

蠕墨铸铁切削技术研究与应用

Research and Application of Compacted Graphite Iron Cutting Technology

汇 报 人: 张振宇

依托单位: 大连理工大学

E-mail: zzy@dlut.edu.cn

Phone: 18642657720

2021.04.24

Outline

一、个人基本情况

Personal information

二、代表性工作

Representative work

三、依托平台团队

Relying on the platform

四、蠕铁切削技术

Cutting Technology of CGI

一、Personal information

张振宇，大连理工大学机械工程学院，精密/超精密加工

1. 长江特聘教授

Distinguished Professor of Chang Jiang Scholars

2. 教育部首届青年长江学者

Young Scholar of Chang Jiang Scholars

3. 国家优秀青年科学基金

Excellent Young Scientists Fund of NSFC

4. 国家科技进步一等奖(创新团队)(10/15)

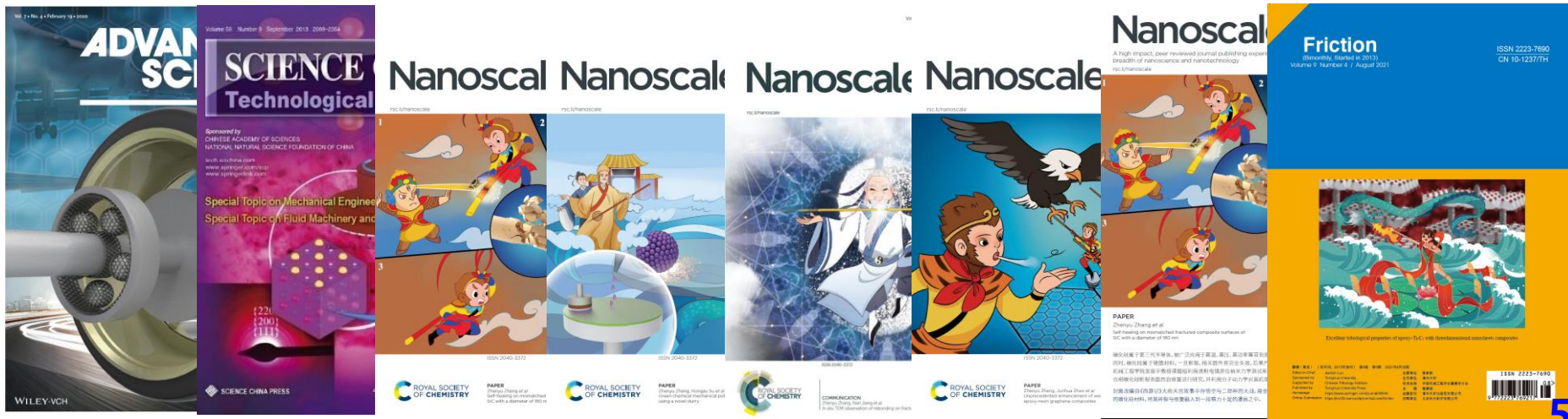
First Prize of National Science and Technology Progress Award (Creative Team)

二、Representative work



二、Representative work

1. Grinding-Science China (1篇封面、2篇高被引)
2. Polishing-Appl. Surf. Sci. (1篇封面、2篇高被引)
3. Application of green polishing -Adv. Sci. (1篇封面、1篇高被引)
4. Damage- Nanoscale (3篇封面) , ACS Nano, Nano Letters



三、Relying on the platform

辽宁重大装备制造国家级协同创新中心

精密与特种加工教育部重点实验室 (2012和2018年教育部评估工程领域35个教育部重点实验室两次排名均第一)

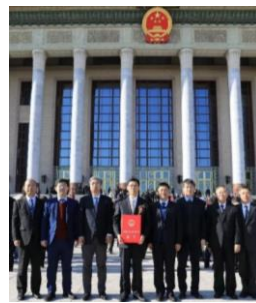
NO.	Award winning projects	Award grade	Time
1	硬脆材料复杂曲面零件精密制造技术与装备	国家技术发明一等奖	2008
2	高性能碳纤维复合材料构件高质高效加工技术与装备	国家技术发明一等奖	2017
3	大连理工大学高性能精密制造创新团队	国家科技进步一等奖	2019



郭东明院士在人民大会堂
领取国家技术发明一等奖



贾振元院士在人民大会堂
领取国家技术发明一等奖



国家科技进步一等奖(2019
年度唯一的创新团队奖)

四、Cutting Technology of CGI

蠕墨铸铁加工面临的挑战：刀具磨损过快，加工成本高、加工效率低以及加工质量不稳定。

Change of cutting CGI: fast tool wear, high cost, low efficiency and unstable quality.

1

成本高

与灰铁材料相比，刀具寿命降低约**20%~80%**

Tool life decreases about 20%~80% Compared with GCI

2

效率低

加工效率为灰铁的**50%~70%**

The processing efficiency is 50%~70% of gray iron

3

质量不稳定

孔径缩小、粗糙度超差

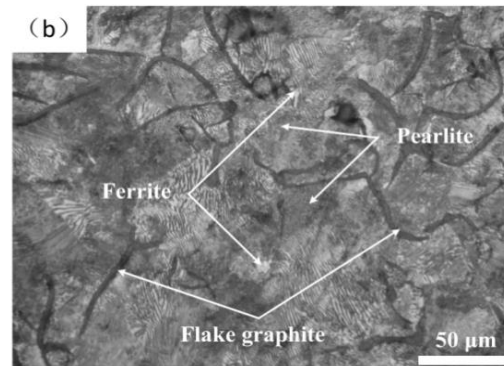
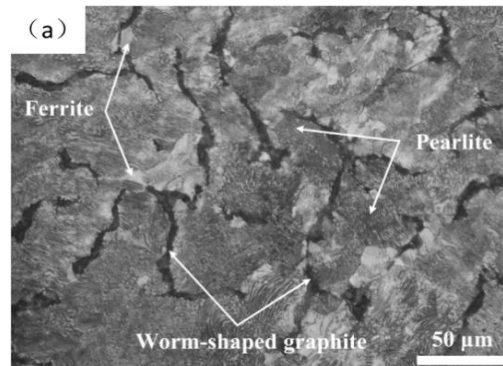
Diameter reduced and roughness out of tolerance

在保障加工质量的前提下，提高加工蠕墨铸铁刀具寿命，降低加工成本，实现蠕墨铸铁高效、低成本生产，从而保障国产发动机在国际市场的竞争力。

四、Cutting Technology of CGI

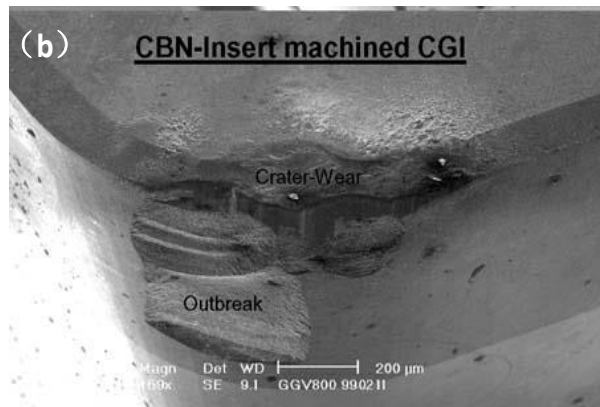
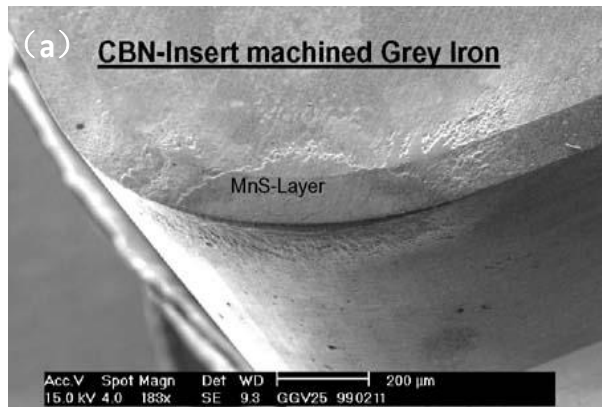
蠕墨铸铁难加工的原因:

- 1、材料性能好 Better material property
- 2、缺少S元素 Lack of S
- 3、导热性能差 Poor thermal conductivity



金相图: (a) CGI-450和 (b) GCI-280

Microstructure of (a) CGI and (b) GCI after corrosion by picric acid.



刀具磨损后SEM图像: (a) 加工GCI刀具; (b) 加工CGI刀具

SEM images after tool wear : (a) machining GCI tool; (b) machining CGI tool

4.1 Research conditions and equipment



CNC lathe-HTC3650



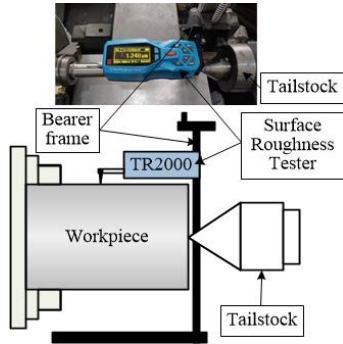
Fotric-280



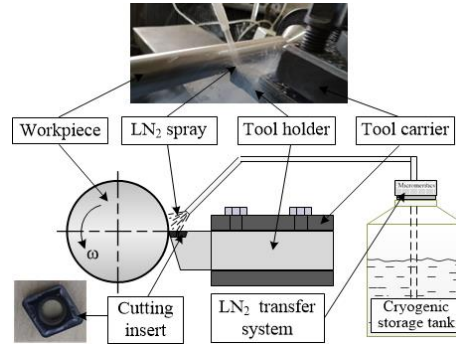
Microscope-GP300C



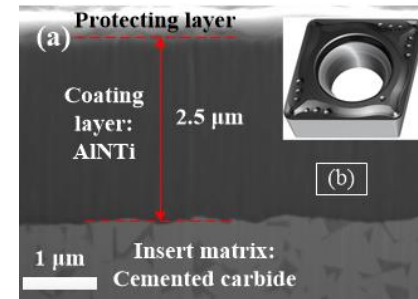
SEM and EDS



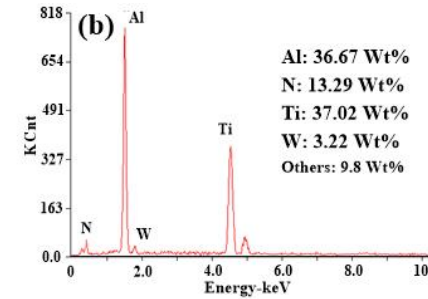
Roughness tester-
TR2000



Cryogenic cooling
processing



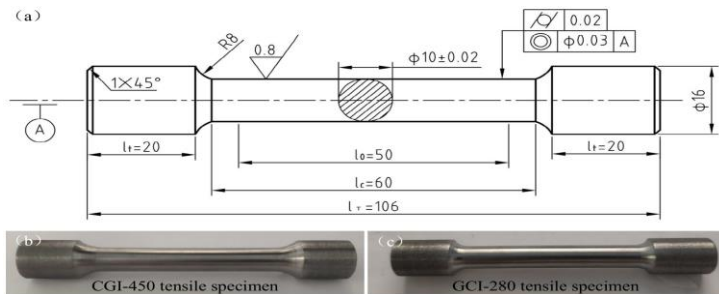
Tool and tool coating



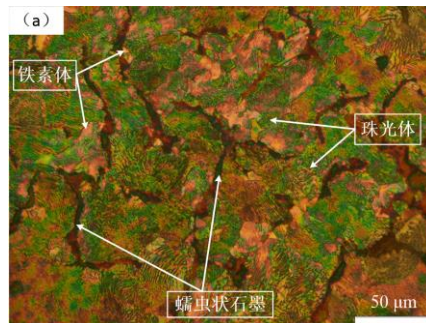
4.2 Properties of CGI

从材料布氏硬度、热导系数、拉伸强度、压缩强度、金相组织、蠕化率评级等材料性能角度对所给材料CGI-450和GCI-280进行实验测定与评定分析。

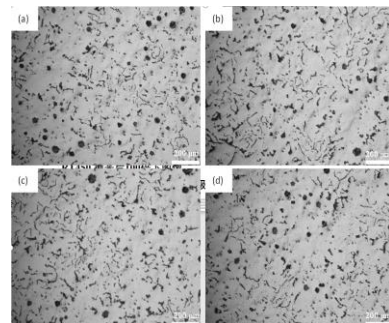
性能	RT450	HT280
布氏硬度/ HBW	189-204	191-202
热导率/ W/mK	36.28	46.26
热扩散率/ mm ² /s	10.48	12.93
比热/ J/g•K	0.471	0.493
抗拉强度Rm/ Mpa	440.4	246.7
伸长率A / %	2.73	0.73
抗压强度/ MPa	1079.4	828.1
压缩率/ %	32.2	19.5
金相组织	珠光体、铁素体	珠光体、铁素体
蠕化率分级	蠕90	--
珠光体数量分级	珠85	--



Tensile specimens



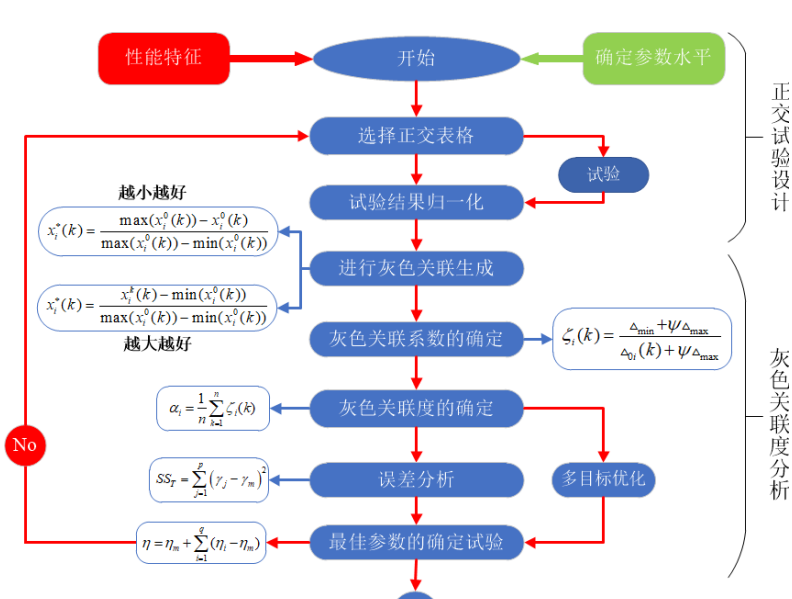
Metallographic



Vermicularity

CGI的热导率是GCI的78.4%，CGI较差的散热效率是影响其加工性能的主要因素之一。

4.3 Multi-objective optimization



1, Normalization values

$$\chi_i(k) = \frac{\max \chi_i^0(k) - \chi_i^0(k)}{\max \chi_i^0(k) - \min \chi_i^0(k)}$$

(the-smaller-the-better)

$$\chi_i(k) = \frac{\chi_i^0(k) - \min \chi_i^0(k)}{\max \chi_i^0(k) - \min \chi_i^0(k)}$$

(the-larger-the-better)

2, Distance Matrix

$$\Delta_{0i}(k) = |\chi_0(k) - \chi_i(k)|$$

3, Grey Relational Coefficient

$$\xi_i(k) = \frac{\Delta_{\min} + \xi \Delta_{\max}}{\Delta_{0i}(k) + \xi \Delta_{\max}}$$

$$\Delta_{\min} = \min_j \min_k |\square_{0i}(k)|$$

$$\Delta_{\max} = \max_j \max_k |\square_{0i}(k)|$$

4, Grey relational grade

$$\gamma_i = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \xi_i(k)$$

5, Analysis of Variance

$$SSQ_{\text{total}} = \sum (X - GM)^2; \quad SSQ_{\text{error}} = SSQ_{\text{total}} - SSQ_{\text{condition}}$$

$$SSQ_{\text{condition}} = n_1 (M_1 - GM)^2 + n_2 (M_2 - GM)^2 + \dots + n_k (M_k - GM)^2$$

$$MSB = SSQ_{\text{condition}} / \text{dfn}; \quad MSE = SSQ_{\text{error}} / \text{dfd}$$

$$F = MSB / MSE; \quad PCR = 1 / (MS_{Vc} + MS_f + MS_{ap} + MS_{\text{error}})$$

大连理工大学

正交试验结果分析软件

开始计算

关闭软件

4.4 Process optimization

Test parameters and levels

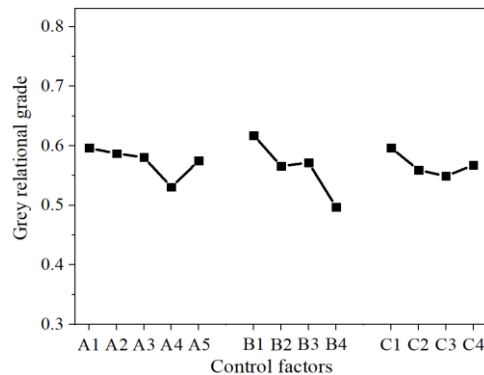
NO.	Process	Levels				
		1	2	3	4	5
A	Vc/ m/min	100	150	200	250	300
B	f/ mm/r	0.05	0.1	0.15	0.2	--
C	a _p / mm	0.1	0.15	0.2	0.25	--

ANOVA results

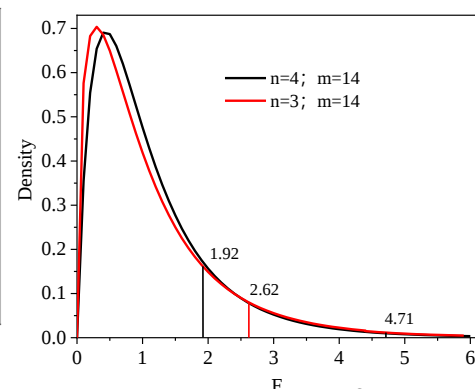
Process	DF	SSQ	MS	F	PCR/%
Vc	4	0.0325	0.0081	2.61	25.5
f	3	0.0439	0.0146	4.71	46.0
a _p	3	0.0179	0.0060	1.94	18.7
Error	14	0.0435	0.0031		9.8
Total	24	0.1378			

Response table for grey relational grade

NO.	Process	Levels				
		1	2	3	4	5
A	Vc/ m/min	0.596	0.587	0.58	0.53	0.575
B	f/ mm/r	0.618	0.566	0.572	0.497	
C	a _p / mm	0.597	0.559	0.549	0.568	



Response graph for the grey relational grade

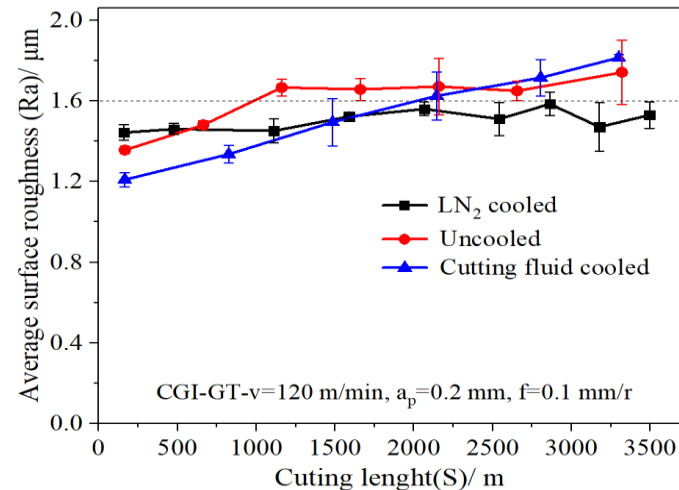
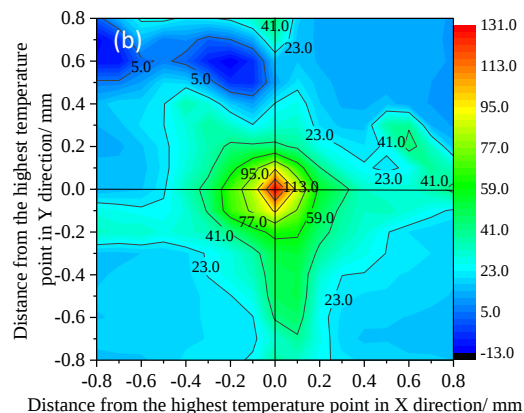
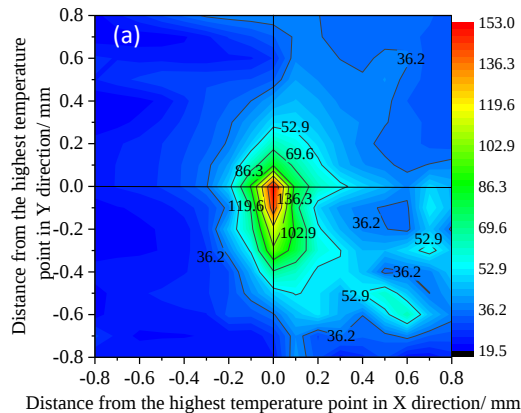


Distribution of F

考虑加工后Ra、切削温度和加工效率下，优化工艺参数组合 (A1, B1, C1) ，即Vc=100 m/min, f=0.05 mm/r, a_p=0.1 mm。

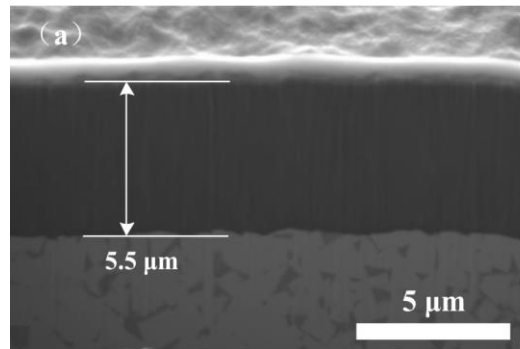
4.5 Cryogenic cooling cutting CGI

NO.	Material	Cooling method	Process	Size
1	CGI	Uncooled	$v = 120 \text{ m/min}$ $f = 0.1 \text{ mm/r}$ $a_p = 0.2 \text{ mm}$ $\kappa_r = 95^\circ$	L=220 mm; D0=28 mm
2	CGI	Cutting fluid		
3	CGI	LN ₂ cooled		

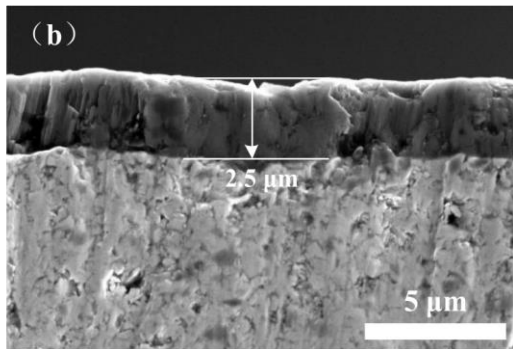


研发了高性能蠕铁发动机缸体液氮喷射加工新方法及装备，应用于潍柴动力股份有限公司，实现了传统刀具寿命提升2.3倍的效果。液氮冷却可以有效增大温度扩散，减少工件和刀尖的温度积累。

4.6 Cryogenic cooling cutting CGI

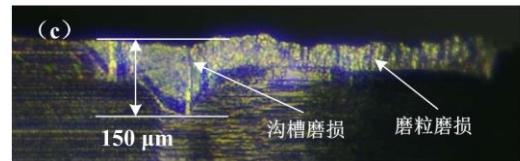


(a) Self-developed tool

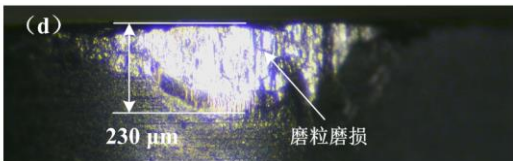


(b) Commercial tool

Tool coating

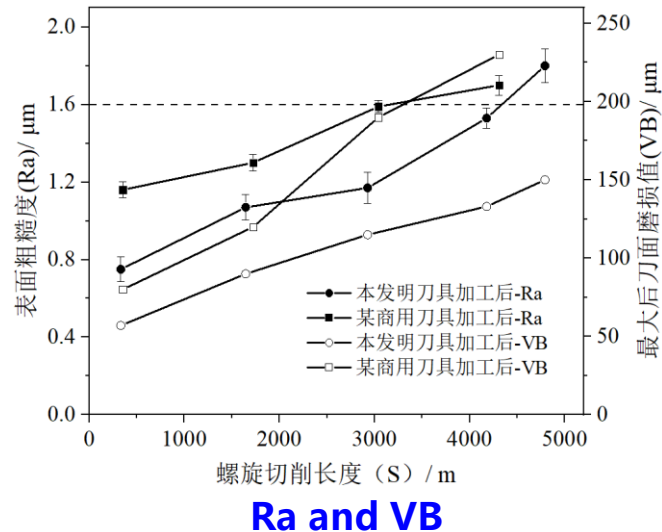


(c) Self-developed tool



(d) Commercial tool

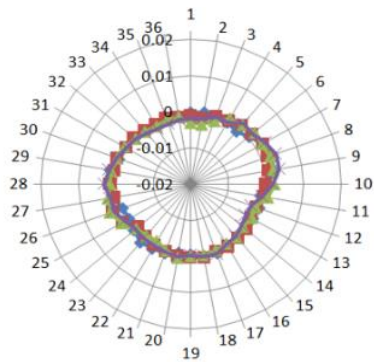
Tool wear after cutting CGI



研发了两种新型高性能蠕铁发动机缸体切削新刀具，寿命达到国外进口刀具的1.3倍，价格是国外刀具的1/2，解决了高性能蠕铁发动机传统刀具磨损过快。

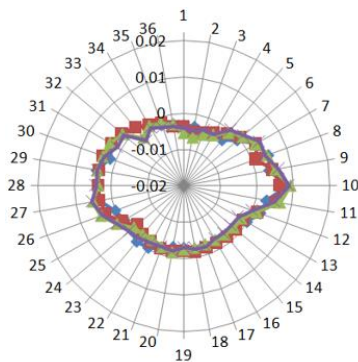
五、Secondary Assembly Process

曲轴孔二次把合面临的挑战：在对曲轴孔进行精镗加工前，需将曲轴箱和气缸体使用螺栓把紧；镗孔加工后，将螺栓放松后再进行二次把合后，会引起**曲轴孔失圆**、**接合面错位**。二次把合变形问题普遍存在，特别是曲轴箱结构，可能导致主轴瓦局部应力集中，进而引起主轴瓦疲劳点蚀等问题；目前，引起曲轴孔变形的**结构原因**和**工艺原因**尚不清楚。

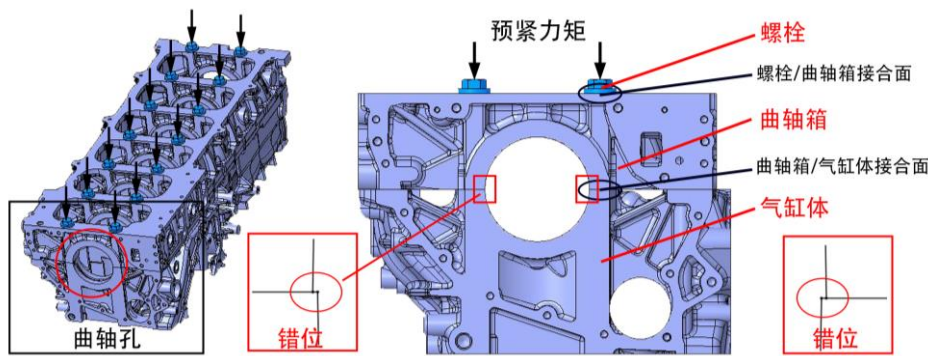


二次把合前

Before and after secondary assembly process



二次把合后

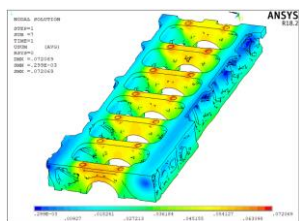


接合面错位变形

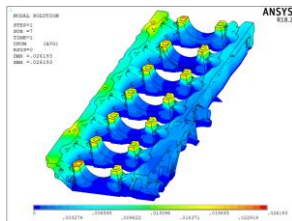
Dislocation and deformation of joint surface

5.1 Finite Element Process Simulation

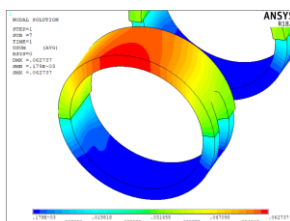
- **有限元仿真云图：**建立柴油发动机曲轴孔结构有限元仿真模型，定量分析二次把合变形的结构原因。曲轴箱刚度低于气缸体，曲轴箱变形量大于气缸体，刚度差异导致接合面错位变形。
- **节点位移向量图：**曲轴孔螺栓预紧力的作用从预紧截面处传递至螺栓头部，通过螺栓头与曲轴箱的面接触将力的作用传递至曲轴箱与气缸体的接合面处。由于曲轴箱和气缸体刚度不同，且螺栓头根部应力集中，因此曲轴箱和气缸体变形量不同，进而发生轴承孔失圆、接合面错位。



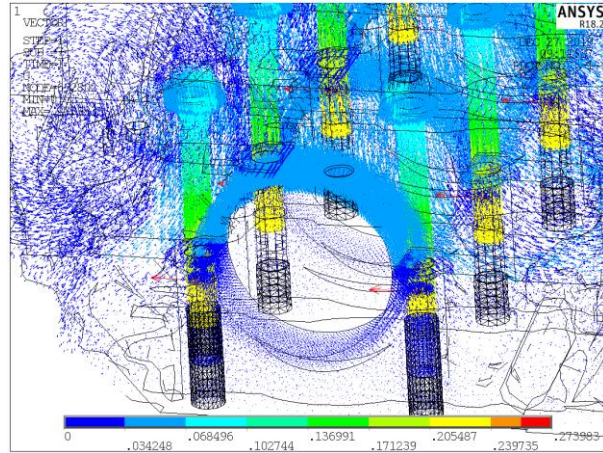
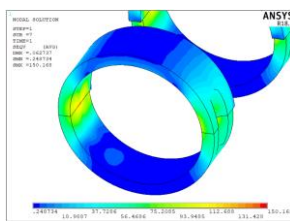
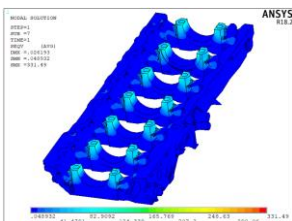
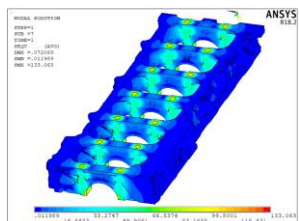
曲轴箱
Crankcase



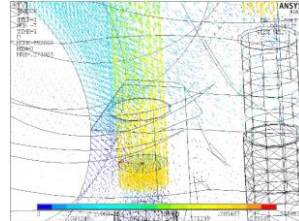
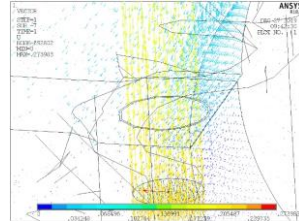
气缸体
Cylinder block



曲轴孔
Bearing bore



节点位移向量图
Vectogram of node displacement



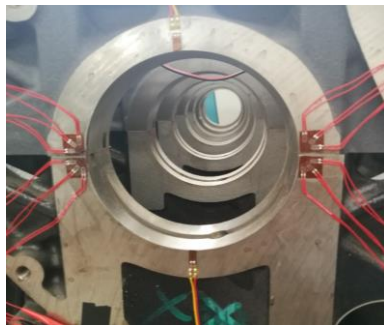
5.2 Structural Mechanics Analysis

- **应变测量**：在接合面两侧粘贴应变花，测量应变并计算**主应力**的大小和方向。曲轴孔两侧相邻节点的主应力的方向在水平**方向相反**，接合面两侧运动趋势相反，进而导致**错位变形**。
- **线激光轮廓测量**：计算不同工况之间接合面错位量的差值，绘制轮廓高度曲线，测量工艺过程中的错位变形量；测量结果与仿真吻合，验证了仿真模型的有效性。
- **错位变形结构原因**：曲轴箱**刚度**低于气缸体，导致曲轴箱变形量大于气缸体，**水平方向位移量不同**导致接合面处发生发生错位变形，计算不同工艺条件下的错位变形量；测量接合面相邻节点应变大小和方向，相邻节点主应力方向相反导致位移方向相反，引起导致错位变形。



应变测量

Strain measurement



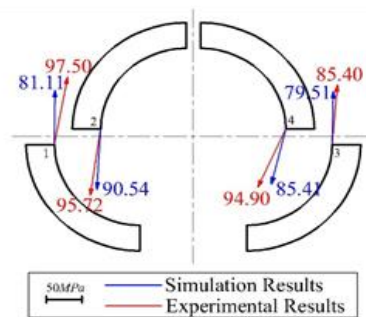
应变花贴片

Strain rosette



线激光轮廓测量

Line laser measurement

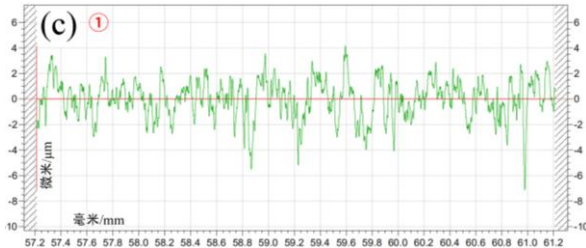
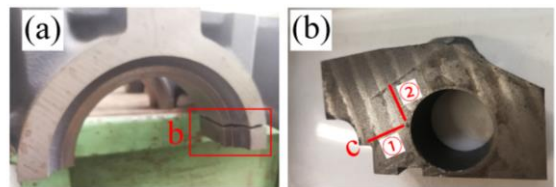


主应力计算

Principal stress

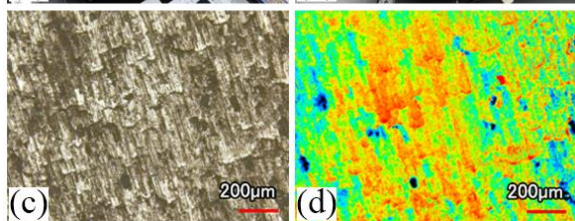
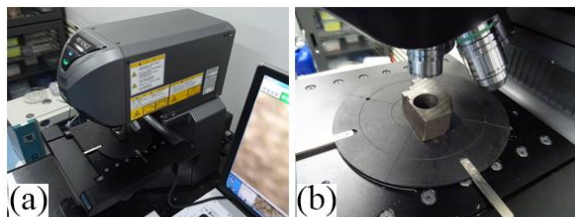
5.3 Tribological Analysis of Interface

- **表面形貌参数测量**：测量表面形貌高度，**结构函数法**计算分型维数D、特征尺度系数G，增大轮廓幅值对接合面重新建模，发现摩擦系数每增加0.03，两侧错位量减小约8.82%和16.37%。
- **面接触对分析**：接合面**接触压力**随着预紧力矩增大而增大，应力集中于接合面上螺栓孔靠近曲轴孔内壁的一侧，最大接触应力为151.03MPa；随着**预紧力矩**增大，接合面**滑动区域**减小，**挤压变形区域**增大，**滑移距离**随预紧力矩增大而增大。



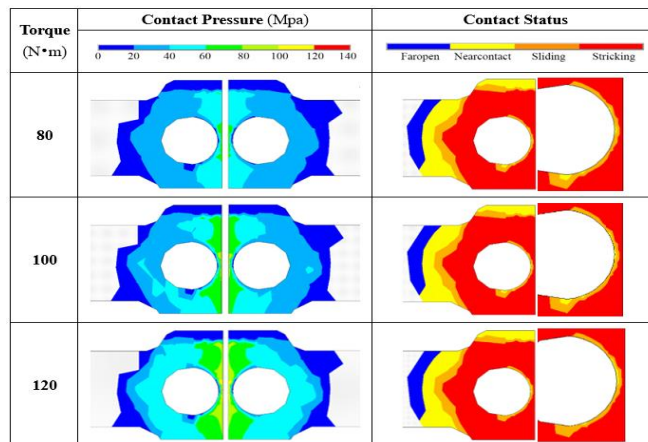
表面形貌测量

Topography measurement



性状参数测量

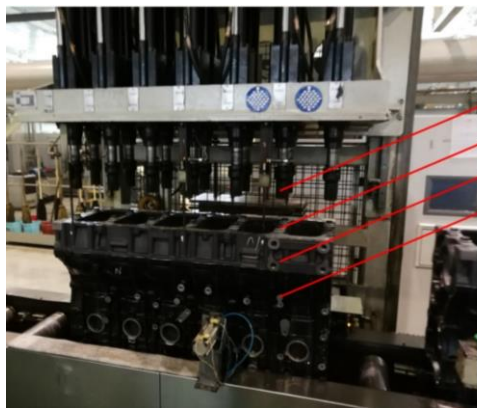
Character measurement



面接触分析

Contact pressure and status

5.4 Technological Causes Analysis

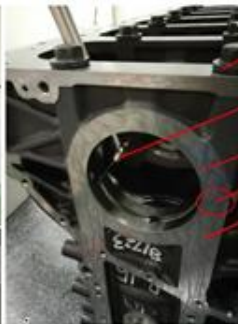


阿特拉斯拧紧机

螺栓

曲轴箱

气缸体



螺栓

测量探头

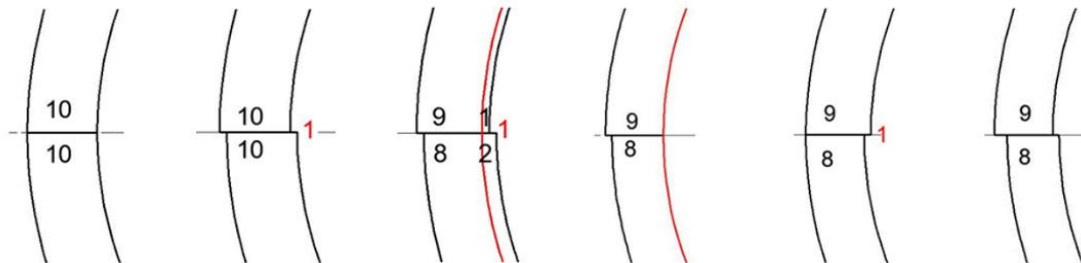
曲轴箱

接合面

气缸体

➤ **工艺试验：**测量不同工况下曲轴孔圆周节点三坐标，最小二乘法拟合圆，计算圆度误差。

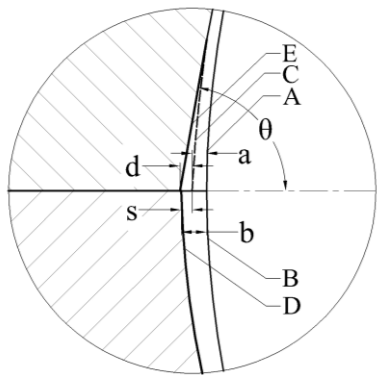
➤ **错位变形工艺原因：**初始状态曲轴箱和气缸体曲轴孔对齐，接合面无错位。螺栓预紧后，曲轴孔变扁，接合面**错位变形**。铣削加工过程**将失圆的曲轴孔加工为圆形**，曲轴箱和气缸体去除的材料不同。镗孔加工后，螺栓放松，变形回弹，**材料去除量不同**导致曲轴孔无法恢复成圆形。由于接合面状态改变，导致螺栓二次把紧后，错位变形**无法恢复到接合面对齐的状态**。



初始未错位 → 螺栓把紧 → 镗孔加工 → 镗孔加工后 → 螺栓放松 → 二次把紧

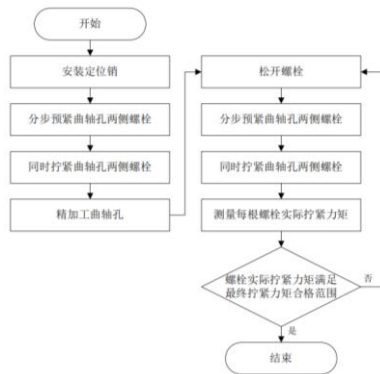
5.5 Structural and Technological Improvement Plans

- **结构改进方案：**通过在曲轴箱和气缸体的接合面处设置**倒角结构**，使螺栓拧紧造成的接合面错位变形发生在**倒角范围内**，防止错位变形产生的阶梯形结构对轴瓦造成**磨损**。
- **工艺改进方案：**将传统的曲轴孔两侧螺栓同时预紧改为**曲轴孔两侧螺栓分步预紧后同时拧紧并施加转角**。拧紧螺栓后对曲轴孔进行镗孔加工。精加工后采用相同的分步预紧装配方法，拧紧后检验每个螺栓的实际拧紧力矩。原始工艺和改进工艺的圆度误差对比，孔前五孔圆度误差平均**改善45.46%**，七孔平均改善**31.90%**。



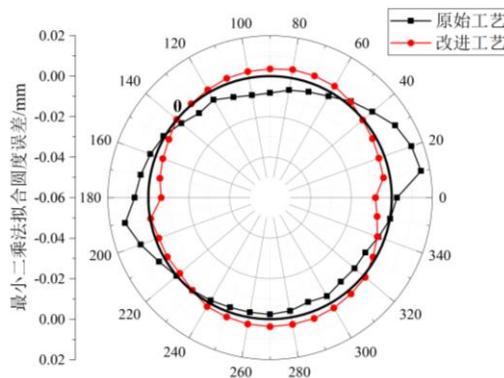
结构改进方案

Structural improvement plan



工艺改进方案

Technological improvement plan



改进结果对比

Improved result

Conclusion

- 1、基于灰色关联分析和正交试验，优化了CGI加工工艺；
The process for cutting CGI was optimized;
- 2、研发超低温冷却加工装置，刀具寿命提升2.3倍；
Developed cryogenic cooling cutting device;
- 3、研制新型刀具，刀具寿命提升30%，成本降低一半；
A new type of cutting tool for CGI is developed;
- 4、建立有限元分析模型，定量计算了二次把合过程错位变形量，分析应力诱导变形机理。
Stress-induced deformation trajectory is analyzed systematically.
- 5、二次把合过程中，由于曲轴箱和气缸体存在刚度差异，导致接合面发生错位变形。
Stiffness difference between cylinder block and crankcase leads to the deformation of interface.
- 6、镗孔加工将失圆的曲轴孔加工成圆形，两侧材料去除量不同，导致曲轴孔失圆无法恢复。
The different materials removed between from crankcase and cylinder block lead to the bearing bores cannot be restored to a round shape.
- 7、上述成果已经在潍柴应用。

**感谢各位专家聆听，
欢迎提出宝贵建议！**