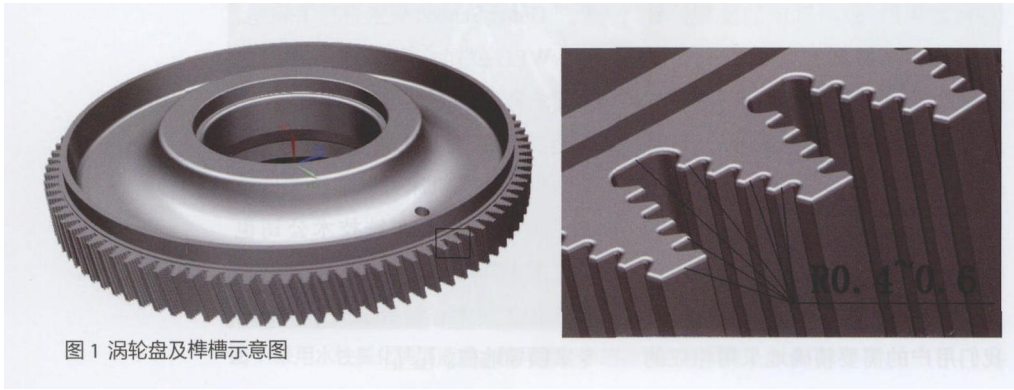


图1 涡轮盘及榫槽示意图

倒圆在 0.6 mm 以下的盘件。

涡轮盘榫槽边缘复合光整加工工艺

高温合金涡轮盘榫槽狭窄，在铣刀的加工过程中，极易产生干涉碰撞，倒圆部位表面粗糙度的要求较为严格 $R_a \leq 0.8$ ，故选用数控铣和刷子自动抛光的复合加工方法，共同完成榫槽边缘的自动倒圆的光整加工。

进行榫槽光整的设备为自动倒角机，夹具采用了组合设计的理念，其结构设计非常合理，可满足不同孔径盘件的装夹要求，具有装卸方便、加紧可靠的性能特点。

榫槽光整采用一种硬质合金的专用铣刀，用于去除榫槽边缘的大部分余量，采用两种标准金刚石粗、细端面刷，用于边缘的圆整与抛光。

为了防止刀具干涉，避免刀具走轮廓时碰撞。在加工试件前，采用 VIRCUT 模拟仿真软件，建立零件模型、编制数控程序并模拟仿真加工倒圆（图 2）。确认程序可行后，选择和真件完全一样的拉槽试验件，在数控倒角上进行试验，调整加工程序并试验切削参数，最终的切削参数为：铣刀转速 $n = 25\,400\text{ r/min}$ ；进给量 $f = 620\text{ mm/min}$ ；切削深度 $ap = 0.1\text{ mm}$ ；零件转速 $n = 6\text{ r/min}$ ；刷子进给量为 $2\,000\text{ mm/min}$ ，刷子切向速度为 17 m/s 。

采用数控铣和刷子自动抛光的复合光整工艺分为五个工步：工步 1，装夹零件，并找正、压紧；工步 2，利用测头对零件位置进行检测，保证加工精度，检测的同时测头处有自动喷气装置，将抛光油及其他杂物去除，防止产生测量误差；工步 3，零件不动，选用高速旋转的专用铣刀沿榫槽一侧的轮廓边缘进行四轴联动铣削倒角，需达到 $0.4 \times 45^\circ$ ，表面粗糙度达到 $R_a 1.6$ ；工步 4，零件顺时针旋转，粗端面刷反方向旋转并沿榫槽端面左右往复运动，抛磨榫槽边缘铣削部位，零件逆时针旋转，粗端面刷反转并往复抛磨。榫槽边缘倒圆达到 $R0.4 \sim 0.6$ ，并圆滑转接，表面粗糙度达到 $R_a 0.8$ ；工步 5，零件顺时针旋转，细端面刷反方向旋转分别沿榫槽端面左右往复运动，细抛榫槽边缘圆角部位。零件逆时针旋转，细端面刷反转并往复精抛。

复合光整加工的效果分析

任何一种光整加工方法，在对零件表面进行光整加工后，衡量其表面质量的主要内容包括：表面粗糙度 R_a 值的降低、毛刺去除及棱边质量的改善、表面物理性能的改善。数控复合光整加工技术彻底改变了人为控制光整质量的缺陷，解决了人工倒圆质量不稳定的技术难题，实现涡轮盘榫槽边缘倒圆数

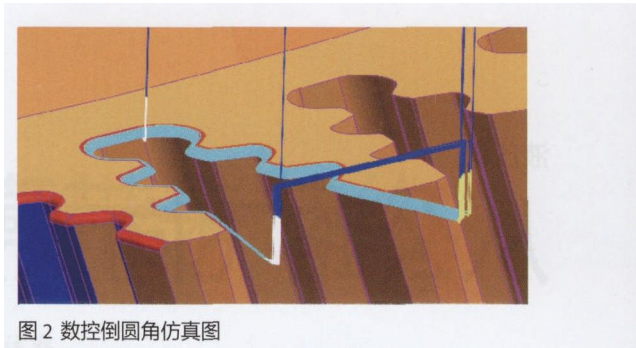


图 2 数控倒圆角仿真图

控程序控制，大大提升了加工质量的保证能力及其稳定性。

任何一种先进的工艺技术，除了在加工质量上是先进的，在加工生产效率上也是先进的。数控复合光整加工技术从根本意义上讲，就是以现代的先进技术替代陈旧、落后、繁重的人工劳动，彻底改变劳动者的生产环境，并从繁重的人工劳作中解放出来。

与人工利用工具的加工方式相比，数控复合光整加工工具备如下优势（表 1）：工件的表面质量状态好，倒圆值规矩且稳定；同样加工状态下的生产效率高；加工环境更佳，封闭、湿态、无污染；大大减轻了工人的劳动强度。

通过对涡轮盘榫槽边缘数控复合光整加工工艺进行研究，拓宽了盘类件榫槽边缘光整加工的工艺技术，突破了榫槽边缘自动倒圆的技术瓶颈，填补了行业盘类件榫槽边缘数控光整制造技术空白，为提高航空盘类件制造质量奠定了扎实的基础。

零件的表面质量对零件的使用性能、寿命和可靠性都有很大影响。随着新型航空发动机性能的不断提高，对零件的表面质量也提出了越来越高的要求。作为提高零件表面质量的表面光整加工技术已经成为改善零件和产品的使用性能、提高可靠性、延长使用寿命的重要途径之一。该项新技术减轻了工人的劳动强度、减少了环境污染，必将得到很好的推广和应用。[MM]

表 1 涡轮盘人工与数控复合光整加工比对

比对项目	利用工具人工加工	数控复合（数控铣+动力刷）
表面粗糙度 $R_a/\mu\text{m}$	0.8	0.5 ~ 0.7
倒圆值 R/mm	0.4 ~ 0.6	0.5 ~ 0.6
加工一件时间 h	4	4
加工质量稳定性	一致性差	一致性好，稳定
加工效率能否提升	不能	有提升空间
加工环境	有污染，环境差，带口罩	湿态，封闭，环境好
工人劳动强度	大	小
对操作者的要求	技能要求高	懂数控操作
经济性	无设备成本	有设备成本