



图2-5 B50汽车侧围外板A柱褶皱及风窗处印痕缺陷

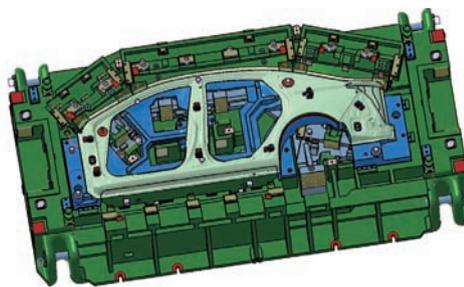


图2-6 侧围外板顶盖侧斜楔整形模具结构图

户抱怨；②处与型面与前风窗装饰条搭接，能覆盖部分型面，但是不同车型的外露型面大小不同，如果此区域型面出现不平、褶皱也很容易暴露给客户，造成客户抱怨。如图3-2所示，装饰条上方有0.5mm的可视区域，前方型面为外露科可视型面，能看出此区域经过喷漆后型面在灯光的反射下有明显的型面不平缺陷。右图装饰条刚好到翼子板与侧围外板搭接的接缝处，侧围外板的整个立面均外露可视，而且此立面深度为23mm，产品过渡激烈，成型过程中聚料严重，此区域缺陷较明显。

③处为焊接型面，此型面的好坏直接影响焊接质量；而且与前风窗玻璃搭接，为涂胶型面，型面不平、褶皱容易引起涂胶不严，造成漏雨等问题。

④处造型容易引起起皱，部分车型甚至出现叠料叠死的情况，使单件

功能性丧失，导致汽车在路试过程中出现开裂等问题。

### 3.2 工艺及CAE分析

通过AutoForm分析软件对B50侧围外板A柱区域进行全工序模拟，材料选择ST16，料厚为0.7mm，摩擦系数为0.125。模拟结果显示在第3序侧整形到底前2mm开始就出现严重的起皱缺陷，图3-3是OP30侧整形的CAE模拟过程。

从模拟结果上来看，此区域的成型状态非常不理想，主要原因为此区域产品造型过渡非常剧烈，整形前后线长差相当大，因此模拟分析时不通过，详细说明如下：通过测量图3-4所示的几个尺寸如下： $h = 9.6\text{mm}$ ； $H = 17.7\text{mm}$ ； $L = 39.1\text{mm}$ ； $\theta = 26.9^\circ$ ，同时又对比了轿车公司X80侧围外板此区域产品尺寸， $h = 10.6\text{mm}$ ； $H = 33.9\text{mm}$ ； $L = 59.84\text{mm}$ ； $\theta = 25.7^\circ$ 。

发现这两款车的左右侧围外板在此区域设计时产品造型的原因整形前后线长差别大，聚料严重，缺陷非常明显，如图3-5是X80此区域的缺陷图片。

### 3.3 工艺对产品设计的要求

A柱前端产品设计的好坏直接决定褶皱的质量，通过对比马自达、B30、B70的侧围外板A柱前端的设计，发现这几款车型在A柱拐角处褶皱非常轻微，本文对这几款车型的产品设计进行进一步研究，得出马自达产品及奔腾的部分产品在其余的产品设计上非常平缓，整形深度也很浅。下面是B30、B70侧围外板A柱前端产品设计的尺寸对比，如表所示下面来探讨一下奔腾B30侧围外板A柱拐角处的设计，如表3-1所示。

B30、B70侧围外板在前期CAE模拟分析时，此区域的效果也比较理想，如图3-6所示，奔腾B30侧围外板到底

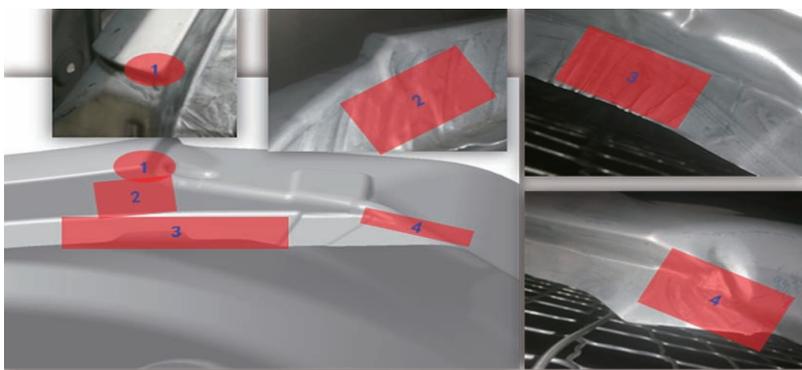


图3-1 A柱前段褶皱问题

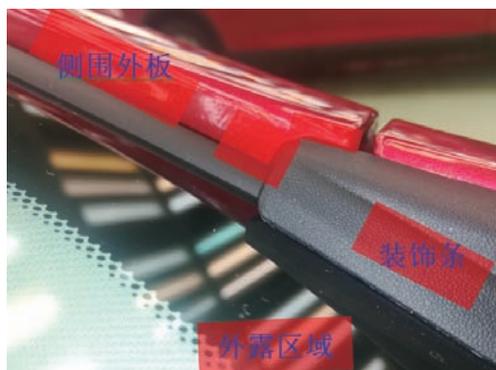


图3-2 B50侧围外板A柱区域与装配件搭接关系

前2mm之后的状态,从模拟结果上来看起皱状态完全可以接受。实物状态如图3-7所示。

综上所述,为了解决侧围外板A柱区域冲压叠料问题,本文对A柱区域产品设计时的 $h$ 、 $H$ 、 $L$ 、 $\theta$ 的尺寸及关系进行研究,总结出产品设计时应考虑并满足如下要求:

- 要求1:  $H < 20\text{mm}$ ,  $L > 3.5H$ ,  $\theta < 15^\circ$ ;
- 要求2: 增加吸料筋;
- 要求3: 法兰型面上增开豁口,或

增加吸皱筋;

要求4: 在可能的情况下增加外观R角,缓解起皱倾向;

$H$ 为冲压成型深度, $L$ 为整形区域长度, $\theta$ 为翼子板搭接面与法兰焊接面夹角。

### 3.4 现场调试及方案验证

经过前期CAE模拟成型过程的分析,A柱区域成型时的材料主要收到侧翻时的剪应力和材料像低端流动的挤压应力。当在拉研工序成型不充分

而导致此区域存在余料过多时,多余的材料受到产品形状和冲压方向的限制就会向低端流动形成聚集,侧翻到底时余料无法完全被吸收而造成叠料缺陷。在现场调试时,根据模拟分析时材料的受力分析,通常采用以下三种措施来减轻叠料的趋势,改善产品的质量,主要如下:

- (1) 相应地加大斜翻刃口的进入R角,减缓材料流进的速度;同时修正斜翻边刃口的整形间隙来控制。
- (2) 局部修改料边的尺寸来均衡各部位的材料,减少产品的叠料趋势。
- (3) 局部修改斜翻边刃口,尽可能让易叠料对应的翻边整形深度加深,已缓解叠料问题。

然而导致此缺陷问题的真因为拉研时工艺余料过多,如何能让拉研工艺余料减少或在后续工序能将多余的余料吸收才能彻底解决此问题。本文通过现场B50等多个车型模具反复的调整,总结出以下几种措施对优化和改进此缺陷显得很有效果:

(4) 将拉研模具局部凸模拔模角改为接近于 $0^\circ$ 减小了此处工艺余料,在斜翻过程中就不至于有过多的材料流向端差处,因而缓解了叠料的发展趋势,如图3-8和图3-9所示。

(5) 在靠近翻边棱线处增加一工艺凹槽,增加的工艺凹槽在斜翻边过程中将多出的余料充分吸收,防止此部位叠料的发生,如图3-10所示。

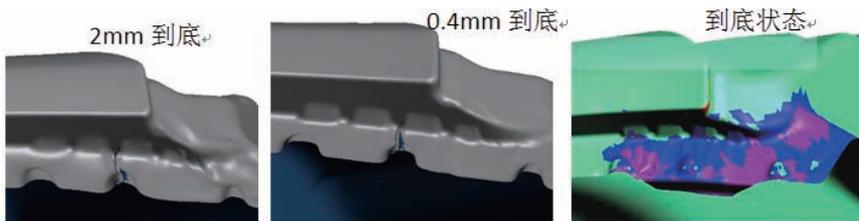


图3-3 B50侧围外板A柱到底过程图

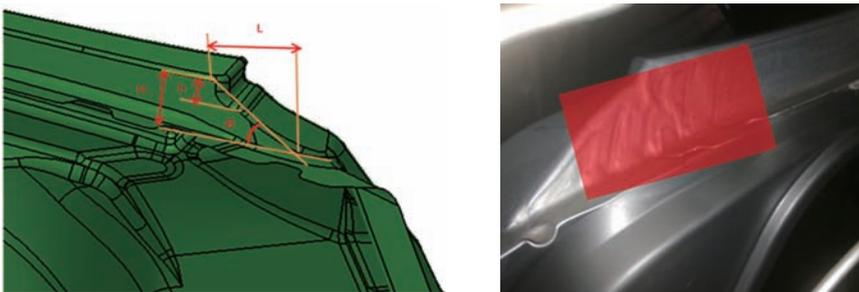


图3-4 A柱区域产品设计的尺寸

图3-5 X80侧围外板A柱缺陷

表3-1 轿车公司各车型在A柱处产品设计对比

车型	$h$	$H$	$L$	$\theta$
B50	9.6	17.7	39.1	26.9
X80	10.6	33.9	59.8	25.7
B30	8.9	12.5	70.7	15.2
B70	12.5	24.5	119.7	7.22
阿特兹	6.2	20.5	77	14.7



图3-6 B30侧围外板A柱到底过程图



图3-7 B30侧围外板A柱缺陷图

(6) 在A柱拐角起皱比较明显的部位增加吸料筋，减少材料聚集，分散部分多余的料，从而达到消除褶皱叠料的效果，如图3-10中的两个小包，图3-11中的两个吸料筋。

## 4 顶盖搭接侧法兰面褶皱原因分析及措施

### 4.1 顶盖搭接侧法兰面褶皱问题描述

侧围外板顶盖侧法兰面的质量缺陷主要为褶皱问题，法兰面与前风窗，顶盖外板，后风窗，流水槽等零件具有焊接匹配关系，对型面的质量要求比较高，如果存在褶皱问题会影响焊接质量及前后风窗玻璃的涂胶质量，影响密封性，如图4-1所示。

### 4.2 工艺分析

B50侧围外板在工艺设计时通过抬高压力面降低顶盖侧的拉研深度，由原来深拉延-侧修边-侧整形工艺优化为浅拉延-正修边-侧整形，使拉延的形状接近于产品的形状，整形后产品质量能够得到保障。同时通过拉拉延筋及压料面控制冲击线不能爬到产品的A面上。如图4-2所示是B50左右侧围外板顶盖侧两种不同的工艺方案。

### 4.3 工艺对产品设计要求

由于左右侧围外板的顶盖搭接处产品为圆弧形，必须利用斜楔机构进行侧整形才能得到想要的产品形状，

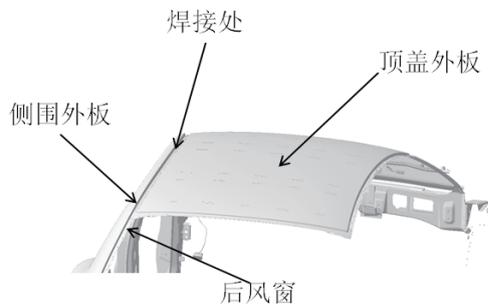


图4-1 侧围外板顶盖侧搭接图



图3-8 拉研凸模拔模角更改



图3-9 A柱拉延拔模角修改



图3-10 A柱增加工艺凹槽



图3-11 A柱增加吸料筋

整个圆弧区域属于多料整形，会造成整形时A级表面、焊接法兰面变形出现起皱波浪等质量问题，通常在工艺评审阶段根据模拟分析结果的不同在法兰面上增加若干个深度为1-2mm的工艺包，如图4-3所示。

### 4.4 工艺对产品设计要求

由于左右侧围外板的顶盖搭接处产品为圆弧形，必须利用斜楔机构进行侧整形才能得到想要的产品形状，整个圆弧区域属于多料整形，会造成整形时A级表面、焊接法兰面变形出现起皱波浪等质量问题，通常在工艺评审阶段根据模拟分析结果的不同在法兰面上增加若干个深度为1-2mm的工艺包，如图4-3所示。

## 5 前后风窗接刀印痕原因分析及解决措施

### 5.1 交刀印痕问题描述

B50左右侧围外板接刀印痕发生在模具OP30，位于前后风窗各1处，漆后极其明显。受制于冲压生产线为四道序，左右侧围外板上部侧成型全位于模具OP30一道序，由于侧围外板上部为圆弧形导致了需要2-3个斜楔机构完成侧整形工作，这就出现了接刀位置选择，位置选择不合理件就会在接刀位置出现深深的刻痕，影响整车外观质量，如图5-1所示。

### 5.2 工艺及模具结构分析

通常侧围外板顶盖侧工艺主要有以下几种：

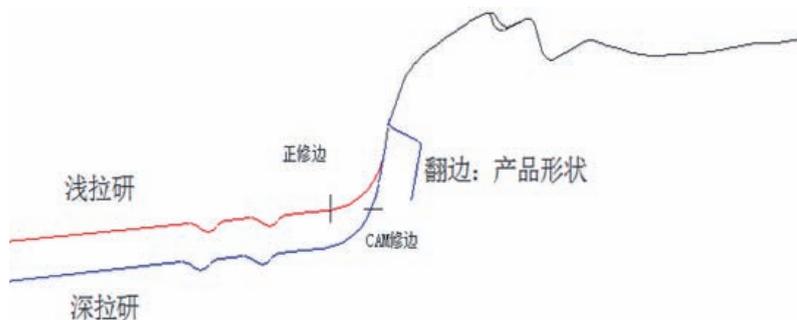


图4-2 B50侧围外板顶盖侧浅拉延图

第一种就是OP10拉延-OP20修边-OP30侧翻风窗区域-OP40侧翻顶盖区域。这种工艺方案导致在OP30和OP40侧翻区域有长度L的重叠过渡区域，在重叠区域OP30第一次预翻边产生翻边线，在OP40第二次翻边时留在立面上，形成棱线，如图5-2所示为B70侧围外板，左图为OP30制件图，又图为OP40制件图。

采用两序分步完成侧翻的结构优点为机构简单，维修方便，但是过渡区域棱线较明显。通常解决方是将过渡区域选择在于顶盖匹配的区域，利用顶盖与侧围之间的胶条将缺陷遮蔽，达到视觉上的不可见；其次工艺上尽可能地加大L的数值。控制在260mm左右，以便于OP40侧整形时能够将OP30预翻产生的翻边线擀直。



图4-3 侧围外板顶盖法兰面增加工艺包



图5-2 B70侧围外板顶盖侧整形OP30、OP40

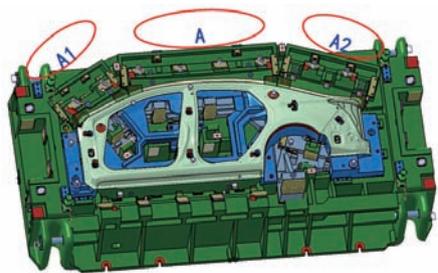


图5-3 B50侧围外板顶盖侧整形斜楔机构图

第二种就是OP10拉延-OP20修边-OP30侧翻风窗及顶盖区域-OP40冲孔。这种工艺方案是由于某些车型B柱上方需要安装装饰条导致需要冲孔，因此需要在OP30侧翻全部区域，模具结构如图5-3所示。此种翻边方式结构较复杂，且需要注意各个斜楔之间的干涉问题，需考虑斜楔动作的先后顺序，一般情况下：压件前：中间斜楔A先顶出，两侧斜楔A1、A2后顶出；压件后：两侧斜楔A1、A2先退回，中间斜楔A后退回，B50侧围外板就是属于这种工艺结构方案。

此种方案的优点也非常明显，就是无过渡区域，范围小，但是对接刀处的模具结构要求较高，需要钳工对接接处两个镶块的局部形状手修3-4轮，通过镶块烧焊，研修翻边间隙，改



图5-1 B50侧围外板风窗交刀印痕



图5-4 交刀立印不明显

变触料状态，翻边镶块交刀形式。同时在选取镶块接缝处时也要注意选择到与顶盖搭接区域。

### 5.3 前后风窗接刀印痕解决措施

(1) 合理的接刀位置的选择，无论是两序完成侧翻边工作内容还是一序完成侧翻边工作内容，过渡区域和接刀位置的选择都至关重要，尽量选择在可以通过装饰条等塑料件遮蔽的区域，比如顶盖外板胶条。

(2) 优选在OP30一序完成全部侧翻边内容，通过优化不同工作方向的两个镶块的搭接处的翻边间隙，触料状态，交刀形式，可以做到漆后不可见，单件状态如图5-4所示。

## 5 结论

本文以B50左右侧围外板为例，从产品设计、CAE模拟分析，冲压工艺、模具结构、现场调试等方面，通过实证研究，对标分析的方法研究汽车左右侧围外板顶盖侧冲压缺陷产生的原因，总结现场调试经验及解决措施，使得汽车侧围外板的质量得到提升。T

### 参考文献

- [1] 方永光. 侧围外板顶梁A柱处冲压缺陷的调整[J]. 模具制造, 2011.
- [2] 关来德. 汽车侧围外板A柱拐角起皱的分析及解决方案[J]. 锻压技术, 2017.
- [3] 肖露云. 基于AutoForm的侧围外板成型工艺研究[J]. 锻压装备与制造技术, 2013.
- [4] 李飞周. 板料成型CAE设计与应用—基于AutoForm[M]. 北京: 航空航天大学出版社, 2010.

### 作者信息

鲁宽, 奔腾事业本部, 冲压工艺工程师, 长春市高新区蔚山路4888号, 130012, 85782831, lukuan@fawcar.com.cn.

# 高精度自膨胀式旋转芯轴结构的研究开发

尤宁, 王奇, 李海

珠海格力电器股份有限公司, 广东 珠海, 519070

**摘要:** 离心压缩机叶轮动平衡检测过程中采用芯轴来装夹定位, 一般地, 为保证芯轴与叶轮拆装方便, 芯轴与叶轮采用间隙配合, 然后使用锁紧螺母锁紧。因采用间隙配合, 芯轴与叶轮之间存在间隙, 且同轴度不高, 导致叶轮动平衡准确度不高。为解决此问题, 本文设计开发了一种高精度液压自膨胀式旋转芯轴, 芯轴通过液压膨胀后与叶轮为过盈配合, 使芯轴与叶轮之间无间隙, 提高同轴度, 从而提高叶轮动平衡准确度, 且无需锁紧螺母锁紧。

**关键词:** 膨胀芯轴; 液压; 叶轮; 动平衡

## The Development of a High-precision and Self-expandable Shaft

You Ning, Wang Qi, Li Hai

Gree Electric Appliances, Inc. of Zhuhai, GUANGDONG ZHUHAI, 519070

**Abstract:** In the process of dynamic balancing inspection of centrifugal compressor impeller, the core shaft is used to clamp the positioning. Generally, in order to ensure the dismantling and loading of the core shaft and the impeller, the core shaft and the impeller are fitted by clearance, and then the locknut is locked. Because of the clearance fit, there is a gap between the shaft and the impeller, and the coaxiality is not high, resulting in poor accuracy of the impeller dynamic balance. In order to solve this problem, a high-precision and self-expandable shaft is proposed. The core shaft cooperates with the impeller through hydraulic expansion to make the core shaft in no gap with the impeller and improve their coaxiality, enhancing the accuracy of the impeller's dynamic balance without locking the locknut.

**Keywords:** Self-expandable Shaft; Hydraulic; Impeller; Dynamic Balancing

## 1 引言

随着技术的不断发展创新, 我司的定频离心压缩机、直流变频离心压缩机、磁悬浮离心压缩机相继诞生, 离心压缩机转子转速由几千转每分钟上升为上万转每分钟。转速越高, 对转子的动平衡精度等级要求就越高, 转子高的动平衡精度可减小离心压缩

机振动, 减少离心压缩机轴、轴承、叶轮、梳齿等静止件与运动件之间的磨损, 提高系统运行可靠性, 延长压缩机使用寿命。

一般地, 为保证芯轴与叶轮拆装方便, 芯轴与叶轮采用间隙配合, 然后使用锁紧螺母锁紧。叶轮内孔加工精度为H7, 螺母锁紧芯轴公差为 $-0.01\sim-0.03\text{mm}$ , 与叶轮配合间

隙在 $0.01\sim0.055\text{mm}$ , 且同轴度为 $0.02\text{mm}$ , 此结构难以同时解决芯轴和叶轮内孔无间隙和芯轴拆装方便的问题, 且对动平衡检测准确度有很大影响, 这种锁紧螺母锁紧工艺技术已经难以满足更高转速叶轮动平衡精度等级的要求。

因此, 需要开发出适用于检测更高转速叶轮动平衡的液压膨胀式芯轴

结构,此结构拆装方便,且可确保其与叶轮同轴度误差在0.01mm,以提高叶轮动平衡检测准确度,满足更高转速叶轮平衡精度等级的要求。

## 2 方案设计

### 2.1 膨胀芯轴理论依据

(1) 液压膨胀芯轴的设计原理: 装在密闭容器中的液体受到压力作用时,这个压力将通过液体传递至容器内壁各处,而且其压力值均等。

(2) 如果把目前的螺母锁紧芯轴内部做成空腔,将其中充满液体,并对液体施加一定压力,则芯轴薄壁将因受压后会向外膨胀,利用薄壁筒的膨胀变形就可以实现对高精度零件的装配夹持。

(3) 液压膨胀夹紧技术是机械加工制造过程中实现超高精度夹紧的一种先进技术,应用此技术设计的芯轴很容易满足对零件夹持精度的要求。

(4) 根据静压膨胀原理,设计一种具有胀缩功能的芯轴(夹紧时膨胀,拆卸时恢复原始状态),其能够满足更高转速叶轮动平衡精度等级的要求。

### 2.2 膨胀芯轴结构设计

液压膨胀芯轴是由外套、中间轴、涨塞、O型圈组成的组合件,芯轴内部为空腔结构,通过拧入涨塞,使内部液压油压力升高,继而使薄壁外套在直径方向上膨胀0.05~0.2mm左右,利用薄壁筒的膨胀变形实现对高精度零件的装配夹持,同时其结构需保证受力强度(如图1—图4)。

### 2.3 膨胀芯轴材料选择(如表1)

根据材料的性质和使用位置,外套和中间轴均使用40CrNiMOA(如图5)。

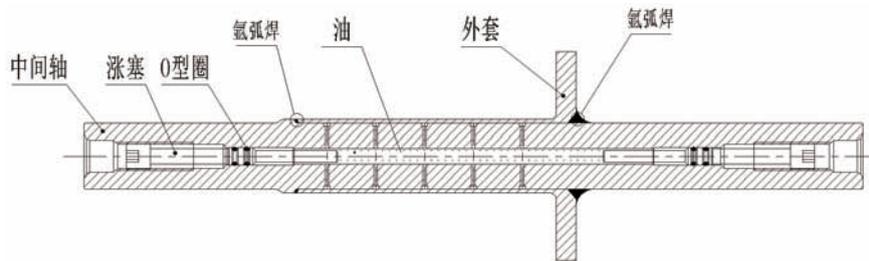


图1 膨胀芯轴结构图

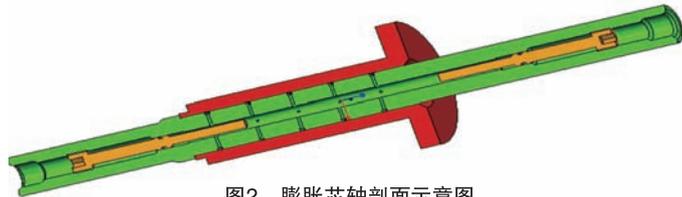


图2 膨胀芯轴剖面示意图

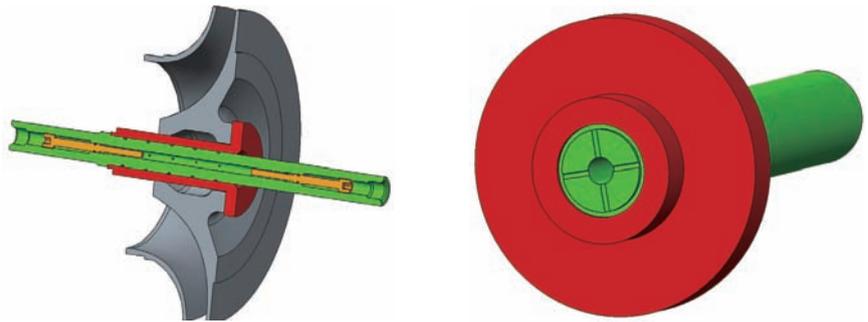


图3 膨胀芯轴与叶轮装配后轴向剖面示意图 图4 膨胀芯轴与叶轮装配后径向剖面示意图

表1 不同材料的结构特点

序号	材料	结构特点	是否选择
1	45	环形式局部胀紧, 膨胀均匀性一般	否
2	40Cr	环形膨胀槽, 膨胀均匀性一般	否
3	40CrNiMOA	键槽式局部胀紧, 膨胀均匀性好	是

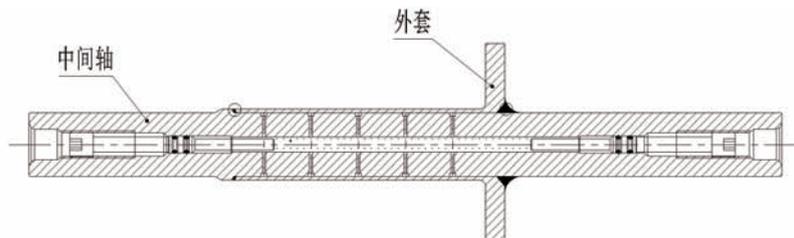


图5 膨胀芯轴外套与中间轴示意图

### 2.4 理论计算

#### (1) 芯轴最大工作压力

根据叶轮内径设计薄壁芯轴工作状态的外径尺寸为Dmm。薄壁在工作状态时的最大应变 $\varepsilon$ 为:

$$\varepsilon = \Delta / D$$

其中,

$\Delta$ —芯轴膨胀变形量;

D—最小芯轴外径。

设定芯轴薄壁厚度tmm, 40CrNiMOA

的弹性模量  $E=2.02 \times 10^5 \text{MPa}$ , 根据应力计算公式:

$$\sigma = E \cdot \varepsilon$$

$$\sigma = PD/2t$$

则最大工作压力:

$$P = 2t\sigma/D$$

最大工作压力需能满足夹紧力要求。

(2) 校核薄壁强度

根据第四强度理论公式:

$$\sigma_m = \sqrt{\frac{1}{2}[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]} \leq \sigma_s$$

其中,

$\sigma_m$ —薄壁套受到的综合应力

$\sigma_s$ —材料的屈服应力, 40CrNiMOA 的  $\sigma_s=785 \text{MPa}$

$\sigma_1$ 、 $\sigma_2$ 、 $\sigma_3$ —薄壁件受到的x、y、z三个方向的应力

根据理论公式核算薄壁外套是否满足弹性变形的强度条件要求。

(3) 结构可靠性校核举例

以一款离心压缩机为例, 一级叶轮与主轴的过盈量为  $0.001 \sim 0.042 \text{mm}$ , 一级叶轮内孔半径  $R=21 \text{mm}$ , 接触面长度  $L=20 \text{mm}$ , 动平衡电机功率  $2.2 \text{KW}$ , 动平衡叶轮的转速  $1500 \text{R/min}$ , 设计外套厚度  $2 \text{mm}$ , 芯轴与叶轮的装配间隙  $0.01 \sim 0.05 \text{mm}$ 。

叶轮动平衡时扭矩:

$$Me = 9549P/n = 9549 \times 2.2/1500 = 14 \text{NM}$$

其中,

P—功率 (KW)

n—转速 (r/min)

Me—扭矩 (NM)

叶轮在做动平衡时, 叶轮与主轴不发生相对运动, 叶轮与主轴之间的静摩擦力必须满足叶轮动平衡的扭矩 Me (临界点), 安全系数  $S=3$ 。

$$Me = F_1 \cdot R$$

$$F_1 = 14 \times 10^3 / 21 = 670 \text{N}$$

$$F = F_1 S = 670 \times 3 = 2000 \text{N}$$

F—叶轮与芯轴产生的摩擦力

R—叶轮与芯轴配合的半径

叶轮与芯轴之间产生的摩擦力是靠芯轴膨胀发生弹性变形附加于叶轮作用力:

$$F = \mu \cdot A \cdot \sigma$$

$$\sigma = F / (\mu \times 2 \Pi r \times L) = 2000 /$$

$$(0.15 \times 2 \times 3.14 \times 21 \times 20) = 5 \text{MPa}$$

其中,

$\mu$ —摩擦系数, 取  $0.15$

A—叶轮与芯轴所接触的面积

$\sigma$ —芯轴弹性变形产生的应力

根据广义胡克定律, 可以计算出传递扭矩所需要的油压 P1:

$$\sigma = P1D/2t$$

$$P1 = 2t \times \sigma / D = 2 \times 2 \times 5 / (2 \times 42) = 0.24 \text{MPa}$$

其中,

$\sigma$ —涨套弹性变形产生的应力

t—芯轴外套厚度

D—芯轴外套平均直径

根据广义胡克定律, 根据装配间隙计算出所需的油压 P2:

$$P2 = 2Et \epsilon t / D (1 - 0.5\nu) = (2 \times 2.02 \times 10^5 \times 2 \times 10^{-3} \times 1.2 \times 10^{-3}) / (42 \times 10^{-3} \times (1 - 0.5 \times 0.3)) = 27.15 \text{MPa}$$

其中,

E—弹性模量, 40CrNiMOA:

$$2.02 \times 10^5 \text{MPa}$$

t—涨套的厚度,  $2 \text{mm}$ ;

$\epsilon t$ —涨套应变,  $\epsilon t = \Delta / D =$

$$0.05/42 = 0.0012;$$

$\nu$ —泊松比,  $0.3$ ;

(4) 校核薄壁强度

$$\sigma_m = \sqrt{\frac{1}{2}[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]} \leq \sigma_s$$

$$\text{故: } \sigma_m = \sqrt{3} * \sigma_1 = 224 \text{MPa} < \sigma_s$$

因此, 薄壁套管满足弹性变形的强度条件要求。

### 3 方案实施

#### 3.1 组装

先加工好外套和中间轴, 然后把二者装配在一起, 结构见图6:

外套和中间轴采用过盈配合, 在外套和中间轴半精加工后进行热套, 热装温度:  $180^\circ \sim 200^\circ$ , 保温  $2 \text{h}$ , 热套完毕后对外套与中间轴进行氩弧焊接。

#### 3.2 焊接、热处理 (如图7-8)

氩弧焊: 焊接电流  $130 \text{A} \pm 5 \text{A}$ , 电压  $14 \text{V} \pm 2 \text{V}$ 。

热处理: 退火处理, 消除焊接应力, 采用  $450^\circ \text{C}$ , 保温  $2 \text{h}$ , 随炉冷却。

#### 3.3 组件精加工 (如图9)

(1) 在加工磨削过程中芯轴内充满压力  $P=5 \text{MPa}$  的油液;

(2) 双顶, 精加工保持芯轴跳动

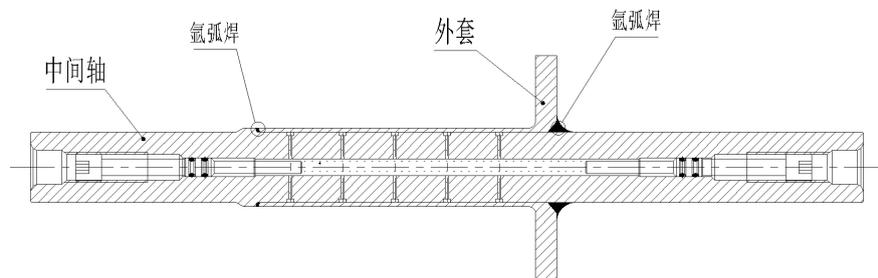


图6 膨胀芯轴外套与中间轴组装示意图