

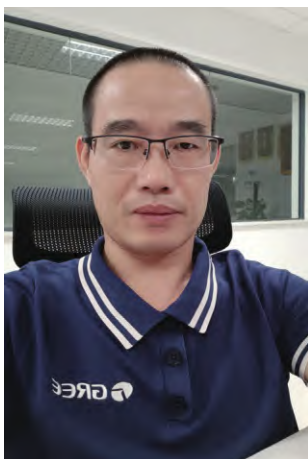
新能源汽车空调压缩机涡旋盘加工工艺

钟晓鸥，曾增权

珠海格力精密模具有限公司 广东珠海 519070

摘要：以研究新能源汽车空调涡旋式压缩机的核心部件涡旋盘的制造加工为切入点，阐述零件制造加工过程中的精度控制、效率提升要素，重点分析涡旋盘坯料、机床精度、刀具夹持柄、刀具、夹具及切削参数对其的影响。通过不同工况下加工的零件的不同精度数据，总结出达到加工精度要求和提高加工效率的方法。

关键词：涡旋盘；夹具；刀具；机床精度；切削参数



高级工程师 钟晓鸥

1 序言

涡旋压缩机因具有高效率、高可靠性、低噪声和低成本等优点而被广泛应用于汽车空调系统^[1]，新能源汽车空调优选涡旋压缩机为核心部件，而涡旋盘又是压缩机最核心的零件，其加工质量的优劣、加工效率的高低，直接影响空调系统性能。

在当前国产新能源汽车迅猛发展的背景下，涡旋盘制造加工已成为汽车空调压缩机最重要的技术之一，其发展速度快，技术也不断在完善。但是，目前涡旋盘制造加工还存在部分不足，主要表现在以下几个方面：①技术支撑不够完善，部分技术指标不能够得到满足。②生产效率不高，特别是大批量生产时。③涡旋盘制造加工过程复杂，质量稳定性难以保证。④加工技术尚待发展，生产成本较

高。因此，不断优化技术，提升效率与质量是当前涡旋盘制造加工的目标。

2 精度要求

动盘与静盘统称涡旋盘（见图1），是新能源汽车空调涡旋压缩机中的核心部件，由于静盘、动盘咬合的特性使得动、静盘的精度要求非常高，公差要求最小达到微米等级，业内普遍采用高精度的CNC加工中心来确保尺寸，且需要在恒温车间加工。

涡旋型线属于深槽薄壁类形状，且铝合金易产生变形，切削参数、夹具压紧方式及压紧力等因素都会导致零件某些特征产生变形。其中轴承孔、定位孔、键槽、平面和涡型线等特征的直径、圆度、平面度、平行度、轮廓度和垂直度等检测精度要求极高，零件经过多工位、多次装夹加工成形后，共50多个尺寸全部要求达到公差范围，且外观达到亚镜面要求，无色差、无阴阳面，加工难度极大。

3 工艺路线

涡旋盘加工工艺路线：坯料设计→夹具设计、制作及测试→刀柄选型→刀具设计→机床精度校正→PowerMILL编程及测试→零件清洁。

（1）坯料设计 确定零件的材料、设计要点及余量设置，既要有利于零件装夹，又能保证加工效率和精度。

（2）夹具设计、制作及测试 根据工件的形状和尺寸，制作效率高、精度高的夹具。



(7) 零件清洁 对零件进行清洁, 保证零件的表面达到光亮效果。

汽车空调涡旋盘零件材料普遍采用铝合金、不锈钢及铸铁等。由于新能源汽车的电池质量较大,为降低整车的质量,其空调压缩机涡旋盘多采用锻铝合金材料,材质轻、强度高,不仅能满足压缩机的使用要求,而且能保证精加工时产生的变形量最小,达到公差要求。

坯料模型设计时,在零件最大外圆设计3处装夹工艺辅助体(见图2),每处 120° 的旋转关系,以



满足零件制作加工多次装夹时压紧的需求，零件所有特征精铣完成后，再铣削去除。

4.3 坯料余量设计

涡旋盘产品模型如图3所示，坯料模型如图4所示。坯料制作时，为了使加工时装夹容易和提高生产效率，同时又保证精铣时有足够的余量，坯料成形后的实际尺寸，径向、轴向余量适合控制在约1mm/单边。这种余量的设置，使得在零件加工时，可以实现铣刀轴向大切深、径向快进给，利用侧刃一次完成粗铣。对粗铣夹具精度要求低，降低了夹具的制作难度，同时对装夹零件时取件、换件的定位精度要求也低，操作容易，易实现自动化生产，为提高生产效率创造了条件。



图3 涡旋盘产品模型



图4 坯料模型

4.4 坯料技术要求

涡旋盘坯料（见图5）成形后，表面轮廓特征均匀，无明显凹凸，无沙眼，无杂质，边角无毛刺，可保证装夹、制造精度。



图5 涡旋盘坯料

5 夹具

5.1 夹具设计与制作

在涡旋盘坯料的3个装夹工艺辅助体对应位置，设计3个用气缸驱动的压块，利用气压驱动，控制压块关节系统，达到压紧零件和松开取件的目的，气动夹具结构如图6所示。零件生产需四工位完成，一出二生产气动夹具（四工位）如图7所示，设计每个工位夹具的排位时，采取了把模型向纵向（Y轴）复制平移的措施，以减少机床长方向（X轴方向）的精度误差；每一工位夹具单独设计开关、压力表，同一工位气缸气路并联，可实现压块同时、同压力且位置精准地压在工艺装夹辅助体上，能避免零件变形，更能保证加工质量、装夹速度 and 安全性，且为后续升级安装机械手自动切换工件创造了条件。

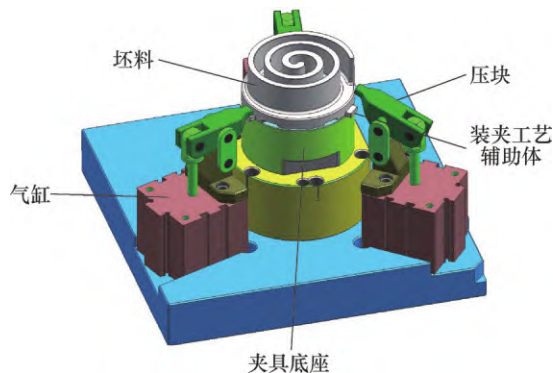


图6 气动夹具结构

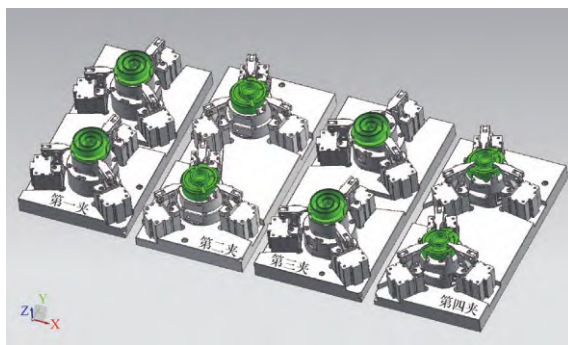


图7 一出二生产气动夹具（四工位）

鉴于零件的高精度要求，夹具制造加工上采用磨削优先，其次是慢走丝线切割，最后才是CNC加工中心铣削的工艺方法。其中第三夹的夹具底座上最关键的键槽凸台（和涡旋盘零件键槽有装配关系）如图8所示，单独加工时需留0.05mm余量，待夹具装配好后，再在CNC加工中心配铣加工，以保证合格涡旋盘零件刚好能放置在夹具上的最佳效

果。因底座需要经常切换涡旋盘零件，对耐磨性和稳定性要求高，故采用淬火工艺，使材料硬度提高到48~52HRC，从而保证长时间批量生产的质量稳定性。

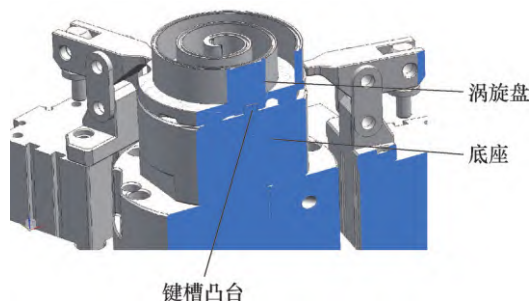


图8 键槽凸台

5.2 夹具测试

每一工位夹具的气压表，可以测试不同气压产生的压紧力对加工零件精度的影响，经过多次零件试切测试，得出不同切削效率时的最佳气压值，总结出在普通切削（主轴转速10000r/min）时，气压调到0.3MPa，加工稳定性好；当主轴转速提高到20000r/min时，加工涡旋盘渐开线型面，需要把气压调到0.4MPa，才能更稳定地保证表面加工质量和精度。由此可知，气动夹具能通过气压表量化压紧力，并通过测试得出最佳压力。且由于气动夹具的稳定性，可以有针对性地对加工过程中发现的问题提出改进方案，因此可以较快解决问题。比如在测试过程中，发现CNC加工中心用铣刀采用等高策略铣削圆，虽然直径可以达到公差要求，但圆柱度始终无法达到技术要求，即使是刀路轨迹优化至全部实现圆弧插补，在数控机床运行加工后，也解决不了圆柱度的问题，只有用镗削、铰削刀具才能实现，且合格率高、效率高。

连续生产10件产品进行验证，三次元检测数据如图9所示，表明加工的零件合格率达到99%，涡形线轮廓精度非常好，能实现批量生产。

6 刀柄和刀具

6.1 刀柄

刀具夹紧系统是连接刀具和机床主轴的关键环节，是一个不可忽视的重要因素^[2]，刀具的夹持柄直接影响零件的加工精度、刀具寿命及加工效率，最终影响加工质量。目前行业内普遍使用的刀柄类型如图10所示，分为弹簧筒夹刀柄和热缩刀柄

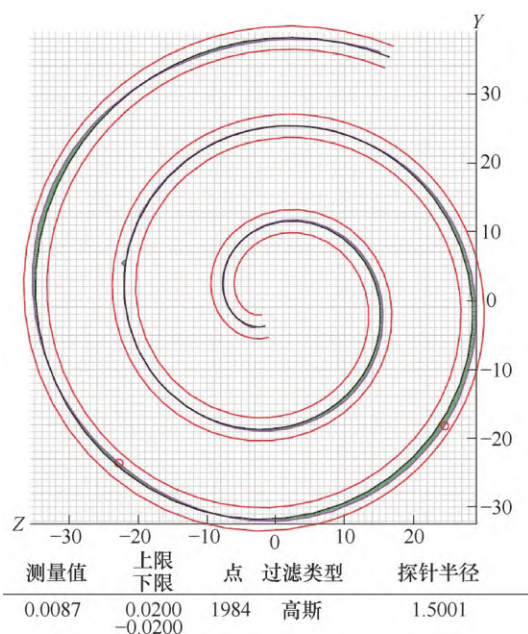


图9 连续生产10件产品进行验证的三次元检测数据

两种。



a) 弹簧筒夹刀柄



b) 热缩刀柄

图10 刀柄类型

弹簧筒夹刀柄通用性强，可节约刀柄的购买成本，但因其精度相对较差，且切削时不利于及时排屑，故不适合涡旋盘零件加工；热缩刀柄与刀具之间无需介入任何零部件，具有较高的夹持扭矩和很好的动平衡性^[3]，跳动小，精度高，夹持力好，刚性强，切削液易于喷射对准切削部位，带走切削产生的热量和切屑，更适合涡旋盘零件加工。图11所示为采用弹簧筒夹刀柄加工，图12所示为采用热缩刀柄加工。

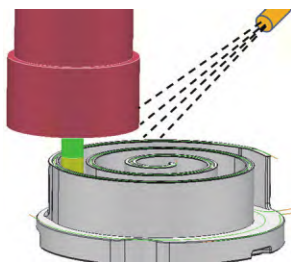


图11 采用弹簧筒夹刀柄加工

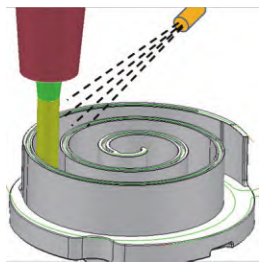


图12 采用热缩刀柄加工

6.2 刀具

由于硬质合金具有高抗压强度、良好的耐磨性、高硬度、高弹性模量和高抗冲击强度，耐振动性能好，耐蚀性强，尺寸稳定性好^[4]，因此刀具的基体采用硬质合金材质。DLC涂层（类金刚石涂层）的硬质合金刀具适用于各种铝合金、石墨和其他有色金属等材料的切削加工^[5]，可以保证加工质量，且刀具寿命长。

在满足生产需求的前提下，刀具设计的有效长度越短越好，此时刀具刚性强，切削效率更高，切削更稳定，不容易出现弹刀，加工精度也好。刀具刃长和刃短的切削效率区别如图13所示。

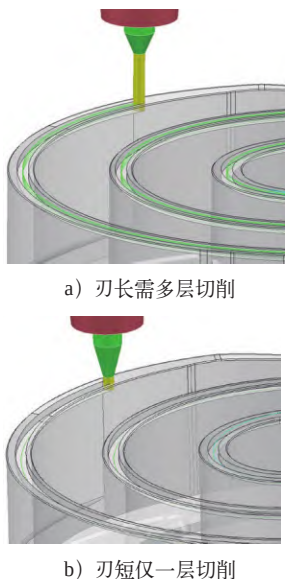


图13 刀具刃长和刃短的切削效率区别

切削速度公式^[6]为

$$v_f = n z_n f_z \quad (1)$$

式中， v_f 是进给速度（mm/min）； n 是转速（r/min）； z_n 是刃数； f_z 是进给量（mm/z）。

由式（1）可知，刀具刃数越多，切削效率越高，因此在满足排屑需求的条件下，刃数越多越好。

粗铣刀具设计4刃，能兼顾效率和排屑需求；精铣刀具设计6刃，能满足精度和效率需求。6刃精铣刀如图14所示。



图14 6刃精铣刀

7 机床精度检测

由于涡旋盘零件精度要求高，特别是涡旋盘渐开线型面的加工精度要求高，因此对CNC加工中心的精度要求更高，加工前必须进行精度检测校正。用激光干涉仪检测X、Y、Z轴位移误差。从车间多台正在使用的日本Makino-V56i机床（行程 $X \times Y \times Z = 900\text{mm} \times 550\text{mm} \times 450\text{mm}$ ）的检测数据来看，机床Y轴由于行程较小，位移误差一般都能保持在0.001~0.002mm；X轴行程较大，误差也随之增大，会有0~0.005mm的位移误差，其中一台机床的位移误差为0.003mm，如果通过技术手段修正到0.001mm内则最理想，但是如果没条件达到，则在零件装夹时，尽量靠近机床对刀器和刀库一侧，可以减小精度误差，并且主轴能以最短位移距离到机械手臂换刀，可以缩短换刀时间。机床对刀器与工作台如图15所示。



图15 机床对刀器与工作台

采用大理石水平仪或千分表对机床工作台水平面进行校验，主轴的垂直度则用标准棒和千分表进行校验，精度都能达到0.002mm以内，在技术条件范围内，修正误差值越小越好。

8 PowerMILL数控编程

8.1 编程要点

涡旋盘编程加工技术须遵循高效、高精原则，编程工艺路线遵循“粗-半精-精”的加工方式，尽可能采用最简单的二维编程策略，计算速度快，刀路轨迹质量高，机床运行也快。精铣编程策略余量必

须严格按照涡旋盘零件2D技术图样中间公差控制。

8.2 粗铣和半精铣

粗铣加工时，由于坯料余量可控和采用了最短刀具方案，编程公差可以稍大（如0.02mm），以提高计算速度。余量留0.33mm后，采用高转速、大切深的编程方案，第一夹粗铣切削参数见表1。其中涡旋盘渐开线型面顶面和侧面在第二次装夹时需要用于定位，经实际验证，粗铣后还需留量0.3mm半精加工一次，否则零件无法装进第二夹工位。多个程序合为同一程序且用同一刀具运行程序，可节约换刀时间。CNC加工工艺卡见表2。

表1 第一夹粗铣切削参数

刀具规格	刃数 z_n	背吃刀量 a_p /mm	侧吃刀量 a_e /mm	切削速度 v_c / (m/min)	进给量 f_z / (mm/z)	主轴转速 n / (r/min)	进给速度 v_f / (mm/min)
$\phi 8\text{mmR}0.5\text{mm}$	4	10.00	1	320	0.12	12739	6115

表2 CNC加工工艺卡

文件名称	刀号	加工部位	粗铣	半精铣	刀具类型	刀具直径 ϕ /mm	R角/mm	径向余量/mm	轴向余量/mm	背吃刀量 a_p /mm	公差/mm
3322222.tap	T1	顶面	✓		圆鼻刀	8	0.5	0.33	0.33	10.00	0.02
		侧面	✓					0.33	0.33	10.00	0.02
		侧面		✓				0.28	0.28	10.00	0.01
		倒角		✓				0.10	0.10	—	0.01

8.3 精铣

(1) 底部精铣 涡旋盘底部特征如图16所示，零件中心圆是轴承孔，精度、圆度要求极高，用二维曲线策略设置修圆，有圆弧插补刀路轨迹如图17所示，输出NC代码如下。

```
G3X12.3461Y-16.9554I-.717J1.867F1337
X-12.3461Y-13.0446I-12.346J1.955F1671
X12.3461Y-16.9554I12.346J-1.955
X11.6294Y-15.0883I-1.975J.313F1337
```

虽然代码具有圆弧插补指令，但加工出来的圆

孔的圆度始终达不到技术要求，改用镗孔的方法可以完美解决，同理，定位孔也用铰孔的方法解决。实际加工验证表明，孔类加工采用镗削、铰削方案，加工精度、效率及稳定性都最好。

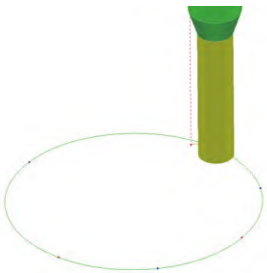


图17 有圆弧插补刀路轨迹

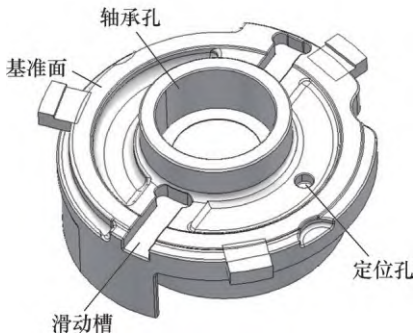


图16 涡旋盘底部特征

零件两侧的滑动槽精度要求也极高，其作用有两个：①压缩机动、定涡旋盘装配在一起时，动盘沿此槽来回运动，槽制造精度高则动、定涡旋盘啮合性高，压缩空气时密封性好，压缩机性能才高。②第三工位加工时，需要用定位孔和此槽定位固定零件以防止转动，精度高才能和夹具高度贴合，才能保证第三工位的涡旋盘渐开线型面顶面和侧面的精度、同心度。由于此槽宽度较小且靠近轴承孔外

圆，因此只能选 $\phi 4\text{mm} \times L16\text{mm}$ 规格刀具，长径比较大，编程加工此槽时，粗铣用二维曲线策略，需设置顺铣、修圆功能，修圆值宜输入 0.18mm ，可以避免因弹刀而影响加工质量和刀具寿命。由于坯料侧壁余量为 1mm ，切深方向需多层切削，以避免断刀，滑块槽粗铣多层刀路轨迹如图18所示。精铣时，由于余量小，则可以一层用侧刃铣削至成品尺寸，滑块槽精铣一层刀路轨迹如图19所示，需要开启2D补偿功能。

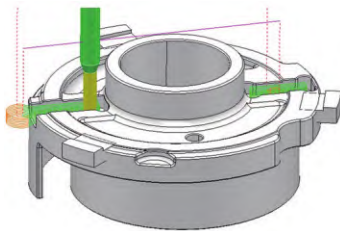


图18 滑块槽粗铣多层刀路轨迹

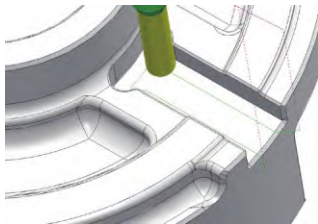


图19 滑块槽精铣一层刀路轨迹

(2) 正面精铣 第三工位是精铣涡旋型面，编程的主要技术难点是保证涡旋盘渐开线型面轮廓均匀，顶、底平面的平行度和平面度达到公差要求。在较低转速 ($n=12000\text{r/min}$) 和进给速度 ($v_f=800\text{mm/min}$) 时，容易达到技术要求，刀路轨迹轴向一层切削，以保证侧表面无刀痕，整体性好，PowerMILL精铣策略如图20所示，对刀具、刀柄的刚性要求高，这样侧面的垂直度才能达到要求；当转速和进给速度加快提效时，加工质量就变得不稳定，三次元检测数据如图21所示，红色表示

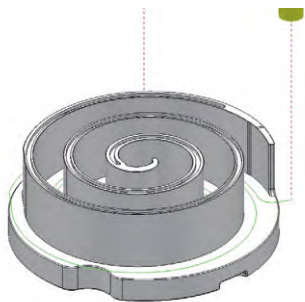
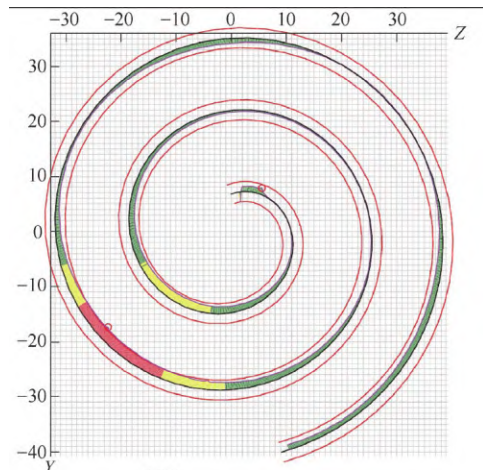
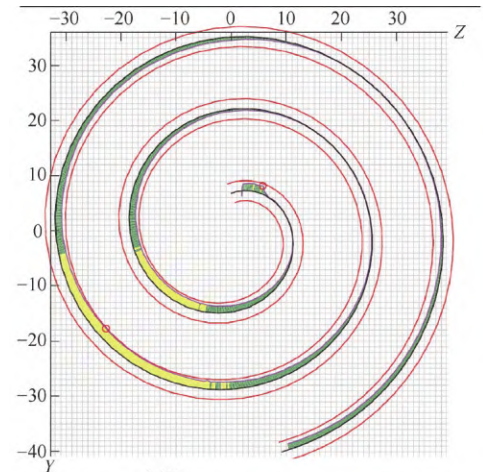


图20 PowerMILL精铣策略示意



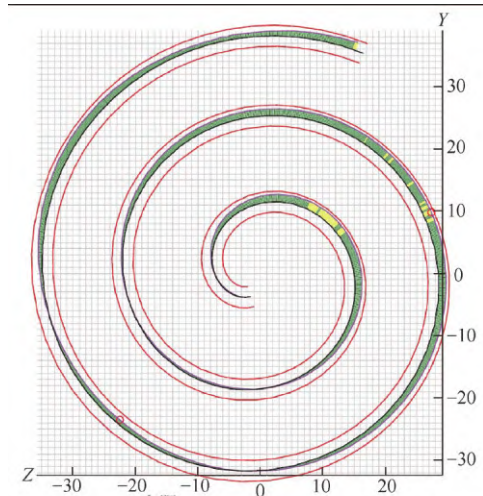
测量值	上限	下限	点	过滤类型	探针半径
0.0250	0.0200	-0.0200	1984	高斯	1.5002

a) 局部红色



测量值	上限	下限	点	过滤类型	探针半径
0.0192	0.0200	-0.0200	1982	高斯	1.5002

b) 局部黄色



测量值	上限	下限	点	过滤类型	探针半径
0.0155	0.0200	-0.0200	1984	高斯	1.5002

c) 小部分黄色

图21 转速和进给速度加快后的三次元检测数据

精度超差，黄色表示公差临界状态，绿色表示在公差范围内。

涡旋盘渐开线型面精铣提效测试参数见表3。

多次调整不同的参数组合，得到涡旋盘渐开线型面精铣提效最佳编程参数见表4，且夹具压紧气压需调到0.4MPa。产品高速切削三次元检测数据如图22所

表3 涡旋盘渐开线型面精铣提效测试参数

刀具规格	刃数 z_n	背吃刀量 a_p /mm	侧吃刀量 a_e /mm	切削速度 v_c / (m/min)	进给量 f_z / (mm/z)	主轴转速 n / (r/min)	进给速度 v_f / (mm/min)
$\phi 8\text{mmR}0\text{mm}$	6	20.00	0.05	352	0.017	14000	1400
				402	0.017	16000	1600
				452	0.013	18000	1440
				502	0.010	20000	1200
				502	0.013	20000	1600
				553	0.012	22000	1540
				553	0.012	22000	1580

表4 涡旋盘渐开线型面精铣提效最佳编程参数

刀具规格	刃数 z_n	背吃刀量 a_p /mm	侧吃刀量 a_e /mm	切削速度 v_c / (m/min)	进给量 f_z / (mm/z)	主轴转速 n / (r/min)	进给速度 v_f / (mm/min)	部位
$\phi 8\text{mmR}0\text{mm}$	6	20.00	0.05	553	0.011	22000	1500	平面
$\phi 8\text{mmR}0\text{mm}$	6	20.00	0.05	553	0.012	22000	1600	侧面

示，达到了技术要求。

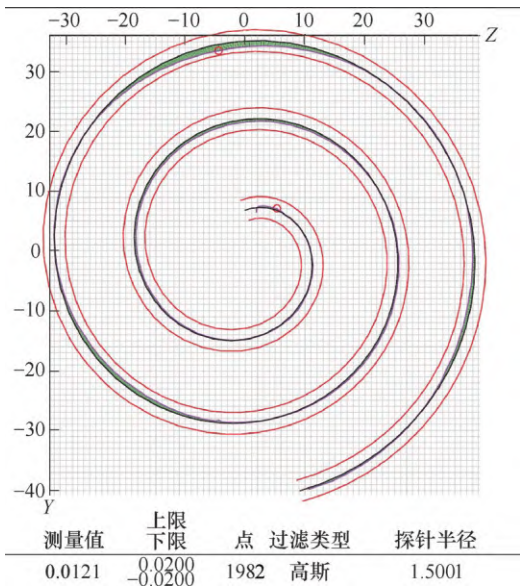


图22 高速切削三次元检测数据

9 零件的清洁

精铣后的零件表面残留有切削液，将对铝合金产生氧化作用，会使涡旋盘表面光泽度变差，所以零件一下机就必须及时清洁表面。用气枪吹压缩空气，或用其他清洗液清洁，存在清洁不彻底或成本过高的缺点，经过摸索发现，用自来水清洗后能很好地保证零件表面光亮效果，经济实惠且方便。表面清洁前后的效果对比如图23所示。

10 结束语

本文研究新能源汽车空调压缩机涡旋盘加工工



a) 表面氧化



b) 表面光亮

图23 表面清洁前后的效果对比

艺，通过现场切削加工数据验证涡旋盘加工技术方法，实现零件批量生产，得出以下几点结论。

1) 关于铣刀夹持柄，热缩刀柄比弹簧筒夹刀柄在加工精度、易于冷却方面更有优势。

2) 刀具设计时，粗铣刀具宜4刃，精铣刀具可以设计6刃，能兼顾效率和质量，刀具设计要遵循最短原则。

新能源汽车典型主减速齿轮车削工艺

张金梅，张特，石耀敏，张录，闫鹏辉

陕西法士特齿轮有限责任公司 陕西西安 710100

摘要：针对新能源汽车典型主减速齿轮热处理后车削内孔及端面工序存在的问题，通过对工艺方案的完善及工装夹具的改进，解决了加工效率低、质量不稳定的难题，同时总结了不同工艺方案对加工节拍及产品精度的影响，并批量验证了工艺稳定性及效率提升，为新能源汽车典型齿轮的高精高效加工提供了参考。

关键词：新能源汽车；主减速齿轮；车削；工装



工程师 张金梅

能及价格的竞争愈发激烈^[1, 2]，为了在激烈的市场竞争中取得优势，必须不断挖掘新能源齿轴工艺潜能，在质量稳定的前提下，最大限度地提升效率、降低成本。

典型新能源汽车齿轴如图1所示。主减速齿轮作为新能源汽车减速器总成中的典型零件，其工艺路线已经相对成熟，传统的机械加工路线包括粗、精车成形→钻孔→滚齿→铣棱→热处理→车削内孔及端面→磨齿等。但实际加工过程中，该零件热处理后车削工序一直存在刀具损耗大、加工节拍长、加工质量与加工效率不能兼顾的情况。本文针对新能源主减速齿轮热处理后车削加工中存在的问题，在打样及批量加工过程尝试了各种改进方案，总结了

1 序言

随着新能源乘用车市场的快速发展，汽车性

3) 孔铣削达不到圆度技术要求时，需改用镗削、铰削方法实现。

4) 夹具设计时，每工位设计同时装夹两件，排列沿Y轴方向排列，可兼顾效率和提高精度。

5) 涡旋盘渐开线型面精铣加工平面时，主轴转速 $n=22000\text{r/min}$ ，进给速度 $v_f=1500\text{mm/min}$ ；加工侧面时，主轴转速 $n=22000\text{r/min}$ ，进给速度 $v_f=1600\text{mm/min}$ ，夹具压紧气压需要调至 0.4MPa ，能提高效率 and 达到精度要求。

参考文献：

[1] 杜涛，孟晓磊，李晨凯，等. 汽车空调涡旋压缩机的阶梯型齿形结构分析[J]. 制冷技术，2017（1）：44-47.

[2] 袁华. 适用于现代模具制造的新一代刀具夹持系统[J]. 模具工业，1999（5）：42-44.

[3] 姜芙林，刘战强，刘钢. 热缩刀柄夹持力的理论模型与有限元分析[J]. 工具技术，2011（6）：31-35.

[4] 张卫兵，刘向中，陈振华，等. WC-Co硬质合金最新进展[J]. 稀有金属，2015（2）：178-186.

[5] 郭风丽，彭文屹，冯亮，等. 硬质合金表面类金刚石涂层的研究进展[J]. 稀有金属，2014（4）：720-729.

[6] 任家隆，刘志峰. 机械制造基础[M]. 3版. 北京：高等教育出版社，2015.

MW 20250519