

齿轮压缩机端面齿的参数设计及制造方法

何洪均

杭州杭氧透平机械有限公司 浙江杭州 310004

摘要：以压缩机端面齿为例，重点阐述其参数设计及制造方法。分别在三轴龙门铣床和五轴联动机床上进行试切，得出了最优加工方案。

关键词：压缩机；端面齿；参数设计；五轴机床

1 序言

端面齿又称赫斯齿（Hirth-tooth）。端面齿联接（见图1）是一种形状相互拟合、可频繁拆卸的联接方式，具有高精度自定心，轴向和径向圆跳动重复性好，同时也不影响已完成零件平衡的特性。它归类于机械离合器中的正三角齿啮合传动，常用于机床刀塔、回转工作台和机器人关节等间歇定位，离心压缩机转子与叶轮、燃气轮机轮盘和航空涡轮发动机等高转速大转矩装置的静态联接中。

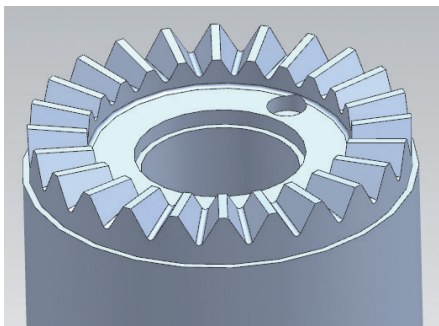


图1 端面齿联接示意

随着工业体系的发展，加工设备越来越先进，对工厂制造出来的产品及零部件精度要求也越来越高，意味着工厂需要投入大量的资金，对一般企业来说是不小的压力，尤其是加工端面齿的设备，用的基本都是德国产的格里森（Gleason）成形磨齿机，价格昂贵。

2 制造工艺

端面齿一般有两种常见的制造工艺，即铣削

（见图2）和磨削（见图3）。接触精度取决于制造工艺，铣削接触精度通常在65%~75%，而磨削接触精度可达80%以上。



图2 铣削

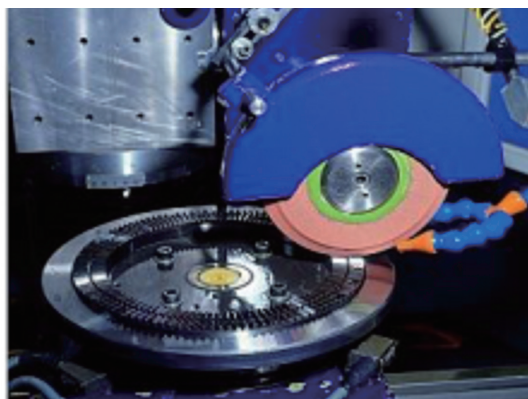


图3 磨削

3 端面齿的应用

当前，在国内离心式齿轮压缩机领域，例如图

4所示的高速转子中，小齿轮轴与叶轮的联接通常采用锥三角、法兰式、轴向销、端面销、红套（又称热套，是实现零件之间过盈配合的一种工艺）或弧面+单个销等定位方式，再通过拉紧螺栓弹性变形来实现转子和叶轮的整体联接，以达到静态结合的目的。这几种联接方式各有各的优点，也有各自的缺点，存在定位不准、加工困难、返修、备件加工繁琐以及周期长等问题。端面齿联接方式很好地解决了这一系列问题，但对加工设备精度要求较高。端面齿联接结构如图5所示。

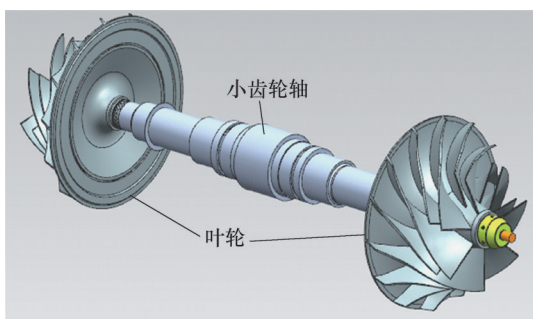


图4 高速转子

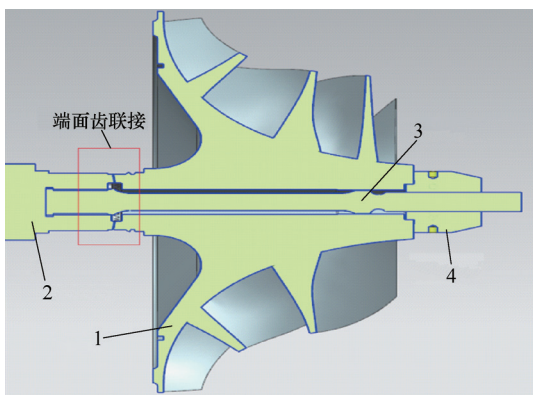


图5 端面齿联接结构示意图

1—叶轮 2—小齿轮轴 3—拉紧螺栓 4—锁紧螺母

4 端面齿的参数设计

端面齿参数如图6所示，设计参数和公式见表1。端面齿的设计应考虑以下几方面。

1) 产品的结构大小（指内外径尺寸）。在尺寸确定的情况下再来选择齿数的多少，一般来说，推荐取12的倍数，即：12、24、36、48、96和192。

2) 端面齿的选择还要考虑传递转矩的大小。齿数越多，齿形越小，强度也越低；反之，当齿数越少时，齿形越大，加工工艺性也会相应变差。在离心式齿轮压缩机中，叶轮与齿轮轴联接处的直径一

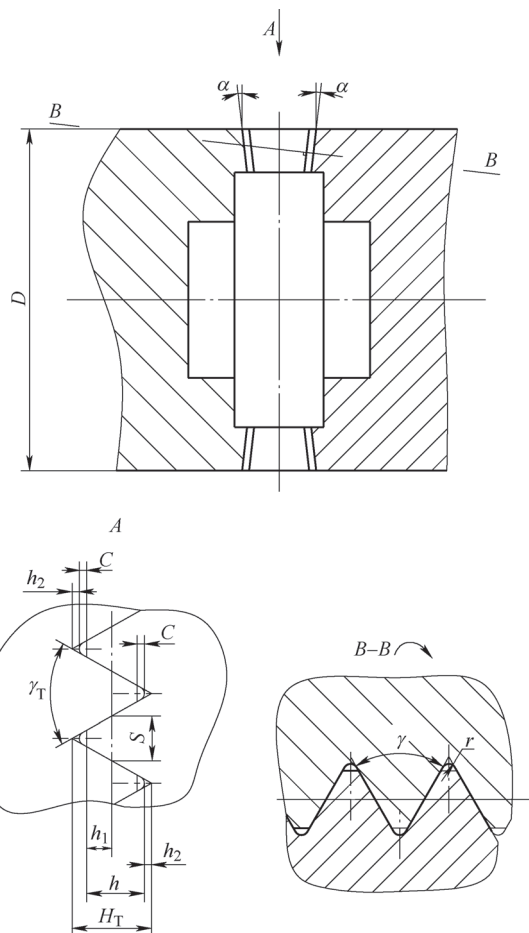


图6 端面齿参数

表1 端面齿结合部设计参数及公式

序号	参数名称	符号	数值与公式
1	外径	D	设计值
2	齿数	Z	设计值
3	型面角	γ	设计值
4	齿槽底圆角半径	r	设计值
5	锥度角	α	$\sin \alpha = \tan 90^\circ / Z \cot (\gamma/2)$
6	齿顶倾斜角	α_1	$\alpha_1 = \alpha$
7	理论齿高(大端)	H_T	$H_T = D \tan \alpha$
8	分度圆上弦齿厚(大端)	S	$S = D \sin (90^\circ / Z)$
9	端面型面角(垂直于齿轴心线的剖面上)	γ_T	$\tan (\gamma_T/2) = \tan (\gamma/2) \cos \alpha$
10	齿顶间隙	C	$r = 0.6 \text{ mm}$ 时, $C = 0.7 \text{ mm}$
11	实际齿底与理论齿底距离	h_2	$h_2 = r / \cos \alpha \{ [1 - \sin (\gamma/2)] / \sin (\gamma/2) \}$
12	实际齿高(大端)	h	$h = H_T - (2h_2 + C)$
13	实际齿顶高(大端)	h_1	$h_1 = H_T/2 - (h_2 + C)$ 或 $h_1 = \{ S [2 \cos (90^\circ / Z)] \} \times \cot (\gamma_T/2) - (h_2 + C)$

般不会 $>180\text{mm}$ ，也不会 $<30\text{mm}$ 。因此，齿数通常在24、36和48之间选择。

3) 在确定了齿外径和齿数 Z 后，还要考虑齿形特征，即型面角 γ 。因本文选的是正三角齿，所以型面角 $\gamma=60^\circ$ 。此角度加工方便，高速运转中脱开的推力适中。

4) 关于端面齿的结合，在轴向力的作用下，齿的两侧面是无间隙完全贴合的。在理想情况下，

任何一个圆周的截面上，对应的齿槽和齿厚完全相等。为了使齿槽的受力均匀，加工方便，必须考虑齿顶的间隙 C ，而 C 跟齿槽圆角 r 大小有关。无论是磨削或铣削，槽底总会有圆角或退刀槽，因此为了避免干涉和接触不紧密，通常 $C>r$ 。

结合我公司齿轮压缩机实际情况，给出了轴头的结构和具体尺寸，如图7所示。

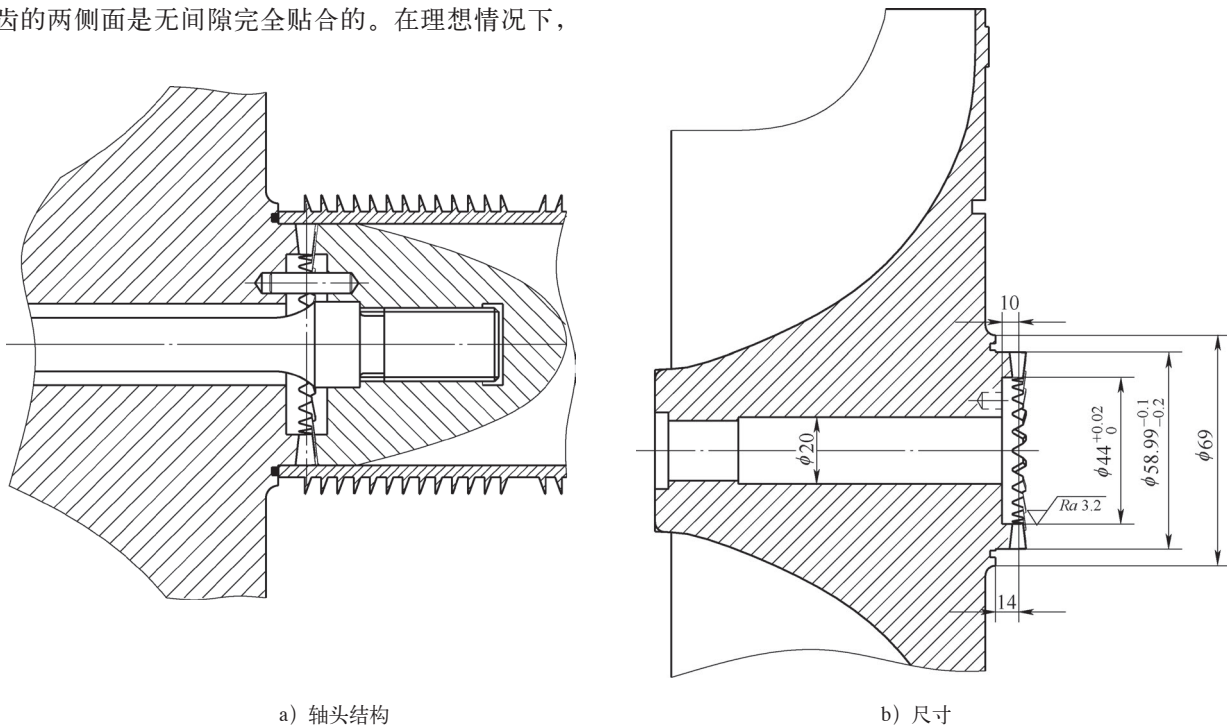


图7 轴头结构及尺寸

将已知参数（见图8）输入程序后，得出相应的计算结果（见图9）。

端面齿计算	
外 径 D:	69
内 径 d:	44
齿 数 Z:	24
型面角 γ :	60
齿槽底圆角半径 r:	0.6

图8 已知参数

锥度角 α :	6.518533996208
齿顶倾斜角 α_1 :	6.518533996208
理论齿高 (大端) h_T :	6.741534630073
分度面上弦齿厚 (大端) S :	3.858784623855
端面型面角 (在垂直于齿轴心线的剖面上) γ_T :	59.67870000648
齿顶隙 C:	7
实际齿底与理论齿底距离 h_2 :	6039041287924
实际齿高 (大端) h :	4.933726372488
实际齿顶高 (大端) h_1 :	2.166863186244

图9 将已知参数输入后的计算结果

5 端面齿的试制

为确保最终加工出来的端面齿符合产品设计要求，分别在三轴三联动龙门铣床和五轴五联动机床上进行了试切。

5.1 在三轴机床上试制

端面齿铣齿前车削尺寸如图10所示。具体的加工步骤如下。

1) 分别将轴和叶轮置于定梁龙门铣床上加工，校正叶轮轴向圆跳动至 $0\sim0.01\text{mm}$ ，外圆径向圆跳动 0.01mm ；校正齿轴上下轴承挡，径向圆跳动 0.005mm ；再校正侧母线，上轴承挡 0mm ，下轴承挡 0.02mm 。

2) 选用 55° 立铣刀粗铣和 60° 特制立铣刀精铣，运用三轴三联动的方式铣制端齿。

3) 端齿铣好后，复检各零件基准面的轴向和径向圆跳动情况，若无变化后拆下。

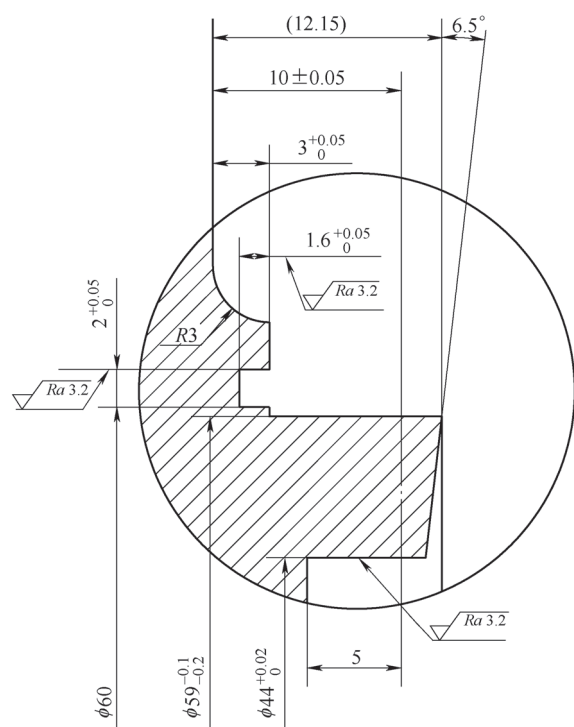


图10 端面齿铣齿前车削尺寸

4) 按照在机床上零件装夹方位(轴 0° 对叶轮 0° 方向)联接叶轮与齿轮轴,将液压拉伸器压强加至35MPa,拉紧螺栓并锁紧螺母。

5) 上车床检查叶轮轴向圆跳动和外圆径向圆跳动,校正齿轮轴轴承挡跳动分别在0.005mm左右,检查 $\phi 305$ mm处轴向圆跳动0.13~0.14mm, $\phi 310$ mm外圆径向圆跳动0.06mm。仅旋转叶轮 180° 后,再次联接后检查,轴向圆跳动0.03~0.04mm,外圆径向圆跳动0.07~0.08mm。

与图样要求对比后,本次试验结果未能满足产品设计要求的外圆和轴向圆跳动在0.03mm以内。

经深入检查,发现定梁龙门铣床Y轴存在反向间隙0.035mm,重复定位精度较差;X轴、Z轴重复定位精度相对较好。

用同样的加工方式将轴和叶轮置于进口龙门铣床上,再用同样的方法试切,发现机床的X轴重复定位精度不理想,试验失败。

经讨论,认为这种利用线性轴联动的加工方式不可行。联动轴越多,轴相互影响越严重,每个齿的位置精度越差。

我公司另有从德国进口的五轴五联动机床,即三线性轴(X、Y和Z轴)+二回转轴(A、C轴)。利用此条件,决定采用“二回转+一线性”轴的方案

再次试验。考虑先将试件倾斜角(6.5°)摆正(A轴),再锁定,然后C轴分度,再锁定,仅Y轴水平切削,减少各轴之间的相互影响,也就是说,在实际切削时,只运动Y轴。

5.2 在五轴机床上试制

当方案确定后,由于生产原因,叶轮和轴不能在同一机床上完成,因此分别将叶轮置于哈默C40U、轴置于哈默C50五轴机床上加工。铣削方法:采用 55° 立铣刀粗铣和 60° 铣刀精铣,切削方向为从外圆向内孔单向走刀,各加工时段情况如下。

1) 叶轮在C40U机床上校正,加工前轴向圆跳动与径向圆跳动校正均在0.005~0.01mm,齿加工后复校无大的变化。

2) 齿轮侧端面齿在C50机床上加工修正,外圆径向圆跳动校正部位为齿侧轴承挡,跳动量0.005mm,上下距离100mm,分别检测3条母线,直线度分别为0mm、0.005mm和0mm;轴向圆跳动0.015mm,齿加工后复校,无大的变化。

3) 按零件加工方位(轴 0° 对叶轮 0° 方向)联接叶轮与齿轮轴,将叶轮安装在齿轮轴上,手工拧紧螺母,测叶轮跳动, $\phi 310$ mm处径向圆跳动0.005mm左右, $\phi 305$ mm处轴向圆跳动0.03mm左右。

4) 拆开后,观察接触面,发现齿根处接触斑点不足,可能是由于叶轮侧端面齿齿顶太尖,与齿槽毛刺等相互干涉等造成的。决定车去部分齿顶(增大齿顶间隙C),上车床再复校。

5) 齿顶间隙C放大到1mm,将齿轮轴、叶轮去毛刺,联接两者后,上车床复校各跳动。手动拧紧螺母,发现叶轮轴向圆跳动在0.2mm左右;再用液压工装压紧叶轮,压强取值30~32MPa,轴向圆跳动0.02mm,径向圆跳动0.025mm,已满足设计要求。拆开叶轮,检查接触面,接触斑点比较理想,基本在70%以上。

6) 当各项条件满足设计要求后,为了安全考虑,将压强提高到35MPa,再做低速平衡。实际不平衡量:叶轮侧118mg·mm,无叶轮侧89mg·mm。

7) 转入高速平衡机进行高速运转,转速达到26000r/min,振动速度1.6mm/s。

8) 经高速运转后的转子再上车床复检跳动情况。校正双轴承挡径向圆跳动0.005mm左右。检查叶轮轴向圆跳动0.015mm,外圆径向圆跳动

0.03mm。拆开叶轮后，当前位置不变，再次压紧，各跳动无变化。拆开后，任意旋转角度齿对中，压强不变（35MPa），叶轮轴向圆跳动在0.015~0.025mm，径向圆跳动0.03mm。接触斑点70%以上，无明显变化。

试切出的叶轮如图11所示，工艺轴如图12所示，试验转子如图13所示。



图11 试切出的叶轮



图12 工艺轴

试制成功后，利用此加工方式成形的端面齿，应用到安徽新宁公司配套的向心汽轮机项目上，实际使用效果良好。

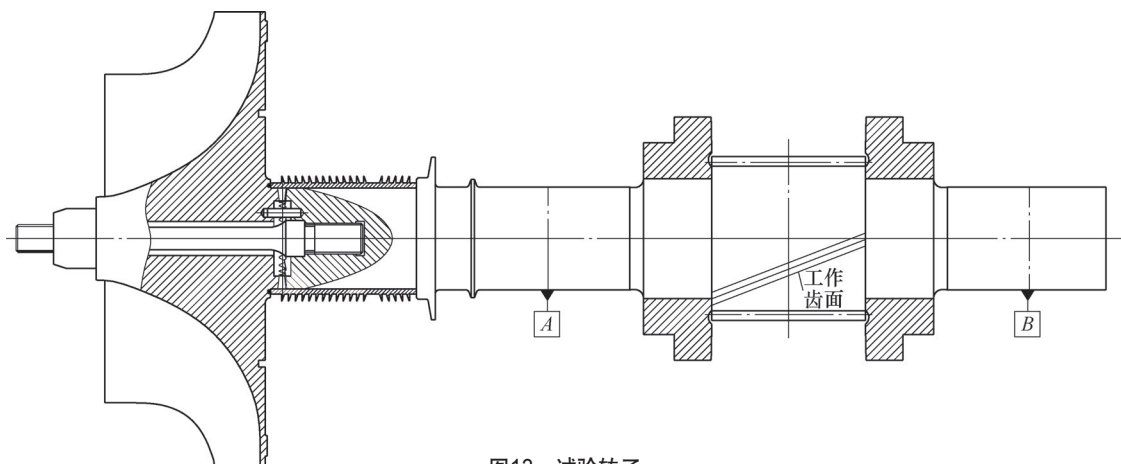


图13 试验转子

6 结束语

试验证明，利用五轴五联动的“二回转+一线性”轴的方案切实可行。在实际生产中，五轴机床的行程有限，加工成本也高，因此可以在常规的三轴机床上，配高精度回转台，再通过为端面齿倾斜角制作特定角度工装来实现。

参考文献：

- [1] 中华人民共和国工业和信息化部. 冶金设备联轴器 法兰端面齿联接基本参数与尺寸：JB/T 12045—2014[S]. 北京：中国标准出版社，2014.
- [2] 杨新建. 端面花键齿轮的设计及加工、检测方法的探讨：中国航空学会第十三届机械动力传输学术会议论文集[C]. 北京：中国航空学会，2007.

MW 20210119

专家点评

端面齿联接具有高精度自定心、轴向和径向圆跳动重复性好的优点，常用于高转速大转矩装置的静态联接。文章重点阐述了压缩机端面齿的参数设计和制造方法，内容较为完整，层次结构安排合理，中心观点突出。通过端面齿铣削试切结果的比较，确定合适的加工方案。利用线性轴联动的三轴机床加工精度较差，利用“二回转+一线性”轴联动的五轴机床加工方案切实可行，为此类产品的设计和制造提供了参考经验。