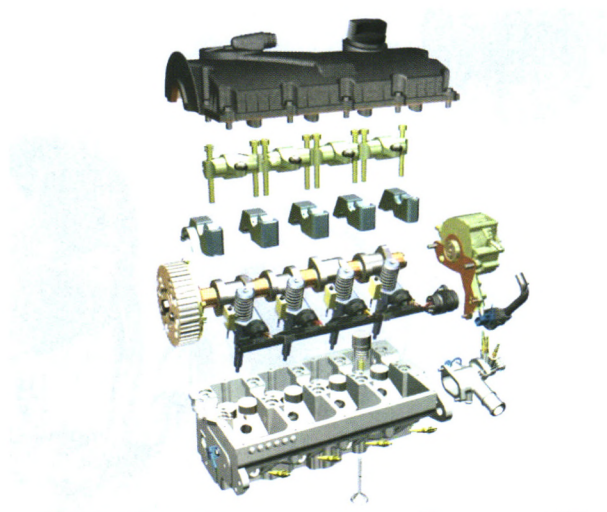


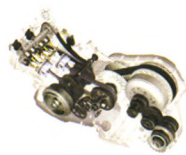
发动机制造技术



随着汽车发动机增压、缸内直喷、可变气门等先进技术的应用，以及轻量化、小型化的发展，发动机制造引起了越来越多的关注，对其制造工艺及设备提出了更高的要求，以进一步适应汽车环保与节能的发展方向。

策划：于永初





■ 一汽解放公司无锡柴油机厂/张云天 徐忠芳

球铁曲轴圆角滚压工艺

曲轴作为发动机的核心零部件，在发动机运转过程中，经受弯曲、扭转复合交变应力的恶劣工况，特别是工作中的冲击载荷，使它极易发生疲劳损坏。圆角滚压技术是一种经济而高效的曲轴强化方式，根据资料统计，锻钢轴经圆角滚压后疲劳性能可提高70%~150%，球铁曲轴经圆角滚压后疲劳性能可提高80%~180%，国外应用已十分普遍和成熟，国内主要受滚压设备影响（高性能的滚压设备十分昂贵），发展一直比较迟缓。

随着国内球铁技术的发展，以及滚压设备的进步，特别是一些有实力的曲轴生产厂家，滚压设备同步采用国际著名厂家的设备，在硬件条件上已得到了根本性的改观，使这一技术具备了大批量推广的条件。另一个重要因素是以铁代钢降本效果明显，球铁滚压曲轴的综合成本一般只有锻钢曲轴的60%~70%，国内各大主机厂对球铁滚压曲轴的需求逐年增加，推动了这一技术快速发展。

曲轴圆角滚压提高疲劳强度的原理

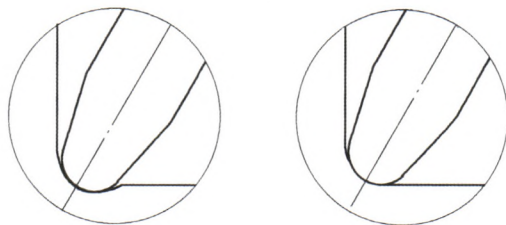
圆角滚压使曲轴的抵抗疲劳破坏的能力提高，其原因在于滚压载荷通过滚压轮作用到曲轴表面，产生接触应力，当接触应力大于球铁材料的压缩屈服强度，则发生塑性变形，滚压卸载后塑性变形保留下来，于是在表面形成残余压应力。拉应力是裂纹萌生和扩展的驱动力，残余压应力的存在抵消或部分抵消

了拉应力的作用，阻止了裂纹的扩展，提高了抵抗裂纹扩展的能力，使曲轴抗疲劳强度提高。滚压强化产生的残余压应力的大小与曲轴抗疲劳破坏能力的提高密切相关。

由于球墨铸铁本身组织结构是由珠光体、铁素体及圆球状石墨球组成，基体致密性比碳钢要差，所以经过滚压后，有利于产生塑性变形，从而形成压应力区。另外，球墨铸铁经过砂轮磨削之后，外表层的石墨球容易脱落，脱落后凹坑是潜在的疲劳裂纹产生源，经过滚压后，这些凹坑被挤压后自动闭合，粗糙度得到大幅度提高，从而消除了疲劳裂纹的产生源头，对曲轴疲劳强度的提高产生了积极的作用。

圆角滚压两种典型工艺

目前最典型的圆角滚压有两种工艺：一是沉割槽滚压，二是大圆角滚压，结构示意图1。这两种结构的工艺特点对比见表1，工艺优缺点对比见表2。



(a) 沉割槽滚压 (b) 大圆角滚压

图1 圆角滚压工艺

表1 曲轴沉割槽滚压和大圆角滚压工艺优缺点

项目内容	沉割槽滚压		大圆角滚压	
曲轴结构	可以加工较小的沉割圆角，可以增大轴颈的接触面积，降低轴径的比压	✓	圆角滚压后在外圆处不可改变的会产生突起，为避免产生咬瓦，必须加大轴瓦倒角，减少轴瓦接触面积	×
	轴径圆角切割后，其圆角半径减小，且在轴径方向有一定的深度，使圆角应力集中系数增大，曲轴的重叠度减小，曲轴本身结构强度下降，据有关资料证明，沉割圆角后曲轴本身结构强度下降了28%左右	×	可保持原设计结构强度	✓
圆角结构对滚压的影响	沉割槽可以为滚轮的滚压及应力分布提供导向作用	✓	应力分布集中在外圆处，对圆角处的强度提高不利	×
工艺流程	需要高精度、先进的前道工序加工设备，投资高，但加工后精度高、工艺流程简单（不需要半精加工及中间回火处理），综合性价比高	✓	前道工序不需要高投入，但后道工序需要增加半精加工及热处理回火，技术落后性价比并不高	×
磨削难度	非常简单，只需要磨削中间轴颈外圆	✓	需要磨削台肩面及R部位，磨削难度高很多	×
磨削效率	只需要磨削中间轴颈外圆，效率提高一倍左右	✓	需要磨削台肩面及R部位，效率低	×
滚压工艺	对滚压难以控制的曲轴跳动要求低，有利于效率的提高	✓	需要考虑曲轴最终精度的保证，在校直工艺上更多地需要考虑精度的保证，效率低	×
滚压后突起	由后道精磨保证，无外圆凸起、跳动、平行度、角差等形状误差的考虑。	✓	在精加工后滚压，外圆突起在工艺上无法解决，对跳动、平行度、角差等最终尺寸均有影响	×

根据对比分析，沉割槽滚压工艺是一种合理的曲轴加工工艺，在保证曲轴圆角强化效果的同时，工艺流程合理、工艺效率及效果非常理想，是一种高效、经济的生产工艺。缺点是一次性投入相对较高，对球铁技术具有较高的门槛。而大圆角滚压工艺是一种临时过渡工艺，虽然对曲轴疲劳强化效果也很明显，但在工艺质量保证（几何尺寸）能力上存在无法解决的死结，优点是与原有工艺容易对接。

影响圆角滚压质量的主要因素及关键参数

1. 材料延伸率对疲劳强度的影响

球墨铸铁技术的发展（包括强度、延伸率等性能提高）是球铁滚压曲轴以铁代钢得以实现的关键之一，这里仅对材料延伸率的影响进行分析和研究。

如果仅考虑曲轴圆角滚压效果，当然是延伸率越高越好，但对球铁材料来说，延伸率的提高不仅存在技术上的门槛，成本上也随之大幅度增加。因此，综合考虑性价比，更重要的是考虑到批量生产时球铁工

艺的稳定性，低端曲轴延伸率推荐使用3%~5%，高端曲轴延伸率推荐使用5%~8%。

2. 滚压转速

1) 经过批量生产的现场跟踪数据及查阅国内外相关资料，滚压转速（工件的旋转速度）对曲轴的疲劳强度没有明显影响。但由于在滚压过程中，工件曲轴带动滚轮转动，而滚轮与曲轴接触面之间存在半径差，这使滚轮的各部分的线速度与曲轴圆角的线速度不同。而正是由于速度差的存在，所以滚压过程中各接触截面产生摩擦，存在剪切应力。为了避免曲轴滚压表面撕痕，一般曲轴的滚压速度为20~60r/min。

2) 确保滚轮与曲轴圆角之间连续滚压十分重要，这直接影响到滚压后的曲轴疲劳强度。但受到滚轮摩擦力及工件当时的几何尺寸如跳动、圆角尺寸公差及曲轴刚度等因素影响，会造成滚压的不连续性。一种解决方案是对滚压头设计上进行改进，支撑轮的外缘设计了8个凸起，在滚压时，该凸起间隔触发感应器发出信号，如果支撑轮不旋转，则说明滚压不连续，机床会报警而停止工作。



3. 滚压次数（时间）

1) 滚压次数即滚压强化时滚轮压过曲轴圆角的次数。如图2所示，滚压强化时滚轮压过曲轴圆角的次数对曲轴的疲劳强度影响较大，在施力之初的几圈里，滚压圈数几乎与疲劳强度的提高成正比，随着滚压次数的增加以及滚压力的稳定，圆角处的材料发生塑性变形，形成局部区域材料积累导致表面硬度增加，继续滚压将不再发生塑性变形，即圆角区域的残余压应力趋于饱和，曲轴的疲劳强度便不再增加。

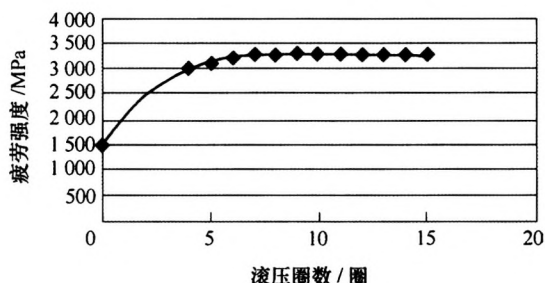


图2 滚压圈数与疲劳强度的关系

2) 根据经验，滚压次数在6~8圈时，圆角处已经不再产生塑性变形，即圆角处的残余压应力已经达到饱和，继续滚压，残余压应力保持不变。如果滚压次数过多，将会使曲轴圆角处产生接触疲劳，表面形成鱼鳞状甚至脱落，严重影响曲轴的疲劳强度。

4. 滚压力

(1) 滚压力的确定 滚压力即滚轮压到曲轴圆角处的力。滚压力对曲轴疲劳强度影响很大，滚压不同材料、工艺和热处理状态的曲轴滚压力差异很大，最佳滚压力与曲轴本体材料强度、硬度、圆角尺寸、轴颈大小、滚轮结构及尺寸等有关。由于滚轮工作情况较复杂，比如：滚压接触区应力分布不均匀，接触区变形，接触点的几何形状复杂以及接触区大小的计算等，目前还没有数学模型能够准确计算出最佳滚压力，一般都是通过试验法来确定最佳的滚压力，滚压力的确定目标是使曲轴疲劳强度满足发动机的要求。

滚压力与曲轴滚压强化后的疲劳关系从目前的经验来看比较明确（见图3），在一定的范围内（注意不能超大）成线性正比关系；当滚压力增加到一定值后，随着滚压力的增加而曲轴的疲劳极限弯矩不再增加，而是保持在一个较稳定的范围内；随着滚压力的进一步增加，当滚压力增大到一定程度后，曲轴圆角处材料的塑性变形已充分实现，其残余压应力值已趋

饱和，零件的疲劳强度变化不大。

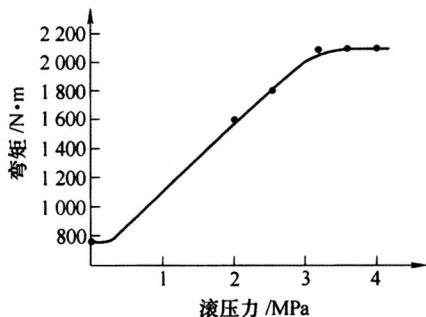


图3 滚压力对曲轴疲劳极限弯矩的影响曲线

当滚压力过大时，滚压表面过高的接触应力将导致曲轴圆角表面损伤，产生细小裂纹甚至起皮，反而使曲轴疲劳强度急剧下降。正常的滚压校直不会对曲轴表面产生破坏，也不会影响曲轴的疲劳强度。滚压力过大的另一个不利因素是对曲轴几何尺寸的破坏，尤其是大圆角滚压过大的滚压力容易导致圆角区材料流动，在轴颈与圆角连接处产生圆周凸起（见图4），容易导致发动机轴瓦装配困难或者工作时拉瓦。

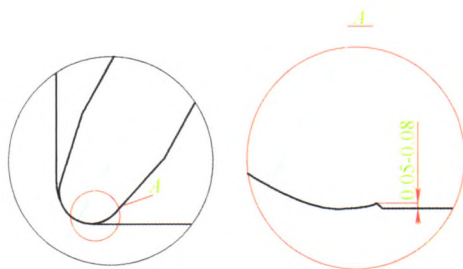


图4 大圆角滚压外圆根部塑性变形凸起

(2) 变力滚压的原理 曲轴在发动机工作过程中，当连杆轴颈运行到上止点时，气缸内压力最大，受到的最大冲击载荷同样也在上止点处，此时，连杆轴颈受拉应力最大的部位是平衡块内测（下止点R处）。考虑到球铁曲轴抗拉强度远低于抗压强度，因此，为了减少曲轴滚压过程中应力值叠加，在滚压曲轴连杆轴颈圆角时需要对滚压力进行处理，一般情况上下止点120°范围加载力最小，下止点120°范围加载力最大，

5. 滚轮直径

滚轮直径的选择应遵循的一般原则：首先应保证滚轮直径小于轴颈与凸台的联接圆角的直径，这样才能保证滚轮与圆角轮廓充分接触；第二，在保证轴颈与轴瓦接触面积的前提下，尽可能选择大的滚轮，

形成较大面积的压应力区，由于实际滚压空间受到曲轴结构及滚压设备结构限制十分有限，因此，滚轮直径不会太大，一般为 $\phi 25 \sim \phi 55\text{mm}$ ；第三，滚轮直径必须满足设备的安装、冷却等结构上的需要。

6. 滚压工艺对曲轴几何尺寸的影响

(1) 跳动 圆角滚压工艺对曲轴跳动的破坏是该工艺的不足之处，是由该工艺固有的原理特性决定的，但通过滚压工艺上的优化和改进，可以有效控制和改善曲轴的跳动范围，从而满足曲轴的使用性能。

影响滚压后曲轴跳动的主要因素有：

1) 滚压力的大小。但该项参数主要在曲轴疲劳强度时考虑，不会为了对跳动的影响而改变。

2) 滚压顺序。圆角滚压对曲轴跳动的影响主要是轴颈的弯曲变形造成的，因此，通过改变滚压顺序能够明显改变滚压后曲轴的跳动，同时也不影响滚压疲劳性能。

3) 加载方式。最佳的方式是滚压力平稳增加及卸载，以减缓曲轴的塑性并行速度，从而减少曲轴的变形量。

4) 变压力滚压。根据曲轴在工作状态下的受力情况，可以采用变压力滚压的方式进行，在上止点方向降低滚压力，这一方法的根据原理是降低变形量。

分割槽曲轴由于后道工序还进行精加工，所以，对跳动项目来说只需要保证磨削余量的均匀即可。而大圆角滚压需要保证最终的成品，因此，跳动对质量、产能的影响很大，工艺保证能力也不足。

(2) 轴向长度 滚压后曲轴的轴向长度会发生变化，这一方面是由于工件在滚压中受到了轴向的作用力，且产生了塑性变形，导致工件的总长度会伸长，各个轴颈的开档变大，同时轴颈发生弯曲变形，这也从另一方面对曲轴轴向长度产生影响。需要注意的是，轴颈弯曲后会造成小开挡尺寸变小，有可能造成连杆安装无间隙或干涉，因此，这一现象在工艺上需要考虑合理布置滚压前的小开挡尺寸。

工件滚压后的延伸量由产品、滚压工艺、材料等的不同所决定，当然其变化还是遵循一定的规律性，可以通过工艺试验进行对比统计后确定。

(3) 滚轮的压入量（即圆角的塑性变形量） 滚轮压入量由滚压力大小、压入方向、滚压圈数和工件的材质特性决定，由于滚压轮在滚压过程中考虑到贴合问题，一般比工艺圆角小0.1mm左右，经过滚压曲轴圆角R处产生塑性变形，此滚轮圆角就复印到曲轴R处，同时在半径方向因塑性变形也会产生变形，经统计压入量平均0.1mm左右，个别极限值约为0.15mm。

(4) 曲轴圆角粗糙度 滚压工艺属于无削加工，主要原理是在滚压力作用下曲轴R部位表面材料发生塑性变形。滚压轮表面粗糙度值严格控制， $R_a=0.05 \sim 0.1\mu\text{m}$ ，因此滚压后，轴颈圆角的粗糙度值能够得到很大提高，可以稳定控制 $R_a=0.2 \sim 0.3\mu\text{m}$ ，有利于曲轴疲劳强度的提高。

根据滚压前加工工艺的不同，曲轴R部位滚压前的粗糙度情况是不同的，表2列出了常见的几种加工方式。

表2 一般的曲轴圆角R部位的粗糙度工艺范围

工艺类型	圆角R部位一般工艺能力	圆角R的形状特点	备注
车—车—拉	$R_a=0.8 \sim 1.6 \mu\text{m}$	由数控单点车出，非常标准	—
数控车	$R_a=1.6 \mu\text{m}$	由数控单点车出，非常标准	—
成型刀车	$R_a=1.6 \sim 2.5 \mu\text{m}$	随着刀具磨损会产生失圆	—
内铣床	多楞形，无法评价	呈多楞形，圆度在0.05mm	R刀片突起铣削成型
磨削	$R_a=0.8 \sim 1.6$	随着砂轮磨损会产生失圆	一般为大圆角滚压

影响圆角R处滚压后粗糙度的因素，除了设备稳定性、前道工艺水平外，影响最大也是最主要的是滚压轮的磨损（表面疲劳后金属剥落），因此，定期检查滚压轮表面质量、强制更换等管理措施十分重要。

7. 滚压校直工艺

曲轴在滚压后跳动不可避免的会受到破坏，然而对于圆角滚压工艺的曲轴不能采用压弯校直的工艺。圆角滚压提高疲劳强度原理是通过塑性变形，在圆角R处产生预应力，如采用压弯校直工艺，则原来经过滚

压产生的压应力将有所损失或消失，失去了滚压强化的意义。据相关资料说明，如对一个0.2mm的跳动进行压弯校直，需要进行一个1.2mm行程的压弯，对曲轴最终疲劳性能产生降低40%的影响，因此，这种方式不可取。

圆角滚压只能采取滚压校直工艺，前期的工艺滚压校直工序与滚压工序是分开的独立过程。但目前的滚压设备技术发展非常快，无论国产还是进口设备一般自带校直功能，由同一设备分两个工步完成，即：首先完成圆角滚压，工件转动由设备对曲轴的实际跳



■ 南京汽车集团有限公司/胡劲松

降低缸盖胀紧器孔工废率的措施

缸盖主要用来封闭发动机气缸上部，构成燃烧室，并为凸轮轴和进、排气歧管提供支撑。发动机工作时，空气从进气歧管吸进燃烧室，火花塞把可燃混合气体点燃，带动活塞做功，并把废气从排气歧管排出。液压胀紧器作用在正时链条上，起着导向和涨紧

的作用。如果缸盖的液压胀紧器孔（简称“胀紧器孔”）存在缺陷，会造成发动机漏油，影响工作性能。缸盖胀紧器孔工废率高一直困扰着我公司，本文通过一个典型的QC小组（质量管理小组）的活动案例，介绍如何降低缸盖胀紧器孔工废率。

动部位、方向、跳动量等参数进行检测，通过设备自带的系统进行分析；再通过对曲轴的某些部位用不同的滚压力再次滚压，直到测量的曲轴跳动量符合要求为止。

由于曲轴的形状复杂、滚压参数变量多，目前的理论计算确定曲轴的校直滚压力和校直部位存在较大误差，尚不能应用于实际的批量生产，目前主要是通过采集大量的试验数据，根据统计规律编制出曲轴滚压校直专用系统。

滚压工艺的不足和改进方向

1. 轴向长度变形

曲轴滚压轴向长度变化虽然有规律可寻，可以通过滚压前轴向长度尺寸链的调整得到改善，但由于滚压工艺的不确定性，个别挡的长度尺寸仍会超过公差要求。由于曲轴连杆颈是偏心，刚性不足，又带有平衡块具有变形放大作用，因此，对于滚压后的弯曲变形影响更为明显，这些因素均会带来装配时产生干涉的风险。

2. 滚压力的理论计算

目前一般均采用经验数据确定滚压力工艺试验范围，再通过疲劳试验确定最佳的滚压力，这必然造成

开发进度慢、试验成本高的缺点，这方面的研究成果可以极大地促进曲轴圆角滚压技术的推广和应用。

3. 滚压校直工艺的理论计算

滚压校直工艺是曲轴滚压的一部分，是对滚压后跳动问题的一种纠正，但其本身并不产生改善性能的效果。随着对此问题研究的深入，需要滚压校直的比例正逐步降低，这极大地提高了滚压工艺的效率、降低生产成本，因此，如在理论计算上能够有所突破并应用于生产，将产生十分巨大的社会效益。

结语

曲轴圆角滚压工艺是一个系统工程，对球铁曲轴来说，首先原材料技术必须过关，其次是选择合适的曲轴结构。在圆角滚压工艺中滚压转速、滚压次数、滚压力、加载方式等工艺参数的确定与选择是关键，同时全面掌握滚压过程中曲轴几何尺寸的变化规律，通过工艺尺寸链的调整和优化，提高曲轴几何尺寸的符合性。总而言之，圆角滚压是一种特别经济、高效的曲轴加工工艺，曲轴的疲劳强度能够得到大幅度的提高，从而实现以铁代钢，带来巨大的社会效益。

关键词：

球铁 曲轴 圆角 滚压

(收稿日期20140331)