

汽车零部件关键制造技术与装备

□ 机械科学研究院 / 陈长年

汽车零部件关键制造技术与装备包括金属精密切削技术、金属精密锻造技术、金属精密铸造技术。其他还有测试设备、数控刀具系统、激光加工技术等。

金属切削机床生产线

金属切削机床生产线占全部汽车制造装备数量和金额的一半以上，特别是我国，由于精密锻造技术和设备落后，大部分汽车零部件采用切削方式加工。我国制造轿车零部件的金属切削机床生产线金额的约70%~80%依赖进口，但近年随着国际著名机床厂商将生产转移至我国，以及国内机床企业并购国际著名机床厂商，进口比率正在下降。制造载货车零部件的金属切削机床生产线目前还是以国产设备为主。这里分析几种热点金属切削机床及生产线。

1. 第三代少品种大批量制造系统：敏捷柔性自动线(AFTL)

(1) 敏捷柔性自动线(AFTL)及其关键技术。动力总成制造装备可谓第一汽车制造装



陈长年

机械科学研究院“汽车制造技术与装备”资深顾问，研究员，曾任中国汽车工程学会装备部部长、中国机床工具工业协会市场部主任。成果获得过机电部、北京市、广西区科技进步一、二、三等奖。参加过百余个国家重大科技项目策划、评议，申报书编写。

备，是现代汽车零部件集成经典。高精度发动机缸体、缸盖、曲轴、变速器壳体加工敏捷柔性自动线(AFTL) 90%以上依赖进口。从20世纪末至今，据不完全统计，已经有约200条安装或将安装，平均单价约2 000万美元。如，仅柯马公司2008~2010年即提供了20条AFTL。

AFTL的关键技术包括以下几个方面。

生产线数字化设计：要求按照精益、敏捷理念，采用协同仿真技术——使用户能够选择技术，经济优化的方案。采用了这种数字化设计技术后，生产规划流程精简了40%。

具有可重构模块的高速加工中

心(RMT)：作为新一代加工缸体、缸盖生产线的核心技术。其特征是：模块化、高速化、干切削。只有模块化才能实现可重构，只有模块化才能大幅度降低制造和使用成本。

在线检测：为实现大批量高生产率条件下的在线精密检测，要求检测设备的分辨率达1 μm，整个测量形貌的测量周期在数十秒以内，测点达到几百万个以上。目前完全依赖进口。

柔性夹具：柔性夹具设计需要精通零件制造工艺。这是国外企业对我们封锁的核心技术和盈利的诀窍，也是我国机床企业的软肋。最近一汽发动机FTL招标中，德国公司一个工位柔性夹具价格约20万欧元。

元，与卧式加工中心价格相当。

物流系统：被视为“第二类生产”，包括自动上下料、工件传输储运、实时工厂物流系统。将极大提高现代发动机生产的效率和可靠性，为零库存提供可能。先进的工厂物流系统是现代发动机生产实现精益和敏捷的关键。自动上下料最新发展是采用机器人（机械手）技术，以便增加通用性和柔性。

信息系统：自动线CNC控制系统，其复杂程度不是只控制单个机床可比拟的。世界上只有少数几家顶级公司有此能力，我国目前空白。

自动线可靠性技术：需要满足整条自动线工序能力指数 C_{pk} 值 ≥ 1.67 ，平均无故障工作时间MTBF $\geq 3\ 000$ h的要求。

(2) 敏捷柔性自动线的基本技术要求。现代壳体类零件机械加工自动线属于“敏捷柔性自动线”，以便满足现代动力总成壳体类零件生产线“多品种、大批量、高效率、低成本”的需要。敏捷柔性自动线使用的机床类型为“刚柔混合”型——以高速加工中心满足生产线高柔性要求，以数控专机满足高效率要求，并可降低投资成本。刚柔混合程度(深度、中度、轻度)要从采用协同仿真技术的数字设计多方案中选择。

(3) AFTL线集成应用技术：FA技术，又称“无人或熄灯生产”(unmanned or lights-out production)技术；壳体类零件高速切削技术；干切削、MLQ切削技术；壳体类零件精密加工技术；生产线多品种工件混流技术；敏捷物流系统；生产线信息采集、分析、反馈、集成控制技术以及在线检测

系统及集成应用技术。

(4) 敏捷柔性自动线的高速加工工艺及装备。

高速切削工艺：根据日本汽车制造业的历史数据，汽车制造业平均每5年切削效率要提高28%，其中切削速度平均提高19%，进给速度平均提高8%，而最近几年切削效率提高的幅度在30%以上。目前制造发动机主要零件的生产节拍已经缩短到了30~40s，比十几年前缩短了50%。发动机制造企业为提高加工效率，都进行了技术改进。如上海大众汽车通过使用HSK刀柄、涂层硬质合金、金属陶瓷、CBN、PCD刀具，满足高主轴转速、高进给速度、高加/减速的“三高”要求。上海通用汽车通过使用SECO公司的CBN300刀片，进行灰铸铁缸体平面干式铣削，切削速度达到了1 600m/min，刀具寿命提升了4倍。

高速模块式机床：用于铝合金壳体类零件生产线。主轴最高转速一般为15 000~20 000r/min，工进最高速度40~60m/min，快速移动速度高达60~90m/min；加速度达到1.0~1.5g，换刀时间(刀-刀)1.5~3.5s、甚至0.8~0.9s；定位精度/重复定位精度——工作台1m以下， $8\ \mu\text{m}/4\ \mu\text{m}$ (VDI标准)；工作台1m以上， $10\ \mu\text{m}/5\ \mu\text{m}/\text{m}$ (VDI标准)。关键工序的机床工程能力指数/工序能力指数 C_{mk}/C_{pk} 值 $\geq 2.0/1.67$ 。

具有可重构模块的高速加工中心(RMT)，作为新一代加工缸体、缸盖生产线的核心技术。其特征是：模块化、高速化、干切削。目前，这类加工中心的最新发展

是，主运动普遍采用电主轴，进给运动普遍采用直线电动机。普遍运用三坐标模块式和箱中箱结构。同时要求带有断刀检测、机内自动测量、自动补偿系统以及对刀装置等等。

2. 双主轴双刀塔多轴数控车铣中心/柔性制造单元

带有C、Y轴和动力刀头，配备自动上下料装置(含机械手)，并在与物料存储与传送及其自动控制集成的条件下，构成柔性制造单元(FMC)。由于这类设备满足轴类汽车零件“一次装夹完全加工(one on down)”需要，近年已经有数百台至千台投入运行，其中进口约占90%，主要来自日本、韩国及中国台湾等。

特别要指出，现代汽车零部件越来越多采用以车代磨工艺，要求数控车床能够进行强力车削。

3. 各种数控磨床和专用数控磨床

如高效、高精无心磨床，配有自动上下料装置(含机械手)，组成磨削单元。高效、高精曲轴和凸轮轴数控磨床、十字轴专用数控磨床等几乎全部依靠进口。主要来自德国、意大利、瑞士和日本。

4. 模具加工5轴高速床身式/龙门式铣床(加工中心)

这类机床主要特点是速度高、刚性好。其中龙门式加工中心为扩大工艺性能，还具有五面功能，配备有换头机构，以便满足铣、镗、钻工艺对主轴转速不同的要求。全部依靠进口，已经有超过数百台投入运行。主要来自德国、瑞士、日本和意大利。

5. 高效专用机床

机床的高效专用性是汽车制造装备的又一大特征。如，汽车齿轮加工，应用高速滚齿机、高速插齿机、高速磨齿机。英国LANDIS公司生产的曲轴磨床磨削速度高达120m/s，用“扒皮法”一次装夹从毛坯到精磨完毕，耗时仅几分钟。

“高效专用”对机床的基本要求是高刚度、高速度及大功率。一律配备超硬刀具。如上述高速滚齿机、高速插齿机要求配备整体硬质合金或硬质合金涂层滚刀、插齿刀，曲轴磨床配备CBN砂轮。

高效专用机床属于“精益机床 (lean Machine)”——去除冗余功能，具有高效率 and 极强针对性特点。现代高效专用机床的供货方式是“整体解决方案—TOTAL SOLUTION”，其技术附加值及设备利润率很高。由于不同于大量生产的机床，其价格也高得多，就像手工缝制的西服比流水线西服价格高得多一样。但是只要能够缩短用户投资回报周期并盈利，用户就会认为“物有所值”，不会斤斤计较价格。

精密锻造技术

轿车重要零件毛坯一直应用锻件。2009年我国汽车锻件产量368万t，模锻件479万t。随着汽车的大发展，我国汽车锻件产量有可能达到1 700万t，相当世界其他国家汽车锻件产量的总和。但从质量上看，我国的汽车锻件水平与世界锻造大国德国和日本还有着相当的差距，与法国、意大利、韩国和我国的台湾地区也不在一个层次上。

精密锻造接近净成形加工，

包括模锻、热精锻、冷精锻（冷挤压）、粉末冶金烧结锻造设备、内高压成形设备等。

(1) 热精锻。德国BLM公司热精锻齿轮精度已达DIN6级，节约材料20%~30%，力学性能提高15%~30%。

(2) 冷精锻（冷挤压）。美国每年生产冷挤压件100万件以上，80%为汽车零件。NATIONAL公司是全球多工位冷精锻机（又称为成形中心）研发中心。丰田1.8L排气量轿车中已有43kg冷挤压件，还有35kg冷挤压标准件。

(3) 温精锻。温锻技术应用范围广泛，汽车锻件热、温、冷锻件的重量结构比约为90:5:5。我国近年精密温热锻件总产量不足10万t，与德国、日本等国家60:20:20的发展水平差距明显，许多在中国设厂的外资企业的高附加值关键零部件进口。在未来5年左右，国内需要温锻压力机约50余台套，我国目前还不掌握温锻压力机设计制造技术，完全依赖进口。

(4) 粉末冶金烧结锻造技术。国外粉末冶金烧结锻造技术有较大发展，粉末锻造连杆重量精度可达1%，而锻造连杆重量精度2.5%，与常规机加工连杆相比，达到经济批量后，可节约加工费35%。福特公司1992年粉末锻造连杆已达1 000万件。

(5) 内高压成形技术。内高压成形件质量轻、强度高、零件数量少、焊缝少，是制造空心轻体构件的高新技术，在欧美发展很快。

(6) 旋压成形技术。旋压成形具有加工精度高、可生产变截面等强度车轮轮辋和轮辐等优点。

铸造技术发展趋势

自2000年以来，中国铸件年总产量已连续13年居世界第一位，2012年铸件年总产量4225万t，占世界总产量的40%以上。近年来，无论是在铸件的产量、高端铸件的品种、铸件的质量，还是在生产工艺技术、装备水平和资源化再利用等方面都有了极大的进步与提高，进一步缩小了与工业发达国家的差距。但我国铸造业与发达国家铸造业相比仍有较大的差距，我国铸造业平均劳动生产率仍是国外的1/4~1/3。

(1) 铸铁熔炼技术的发展趋势。大型热风除尘冲天炉+工频保温炉双联熔炼方式仍为主流；电炉熔炼技术开始越来越受到重视，技术也日益成熟，其清洁、环保的优势突出，是今后的发展方向。

(2) 铸铁材质的发展趋势。灰铸铁：随着大马力柴油机的发展，灰铸铁的牌号在不断提高，HT300已应用于缸体、缸盖的生产，个别产品甚至要求达到HT350。

蠕墨铸铁：用蠕墨铸铁生产高强度的缸体、缸盖有市场、有潜力。蠕墨铸铁强度高、壁薄、减轻重量。耐热疲劳性优良的蠕墨铸铁生产大马力柴油机缸盖，能有效解决缸盖的热疲劳裂纹问题。

球墨铸铁：保安类铸件。此类件对材质要求严格，零铸造缺陷，100%无损检测，如轿车转向节。耐热球铁件采用高硅钼、高镍球铁。主要生产排气管，有非常好的抗高温性能。奥贝球铁以其优异的性能引起人们关注，用于生产高强度曲

轴等。

(3) 造型和制芯技术发展趋势。造型线以静压造型为主；制芯技术以冷芯技术为主；造型线和制芯技术以引进国外技术为主。

(4) 计算机应用技术的发展趋势。计算机仿真模拟、三维建模以及数控技术的应用越来越广泛、实用。

(5) 清洁生产、废物再生是发展的趋势。废砂再生技术可以使废砂重复使用，减少废弃物的排放；无毒粘结剂的开发使用可以减少有害气体的排放。

(6) 先进铝合金铸造技术。铝合金真空压力铸造、半固态挤压铸造、Cosworth铸造，是国际上新出现的先进铸造技术。

真空压力铸造与普通压铸相比，增加了抽真空操作，可将型腔中的气体抽出，金属液在真空状态下充填型腔，减少了卷入的气体，铸件可进行热处理，力学性能高于普通压铸件。美国蓝石超高真空薄壁铸造技术全球领先。铸件精度高，壁厚2~4mm，重量3~12kg，气孔含量很少，具有高强、高延展、可热处理、可焊接及可铆接等特点。

半固态挤压铸造不仅可实现液态金属挤压成型，而且还可实现处于半固态的金属浆料挤压成型，此浆料具有较好的流动性以及“球状”显微组织，可成形较为复杂的铸件，而且铸件具有优良的力学性能以及较高的近净成形程度。

Cosworth铸造由英国Cosworth公司于20世纪70年代末发明，是一种精确锆英树脂自硬砂的组芯造型，在可控气氛压力下充型的铸造

工艺。适于大尺寸薄壁复杂结构缸体铸件，如，大马力高档发动机（排量4.0L以上、v8、v12等）。强度可提高30%左右，铸件的重量减轻约10%~15%。

笔者2014年7月考察英国Cosworth公司时发现了采用这种先进铸造技术的高端发动机的突出实例。如，世界上第一台时速达到241km/h的赛车发动机；功率达到2206kW的V8发动机；小排量高功率发动机的世界冠军——1.6L双增压发动机，功率达到368kW。

焊接技术

我国焊接行业总产值已超过600亿元，已成为世界上的焊接大国，但还未成为焊接强国。焊接行业当前正面临产品结构调整和产业转型升级的关键时期，焊接自动化比例逐年提高，2014年我国有望成为世界上工业机器人应用的第一大国，焊接材料的生产和消耗也已超过了世界总量的50%，焊接技术在中国具有广阔的发展空间。但一些重大项目和重大装备应用的焊接技术，无论是焊接设备，还是焊接材料，与工业发达国家相比都有很大的差距，严重制约着重大装备的创新和发展，高端焊接技术过多地依赖进口，严重危及国家经济安全。

总的来看，我国30年来的焊接技术取得了巨大进步，但与工业先进国家相比，仍有一定差距，其发展面临着一些不容忽视的问题。

在焊接自动化方面，日本和欧美等国手工焊条产量只占20%以下，焊接机械化自动化率达80%以上，而国内手工焊用焊条占50%，自动化率为50%。在我国制造业

中，以焊接为主要工艺技术的企业约有7000家，其中特大型、大型和中型企业约占1/3，它们的焊接机械化/自动化情况明显要好于众多的小型企业，但是大部分的自动化焊接设备依靠进口。

在焊接设备方面，近30年来国外电焊机技术水平随着电力、电子元器件和计算机技术的发展迅速提高，从原先的旋转式直流焊机发展到二极管整流焊机、晶闸管（可控硅）整流焊机、晶体管整流焊机、逆变式焊机，一直到现在的全数字化逆变式焊机。

当前引领我国电焊机产业的是两家合资企业，产品主要是外国母公司的品牌，占有我国电焊机市场的近半壁江山。具有我国自主知识产权的电焊机主要是晶闸管整流焊机和简单功能的逆变焊机。目前我国骨干装备制造企业使用的高档焊机，如STT焊机、CMT全数字化逆变式焊机、双丝脉冲气体保护焊机等基本上依靠进口。这些先进的焊机附加值极高，一台全数字化逆变焊机价格高达12~15万元，而一般同等功率的普通硅整流焊机价格仅为2~4万元。我国每年进口焊接电源和设备的费用约占全国市场的20%，而国内生产的焊接电源产值中有近一半是合资企业的。我国焊接设备与国外相比，还存在着以下的不足：

(1) 焊机控制数字化。全数字化控制的焊机，已经成为进口焊机的主流。全数字化控制技术大大提高焊机的控制精度、焊机产品的一致性和可靠性，同时也大大简化了控制技术的升级。而国内的焊接电源，仍然以模拟控制技术为主，

虽然部分厂家也推出了全数字化的焊接电源，但是大都处于简单代替模拟控制的水平，全数字控制的作用还没有发挥出来，导致市场的认可度不高。

(2) 工艺控制智能化。国外进口焊接电源大都以免费或选配的方式提供了焊接专家系统，允许操作者输入焊接材料、厚度、坡口形式等焊接工艺条件就可自动生成焊接工艺。而国内焊接电源厂家在焊接工艺的研究和积累工作还十分有限，难以提供成熟可靠的焊接工艺支持，导致国内产品除价格外与进口产品不存在竞争优势，大部分高端市场份额仍然被进口焊机占据。

(3) 系统集成网络化。国外焊接设备大都提供了现场总线接口，而且可控参数丰富，焊接工艺控制更加方便，国外自动化焊接系统的集成水平显著提高。而国内的自动化焊接系统普遍处于继电器开关量编组控制的水平，各个自动化焊接部件信息量的传递十分有限，难以实现复杂的焊接工艺协调控制。

(4) 自动化。机器人焊接装备技术在欧美、日本等技术发达国家，自动化、机器人焊接设备的应用非常普遍，特别是在批量化、大规模和有害作业环境中使用率更高，已形成了成熟的技术、设备和与之配套并不断升级的焊接工艺。在我国，汽车、石化、电力、钢构等行业焊接生产现场使用的自动化和机器人焊接设备，少部分为国内焊接装备企业开发的自主知识产权设备，一部分由国内或合资、独资企业提供的、关键部件采用国外技术的组装和成套产品，更多的则是成套进口设备。

(5) 在焊接智能化和新型焊接技术方面，随着我国焊接自动化率有所提高，应用面不断扩大，焊接变位机的用量不断增加，但焊接智能化控制技术及焊接专家系统的应用很少；我国在激光焊接与切割加工技术与装备开发与生产、焊接机器人工作站开发与生产、数字化焊接技术与装备的开发与生产、新型摩擦焊接技术装备的开发与生产等领域，还没有规模化、产业化基地，主要依靠进口。

(6) 在焊接材料方面，世界上焊接材料的先进技术主要集中在美国、日本、欧洲等工业发达国家和地区。这些国家和地区的焊接材料技术发展现状主要体现在三个方面：一是焊接材料制造水平高；二是焊接材料总量中自动化焊接材料的比例高；三是研发创新能力强，重大技术装备所需的优质焊接材料可以自主研发配套。我国焊接材料行业与先进工业国家相比还有不小的差距，焊接材料生产装备和制造工艺水平不高，焊剂生产企业自动化水平低，适用于自动化焊接的焊接材料比例还需进一步提高等。

综上所述，焊接已经成为制造业中的关键加工手段，近年来已经完成了许多关系国计民生与国防建设的重大战略性产品与重大装备的生产制造，我国已经毫无悬念地成为世界最大的焊接大国。

但是我国焊接生产中应用的自动化焊接设备严重依赖外国进口，具有自主知识产权的关键技术与产品不多，而且总体研发与产业化水平较低，与焊接大国的形象还有相当大的差距，焊接机械化与自动化率仅为50%，同发达工业国家的

80%差距较大。在国家重大工程中的重、大、厚、长焊接结构中采用了不少自动化焊接技术，但许多焊接设备，特别是成套焊接设备仍然依靠进口，这些问题急需解决。

制造技术和装备本地化是历史使命

汽车制造装备的本地化是我国汽车产业和机床产业共同的历史使命。20世纪90年代，我国汽车工业重点转入轿车，国内机床工业很不适应。轿车装备国产化率长期来只有20%，但是仍然有一些亮点：汽车冲压生产线、数控齿轮加工机床等自主开发产品都占有较高的份额。大连和沈阳等机床集团近年来为汽车企业提供由高速加工中心组成的柔性生产线，目前已有几千台国产数控机床在汽车企业中的应用。

中国实现汽车强国梦想，不可能建筑在装备长期依赖进口的沙滩上。一方面，对汽车企业而言，激烈的市场竞争要求不断降低制造成本，统计资料表明，汽车装备进口率每提高1%，装备总投资增加2%~3%。可以说，装备本地化是企业生存竞争的需要；另一方面，随着我国汽车工业开始进入微利阶段，企业将无力长期支付进口设备的高额外汇。

因此，汽车及零部件企业应结合我国实际，不盲目追求使用进口的高速高性能装备，应该在充分考虑到产品生命周期、科学预测产品更新期前提下，结合企业投资能力和回收周期，因工件而异地选择不同类型的生产线等制造装备。

AME