

# 曲轴沉割大圆角滚压强化工艺应用研究

陈林 李卫军

(昆明云内动力股份有限公司 云南 昆明 650217)

**摘要:** 本文介绍了如何通过沉割圆角的设计、滚压参数的确定及试验对比、工艺装备的选定、滚压强化质量的监控、实施沉割圆角滚压强化工艺在公司三种 YN 系列曲轴上的成功应用, 将滚压设备融合在机加线内, 使工艺流程和物流大为缩短, 应用最低限值试验方法能及时有效地监控曲轴滚压强化质量, 经过沉割圆角滚压强化工艺的应用实践, 达到了提高曲轴疲劳强度、降本增效、节能降耗的目标。

**关键词:** 曲轴; 圆角滚压; 强化工艺; 成功应用

## 1 曲轴沉割圆角滚压强化机理

曲轴沉割圆角滚压主要是在曲轴的主轴颈和连杆轴颈上事先加工出沉割圆角, 之后通过采用专用滚轮以一定的压力在曲轴沉割圆角部位滚动, 使曲轴圆角部位产生一定的压应力, 以此来抵消曲轴工作过程中圆角部位所受的拉应力, 进而提高曲轴的疲劳强度和使用寿命。其强化机理见图 1, 其中  $P$  为滚压装置的力,  $F$  为滚轮的力,  $R$  为滚轮半径,  $R'$  为沉割圆弧,  $h$  为沉割圆角深度,  $\alpha$  为滚压角度。

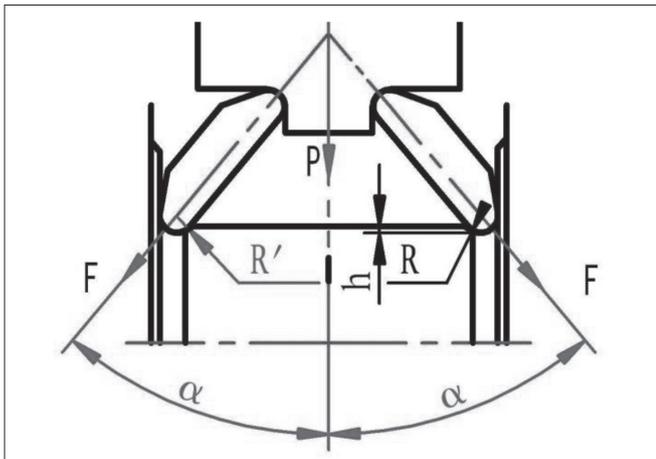


图 1 曲轴沉割圆角滚压强化机理图

滚压时, 曲轴轴颈圆角处的材料在滚轮的高接触应力作用下发生强烈的塑性变形, 结果在圆角表层形成了数值很高、层深可达数毫米的残余压应力场; 同时圆角滚压可以使曲轴圆角加工的波峰突起趋于平缓并使微小裂纹趋于弥合, 改善圆角表面粗糙度, 这些表面质量的提高也能部分提高曲轴疲劳强度。

## 2 沉割圆角的设计

沉割圆角设计的合理性, 直接影响着曲轴的结构强度, 它包含沉割圆角半径  $R_w$ 、沉割深度、滚压角度的设计等方面的内容。公司与滚压设备提供商一起, 对沉割圆角进行了认真分析和计算, 结合成功的范例, 对公司三种 YN 系列曲轴的沉割圆角半径、沉割深度及滚压角度进行了设计。

### 2.1 沉割圆角半径的设计

按以下公式计算并确定沉割圆角半径:

$$R_w = (W_1 - W_2) / 2 - L$$

式中:  $R_w$  — 沉割滚压圆角尺寸;

$W_1$  — 主轴颈、连杆颈档宽;

$W_2$  — 主轴颈、连杆颈轴瓦宽;

$L$  — 根据主轴颈、连杆颈圆角及有关标准确定的调整参数。

根据上面公式, 最终确定三种 YN 系列曲轴沉割圆角半径为  $R2.5$ 。

### 2.2 沉割深度及滚压角度的设计

沉割深度及滚压角度的设计参照国际上著名的曲轴深滚压机床厂家 Hegenscheidt 提供的资料, 沉割深度设计为 0.5, 滚压角度设计为  $50^\circ$ 。

## 3 滚压参数的确定及试验结果

滚压参数设计是否合理是曲轴疲劳强度是否达到要求的关键, 同时其直接影响着曲轴的变形, 因此滚压参数的确定应在曲轴疲劳强度达到要求的前提下尽可能地减小曲轴的变形量, 以最大程度地降低校直比例和提高滚压工具耐用度。滚压参数的确定包含滚轮半径  $R_r$  和滚压力等的确定。

### 3.1 滚轮半径 $R_r$ 的确定

为使滚压头能有效渗透沉割圆角，即在深滚压操作开始时，滚轮必须接触预加工的沉割槽的底部，因此滚轮半径  $R_r$  必须略小于沉割圆角半径  $R_w$ 。结合市场上专用滚轮供应情况（注：因滚压时对滚轮的耐用度及加工精度等要求很高，国产滚轮无法达到要求，几乎均采用进口滚轮），滚轮半径  $R_r$  确定为  $R2.35$ ，小于  $R_w=2.5$  要求。

### 3.2 最佳滚压力的确定

为了缩短最佳滚压力确定时间，参考预验收滚压设备时疲劳试验结果，在滚压力  $9 \sim 11\text{MPa}$  区间（在预验收时在此压力区间试验，疲劳强度能达到要求），采用不同的压力进行滚压。滚压后进行快速疲劳试验，统计中间主轴跳动超差的比例。曲轴疲劳强度与压力的大小不是呈线性关系，即并不是滚压力大，疲劳强度就一定高。当滚压力升到一定程度时，疲劳强度不再升高，反而有降低的趋势，同时曲轴变形加大，滚轮寿命缩短。综合疲劳试验结果、曲轴变形结果和滚压工具寿命，确定最终滚压力为：主轴颈为  $9\text{MPa}$ ，连杆轴颈为  $10\text{MPa}$ 。为慎重起见，紧接着在按确定的最终滚压力滚压后，又按 QC/T 637-2000《汽车发动机曲轴弯曲疲劳试验方法》标准试验论证所确定的滚压参数是否合理。试验时从 6 根试验曲轴上截取了 14 个单拐作为试件，在 PDC-2 疲劳试验机上，用升降法在最大爆压  $14\text{MPa}$ ，名义工作弯矩  $1340\text{N}$  的条件下测定试件的疲劳极限弯矩，试验的循环基数为  $1 \times 10^7$ 。所得结果见表。

表 滚压设备疲劳试验结果

根据升降法的闭合条件，对表中的数据进行配对，得出本试验有效数据的对子数目  $n=6$ ，由此计算承载弯矩疲劳极限  $M-1=2797\text{Nm}$ 、标准差  $S_{n-1}=148.28\text{Nm}$ 。根据承载弯矩疲劳极限  $M-1$  和标准  $S_{n-1}$  计算存活率为 50% 时的安全系数  $n_{50\%}=2.09$ ，存活率为 99.9% 时的安全系数  $n_{99.9\%}=1.73$ ，满足安全系数  $\geq 1.6$  要求，可见所确定的滚压力在兼顾曲轴变形小和延长滚压工具寿命的条件下能达到疲劳强度要求。

### 3.3 前工序工艺尺寸的确定

前面提到，滚压后曲轴会出现变形，不但中间主轴颈跳动量变大，而且轴颈轴向尺寸及档宽均发生变化。如果不根据滚压变化量来确定相关前

工序的工艺尺寸，滚压后的曲轴轴向尺寸及档宽很可能出现超差甚至报废。在完成滚压疲劳强度试验和最终确定滚压参数后，为避免人为检测误差，用进口曲轴、凸轮轴综合检测仪对滚压前后的 100 件曲轴轴向尺寸、档宽进行了检测，得出各轴颈轴向尺寸及档宽变化规律，滚压后 4100QBZ 曲轴与 4102QB 曲轴的变化规律基本一致，滚压后一、二主轴拉长，三、四主轴压缩，一、二连杆轴拉长，二、三、四连杆轴压缩，所有的轴颈档宽均变宽。根据测试结果就可确定相关前工序的各轴颈轴向尺寸及各档宽加工工艺尺寸，从而使曲轴滚压后的轴向尺寸及档宽在图纸要求的范围内。

## 4 工艺装备的选定

在实施沉割圆角深滚压强化工艺的前期，对国内外滚压及校直设备供应商进行了调研，综合投入与产出成本，最终确定采用国产 RS-9G 通用的半自动曲轴圆角滚压机床，一次可同时对 9 个轴颈进行滚压。并配有单头 RS-1C 滚压校直机，仅在检测中间主轴跳动量超差时滚压校直使用。

公司选用的国产滚压与校直设备与进口设备相比不同之处为：滚压与校直是分体机，而进口设备为一体机，国产滚压设备无主轴颈跳动在线检测单元，需人工全检主轴颈跳动，根据跳动超差情况对曲轴进行人工滚压校直，因此对操作者的素质要求较高，进口滚

| 试件序号 | 拐别 | 载荷 /Nm | 循环次数 ( $\times 10^4$ ) | 安全系数     | 断裂部位  |
|------|----|--------|------------------------|----------|-------|
| 1    | 4  | 2580   | 1000                   | $> 1.93$ |       |
| 2    | 4  | 2680   | 850                    | $< 2.0$  | 连杆颈圆角 |
| 3    | 2  | 2580   | 890                    | $< 1.93$ | 连杆颈圆角 |
| 4    | 4  | 2480   | 1000                   | $> 1.85$ |       |
| 5    | 1  | 2580   | 1000                   | $> 1.93$ |       |
| 6    | 3  | 2680   | 1000                   | $> 2.0$  |       |
| 7    | 3  | 2780   | 1000                   | $> 2.07$ |       |
| 8    | 2  | 2880   | 1000                   | $> 2.15$ |       |
| 9    | 2  | 2980   | 110                    | $< 2.22$ | 连杆颈圆角 |
| 10   | 1  | 2880   | 320                    | $< 2.15$ | 连杆颈圆角 |
| 11   | 4  | 2780   | 1000                   | $> 2.07$ |       |
| 12   | 2  | 2880   | 1000                   | $> 2.15$ |       |
| 13   | 2  | 2980   | 770                    | $< 2.22$ | 连杆颈圆角 |
| 14   | 4  | 2880   | 1000                   | $> 2.15$ |       |

压设备有主轴颈跳动在线检测单元,滚压后对曲轴主轴颈跳动自动进行检测,根据检测情况自动进行滚压校直,因此对操作者的素质要求较低。但进口滚压设备投资较高,购买一台设备需上千万,而国产滚压与校直设备加起来仅为其1/10。在优化滚压参数后,采用国产滚压设备完全能将滚压后曲轴的变形量大大降低。目前公司采用国产滚压设备滚压后曲轴主轴颈跳动超差率和滚压校直率不到1%,操作者在滚压的同时有足够时间进行校直,因此一人可同时操作滚压和校直设备,对于曲轴的产能无影响,达到了投入少、产出高的要求。

## 5 滚压强化质量的监控

公司在日常生产中对滚压强化质量的监控除在滚压全程监控滚压力是否满足工艺要求外,另外采用了最低限值试验方法对滚压强化质量进行评价。最低限值试验方法的实质就是用曲轴弯曲疲劳试验对强化效果进行评定。评价指标就是通过强化要使曲轴在试验中必须达到的最低弯曲疲劳极限弯矩。当以此最低弯曲疲劳极限弯矩加载进行曲拐试样的弯曲疲劳试验时,则要求全数通过107循环。最低限值——最低弯曲疲劳极限弯矩就是设定的一个门槛,以子样在试验中能否通过来判断母体的强化效果是否合格。最低限值的确定通过升降法试验结果及期待的存活率确定。公司以M-1(99.9%)作为最低限值,即是存活率为99.9%时的疲劳极限弯矩。最低限值试验时对于四缸机曲轴只需取一个试样,按正常试验频率试验的时间小于40h,因此采用这种方法大大降低了试验时间,这种试验方法本质上是QC/T637-2000《汽车发动机曲轴弯曲疲劳试验方法》标准的延伸,经实践证明对于及时有效监控滚压强化质量起到了十分重要的

作用。

## 6 结语

根据疲劳试验结果,公司QT800曲轴经沉割圆角滚压强化后的曲轴疲劳强度安全系数至少达到1.7,而氮化曲轴疲劳强度安全系数为1.3左右,因此曲轴经滚压后疲劳强度与氮化相比其提高幅度大于30%。据统计计算,实施沉割圆角滚压强化工艺成本比氮化工艺成本每根降低87.31%。实施沉割圆角滚压强化工艺后,滚压处理一件曲轴的节拍为1.6min,开两班就能达每日660件产量,而以前实施气体软氮化工艺每日三班氮化曲轴产量 $\leq 330$ 件,可见生产效率提升2倍。实施沉割圆角滚压强化工艺将滚压设备融合在机加工线内,使工艺流程和物流大为缩短,同时无HCN等有毒有害气体产生,对环境不会产生有害影响。应用最低限值试验方法能及时有效地监控曲轴滚压强化质量。综上所述,经过沉割圆角滚压强化工艺的应用实践,达到了提高曲轴疲劳强度、降本增效、节能降耗的目标。

## 参考文献:

- [1] 刘俊,王茂川,张世艳,等.汽车发动机曲轴弯曲疲劳试验方法研究[J].精密成形工程,2019,11(01):114-118.
- [2] 谢丽颖.汽车发动机曲轴疲劳试验方法[J].汽车工艺与材料,2006(03):9-12.
- [3] 孙腾蛟,等.正火、氮化沉割圆角滚压球铁曲轴疲劳可靠性研究:2014ZC0203[Z].滨州市科技局,2019-08-26.
- [4] 李满良.球铁曲轴圆角沉割滚压试验研究[J].汽车工艺与材料,2003(10):19-21+24.
- [5] 张影.发动机曲轴曲拐疲劳分析[J].黑龙江科学,2022,13(04):60-61.