汽轮机转子制造技术

上海重型机器厂有限公司 （200240） 雷 文

汽轮机高、中、低压转子外形结构复杂，材料性能及加工精度要求较高，其材料主要以中碳高强度合金钢为主，材料强度和韧性较高，而导热性能很差，尤其是割槽时切削区域的温度较高，不仅加速了刀具磨损，降低刀具的寿命，同时也容易使加工后材料产生较大的残余应力，影响转子的尺寸精度和使用寿命。因此，其工艺过程极其复杂，需要配备特殊的加工设备，刀具及工艺技术的创新。本文将主要是对叶片槽的高效切削方法及套料孔的高精度加工方法进行详细论述。

1. 转子结构特点

汽轮机转子分高、中、低压三种，重量从十几吨到上百吨不等，属于大型轴类零件，其结构复杂，如图 1 所示。一般高、中压转子外形尺寸为 ϕ1 200mm × 8 000 mm，低压转子外形尺寸为 ϕ1 800mm × 8 000mm，其外圆存在许多形状各异的叶片槽，各槽形状复杂且不规则，且多数转子调阀端中心存在 ϕ130mm × 2 000mm 左右的套料盲孔。

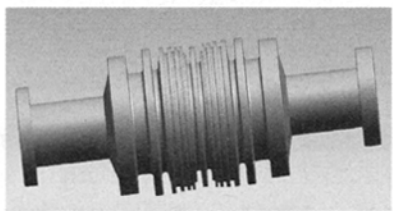

图 1

2. 转子加工要点分析

汽轮机转子由于其特殊的结构特点，外圆上存在密排深而窄的不规则叶片槽，其加工量大，散热差，对刀具的形状及性能提出较高的要求。而且多数转子要求在调阀端中心 ϕ120mm 盲孔范围内套出 ϕ60mm 试棒，这种小孔径大试棒的套料及割断加工较为复杂，而且 2 000mm 长套料孔的最终圆跳动必须控制在 0. 25mm 以内。因此，叶片槽的高效切削和调阀端的套料是转子加工的两大难点。

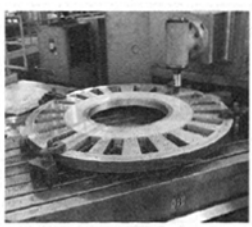

图4 转动环在机床上铣削

图5 转动环在机床上磨削

在机床上磨削。⑤转动环与隔板体组合加工。转动环单独精细磨准喷涂硬质金属表面后，再与隔板体进行同研磨喷涂面，以保证转动环与隔板体间的灵活性及气密性要求。

5. 结语

本高参数大功率旋转隔板的制造关键工艺技术的全面解决，从工艺上着力提升了转动环与隔板体的制造技术水平，形成具有完全自主的知识产权。通过该旋转隔板产业化的应用，发展了我公司旋转隔板的工艺技术，降低制造成本，提高旋转隔板的工作效率，具有明显的创造性和实用性。同时本工艺创新成果完全可以满足相同结构的所有汽轮机旋转隔板的制造加工工艺。本高参数大功率旋转隔板加工工艺技术为国内首创。**MW**

（收稿日期：20110311）

3. 叶片槽的加工

转子（尤其是低压转子）吨位较大，ϕ1 800mm外圆上存在密排窄而深的叶片槽，深度从50～500mm不等，宽度从50～300mm不等。叶片槽加工量甚至达转子净重的30%以上，切削量较大，并且叶片槽形状不规则，大大制约了零件加工效率，对刀具的性能及加工方法提出较高要求。叶片槽加工主要难点体现在：排屑困难，散热差，刀片磨损快，切削速度受限制，效率低等几个方面。

（1）割槽刀具的改进　转子材料大多为高强度合金钢，抗拉强度在860～960N/mm^{2}之间，韧性大，切削性能较差；由于叶片槽深而窄，割刀主要受到切向力作用，而且刀杆的宽度必须小于工件叶片槽宽度，所以割刀设计成前宽后窄的板式结构，刀杆宽度略小于刀片宽度，保证了进刀时刀杆与槽侧面的间隙；传统割刀采用45调质钢，刀具为机夹式，割刀片采用整体YT5硬质合金，宽度在20～30mm间。由于考虑到刀杆刚性及刀片材质耐温性，切削速度一般控制在40m/min左右，进给量在0.2～0.3mm/r间。当刀片磨损后取出，将刀片换到磨用小刀杆，待刀片磨好后，重新将刀片安装在割刀杆继续加工，大大降低了加工效率。为此，根据各叶片槽特点，选用进口的专用割槽工具，割刀杆采用高强度硬质合金，并且通过性能热处理，提高刀杆的刚性。割刀片采用三角形状，宽度为19mm，为耐热涂层硬质合金刀片，耐热度高。通过改进后，进口刀片进给量0.2～0.3mm/r，切削速度100m/min，和传统的割刀相比，即使进给量一定，进口刀割槽速度显著提高，加上进口刀耐用，不需要磨削，避免了大量的磨刀及换刀时间，所以割槽效率可以提高为原来2倍左右。

（2）加工方式的改进　割槽时切削量大，由于叶片槽狭窄，为防止加工过程中，割刀和叶片槽产生摩擦。割刀装夹时，通过百分表校正刀杆与刀座垂直，同时刀杆垂直工件表面。由于叶片槽空间狭小，散热差，如果连续断屑，会产生较大热量，不仅消耗大量机床功率，最重要的是刀具耗损快。所以割槽时，切屑选择成薄而长卷曲状，但是薄而长卷曲状切屑排屑困难，如果不能及时排出，大量堆积在叶片槽内，会阻碍割刀的继续加工，同时刮伤已加工表面。为此，经过长期试验，采用反切削的方法（即机床反转，刀杆反装）使切屑在重力的作用下直接排出叶片槽，防止不必要的刀片磨损，同时有效解决了排屑问题。

（3）设计专用的冷却工装　割槽会产生大量的热量，降低刀具寿命，为此，根据车床的特点，设计专用的冷却循环系统。对割槽处提供一定流量的切削液，大大降低了切削热量，提高刀片寿命，同时提高了工作效率。

4. 套料加工

汽轮机转子大多存在ϕ120mm/ϕ60mm的套料孔，即要求从转子调阀端中心ϕ120mm范围内套割出ϕ60mm以上试棒，这种小孔径套大试棒的工具制造要求较高，是深孔加工中的难点。套料孔存在较高的直线度要求，根部为R60mm球状，表面粗糙度值R_a=3.2μm以下。因此，高精度、刀具要求高、排屑困难等是套料孔加工的难点，根据深孔套料加工原理及经验分析，我们可以从以下几个方面进行改进。

（1）刀具选择　套料工具选用瑞典山特维克可乐满刀具，刀片材质为GC235涂层硬质合金，刀具刚性较好，强度高，刀片的高韧性保证了极高的刃口安全性，使之轻松应对低速重载间断切削及不稳定状态切削。套料刀片结构采用外凸三角形刀片（WCMX 06…），此刀片可用于外、中、内刀座，WCMX 06…刀片的定位方法使得中心刀片在切削过程中首先在中心点开始切削，然后连续向外到周边进行切削，产生小而薄圆片切削，容易排屑，提高了机床的稳定性，同时提高了工件内孔的直线度及表面质量。在割断工具上，由于割断空间狭小，如图2所示，割刀必须在a_p<30mm的空间内实现割断加工，割刀制造困难较大，国际上各刀具厂家均没有此规格的割断工具。为此，我公司根据多年的套料及割断经验，初步设计并制造了ϕ120mm/ϕ60mm割断工具。割断刀片采用高速钢材质，通过对相同材质的毛坯试验件进行了割断试验并取得成功，同时根据试验结果，对各切削参数（如转速及

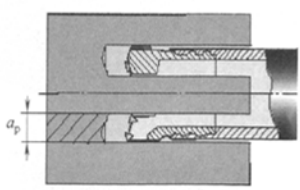

图 2

进给量等）及刀具结构（包括刀具形状、角度、安装方式等）再次进行了优化，最后，在汽轮机转子零件的套料及割断中一次性获得成功，为高中压转子的生产提供了良好硬件基础。内孔根部 R65mm 球面设计专用的圆弧扁及裹纱布磨头进行加工，使表面粗糙度值达 $R_a=3.2\mu m$。

（2）旋转状况　根据深孔套料加工原理，套料时工件与钻杆相对旋转是高直线度的首选，为获得最佳直线度要求，套料时采用钻头和工件相对旋转的加工方式，如图3所示。而割断由于与孔直线度无关，只要将试棒割出即可，所以对直线度无要求，为了加工方便，采用工件静止，钻杆旋转的加工方式，如图4所示。

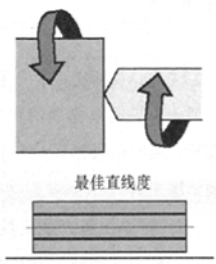

图3　钻头与工件相对旋转

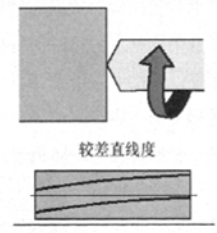

图4　旋转钻头

（3）导向套　导向套磨损或放置位置不恰当都会影响孔的直线度；导向套在钻头钻入工件的初始阶段起导向作用，为提高刀具的寿命和孔的质量，导向套的孔径等于钻头的名义直径并按上公差附加一定的数值。如钻头直径为 120.00mm 的深孔，导向套孔径为 120.012 ~ 120.034mm 间；其次，刀具装夹时，校正导向套和机床主轴中心对称度小于 0.02mm，如图5所示。导向套尽量靠近工件表面，提高刀杆的刚性及导向作用。

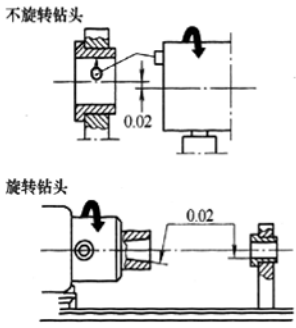

图5

（4）切削参数　在钻削加工中，最重要的是既提高切削效率又能将切屑顺利排出并远离钻头切削刃，切屑的长短及厚薄可以通过改变切削速度和进给量来获得，如图6所示。

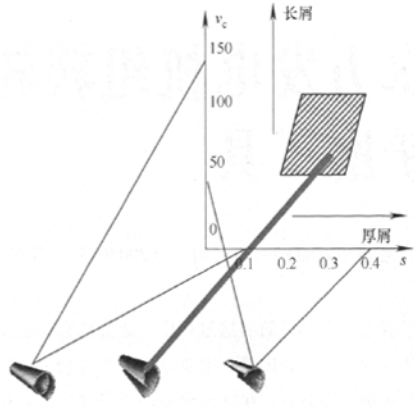

图6

由图6可知，降低切削速度可以提高进给量来缩短切屑，但特长或特大的断屑会阻塞切屑槽，所以不必过分断屑，同时断屑需要消耗能量，产生巨大热量会加速切削刃的磨损。通过长期多次试验，最终选择套料转速是 120r/min，套料进给速度 2mm/min；割断参数转速为 30r/min，进给速度为 0.4mm/min。

（5）切削液　切削液主要有油和乳化液两种，切削液不仅可以起到润滑、冷却效果，还可以改善工件加工表面质量，一般切削液温度控制在 30° ~ 40°。由于乳化液可以起到清洁工件的效果，同时乳化液适用于大多数材料，因此切削液选用乳化液；由于机床采用单管钻系统，如图7所示。单管钻系统的原理是外切削液供给和内切屑排送；钻头是靠矩形螺纹与钻杆相联接，切削液经过钻杆外壁与工件孔壁之间的间隙实现进给，将切屑通过钻管内孔排出，由于切削液速度很高，所以切屑可以无障碍通过钻管。

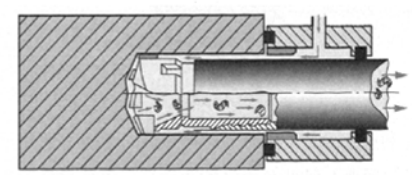
图7

5. 结语

通过对汽轮机转子割槽刀具及对套料加工的改进，大大提高了转子的加工效率，为汽轮机转子的批量化提供了技术准备。**MW**　（收稿日期：20110311）