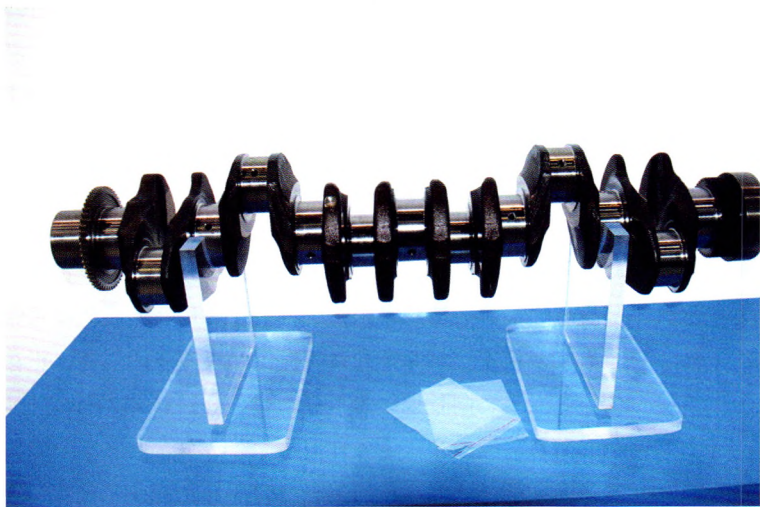


# 曲轴主轴颈及法兰粗加工新工艺

□ 上汽大众汽车有限公司/张书桥 冯 波

本文介绍了曲轴主轴颈和法兰粗加工的工艺加工过程及一种高效复合车削加工工艺发展趋势。对曲轴主轴颈和法兰高效复合车削加工过程中经常碰到的刀具调整数据测量和读取、刀具崩刃、切屑缠绕和曲轴法兰卡爪印缺陷问题进行解决方案阐述。



## 曲轴加工工艺过程介绍

### 1. 典型曲轴加工工艺过程

曲轴是发动机制造中的核心零件，制造工艺复杂，精度要求高，以沉割槽型轴颈结构的四缸发动机

曲轴为例，其一般加工工艺如图1所示。

如果是过渡圆弧型轴颈结构的曲轴，工艺路线稍有不同，一般会取消沉割槽滚轧和止推档车削和清洗

削。为确保磨削质量，一般会分成粗磨和精磨两道工序来完成轴颈的精加工。

曲轴毛坯材料有两种，一种为锻钢毛坯，另一种为球墨铸铁毛坯。出于材料成本和材料性能考虑，锻钢毛坯曲轴一般用于高功率高转矩的增压发动机，球墨铸铁毛坯一般用于自然吸气发动机。两种曲轴毛坯的加工工艺过程基本相同，铸铁曲轴毛坯只能使用低温回火，锻钢曲轴毛坯可以使用余温回火。

### 2. 曲轴轴颈切削加工类型

曲轴轴颈切削加工方式多种多样，各有优势。从国内曲轴轴颈加工工艺历史分析，其加工类型有外铣、内铣、车削、车拉和车-车拉五种。外铣、内铣、车拉和车-车拉的加工原理见图2~图5。

外铣和内铣切削余量大、加工

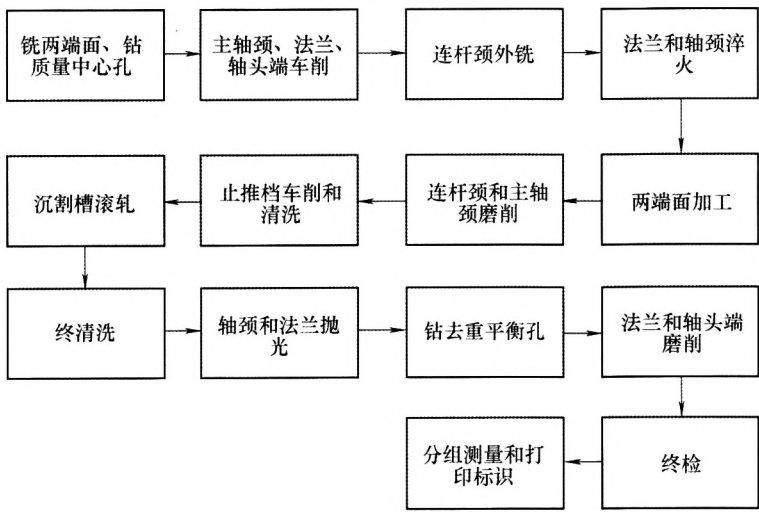


图1 四缸发动机曲轴加工工艺路线

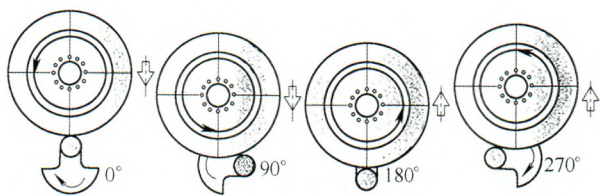


图2 外铣加工原理

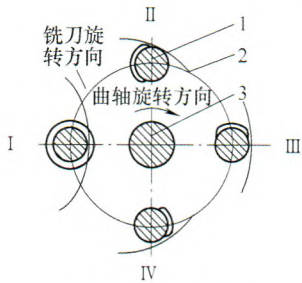


图3 内铣加工原理

1.连杆轴颈 2.铣刀 3.主轴颈

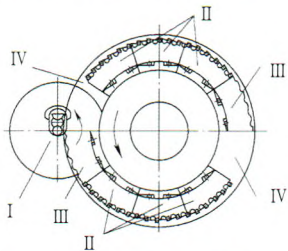


图4 车拉(旋转式)加工原理

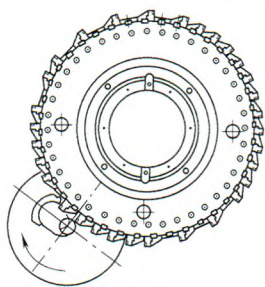


图5 车-车拉加工原理

柔性好、加工效率高，但加工表面质量较差，且内铣和外铣无法加工有轴向位置要求的沉割槽。车拉切削能一次切削完成轴颈、沉割槽的加工，加工精度高。车拉切削也无法加工有轴向位置要求的沉割槽。车拉切削已经淘汰直线刀具，现在一般都采用旋转刀具。车-车拉切削兼具车削和车拉切削的特点，加工精度高，能够同时完成有轴向位置要求的沉割槽加工。

车削、车拉和车-车拉轴颈切削工艺的缺点是加工柔性较差，无法在一台加工设备上完成全部连杆轴颈的加工内容。所以，现在曲轴轴颈加工工艺一般都综合内外铣和车削的切削特点，兼顾加工精度和加工柔性。

### 3. 曲轴加工工艺的发展趋势

30年来，曲轴零件的尺寸精度和加工要求没有很大变化，但每一代发动机曲轴机加工工艺发展还是变化巨大的，总体趋势是高效化、柔性化和高可靠性。

高效化的典型特征就是自动化。曲轴零件从20世纪90年代中期已经实现全自动化的机加工生产。另一个特征是曲轴高效加工工艺的大量应用。常用的高效加工工艺有几何中心孔取代原先的质量中心孔；法兰、主轴颈和轴头端的复合加工工艺取代原先需要三道不同工序加工的工艺方法，该工艺也将是本文详细展开讲述的内容；连杆颈外铣取代原先车-车拉工艺；余温回火取代低温回火（仅适用于钢件曲轴）；轴颈跟踪磨削取代偏心卡盘式磨削。高效化的第三个特征是曲轴加工采用大量的高效切削方式，譬如高速外铣、CBN砂轮磨削和带微量润滑（MQL）的硬质合金刀具高速加工等。

柔性化与高效化是同时进行的。曲轴加工工艺中采用连杆颈外铣和轴颈跟踪磨削工艺后，也就意

味着打通了同一系列曲轴零件的换型生产瓶颈，改变了过去不同升程曲轴零件换型生产时，必须花费较多时间进行偏心卡盘夹具调整的状态。一般单工序的换型时间可以控制在10min以内，为曲轴生产线多品种柔性生产创造了条件。

可靠性提高。一方面大量新型刀具和加工方式的使用，从切削技术的进步方面确保了曲轴机加工可靠性的提高，如CBN砂轮磨削方式，每次砂轮修磨可以加工300~500件曲轴，而原先使用刚玉砂轮磨削，每次砂轮修整仅能加工10件曲轴。每次砂轮修磨可以加工数量的大幅提高极大地保证了零件加工尺寸的一致性，如法兰、主轴颈、轴头复合车削工艺，使得在一台机床上，经过一次定位就能完成主轴颈轴线上的全部加工尺寸，避免了原先在三台设备上加工存在的定位误差对加工尺寸的影响。两端面加工使用加工中心或专机取代原先的通过式多工位加工工艺，既缩减了设备尺寸，也避免了多次定位的误差。同样的发展变化也体现在曲轴斜油孔加工工艺变化上，使用MQL的麻花钻切削取代原先的单刃深孔钻加工工艺。

曲轴车削技术还在向一种高效的高速硬车削工艺发展。其技术发展的思路是使用干式加工工艺达到目前只能通过湿式磨削工艺达到的零件加工精度。

## 曲轴主轴颈及法兰粗加工工艺对比

### 1. 第二代曲轴主轴颈及法兰粗加工工艺

以某发动机厂第二代曲轴主

轴颈和法兰粗加工工艺为例，该工艺将轴头车削、法兰车削和主轴颈车削分别在三道工序上完成。这样工艺安排的好处是工件装夹比较简单，对设备的性能要求较低。缺点也很明显，工艺路线长，增加了多次定位的偏差风险，各道工序的加工工艺简图如图6~8所示。

2.第三代曲轴主轴颈及法兰粗加工工艺

某发动机厂第三代曲轴将主

轴颈和法兰粗加工工艺集成在一台车床上完成，极大地缩短了工艺路线，但对设备的技术性能要求高，加工工艺复杂，在一次加工节拍中轴头和法兰要自动变换一次夹紧位置。一般两顶尖定位后，先由轴头端卡爪夹紧轴头端曲轴的毛坯外圆面，车削法兰端加工尺寸（包括外圆端面和沉割槽），然后转换为法兰端夹紧，完成余下的主轴颈和轴头端车削加工。该工艺缩短了曲轴

法兰、主轴颈的工艺路线，解决了分成三道工序时容易产生的轴向定位偏差风险问题。但在实际生产中，该工艺由于在法兰端夹紧时，容易在法兰外圆表面被缠绕切屑的法兰端卡爪夹出较深的压痕，该压痕一般会超过后道工序的磨削余量，残留到成品曲轴的法兰密封面外圆上。按曲轴法兰密封面外圆的质量标准，不允许有任何表面缺陷，法兰卡爪痕会直接导致工件报废，若终检人员不能目测发现该缺陷（由于粗加工时法兰卡爪印是随机产生的），缺陷曲轴就会流至装配线，该缺陷会导致发动机法兰密封面外漏油，造成用户抱怨。

3.曲轴主轴颈及法兰粗加工工艺发展趋势

曲轴主轴颈及法兰粗加工工艺的发展趋势是高效化和可靠性的同步提升。主轴颈和法兰、轴头的复合式加工，一次工件装夹就能完成全部加工内容，极大地降低了工件装夹次数，降低了自动化流水线上机械手的装卸负荷。在减少工序数的同时，也节约了机械手的规划能力。工艺技术进步总是以设备技术进步为前提的。曲轴主轴颈和法兰复合加工工艺的使用需依靠更可靠和更先进的车削加工机床。在一台机床上完成全部主轴和法兰、轴头的加工尺寸，需要十几种不同的车削刀具，加工刀具一般按组安装在同一个刀盘上，任何一把刀具的安装和调整误差，都会直接影响整个零件的加工质量。如何高效、正确地保证复合车削工艺中复杂刀盘的刀具安装和质量，是工艺规划中亟待解决的问题。

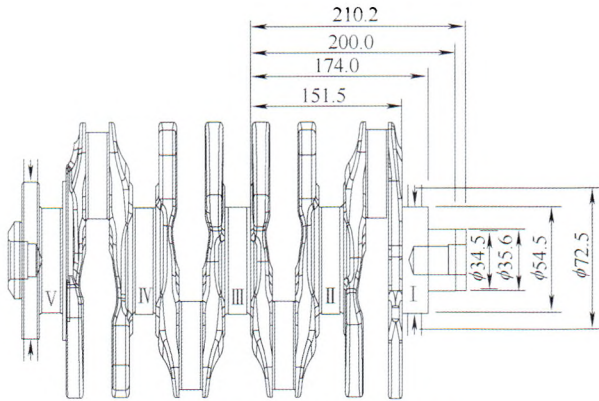


图6 第二代曲轴轴头加工工艺简图

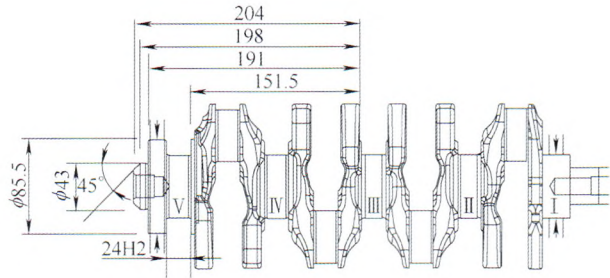


图7 第二代曲轴法兰加工工艺简图

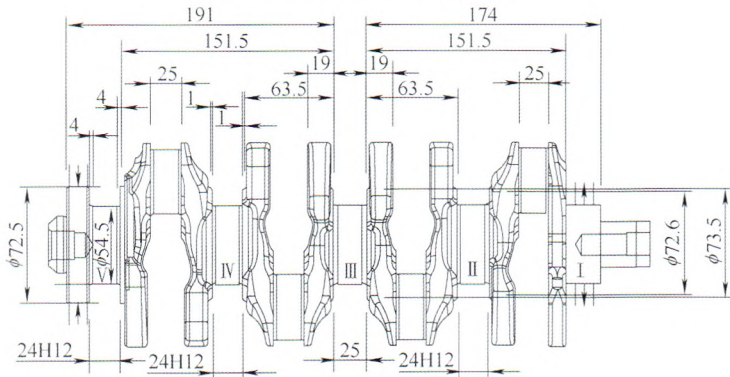


图8 第二代曲轴主轴颈加工工艺简图

## 加工工艺难点及解决方法

### 1. 更换刀盘刀具的尺寸调整数据及高效数据读取技术

完成曲轴主轴颈和法兰、轴头复合车削工艺，需要一个安装着几十把刀具的复杂刀盘，一个刀盘的加工寿命一般可以达到1 000件以上的加工零件数量。比较高的刀具寿命可以减少换刀频次，降低换刀损失时间。对大批量生产来说，每一分钟不必要的损失时间都要考虑。复杂刀盘更换新刀片以后，不允许直接安装到设备上开始加工，每把新刀片必须在设备加工参数表中重新定义实际的刀具位置。

定义复杂刀盘新刀具的实际位置尺寸有两种自动对刀方式，一种是在设备上接触式安装新刀盘后，由机内的对刀测量仪对刀盘上的每个刀具切削刃位置测量，更新每把刀具在切削参数表中的位置数据。一般更换新刀盘仅使用该方式对刀，每次需要20min。另一种使用刀盘芯片数据读取技术，实现快速刀具位置尺寸的读取和更新。使用刀盘芯片数据读取技术的刀盘，有专业人员在更换新刀片并在线下进行新刀盘测量时，同时将测量数据写入刀盘芯片，操作工在设备上更换好刀盘，也能同时完成切削数据表中新刀盘数据的更新，能够最大限度地减少换刀损失。使用刀盘芯片读写技术，需要增加一台线下的刀具芯片写入设备，加工设备也需编写好专门的芯片读取程序并和刀具切削参数表进行很好匹配。

从实际使用情况看，复杂车削刀盘的刀具芯片读取技术，能够高

效地实现换刀作业。它对设备刀具管理程序的设计要求比较高，比较容易容易出现由于内存问题造成的刀盘数据读取错误。图9为采用传统机内对刀仪进行接触式测量对刀的过程，图10~图11表示采用芯片读取技术进行线下刀盘测量和刀具数据写入芯片的过程，图12表示更换刀盘后，加工机床自动读取新刀具刀具刀位位置数据。



图9 使用机内对刀仪进行接触式测量对刀



图10 线下刀盘位置数据测量机和刀具数据存储芯片

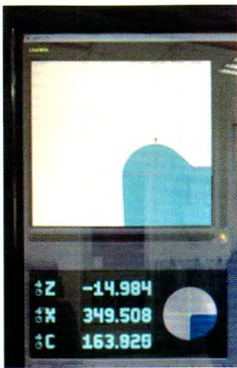


图11 线下刀盘位置数据测量机界面



图12 安装新刀盘并自动读取新刀具数据

### 2. 主轴颈及法兰车削刀具崩刃现象分析及解决办法

曲轴法兰和主轴颈车削加工最容易发生的加工缺陷是刀具异常崩刃。虽然目前的车削加工都有刀具安全监控功能，目的是一旦发生异常损坏，如刀具崩刃或缺失，或刀具磨损严重，设备会自动停止加工，防止发生批量报废。但在实际加工过程中，如果是沉割槽类的微小切削量加工过程，目前的刀具安全监控功能其监控精度无法满足有效监控沟槽刀的微小崩刃后切削力的变化，容易发生由于刀具微小崩刃产生的批量加工缺陷。

从监控措施上无法100%立即发现刀具微小崩刃产生的加工缺陷，为尽可能避免批量缺陷的产生，就要注意过程能力方面主动防止加工过程中的异常崩刃，尤其要关注微小切削余量的刀具。常用的方法有：改善刀具材料和几何结构设计；优化切削余量分配和切削速度；合理制定刀具耐用度计划。

除了沉割槽等小余量刀具切削是容易崩刃且不易发觉外，主轴颈大余量的车刀也容易发生崩刃，当然该类刀具在安全监控功能正常工作的情况下一般能及时发觉并报警。但刀具损失和停机损失却是实实在在要发生的。为了提高加工效率，减少加工时间，曲轴加工采用

高速大切削量的加工方式，实际生产中的任何一类客观条件的变化都会造成刀具异常崩刃。对大余量车刀切削过程来讲，最常碰到的意外情况是曲轴毛坯直径的变化对切削过程的影响。如毛坯分型面打磨不规范，使得车刀在快进过程中就碰到了工件，这时非常容易造成刀具崩刃。常用的解决方法有：控制好毛坯的分型面尺寸，保持毛坯尺寸的一致性；在节拍允许情况下，预留足够多的快进距离；适当缩小刀具安全监控软件的监控窗口，提高监控灵敏度。

### 3. 主轴颈及法兰车削缠绕现象分析及解决办法

主轴颈及法兰车削另一个常见难题是加工过程中的切屑缠绕现象。由于目前该工艺主要采用干式加工，车削过程中的切屑缠绕比使用切削液的车削加工更加突出，常见的车削切屑缠绕有以下三种情况：

(1) 由于断屑不良，工件直接缠绕切屑。这种情况主要是由于刀具设计缺陷造成的，一般可以通过优化刀具设计解决。

(2) 加工过程中切屑缠绕在托架、顶尖、卡爪等夹具表面，造成排屑不畅，严重时，切屑会与工件已加工表面产生摩擦，损坏工件表面。这种情况可以通过两方面措施解决：优化夹具结构，包括夹具周围的监控信号结构，使之不容易聚集切屑，保持排屑通畅；优化冲屑喷嘴结构和位置，在噪声允许条件下尽量增大压缩空气冲屑量，另外吹屑位置也很关键，防止吹屑喷嘴位置走失，以确保吹屑效果。

(3) 轴颈缠绕现象是在后

道磨削工序完成后才会被发现的。它主要产生在带沉割槽的轴颈部位，如一圈或大半圈铁丝挂在轴颈表面。其原因为车削时沉割槽尺寸不合理加上磨削轴颈时宽度出现偏差。解决办法为：匹配好沉割槽车削宽度和磨削宽度的关系，确保磨削宽度能覆盖到完整的沟槽边缘上。

### 4. 曲轴法兰卡爪印缺陷分析及解决办法

在曲轴法兰加工过程中，先由尾端的卡爪夹紧第一档主轴颈毛坯面车削曲轴的法兰端（外圆和端面），再由头架端的卡爪夹紧加工好的法兰外圆车拉五档主轴颈。车削法兰端产生的切屑会溅贴到头架端的卡爪夹紧面上，卡爪在夹紧法兰外圆时，夹在卡爪和法兰外圆之间的金属切屑，在法兰外圆产生0.5~1.5mm深的压痕（见图13），后道精磨工序余量在0.3mm左右，无法去除压痕。

针对法兰卡爪印缺陷的解决办法，目前国内外已有工艺方案主要有3种：

(1) 将法兰端加工和五档主轴颈加工分成先后两道工序。先在

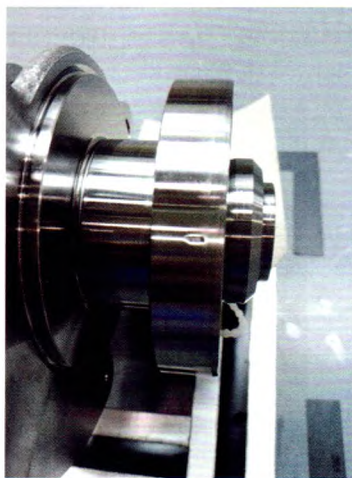


图13 法兰卡爪压痕

一台设备上加工法兰端（外圆和端面），再在另一台设备上加工五档主轴颈。如：德国大众EA113曲轴就是采用这样的加工工艺。

(2) 优化刀具和切削参数，改善切屑形状和尺寸，使之易于排屑。

(3) 使用压缩空气吹屑或使用冷却介质冲屑，比如喷嘴吹屑。

已有工艺方案劣势概括如下：增加工序的方法，需要投入新设备，加工成本大；刀具优化难度较大，无法根本解决法兰外圆卡爪印缺陷的产生，同时影响刀具使用寿命，增加加工成本；压缩空气吹屑和冷却介质冲屑两种方式，存在喷嘴吹屑位置容易走失，噪声较大以及需要定期调整等不足。

在总结EA888曲轴多年加工经验中，上汽大众发动机厂结合生产实际提出了一种高效的解决方案。即通过设计一种简单可靠的轴类零件卡盘卡爪挡屑模块，从根源上杜绝了加工过程中曲轴法兰外圆卡爪印产生，避免卡爪印缺陷件产生。其工作原理：该挡屑模块通过卡盘体的原有紧固螺钉安装固定在卡盘上，挡屑模块的卡爪面与卡盘的卡爪面夹紧贴合。当设备在车削法兰外圆时，挡屑模块能保护卡盘的卡爪面不被切屑污染；当卡盘的卡爪伸出和退回时，挡屑模块能清除卡爪面可能残留的切屑，从而保证零件卡爪印缺陷件产生。解决方案涉及的挡屑模块已申请国家专利（申请号：201620808091.6）。该解决方案实施前，加工法兰时切屑可能飞溅至卡爪处，卡盘旋转时的离心力导致切屑不掉落，如图14所示。实

（下转第63页）

目前国内外主要油嘴制造厂家都采用德国werth或德国Mycrona的喷孔测量设备。图10是Mycrona喷孔测量仪，这是一台高精度的三坐标测量仪加上油嘴体专用夹具，可检测以上几何尺寸要求。

2.性能检测

性能检测主要是对几何尺寸测量结果的间接反映，对于在实际工况下的油嘴性能，具有重要的作

用。性能检测的项目主要有：空间喷射夹角测量、油雾雾化状态测量、油雾贯穿长度测量，采用EFS高速摄影测量仪器检测以上参数；高压流量测量，按照国标要求对喷油器高压喷射流量分别进行10MPa、60MPa压力流量测试，测试油温在压力10MPa条件下要求40℃，在60MPa条件下30℃。

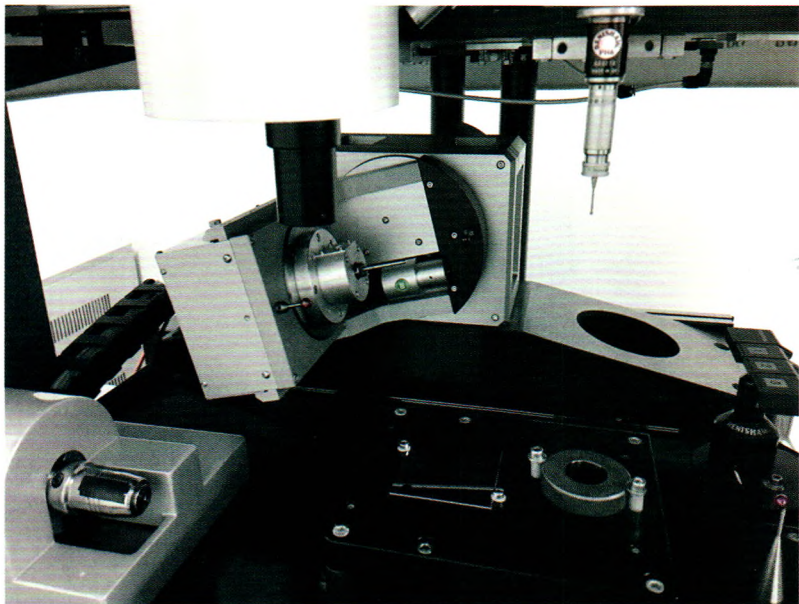


图10 Mycrona 喷孔测量仪

结语

超快（皮秒、飞秒）激光微加工技术作为一种极具潜力的新型材料精细加工手段，目前已经应用于汽车发动机、船舶发动机的喷油器喷孔的加工制造。独特的冷加工、高精度、高效率为柴油机油泵油嘴行业带来了全新的加工思路。通过工艺试验可以看出，超快激光加工喷油器喷孔的精度能够达到产品的要求，大批量生产的关键是要做好喷油器压力室的对壁保护，超快激光对喷孔的新型加工装备的选择提供了指导意义。AUTO1950



张丽敏  
中国第一汽车股份有限公司  
无锡油泵油嘴研究所  
制造技术部

(上接第58页)

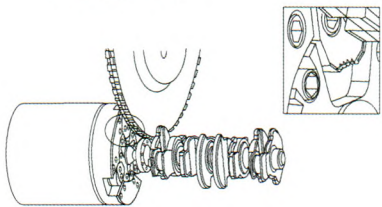


图14 改善前的法兰加工状态

施后，安装法兰卡爪挡屑模块，加工法兰时切屑无法飞溅至卡爪处，卡盘卡爪能正常工作，并在回缩过程中对卡爪有清洁作用，如图15所示。

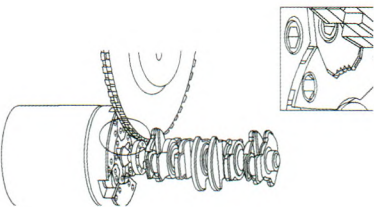


图15 改善后的法兰加工状态

结语

曲轴主轴颈及法兰粗加工工艺按轴头端、法兰端和主轴颈分别加工的工序布置，虽然降低了单台

设备的技术要求，但存在工件定位偏差大、切削效率低和线体布置长的问题。随着切削加工技术和数控车床制造技术的不断发展，曲轴主轴颈及法兰粗加工使用的复合高效车削工艺代表曲轴加工工艺的发展趋势，具有加工效率高、加工工序少、投资成本低和避免重复定位误差的优点，新工艺伴随的质量和设备停机风险可以通过技术手段逐步被克服。AUTO1950