陶瓷刀具在发动机领域的高效铣削应用

丁胜明，周俊

一汽解放发动机事业部　江苏无锡　214000

摘要：对重型柴油机缸体、缸盖粗铣，行业内普遍采用硬质合金可转位刀片加工工艺，由于金属去除量大、毛坯表面硬皮等原因，加工过程中普遍存在刀片崩刃、换刀频繁、效率无法提升等问题。通过试验超硬材料陶瓷刀片，利用其高硬度、耐高温和抗磨损特性，实现缸盖顶底面的高速高效加工，效率和寿命实现大幅提升。

关键词：超硬刀具；陶瓷；高耐磨性；磨损；效率

近年来，重型柴油机市场形势大好，一汽解放发动机事业部自主研发的奥威发动机更是一机难求，其缸体、缸盖生产线实行极限模式仍难以满足装机需求。此外，为响应国家“碳达峰”和“碳中和”的战略调整，企业急需在“减碳”“低碳”方面探索新措施、新技术，寻求增产提效新措施。

控制技术（Thermo-Friendly）、几何误差测量补偿技术（5-Axis Auto Tuning System）、伺服导航技术（Servonavi）、防碰撞技术（Collision Avoidance System）以及加工参数优化技术（Machining Navi）等功能。其中规则热变形控制技术、几何误差测量补偿技术及伺服导航技术三项功能主要用来提高和保持机床的精度；防碰撞技术用以保障机床设备的安全；加工参数优化技术用以优化切削参数，提高机床的加工效率。

雄克

雄克公司的EGI智能机械手，行程可自由编程，适用于抓取多种工件，抓取力可调，可精密抓取对力敏感的工件。控制和电子元件全部集成在机械手内部，无需外部控制器，具有智能、可靠、高灵活性的特点。

雄克iTENDO2智能刀柄，配有传感器、蓄电池和传输单元，能够监测刀具的振动，实时将数据发送给监控系统，在切削刃或刀具状态发生变化时，借助闭环反馈控制实时做出反应，从而避免工件或刀具受损。iTENDO2智能刀柄规格为HSK-A 63，可与雄克标准刀柄互换，操作便捷，无需花费时间重新进行系统编程。iTENDO2最高转速可达30 000r/min。

在不增加机床设备硬件投入的前提下，通过刀具优化升级，提升切削参数和缩短换刀时间，是最直接有效的增产途径。在此背景下，刀具工程师通过超硬刀片替代硬质合金刀片，利用超硬材料高速切削和耐磨性好的特性，提升切削效率，缩短单件加工时间，同时大幅提高单刃寿命，减少换刀停机。缸盖顶面、底面粗铣作为缸盖线的上线工序，其加工效率直接影响整线出产能力，因此本文选择该粗铣刀作为研究应用的典型案例。

现有加工设备和参数

1）加工设备：德国卧式铣削专机。

2）刀盘：德国ϕ500mm密齿刀盘。

3）刀片：德国SCGW09T308，材料为硬质合金。

4）最大转速：224r/min。

5）最大负载功率：85kW。

6）切削参数见表1。

加工零件如图1所示。

表1　现用切削参数

加工内容	加工余量/mm	铣削长度/mm	转速/（r/min）	线速度/（m/min）	进给速度/（mm/min）	切削时间/s
缸盖顶底面	3～4	2230	150	188	1850	72.3

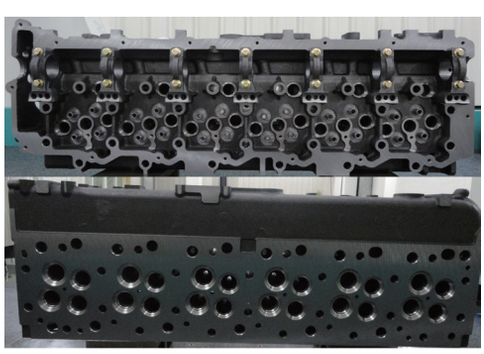


图1　加工零件部位

现状分析

1.国产毛坯材质不稳定

缸盖铸件毛坯由国内供应商提供，由于铸造工艺难度大和原材料问题，毛坯表面会有硬度极高且不规则披缝硬皮，现有硬质合金刀片耐磨性和强度不够，生产过程经常出现刀片崩刃问题（见图 2 ）。

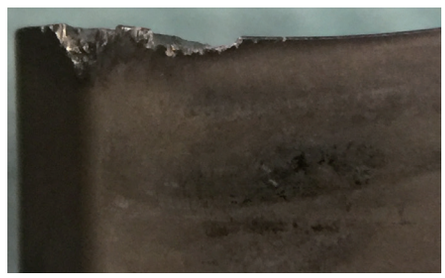


图2　刀片刃口崩刃

2.硬质合金刀片已无提升空间

缸盖毛坯尺寸为1069mm × 354mm × 185mm，体积较大，金属去除量大，刀片单刃设定寿命150件。从换下的刀片看，后刀面磨损普遍比较严重（见图 3 ），磨损宽度超过0.5mm，分析认为设定寿命已达刀片磨损极限，无进一步提升空间。

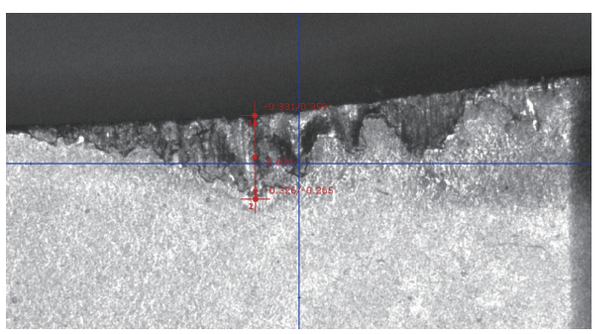


图3　硬质合金刀片后刀面磨损情况

该刀具原方案是采用某进口品牌硬质合金涂层刀片，材质为近年新开发的WKP25S和复合TiAlN涂层。之后曾试验过某进口品牌新升级WKP25G刀片及多家国产或进口品牌刀片，但寿命和效率均未超过现有刀片。目前，刀具线速度高达188m/min，每齿进给量0.27mm，已经达到硬质合金铣刀最大极限，该材质刀片已无效率和寿命提升空间。

超硬材料选择

1.选择研究对象

为了进一步提升刀具寿命，提高加工效率，满足高速加工要求，需研究应用硬度更高、耐磨性更好的刀具材料。因此，根据切削材料比较图（见图 4 ），选择了硬度高于硬质合金的金刚石（PCD）、立方氮化硼（CBN）、陶瓷这三种超硬材料作为项目研究对象。

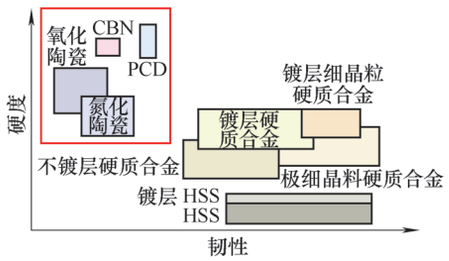


图4　切削材料比较

2.对比确认刀具材料

（1） PCD材质（金刚石）特性　目前已知的最硬物质，其硬度接近10 000HV；不适合加工铁族材料，它会由于铁和碳原子的亲和性产生的黏附作用而损坏；适合连续加工。

（2） CBN（立方氮化硼）材质特性　具有很高的硬度及耐磨性，硬度高达8000～9000HV；具有良好的热稳定性和化学稳定性，可耐1300～1500℃的高温，并且与铁族元素有很大的化学惰性；适合连续加工。

（3）陶瓷材质特性　具有高硬度、高耐磨性、优良的化学稳定性和低摩擦系数；高温下，仍能保持较高的硬度，适合高速切削；具有高的韧性、抗热振性及抗冲击能力，一般可用于粗加工铸铁，甚至带有断续切削和变化的切削余量。

通过对上述三种材料的对比研究发现，三种超硬材料均有很高的硬度及热稳定性，能满足高速加工要求。但PCD材质不适合加工铁族元素，无法满足铸铁加工。CBN材质较脆，而铸件表面存在较多的飞边凸起会冲击刀片，引起刀片崩刃，无法适应粗加工要求。因此综合比较后，选择了兼顾硬度及韧性的陶瓷材料作为攻关对象。

陶瓷刀具开发及试验过程

1.刀盘关键尺寸及几何角度设计

（1）关键尺寸设计　根据工艺尺寸要求及刀具连接盘尺寸，确认刀具有效直径及安装连接部位尺寸。

（2）主偏角设计　主偏角主要影响被吃刀量及径向切削力。主偏角越大，被吃刀量越大，径向力也越大。铣刀常用主偏角有90°、75°、60°及45°，09刀片对应的被吃刀量分别为9mm、8.69mm、7.79mm及6.36mm，而缸盖顶面、底面工序切削余量均为3～4mm，因此4种角度均能满足要求。以90°及45°主偏角为例（见图5），根据受力分析可见，90°主偏角径向力远大于轴向力，而45°主偏角径向力等于轴向力。粗铣加工常见失效模式为工件爆口，要求径向力尽可能小，因此在切削深度满足要求的前提下，采用45°主偏角设计（见图6）。

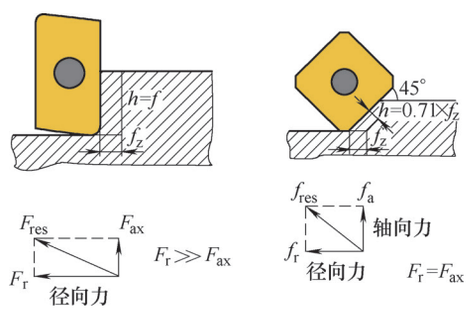


图5　90°及45°主偏角受力分析

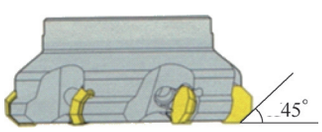


图6　陶瓷刀具主偏角设计

（3）刀片后角设计　后角主要影响工件表面粗糙度及刀片经济性。刀片后角常用角度为11°及0°，11°后角加工表面粗糙度较好，但只能单面使用，经济性较差，而0°后角加工表面粗糙度略差，但可双面使用，经济性好。结合实际加工为粗加工，同时考虑刀具成本，采用0°后角设计。

（4）刀片前角设计　前角主要影响切削刃强度及锋利程度。行业内考虑陶瓷刀片制造难度及切削刃强度，均采用不带槽型的0°前角设计，因此本次也采用0°刀片前角。

（5）刀盘轴向、径向前角设计　轴向、径向前角将影响切削力大小及切削刃抗冲击性能。由于刀片后角采用0°设计，因此轴向、径向前角相应采用双负前角设计。常用双负前角为－3°～－5°，通过寻求国内知名刀具商技术支持，采用模拟试验的方法，项目最终确定轴向、径向前角均为－4°设计（见图7）。

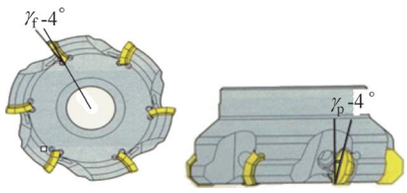


图7　刀盘轴向、径向前角设计

2.试验过程

与国内知名刀具供应商联合完成陶瓷刀具制造后，随即组织了刀具试验，刀具实物如图8所示。采用了4组切削参数（参数1为原参数）进行对比试验，具体试验方案见表2。

表2 切削参数对比试验方案

序号	转速/（r/min）	线速度/（m/min）	进给速度/mm/min	每齿进给/（m/min）	切削时间/s
参数1	150	188	1850	0.27	72.3
参数2	180	226	2200	0.27	60.8
参数3	200	251	2500	0.27	53.5
参数4	220	276	2750	0.27	48.7

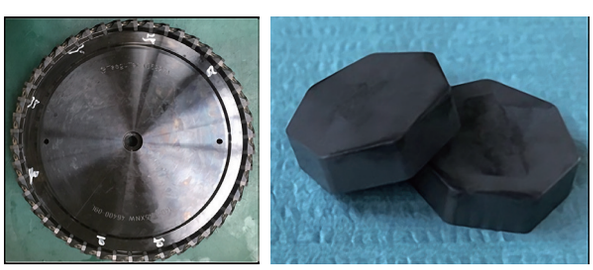


图8　陶瓷刀具

刀具设定寿命按照推荐的400件进行，参数1～3均进行了5轮试验，参数4由于前两轮试验均出现刀片崩刃问题而停止试验，具体试验结果见表3。

表3 切削参数对比试验结果

序号	参数1/件	参数2/件	参数3/件	参数4/件
1	400	400	400	327
2	400	396	400	304
3	400	400	400	–
4	400	400	400	–
5	400	400	400	–
平均寿命/件	400	399	400	316
换刀原因	寿命到	寿命到	寿命到	刀片崩刃
后刀面磨损/mm	0.27	0.28	0.28	–

由表3可见，采用参数1、参数2、参数3试验时加工情况正常，基本均可达到设定寿命400件，刀片磨损情况如图9所示，后刀面磨损达到0.27～0.28mm，接近陶瓷刀片0.3mm的磨损极限标准，故不再继续进行提升寿命试验。采用参数4试验时出现了刀片崩刃现象（见图10），刀具中途异常下机。故为追求高效生产，该工序陶瓷刀具加工采用参数3最为合理。



图9　参数3试验中刀片磨损情况



图10　参数4试验中刀片崩刃

陶瓷刀具试验完成后，进行了20轮刀具小批验证，加工情况稳定，未出现刀片崩刃、功率报警等现象。

结语

通过对超硬材料特性进行研究分析，自主开发陶瓷刀具以及实际上机床进行刀具试验，摸索出HT250材料使用陶瓷刀具的最优切削参数。利用陶瓷材料热稳定性和耐磨性好的特性，实现高速高效加工，大幅提升刀具寿命，减少换刀等辅助时间。

（1）寿命提升　实际刀具寿命由150件提升至400件，提升167%。

（2）效率提升　进给速度由1850mm/min提升至2500mm/min；加工时间由72.3s降至53.5s，降幅约26%。

（3）停机减少　换刀次数由每日更换2～3次减少至每日更换1次，换刀停机时间由75min降至30min，降幅60%。

在该粗铣刀试验成功后，继续推广至加工发动机缸体顶面、底面、冷却器安装面等工序应用，在铸铁加工中成功批量应用陶瓷超硬刀具，为生产效率和产能提升找到了一条新途径。AUTO1950