

第四届高效加工技术研讨会

高性能加工—高速高效、 可测可控和可持续

High Performance Cutting--High speed, high efficiency, measurable, controllable and sustainable

何宁 教授

南京航空航天大学



南京航空航天大学

NANJING UNIVERSITY OF AERONAUTICS AND ASTRONAUTICS

无锡. 2013年3月29日

主要内容

- ① 高性能加工技术概述
- ② 高速加工技术
- ③ 高效加工技术
- ④ 可测可控加工
- ⑤ 可持续加工
- ⑥ 结束语

一、高性能加工技术概述

高性能加工技术概述



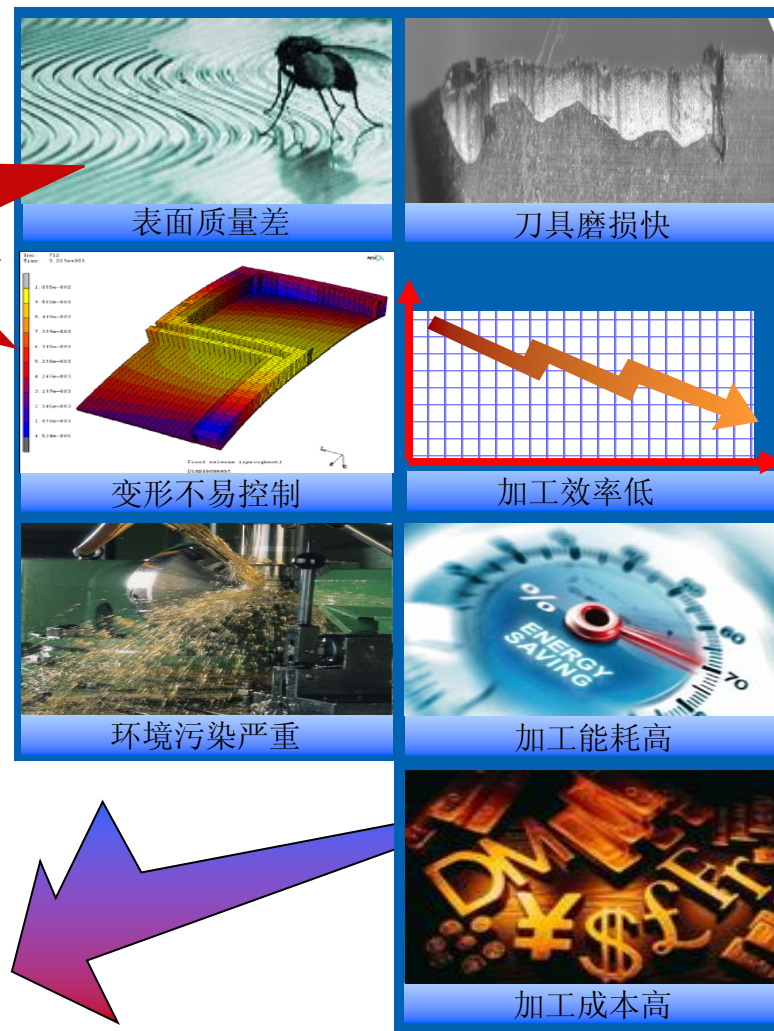
制造业面临的挑战与需求:

- 复杂结构带来的诸多加工难题: 薄壁、深型腔、深孔、异型曲面...
- 先进材料带来的诸多加工难题: 硬度高/强度高/高黏塑性/低热导率/硬质相/低延展性或脆性/高化学活性...
- 能耗与环境问题...

难加工

高性能
加工技术

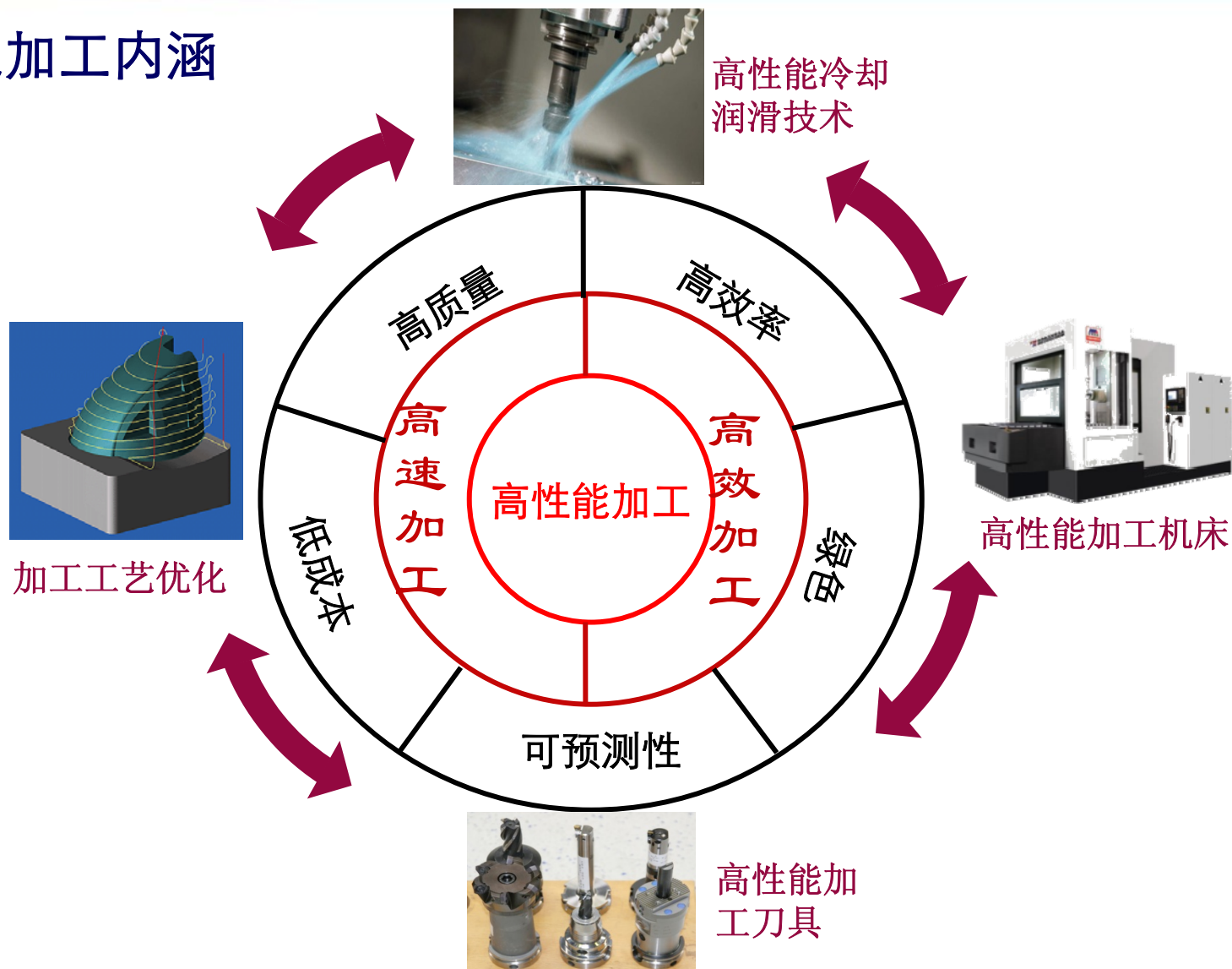
- ◆ 更高的切削效率
- ◆ 更高的加工质量
- ◆ 环境更加友好
- ◆ 更低的加工成本
- ◆ 加工过程可控



高性能加工技术概述



高性能加工内涵



□ 高性能加工技术概述



■ 高性能加工基本概念

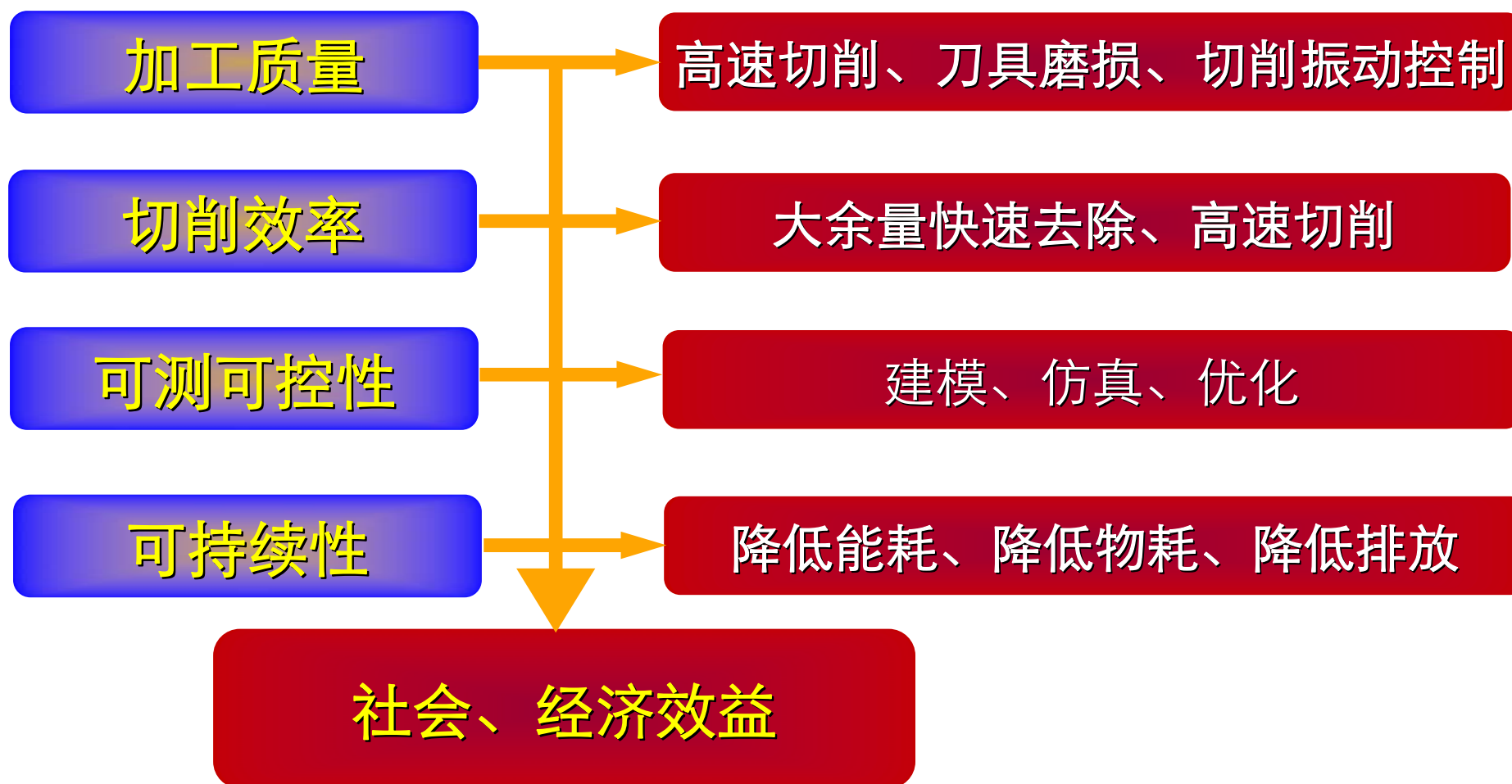
高性能切削技术 / High Performance Cutting, HPC

- 根据加工对象，以最高的加工效率、最高的经济效益、满意的加工质量，获得高性能零件与高性能加工过程的切削技术。
- 高性能切削技术的主要特征：
 - (1) 粗加工阶段以高效切削为主要特性，快速去除大量余量；
 - (2) 精加工阶段以高质量为主要特性，满足零件的使用性能要求，通常采用高速切削获得高得加工质量，同时，单位时间面积去除率最高；
 - (3) 绿色可持续特性，降低能耗，减少废弃物和污染物排放；
 - (4) 可测可控性，对加工过程、加工结果可以预测，可以控制，进而可以综合优化。

□ 高性能加工技术概述



■ 高性能加工应用中的主要问题



二、高速加工技术

高速加工最主要的特色

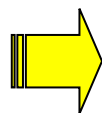
二十一世纪，以高速切削为代表的高性能切削技术已成为切削加工的发展趋势，引起了革命性的变化，如：

- 薄壁件加工
- 硬切削
- 绿色切削
- 难加工材料高效切削

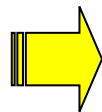
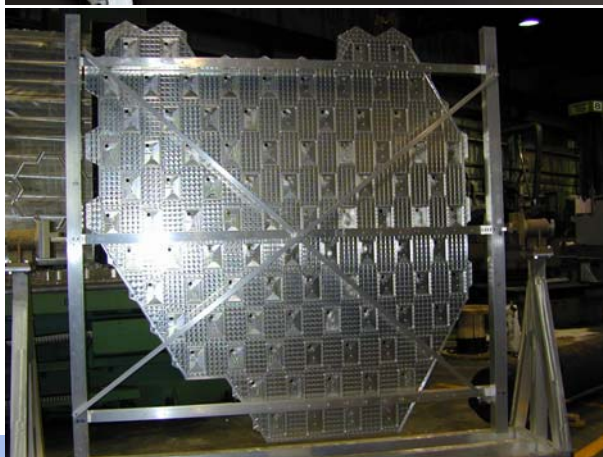
□ 高速加工技术

■ 航空航天薄壁结构件的主要特点:

- 薄壁框、薄壁腹板，局部刚性差
- 材料去除率高>95%



侧壁厚**0.305mm**
底板厚**0.381mm**
毛坯重量**2000 kg**
成品重量**22.7 kg**

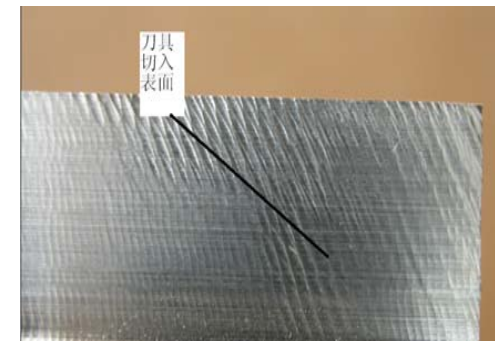
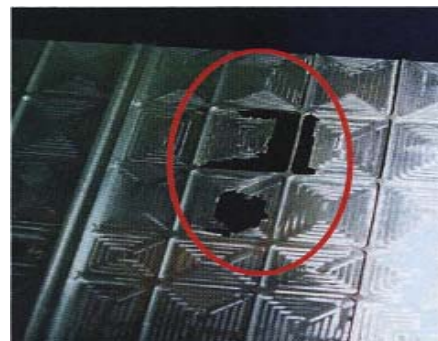
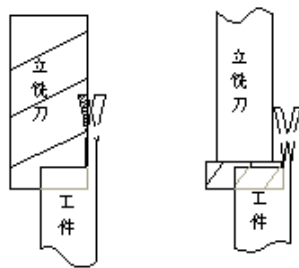


侧壁厚 **0.330mm**
底板厚 **0.381mm**
毛坯重量**1818 kg**
成品重量**14.5 kg**

□ 高速加工技术

■ 薄壁结构件铣削加工的主要问题

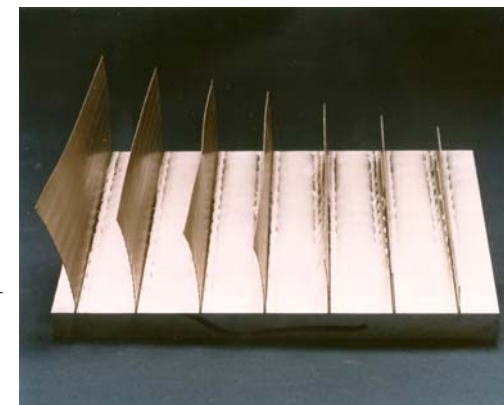
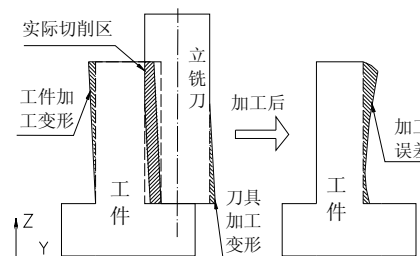
□ 铣削振动导致加工效率低下



□ 结构局部变形

- 薄壁零件的结构复杂、尺寸较大、加工余量大、相对刚度较低，加工工艺性差，不易控制加工精度和提高加工效率，加工变形问题是薄壁件加工的主要技术难题。

- 切削力导致薄壁类零件变形



□ 高速加工技术



■ 高速切削技术优势

解决了薄壁零件表层
残余应力变形问题

解决了薄壁零件刚度
与切削力之间的矛盾

提高加工质量

- ◆ 更高的表面质量
- ◆ 可实现低变形（翘曲）加工
- ◆ 可实现无振稳定加工
- ◆ 更低的切削力

薄壁零件无振
切削，避免刀
具二次切削

减少加工时间

- ◆ 更高的切削速度
- ◆ 更高的进给率
- ◆ 较大的材料去除率
- ◆ 更低的空运转耗时

降低加工成本

- ◆ 缩短单件的生产时间
- ◆ 缩短单件的机床工作时间
- ◆ 进一步发挥刀具的性能
- ◆ 可实现干切削或准干式切削

薄壁件加工 变形控制 关键技术

动、静态铣削力模型

- 空间力分布状态
- 加工变形影响
- 加工条件影响

薄壁件的加工变形 分析技术

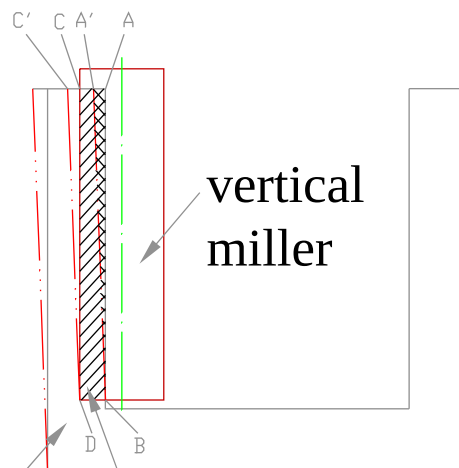
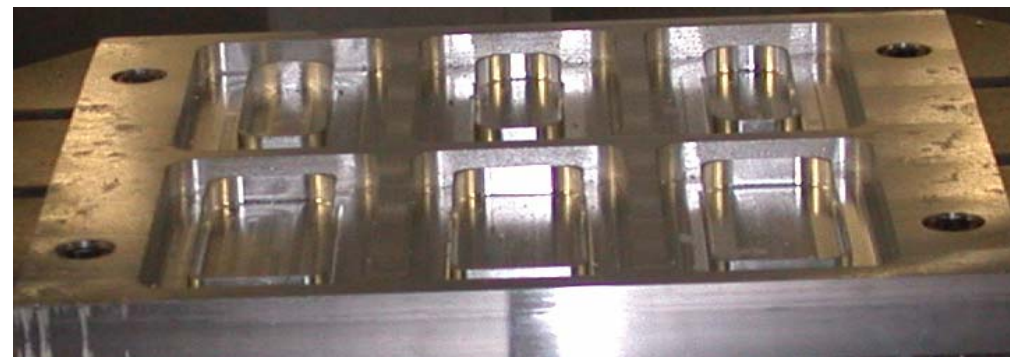
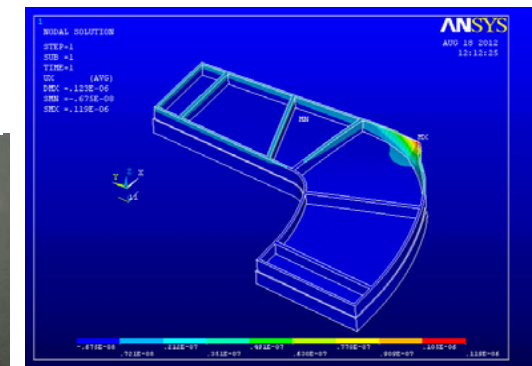
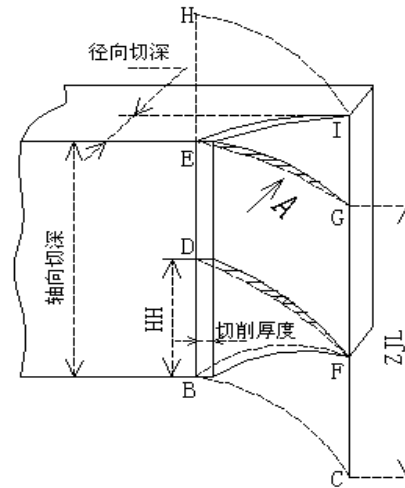
- 切削力加载
- 加工过程模拟
- 参数化建模
- 工件与刀具变形耦合

薄壁件的高速铣削 加工变形控制工艺

- 机床
- 刀具
- 装夹方式
- 切削参数、
- 切削方式
- 走刀路径的选择

薄壁件加工技术

利用铣削力模型、加工变形模型，分析加工变形形式与大小，充分利用毛坯残余刚度，采用高速铣削技术，解决薄壁零件切削加工受力变形问题。



Thin-walled workpiece materials to be cut away

三、高效加工技术

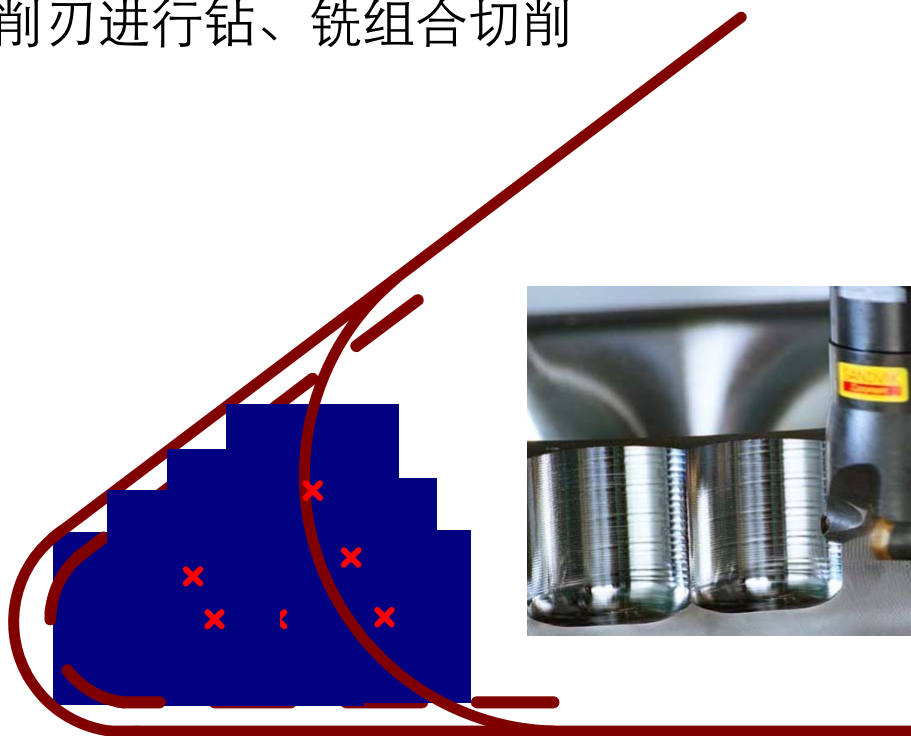
□ 高效加工技术



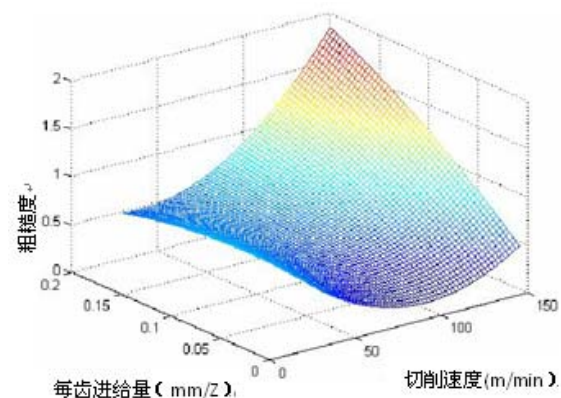
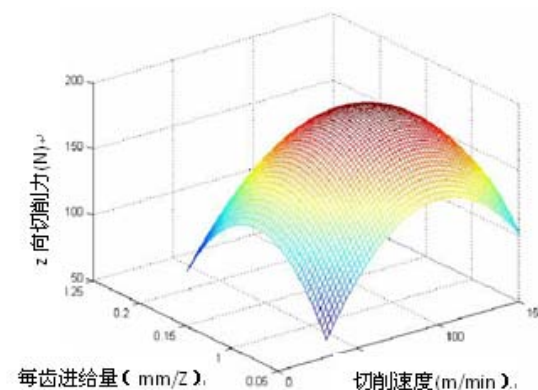
■ 高速插铣技术

High speed plunge milling

加工过程中刀具沿主轴方向
做进给运动，利用底部的切
削刃进行钻、铣组合切削



Efficiency: 3~5 times more
than traditional milling



□ 高效加工技术



■ 大进给铣削技术

采用大的切削进给量,利用专用大进给铣刀底刃切削的铣削技术



➡ TC4钛合金典型零件高性能加工应用验证及评价

粗加工大进给加工方式效率对比分析:

提高54.14%

	加工内容	直径 (mm)	齿数 z	切宽 (mm)	切深 (mm)	线速度 (mm/min)	每齿进给 (mm/z)	加工时间 (min)	去除量 (cm ³)	去除率 (cm ³ /min)
改进前	钻下刀孔	40	4	40	20	40.19	0.03	6.90	221354.23	21.24
	粗铣内外形	30	4	10	20	37.68	0.05	130.73	2702436.1	
改进后	粗铣内外形	32	3	22	1.2	80.00	0.70	83.86	2745864.8	32.74

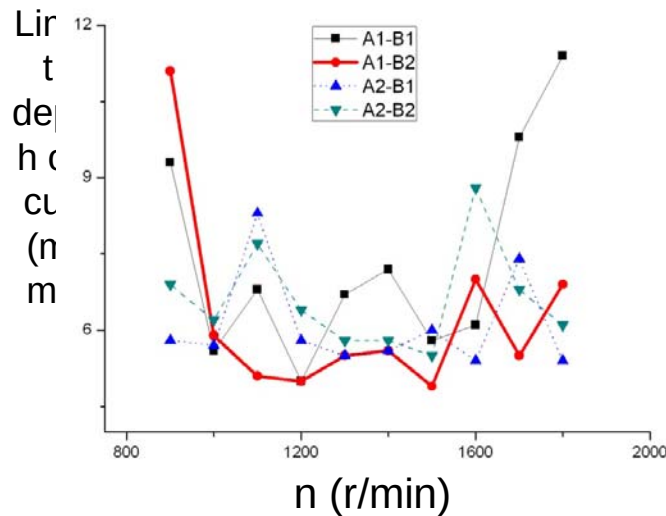
提高74.17%

精加工大进给加工方式效率对比分析:

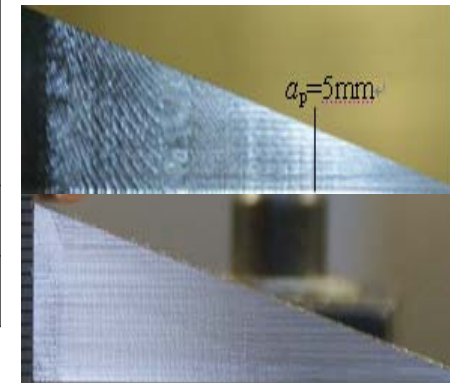
	加工内容	直径 (mm)	齿数 z	切宽 (mm)	切深 (mm)	线速度 (mm/min)	每齿进给 (mm/z)	加工时间 (min)	去除量 (cm ³)	去除率 (cm ³ /min)
改进前	精铣内外形	20	4	1	21	125.60	0.10	26.84	251668.10	9.37
改进后	精铣内外形	20	4	1	21	126.00	0.15	16.47	268785.62	16.32

主动振动控制——变速切削与不等距铣刀

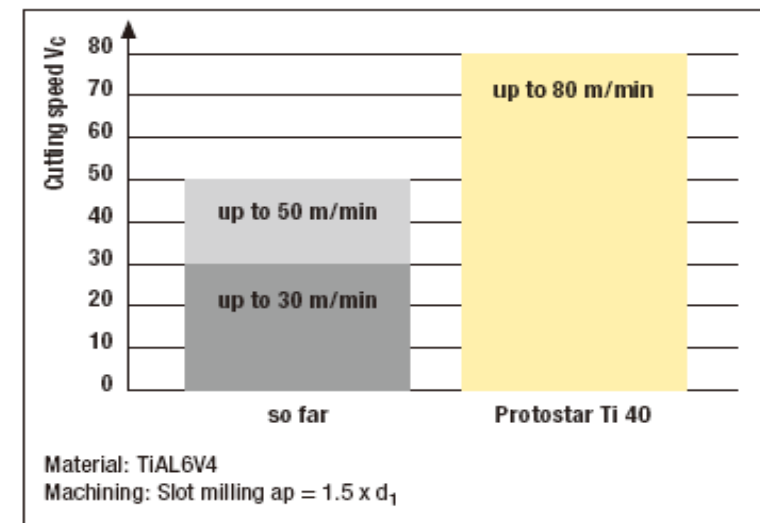
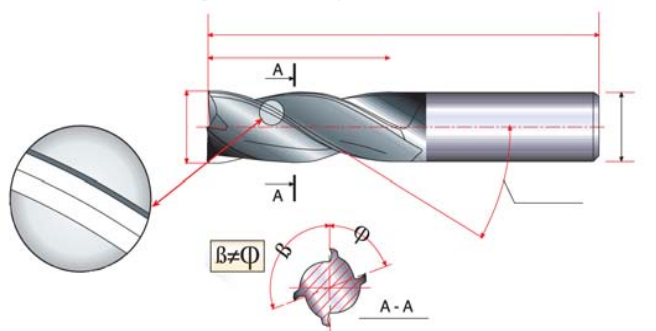
— 变速铣/Vari-speed milling



N O.	A Amplitude ($\Delta n/n$)	B Frequency (Hz)
1	10%	0.1
2	30%	0.5

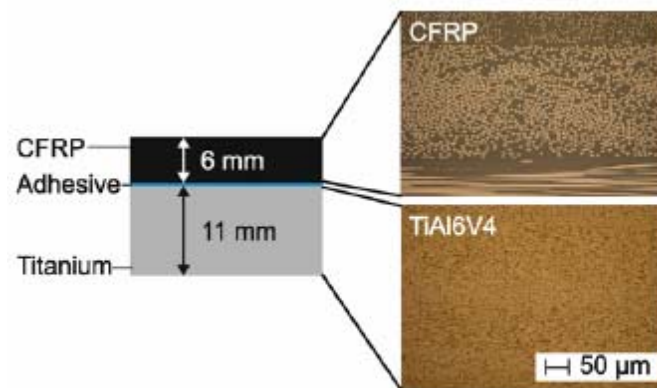
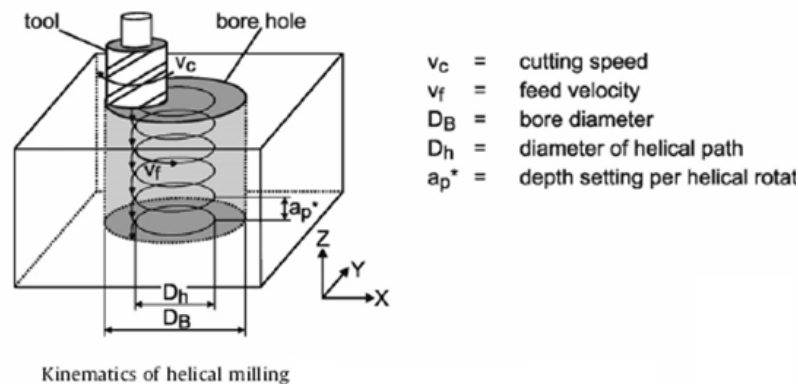


— 不等距铣刀/Milling with unequal blade spacing cutter

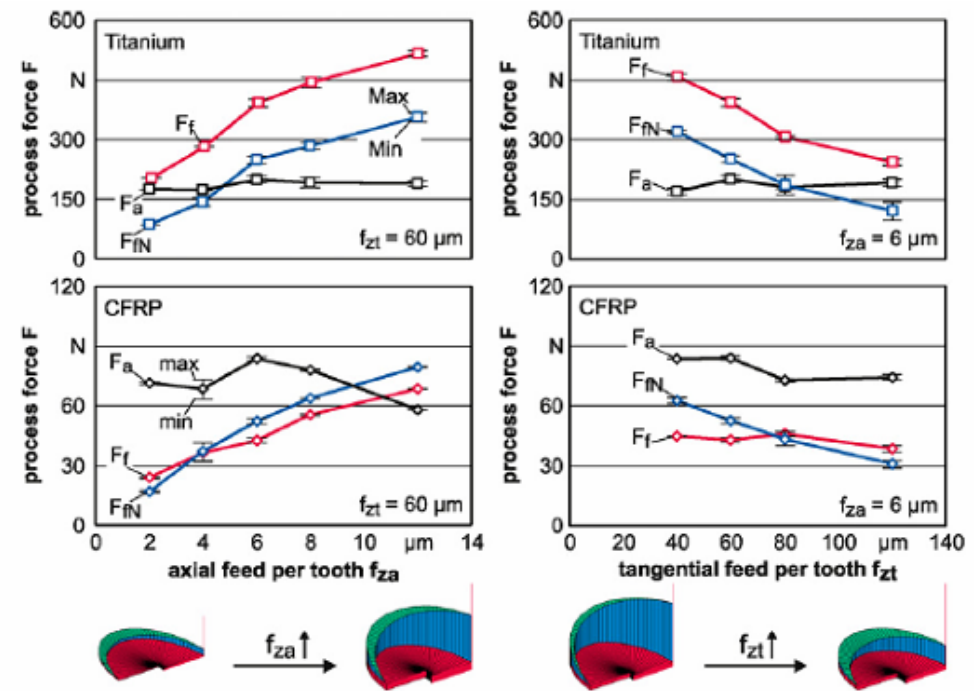


■ 其他高性能加工工艺技术——高效螺旋铣孔技术

High speed helical milling of Milling Carbon Fiber Reinforced Plastics (CFRP)-titanium layer compounds with TiAlN coated solid carbide end mills.



Buildup of the CFRP-Ti layer compound



process:
cutting speed: $v_c = 40$ m/min
bore diameter: $D_B = 10$ mm
tool diameter: $D_{WZ} = 8$ mm
number of teeth: $z = 3$

material compound:
CFRP $t = 6$ mm
TiAl6V4 $t = 11$ mm

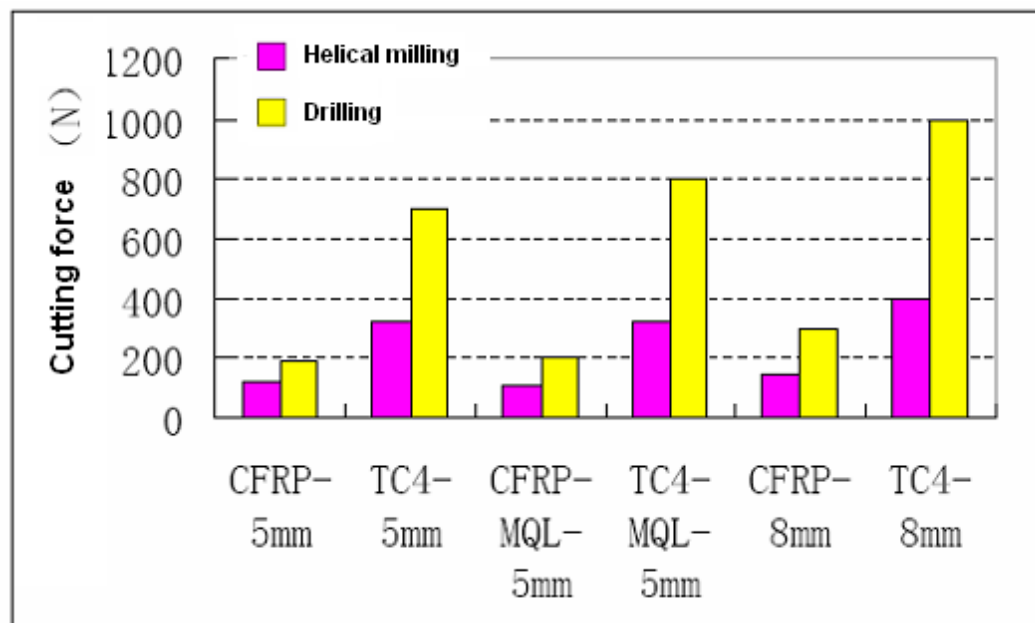
CFRP
TiAl6V4

Dg/49492 © IFW

Process forces in the titanium and the CFRP layer in dependence on the axial and tangential feed per tooth

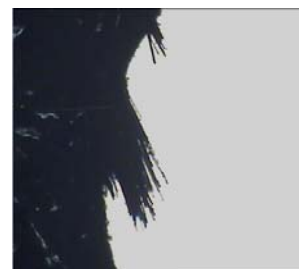
■ 其他高性能加工工艺技术——高效螺旋铣孔技术

Comparison between helical milling with drilling of CFRP and titanium alloy with cemented carbide tools.

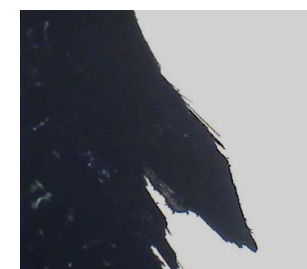


Cutting forces in axial direction

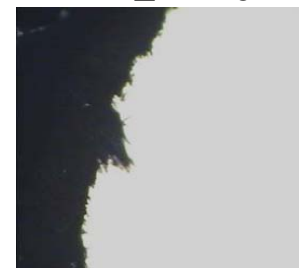
Cutting burrs



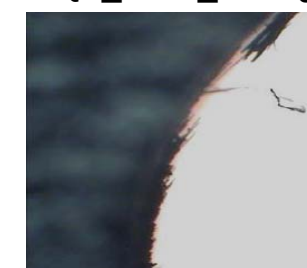
5mm_drilling



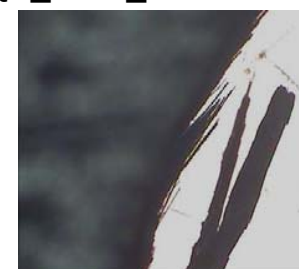
MQL_5mm_drilling



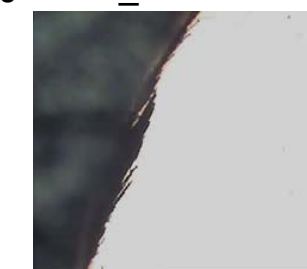
MQL_5mm_helical milling



5mm_helical milling



8mm_drilling



8mm_helical milling

四、可测可控加工

□ 可测可控加工



高速/高性能加工过程极为复杂，存在许多不易控制因素：

- 加工变形问题
- 切削振动问题
- 工具系统故障
- 机床系统故障

.....

尺寸超差
零件报废
设备损伤
人身伤害

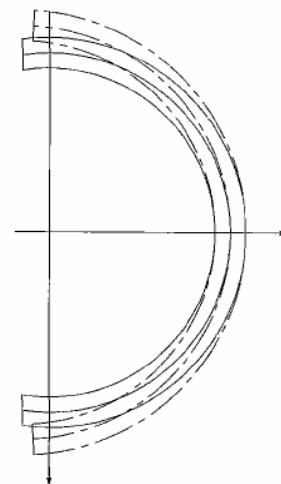
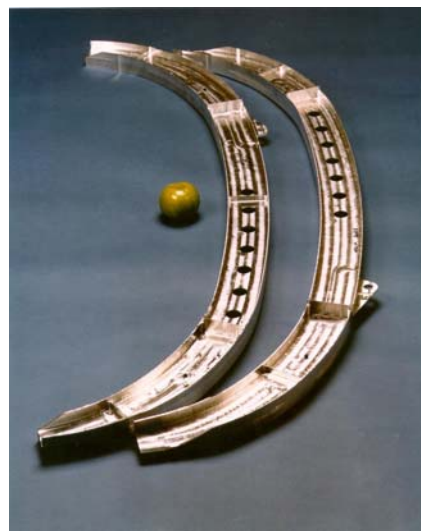
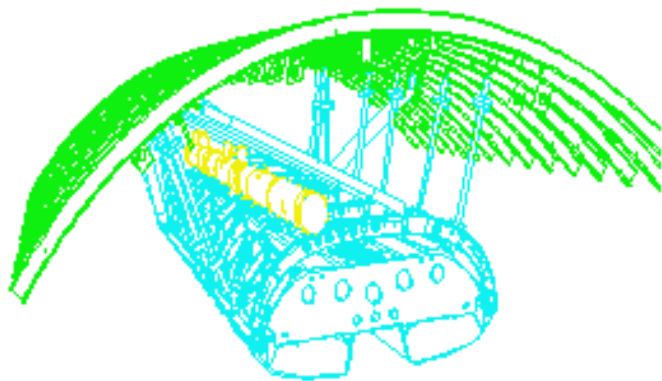
.....

从保证零件加工质量、提高加工效率、降低加工成本等角度考虑，高性能加工技术，要求能够实现对加工过程、加工结果的有效预测和控制，进而实现对整个加工工艺的综合优化，即实现可测可控加工。

□ 可测可控加工

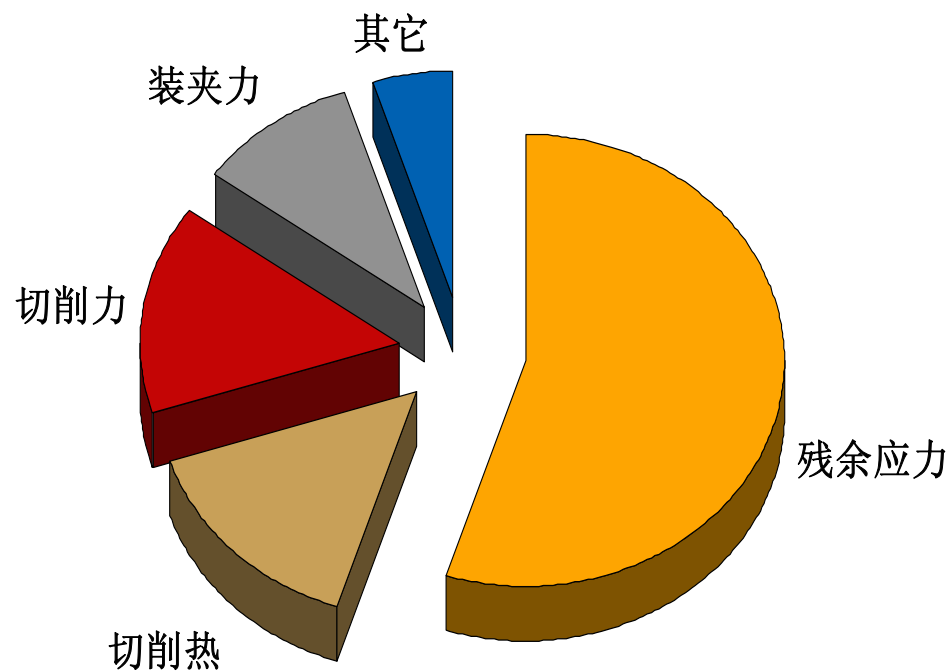
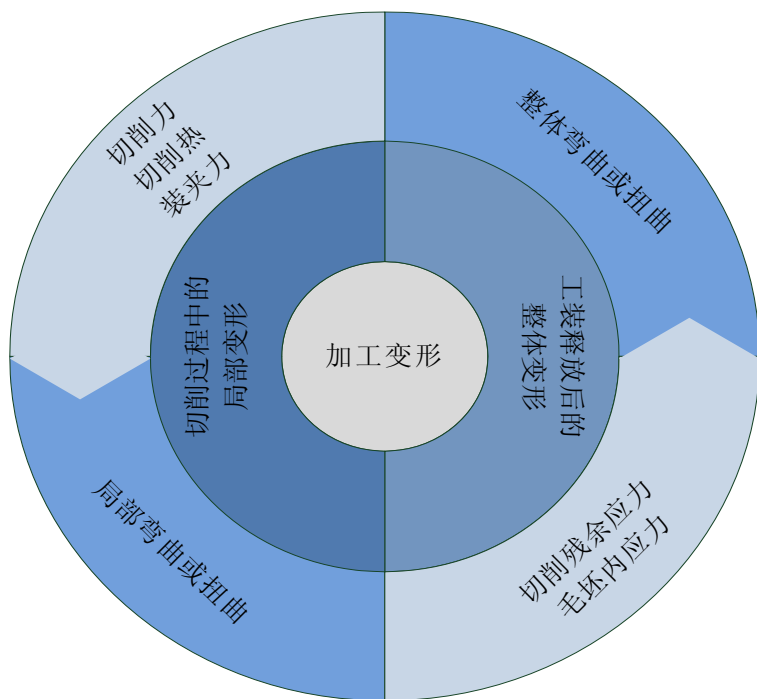
■ 外形轮廓整体变形

- 零件整体扭曲、弯曲或翘曲
- 主要出现于大尺寸整体结构件加工



□ 可测可控加工

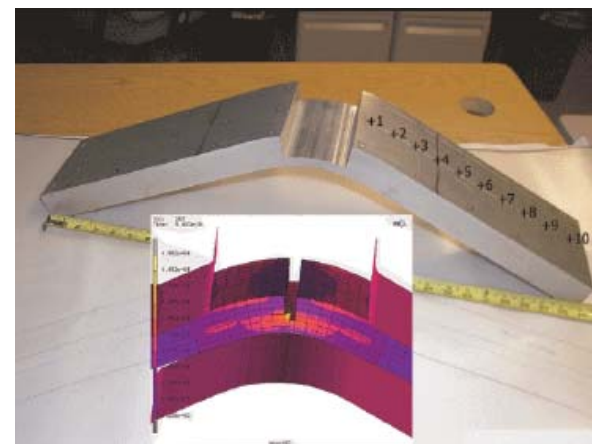
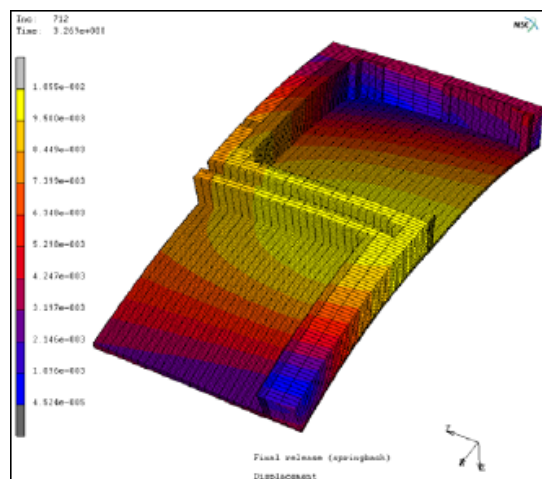
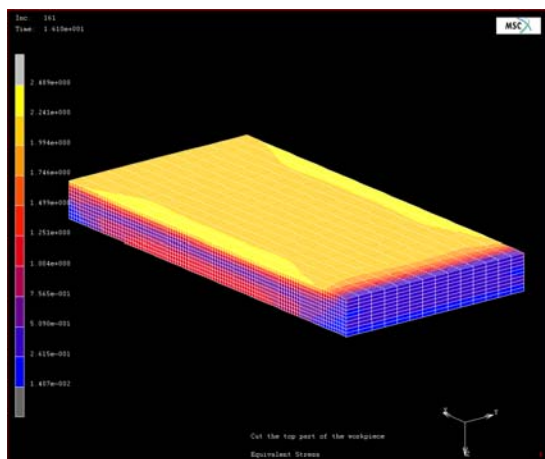
■ 零件变形原因分析



□ 可测可控加工

■ 宏观内应力导致加工变形机理

——切削加工过程中，内应力释放并且零件刚度减弱，内应力重新平衡伴随变形协调。

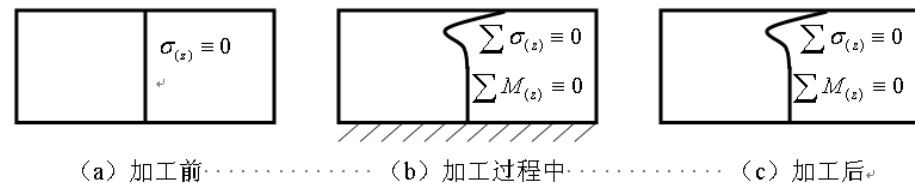


□ 可测可控加工

■ 表面残余应力导致加工变形机理

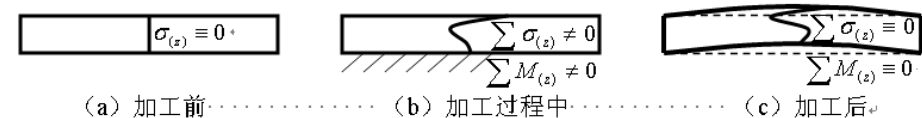
1、大厚度结构的切削残余应力分布

- 刚度高
- 表层较浅区域应力通过变形协调实现自平衡
- 变形小



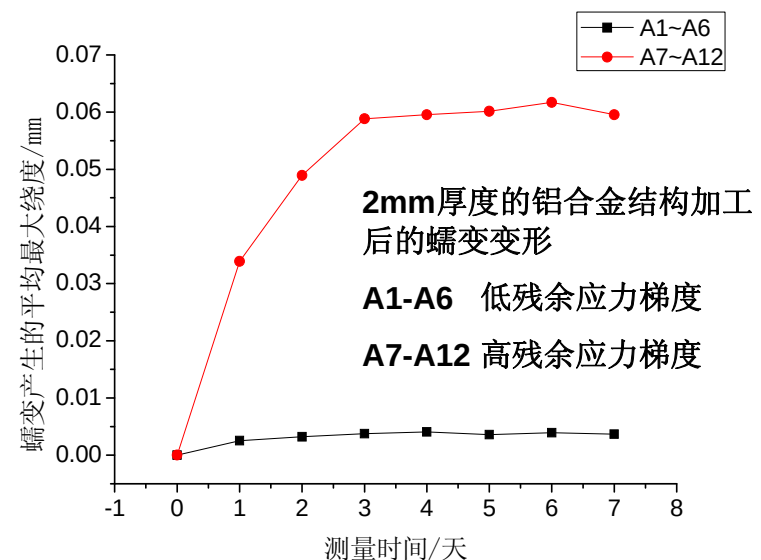
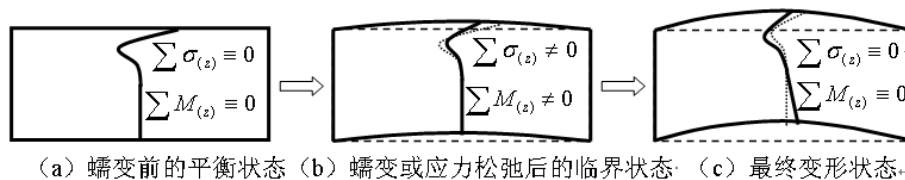
2、薄壁结构的切削残余应力分布

- 弱刚性
- 即使在全厚度上应力仍难自平衡
- 加工后立即变形，变形量大



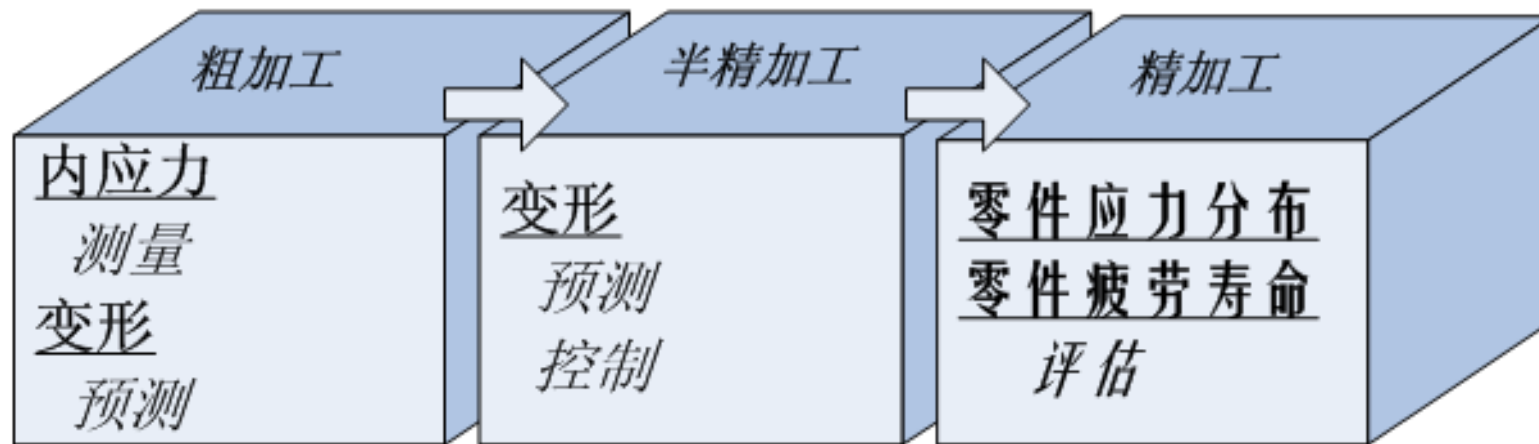
3、加工后切削残余应力松弛

- 高梯度分布在表面的应力发生松弛
- 尤其是铝合金等在常温下蠕变较大的材料
- 加工后持续变形，变形量大



□ 可测可控加工

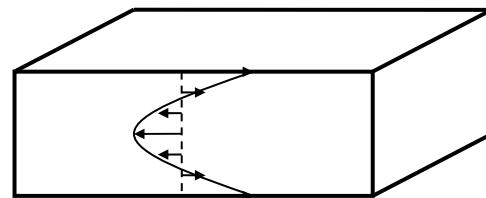
■ 整体变形控制的思路



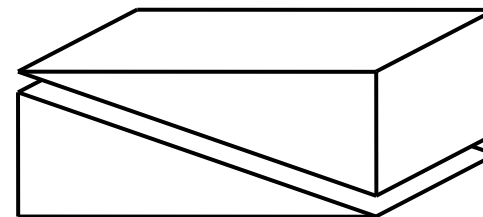
基于零件整体应力变形与表面层疲劳性能综合控制的
低应力制造技术

■ 均匀残余应力场的快速测量方法

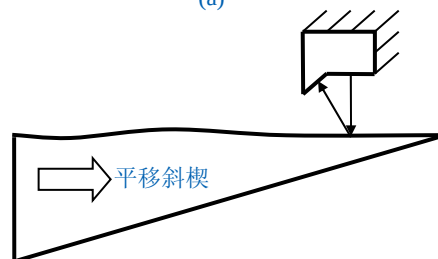
- 关于均匀应力场的假设
 - 板材的残余应力仅沿厚度方向变化，而在垂直于厚度方向的平面内均匀分布；
 - 在厚度方向，应力分布关于中间层对称。
- 逐层法、裂纹柔度法——需贴应变片、效率低，数据分辨率低
- 基于斜楔的应力测量——仅需测量变形、效率高、分辨率高
 - 测量过程：a → b → c → d



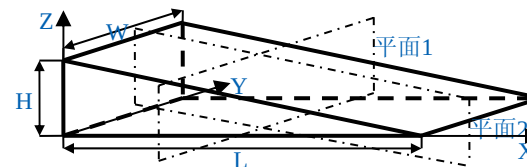
(a)



(b)



(c)



(d)

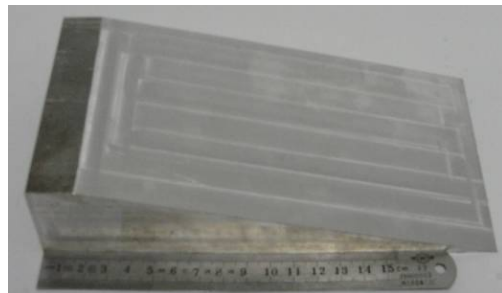
$$\sigma(x) = \frac{2EL}{(1-\mu^2)} \frac{2LL_x^2 + (2L\rho_{cx} + HL - Hx)(x-L) \frac{\Delta L_x}{\Delta x} + 2LL_x[\rho_{cx} + (L-x) \frac{\Delta \rho_{cx}}{\Delta x}]}{[2L\rho_{cx} + H(L-x) + 2LL_x]^2}$$

□ 可测可控加工

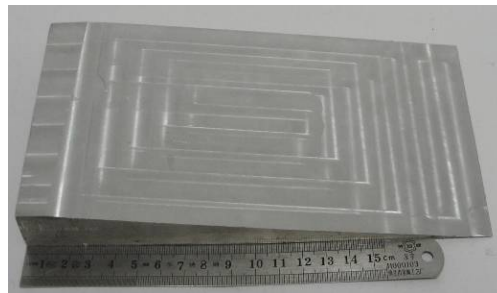


■ 均匀残余应力场的快速测量方法

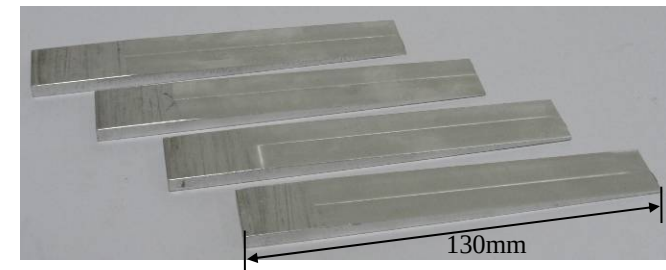
■ 三种不同厚度板材的实际测量结果



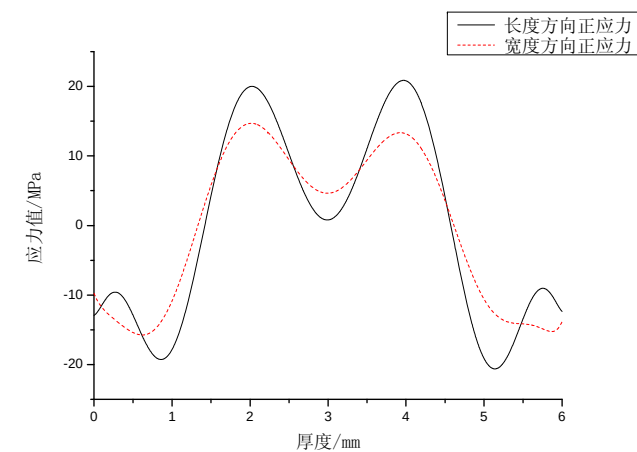
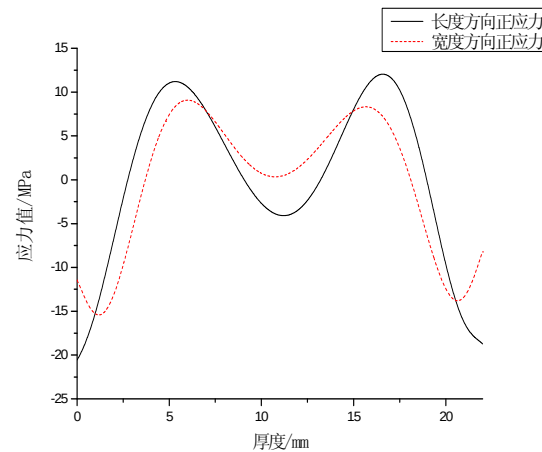
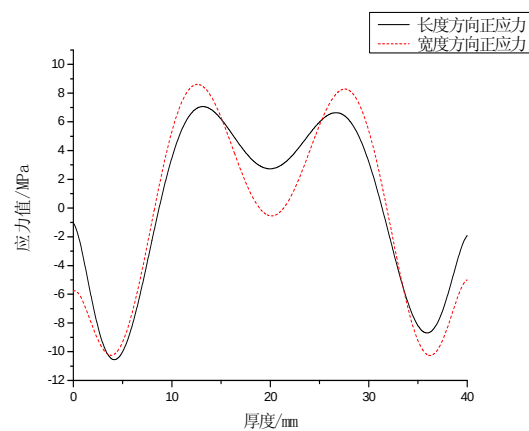
(a) 40mm板加工所得斜楔



(b) 22mm板加工所得斜楔



(c) 6mm板加工所得斜楔



可测可控加工

非均匀残余应力场的测量和构建方法

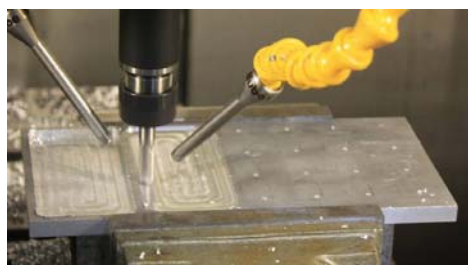
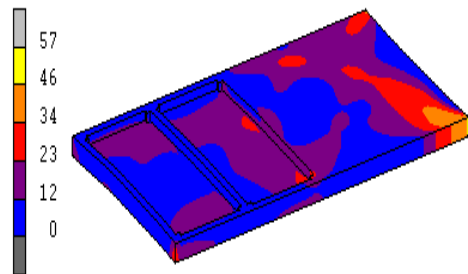
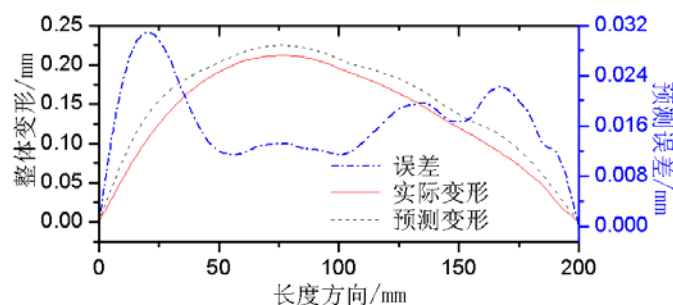
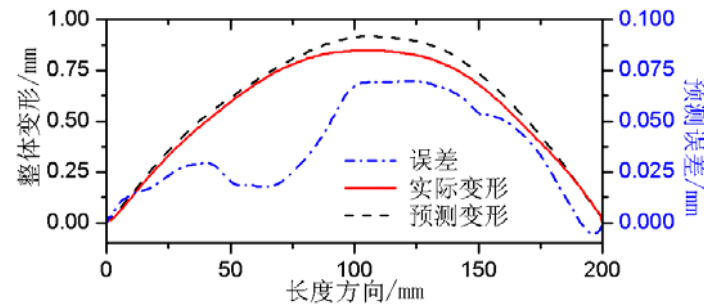


表 2.1 零件 P1 和 P2 的应力场构成参数

参数	P1	P2
测量层厚度	2mm	4mm
测量总层数, n	1	2
$h_{n+1}, h_{n+2}, h_{n+3}$	2mm	1.333mm
$\sigma_{n+1}(x, y), \sigma_{n+2}(x, y)$	$-\sigma_1(x, y)$	$[-19\sigma_1(x, y) - 13\sigma_2(x, y)]/8$
$\sigma_{n+3}(x, y)$	$\sigma_1(x, y)$	$[13\sigma_1(x, y) - 7\sigma_2(x, y)]/4$



(a) 零件 P1 的变形曲线。

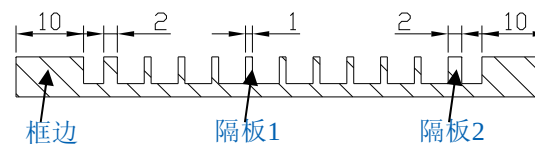


(b) 零件 P2 的变形曲线。

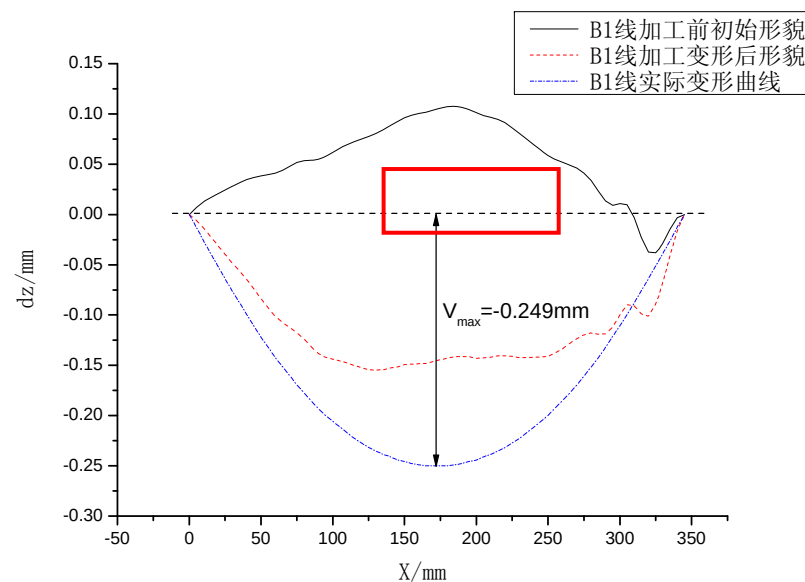
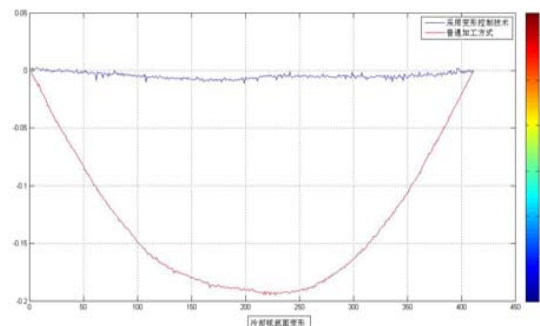
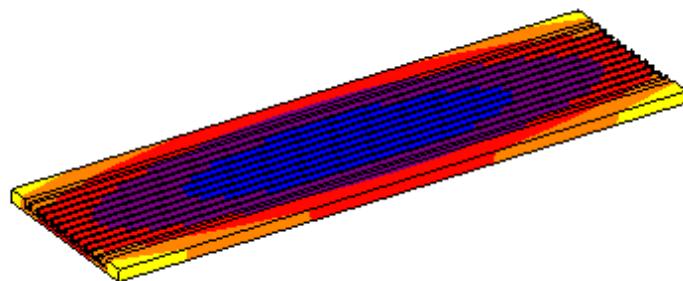
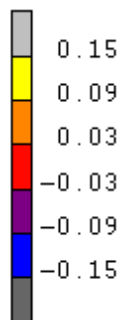


可测可控加工

案例1——某冷却板变形理论分析与低应力切削



预测值: -0.258mm



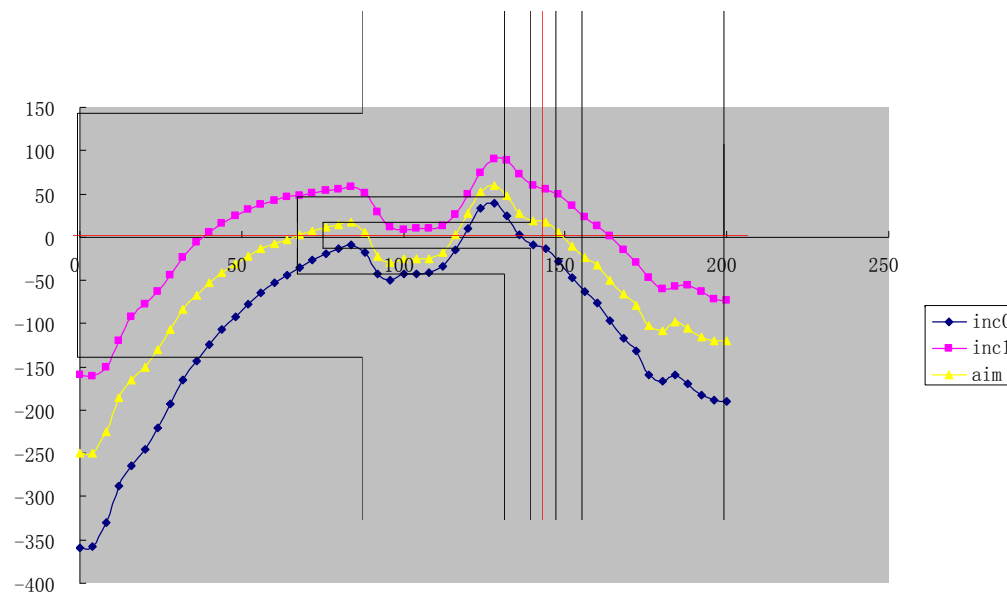
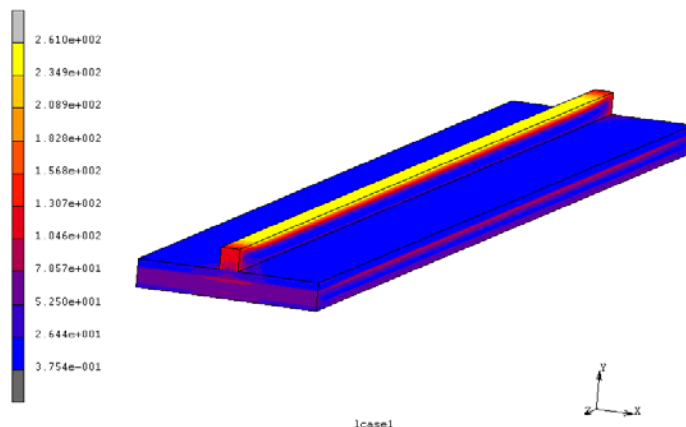
可测可控加工



案例2——某飞机模锻铝合金肋缘条零件

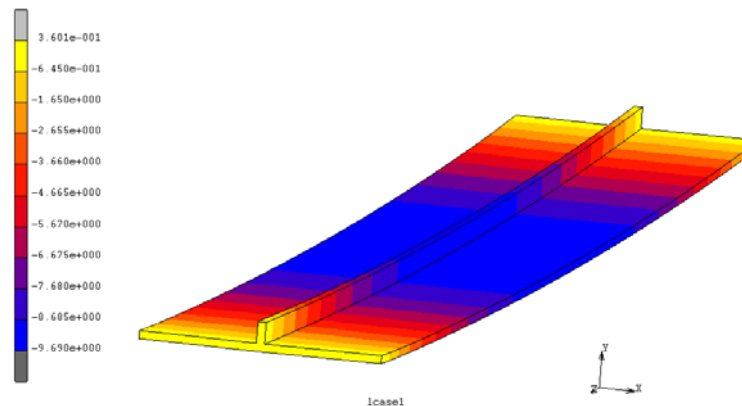


Inc: 1
Time: 1.000e+000



inc0 Software

Inc: 1
Time: 1.000e+000

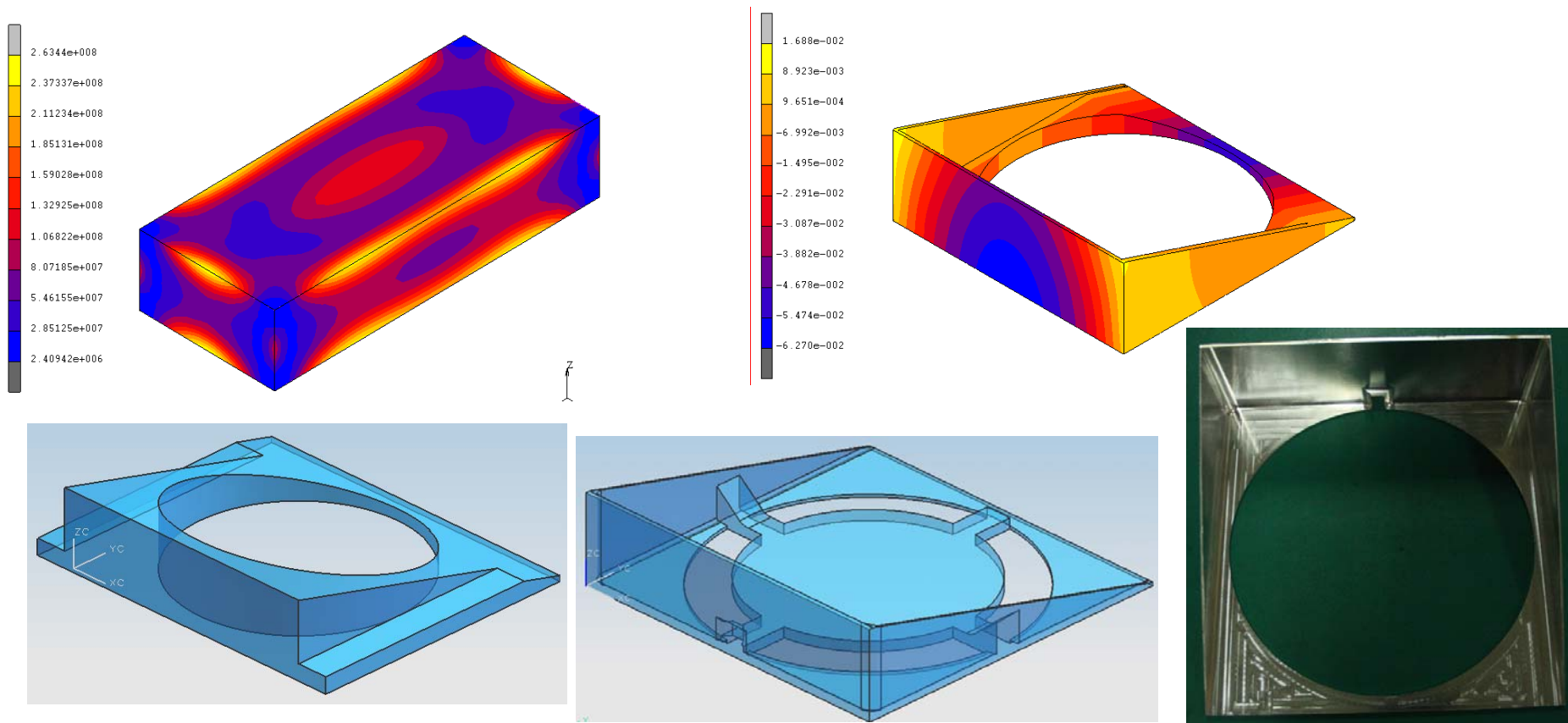


inc0 Software

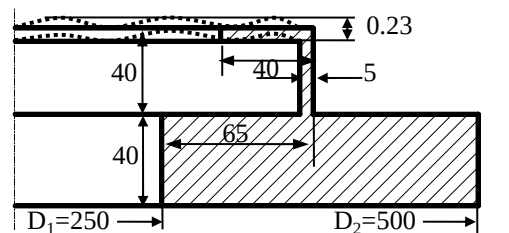
案例3——某卫星薄壁SADA支架零件

铝合金2A14T6毛坯

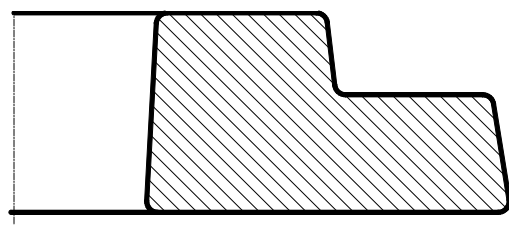
关键技术要求：基准面加工平面度优于0.04，垂直度优于0.15



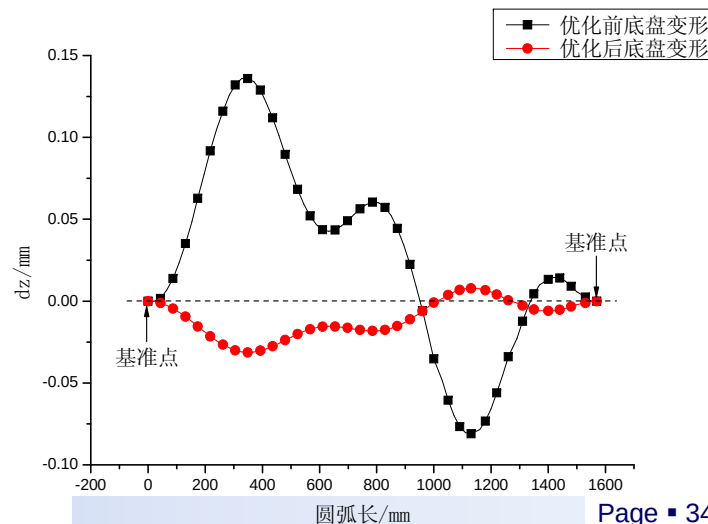
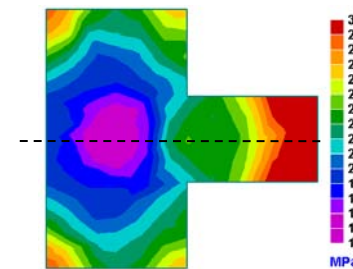
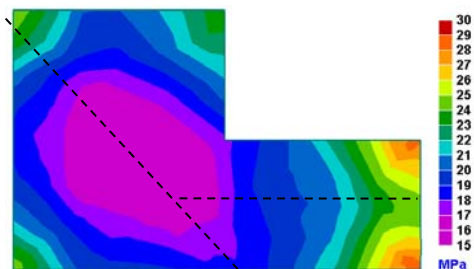
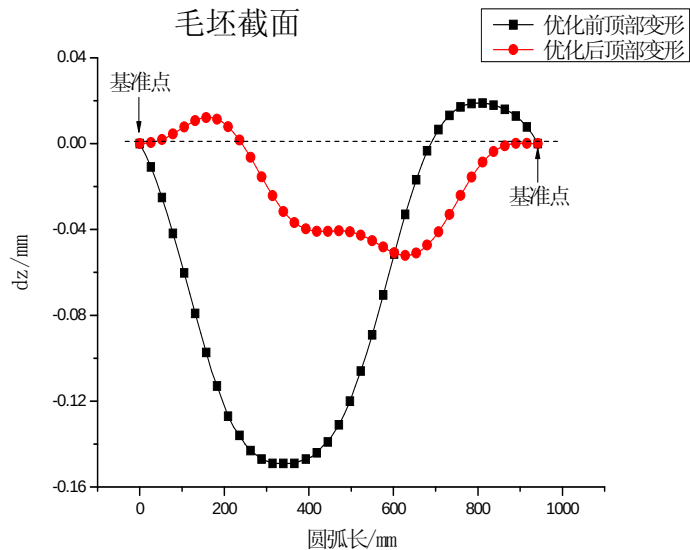
案例5——某发动机环形零件



零件截面



毛坯截面



五、可持续加工

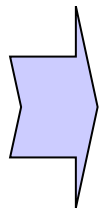
□ 可持续加工



■ 可持续制造的提出

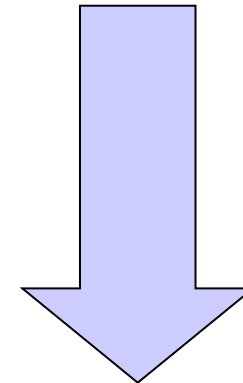
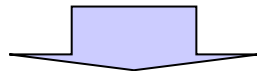
资源
环境
人口

全球三大
热点问题



为缓解这些问题而带来的种种危害，可持续发展已被公认为21世纪的生产发展模式。

占能耗总量50%~60%的制造业，是资源消耗的大户，同时也是环境污染的主要源头之一。

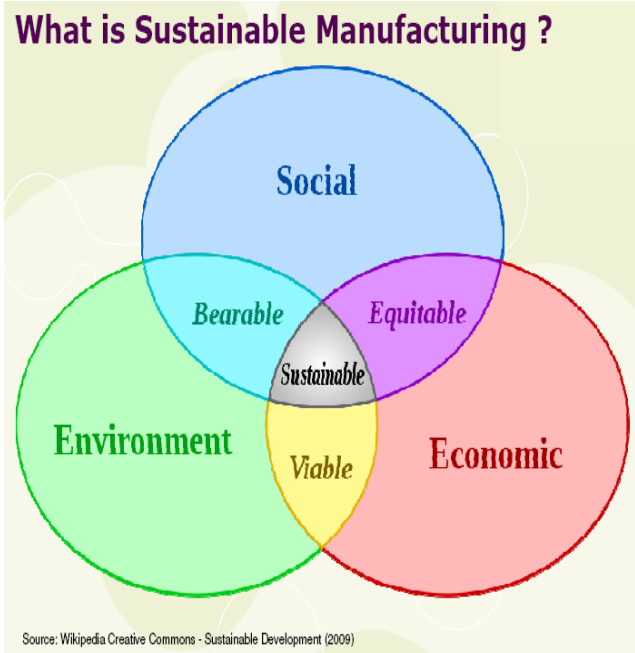


如何有效提高能源效率比，从源头消除或抑制环境污染，使制造过程更加高效、节能和环境友好，是目前全球制造业中亟待解决的关键问题。

□ 可持续加工

□ 可持续制造的基本概念

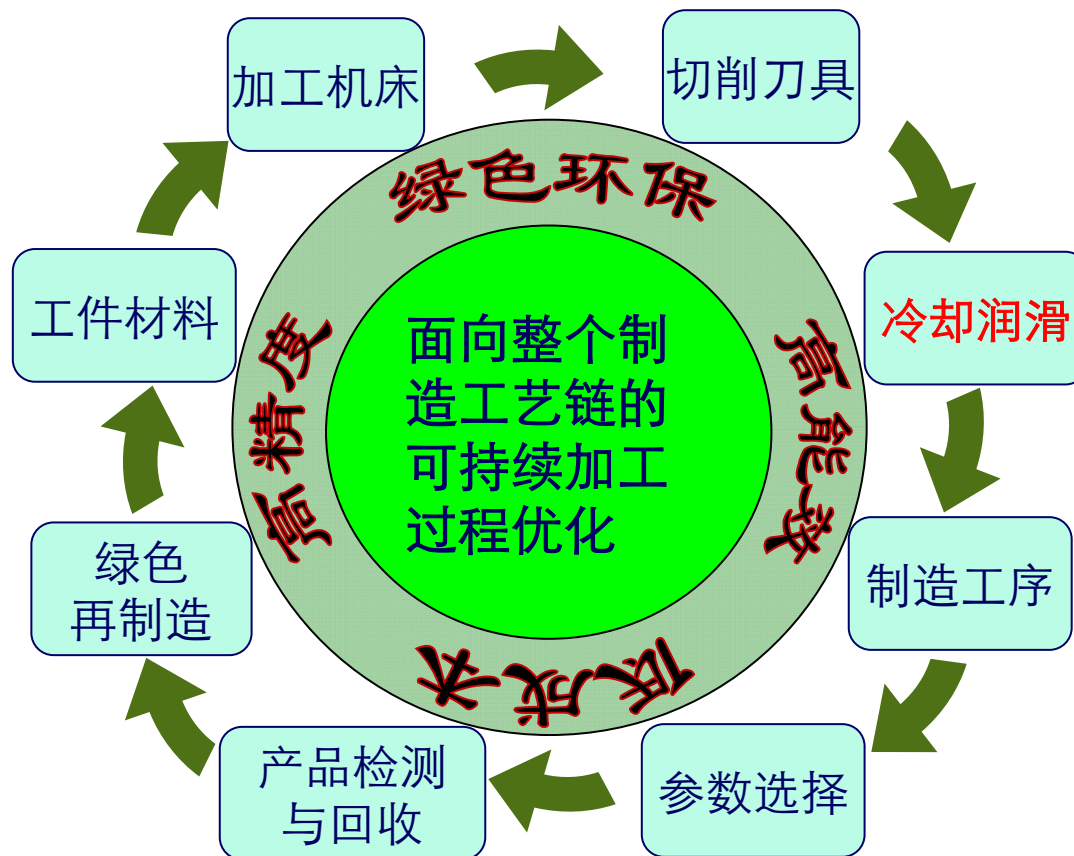
可持续制造（Sustainable manufacturing）是在传统制造基础上，面对资源与环境压力而发展出的一项先进制造模式，是一种在生产现场直接改变产品形状、尺寸、性能的高新技术，同时又是一种洁净的生态型技术、资源传递链延伸技术和整体优化技术。



“Sustainable manufacturing is a platform for development of innovative manufacturing technologies which address world wide resources shortages and excess environmental load to enable an environmentally benign life cycle.”

□ 可持续加工

■ 可持续制造过程优化

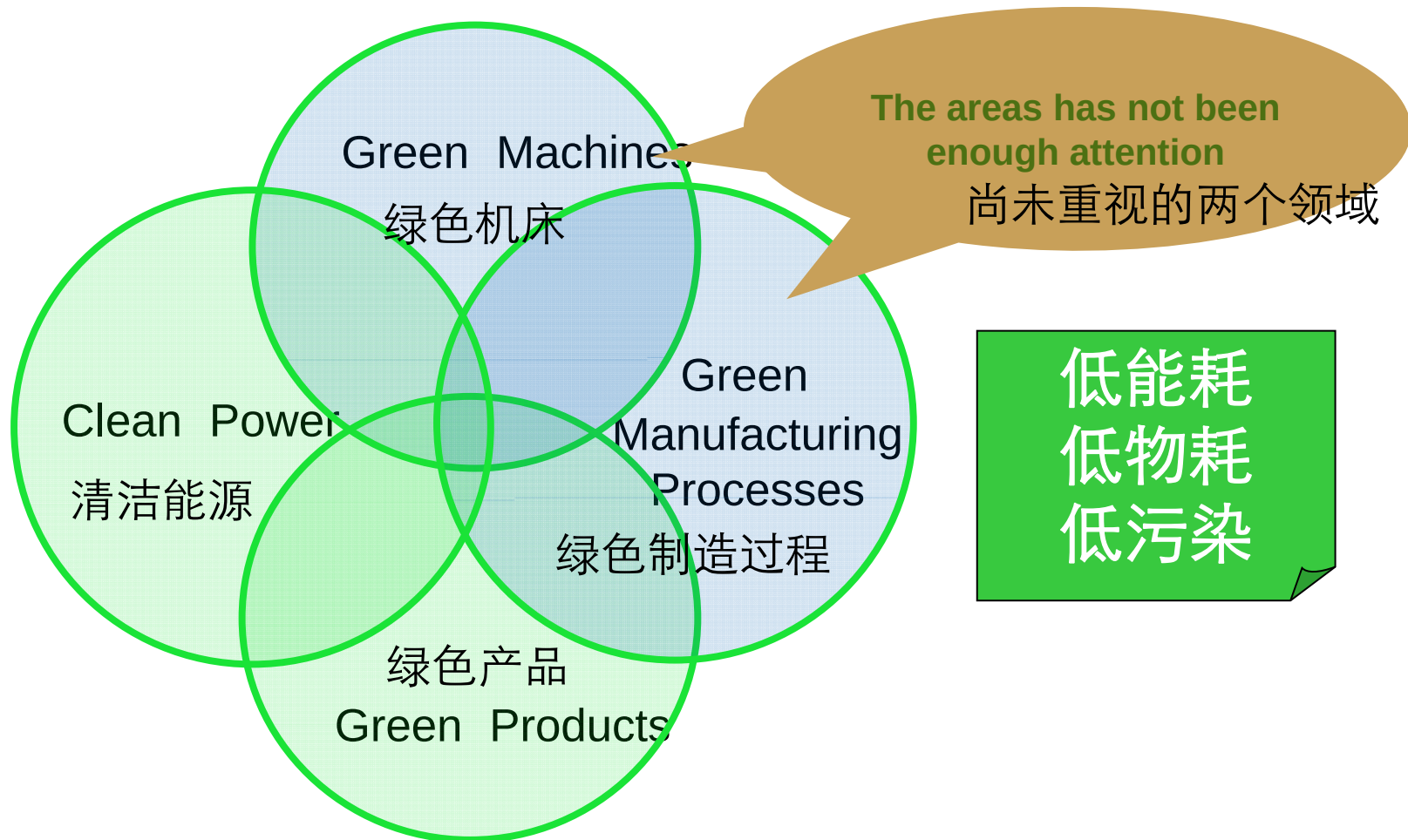


Main Concepts:

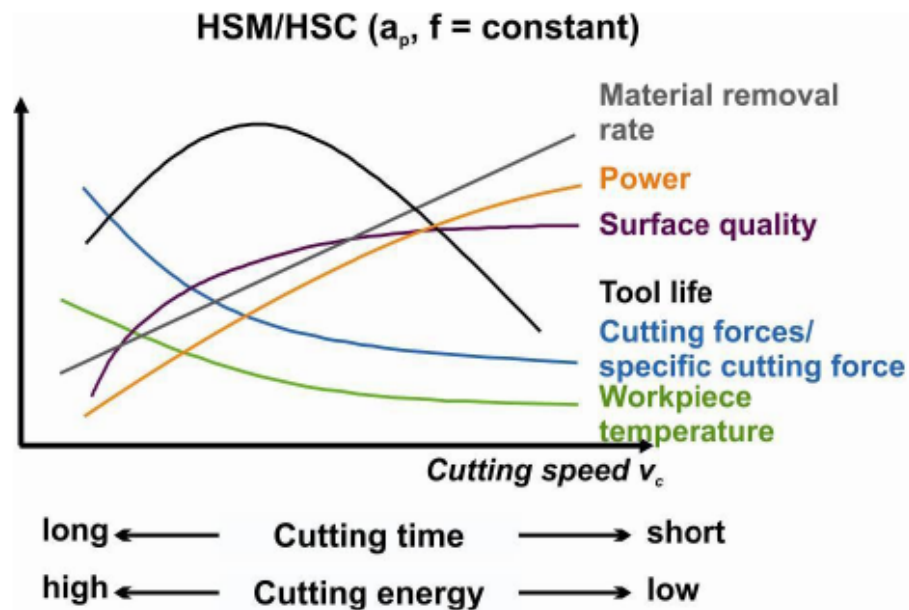
Low materials consumption

Low energy consumption

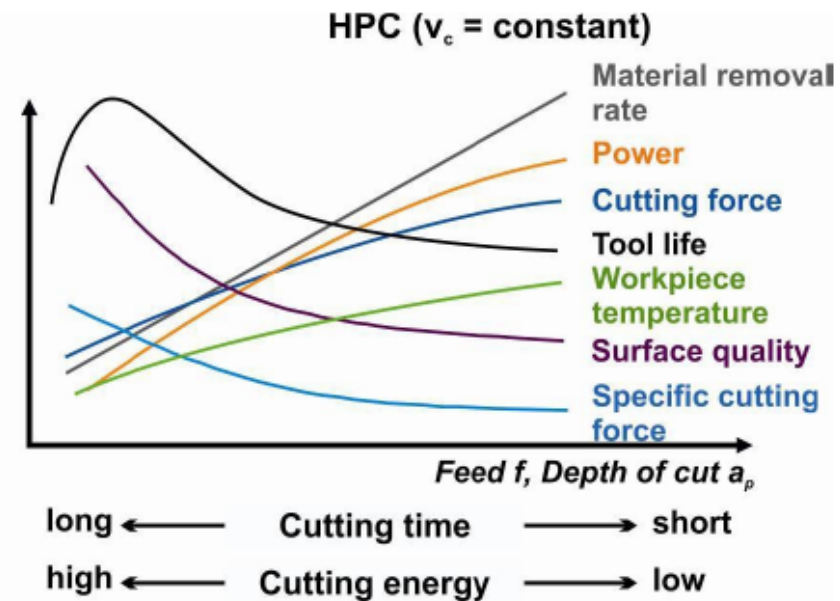
Low waste (solid, liquid, gas)



Influence of Velocity, Feed and Depth of Cut on Performance



提高切削速度
将会降低比切削力，
降低工件热载，提高表面质量



提高进给速度和切削深度
将会降低比切削力，
但提高工件热载，降低表面质量

降低排放—冷却润滑技术

干切削



压缩空气



乳化液



冷风



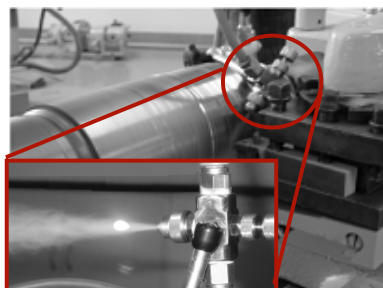
深冷方法



降低切削温度

增加散热率

低温汽雾



MQL



低温 MQL



低温氮气 MQL

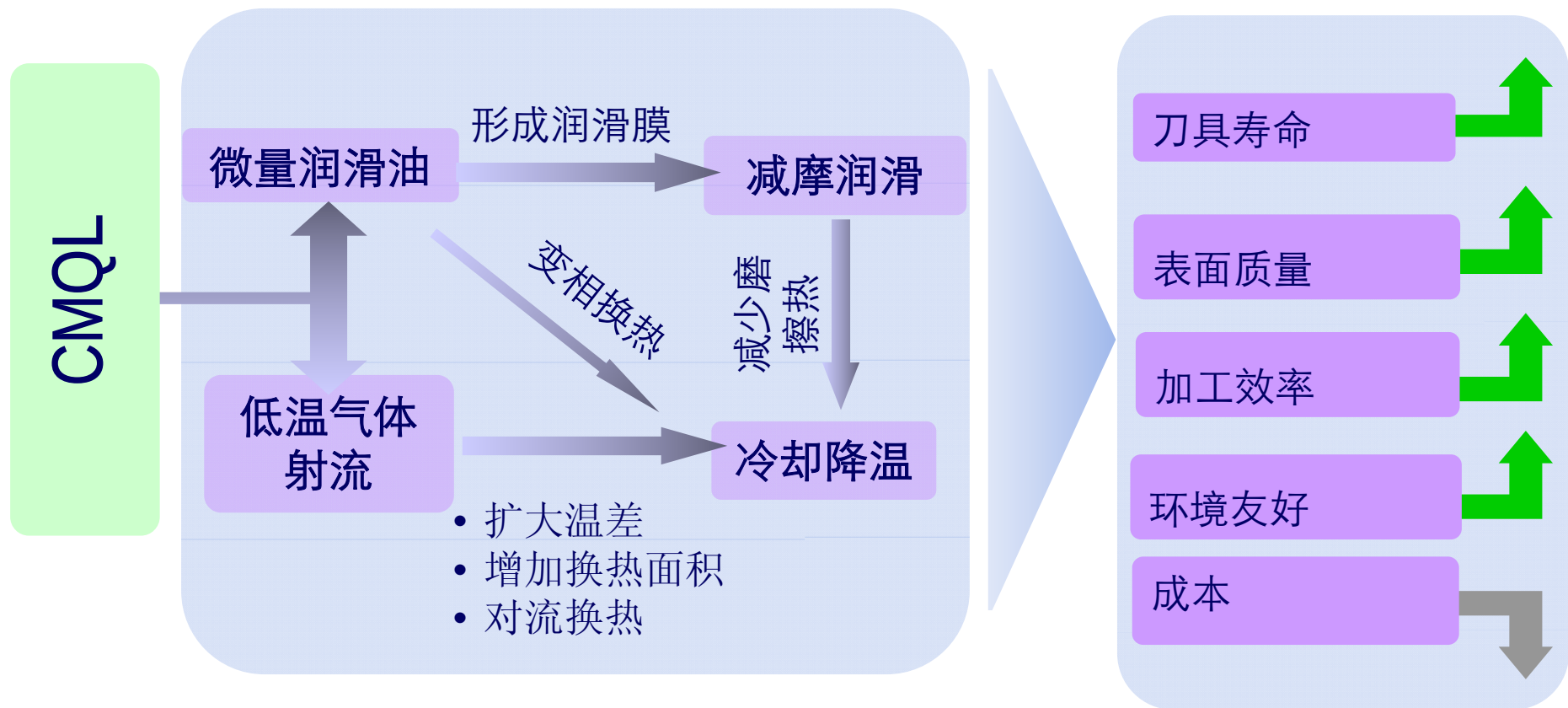


降低刀屑界面摩擦系数

增加刀具抗磨损能力

□ 可持续加工

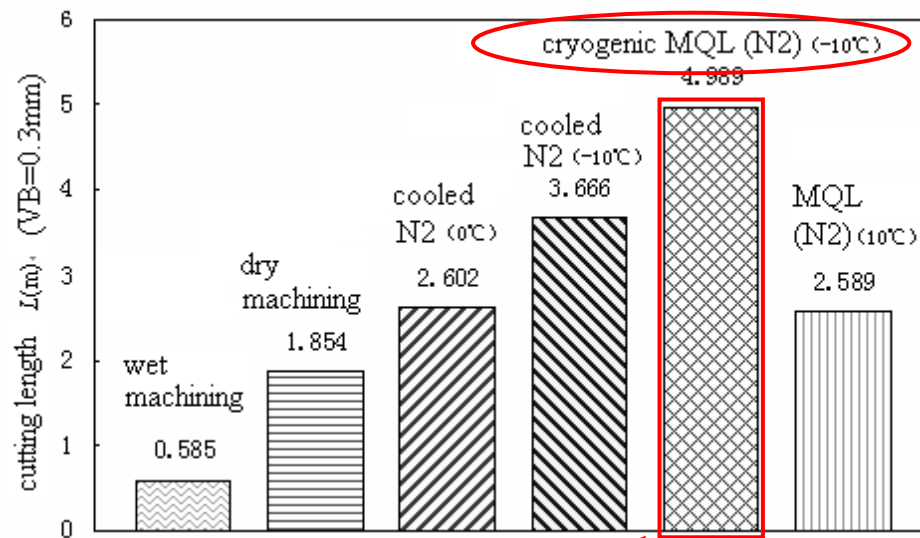
■ 低温微量润滑作用机理



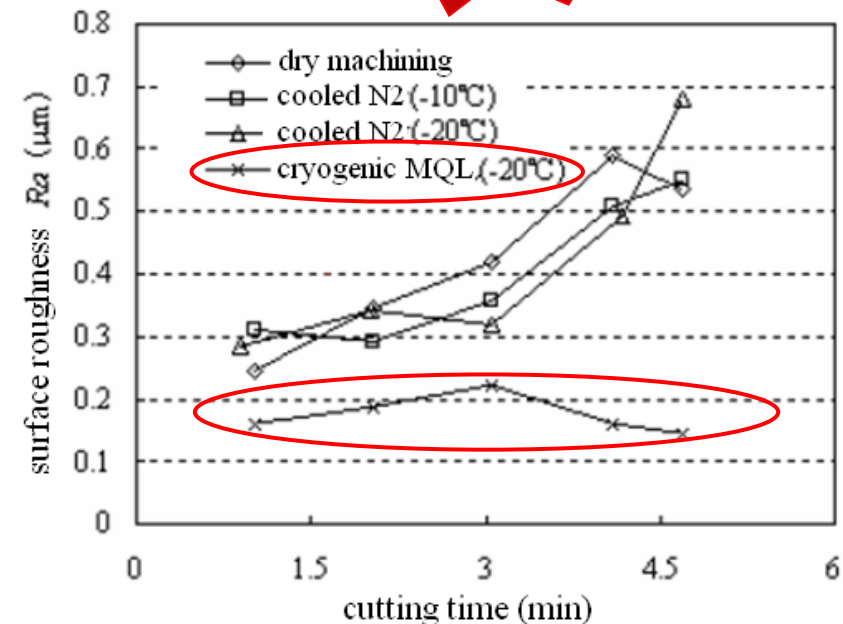
□ 可持续加工

■ 难加工材料低温微量润滑切削试验

◎ 钛合金



Tool life

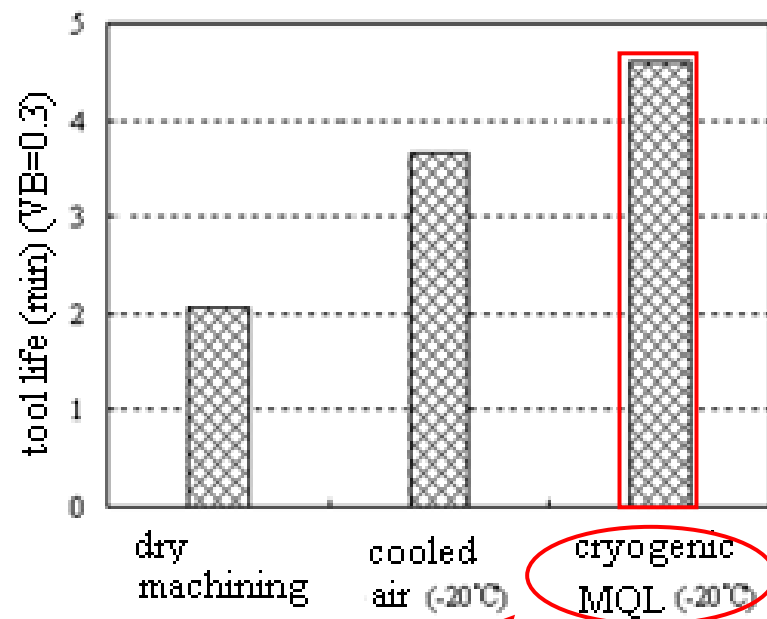


Tool life & surface roughness of high speed milling Ti6Al4V alloy at different cutting media (cutting tool : Walter uncoated inserts (WK10). cutting parameters: $v_c = 400\text{m/min}$, $f_z = 0.1\text{mm}$, $a_p = 5\text{mm}$, $a_e = 1\text{mm}$)

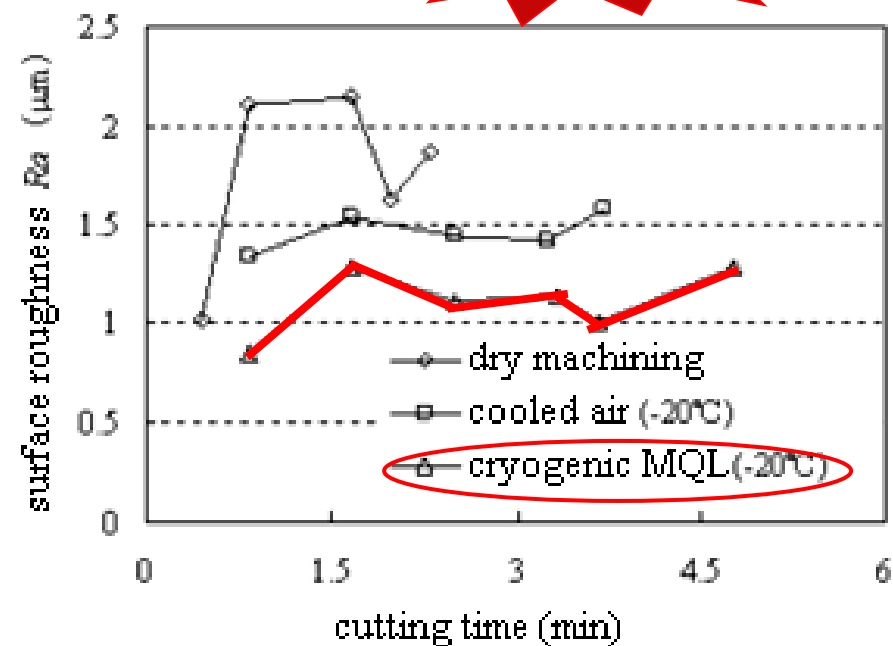
□ 可持续加工

■ 难加工材料低温微量润滑切削试验

◎ 高温合金



Tool life



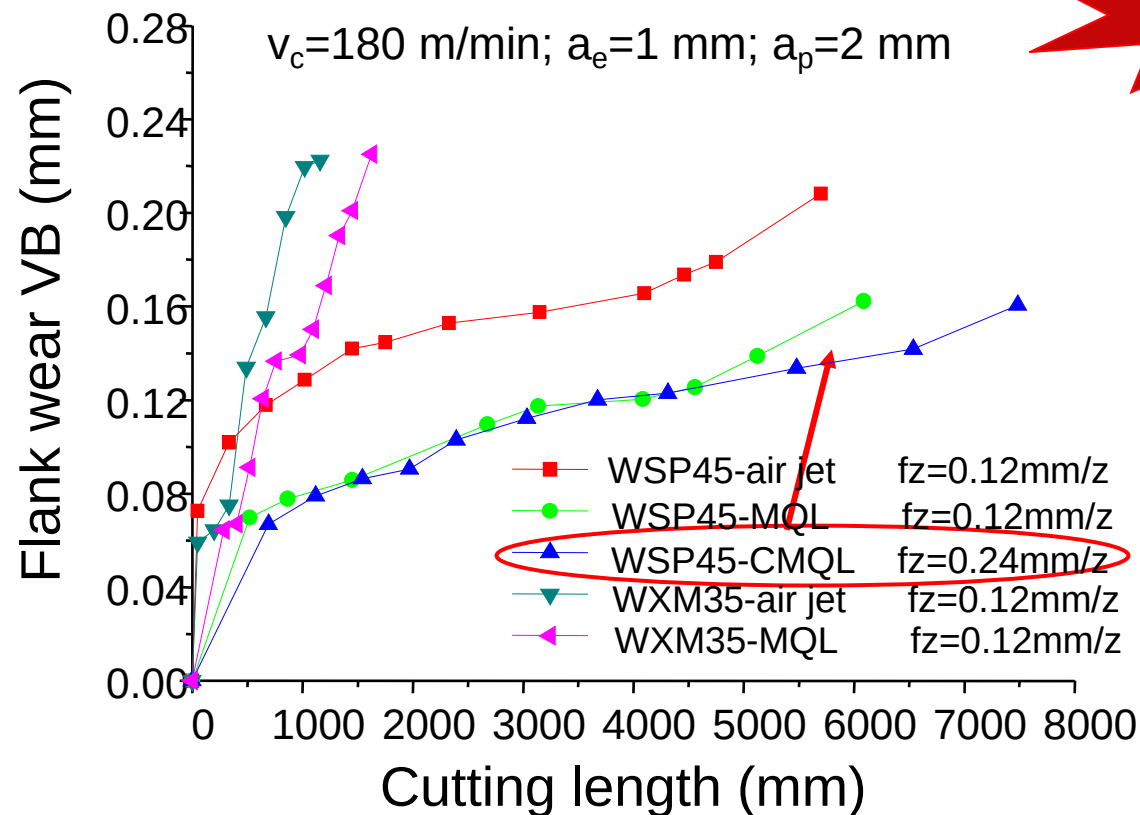
Surface roughness

Tool life & surface roughness of high speed cutting Inconel718 at different cutting media
(cutting tool: KC5010 cemented carbide. cutting parameters: $v_c = 76$ m/min, $f = 0.1$ mm/r, $a_p = 0.5$ mm)

□ 可持续加工

■ 难加工材料低温微量润滑切削试验

◎ 不锈钢



Tool wear

Workpiece material:

PH13-8Mo

Cutting tools:

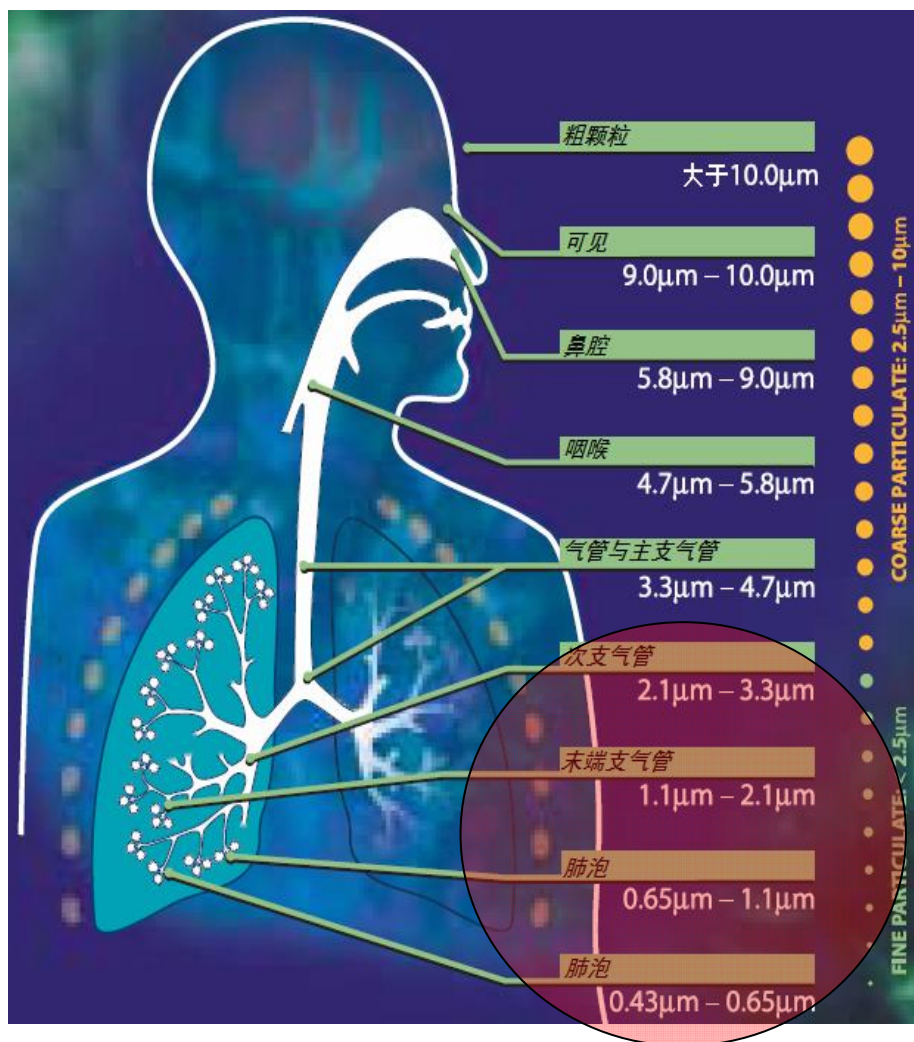
WSP45, WXM35

Cemented Carbide tool

High speed milling

□ 可持续加工

■ 切削加工车间空气环境质量评估控制体系



国家	制定机构	矿物油基
美国	职业安全与健康管理局 (OSHA)	5 mg/m ³
	政府工业卫生学家协会 (ACGIH)	5 mg/m ³
	国家职业安全与健康协会 (NIOSH)	0.5 mg/m ³
中国	金属切削机床标准化技术委员会	5 mg/m ³ (可吸入)
英国	健康与安全署 (HSE)	5 mg/m ³ —
日本	职业健康协会 (IOSH)	3 mg/m ³ —

方案设计依据

美国国家职业安全与健康研究会 (NIOSH)

Method 5524

《金属切削机床油雾浓度测量方法》 (JB/T 9879-1999)

《室内环境空气质量监测技术规范》 (HJ/T 167-2004)

《大气飘尘浓度测定方法》 (GB 6921-86)

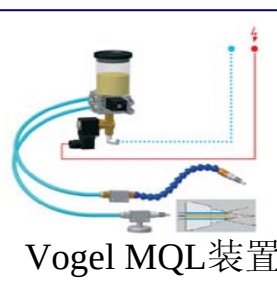
□ 可持续加工

■ 微量润滑切削环境空气质量监测系统

基于光散射法和重量分析法，利用Fluke -983 型激光粒子计数器与FA-3型串级撞击式气溶胶粒度分布采样器的组合测试方法，建立基于微量润滑切削的环境空气质量监测系统



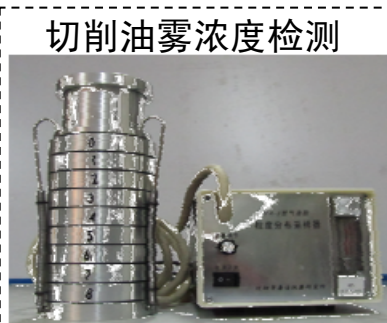
(低温) 微量润滑系统



Vogel MQL装置



UCP 710 五坐标加工中心

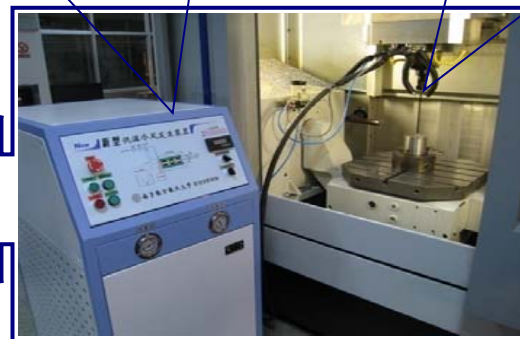


切削油雾浓度检测

FA-3型串级撞击式气溶胶粒度分布采样器



OHAUS AR1140
分析天平



(低温) 微量润滑切削

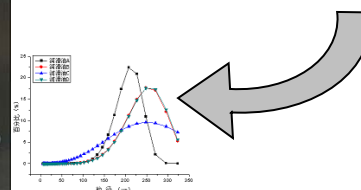


切削油雾粒径检测

手持式Fluke-983粒子计数器与倒置探头

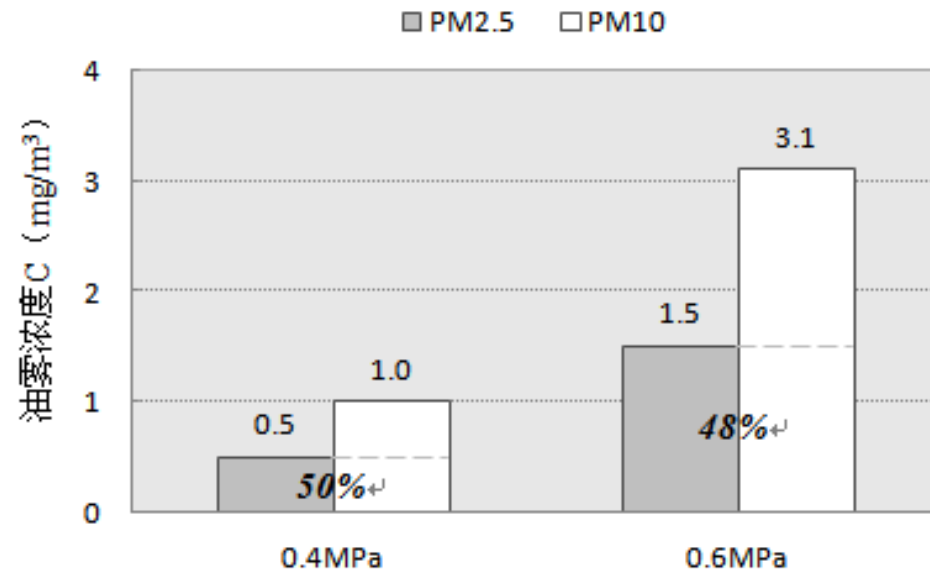


数据处理与分析

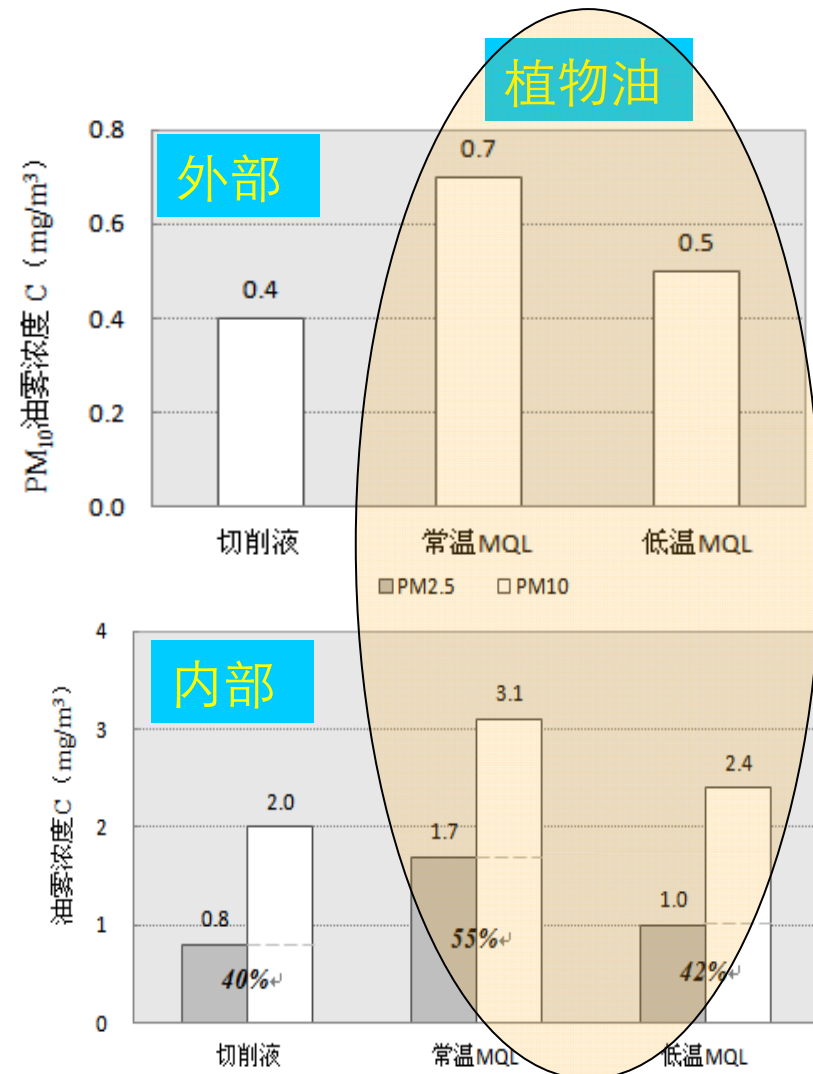


□ 可持续加工

■ 切削加工车间空气环境评价结果



低温微量润滑不仅能提高切削效率，而且可以有效降低车间油雾浓度
尽量采用高倾点植物基润滑油



六、结束语

- 现代高技术产品性能要求的提高，使得新型材料（难加工材料）的应用需求越发广泛，同时也给难加工材料的机加工技术带来了严峻的挑战！
- 在追求高性能产品的同时，保护良好的环境成为新的共识，因此，理想的生产模式既包括制造的产品最优化，也包括制造过程能源、材料、资金和产品、排放物等输入输出的最优化。
- 科学化生产对加工过程的描述、测量、控制提出的更高的要求。
- 未来切削加工发展将具有以下特征：优质、高效、可测可控、可持续，综合经济性最高。

谢 谢!

- 南京航空航天大学研究平台
- “机械制造及其自动化” 国家重点学科
- 科工委“难加工材料高校精密加工”工程技术应用中心
- 教育部“高效精密加工技术与装备” 工程研究中心
- 江苏省“精密微细制造技术” 重点实验室

- 联系方式:
- 何宁 教授
- 南京航空航天大学国际教育学院
- 邮编: **210016**
- Tel/Fax: 025-84892256
- E-Mail: drnhe@nuaa.edu.cn

