

先进快速无模化制造技术在 柴油发动机新产品开发中的应用*

吕登红, 陈金源, 周梁坚,

广西玉柴机器股份有限公司, 广西 玉林 537005

摘要: 先进快速无模化制造技术是发动机等领域关键部件急需的快速精密制造技术, 本文简述了该技术在柴油发动机领域实施的可行性及必要性, 结合铸造企业在柴油发动机核心部件制造的实例, 说明该技术在节能、降耗、减排等方面均可取得显著成效。该技术的使用可提高国内企业的核心竞争能力, 对促进机械装备制造行业节能减排和可持续发展具有重要战略意义。

关键词: 先进快速无模化制造技术; 柴油发动机; 核心部件; 节能减排

Application of Advanced Rapid Manufacturing Technology without Pattern on New Product Development of Diesel Engine

LV Denghong, CHEN Jinyuan, ZHOU Liangjian

Guangxi Yuchai Machinery Co., Ltd, YuLin 537005

Abstract: The advanced rapid manufacturing technology without pattern, short for ARMTWP, as a rapid and precision manufacturing technology, is needed in the field of manufacturing of engine urgently. The necessity and feasibility of ARMTWP's application in diesel engine production is analyzed. It has achieved remarkable effect of energy conservation, consumption reduction and emission reduction in the cases of diesel engine core parts manufacturing foundry enterprises. ARMTWP can enhance the core competitiveness of domestic enterprises. There is an important strategic significance to promote energy saving & emission reduction and sustainable development in the industry of machinery and equipment manufacturing.

Keywords: advanced rapid manufacturing technology without pattern; diesel engine; core parts; energy saving & emission reduction

1 引言

目前柴油发动机生产企业之间竞争非常激烈, 面对市场竞争和客户的不同需求, 企业必须通过技

术创新和降低成本以提高自身的竞争力。特别是如今我国大幅度提高了柴油发动机的排放标准, 更要求柴油发动机生产企业具备很强的技术研发能力和创新能力。而提高企业的竞争力

就需要不断压缩产品的开发成本并提高开发效率, 故此成本和效率成为了企业关注的焦点。

传统柴油发动机铸造生产中模具设计及制造的时间长, 模具开发费用

* 基金项目: 高档数控机床与基础制造装备(科技重大专项), Major high-end CNC machine tools and basic manufacturing equipment special science and technology Foundation. (项目编号2012ZX04007011);

占新品整机开发费用很大的比例。因此，在柴油发动机开发阶段，取消或降低模具的投资成本，对提高新产品的开发效率具有非常重要的作用。

2 先进快速无模化制造技术的简述

先进快速无模化制造技术是一种全新的基于三维CAD模型驱动的柔性化、数字化、精密化、绿色化快速制造方法，也是将“数字化无模铸造精

密成形”和“激光烧结快速成形”两种新技术有机结合的复合创新技术，这种技术省去了模样/模具制造环节，缩短了工艺流程，提高了铸件制造工艺的灵活性和可操作性，实现了柴油发动机等复杂部件的快速制造，缩短了新产品的开发时间，降低了产品开发费用，提高了市场的竞争力。因此该技术特别适用于新产品开发试制及技术工艺攻关试验。快速无模化制造砂型铸造工艺流程见图1：

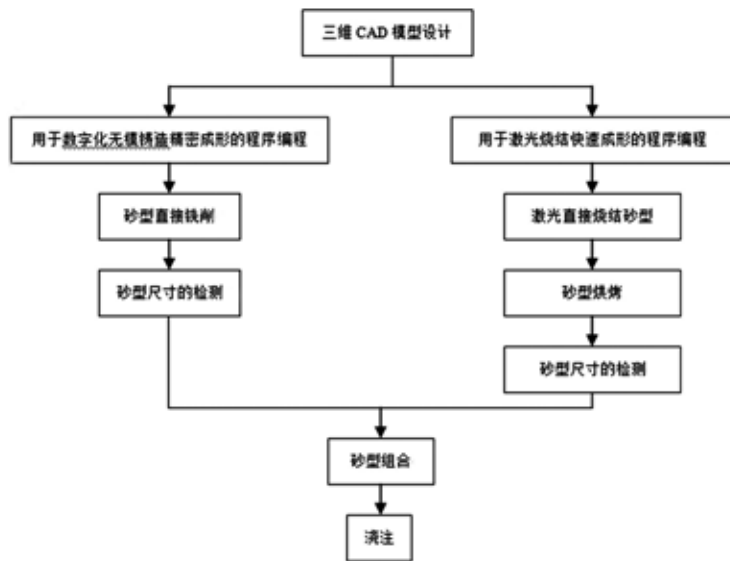


图1 快速无模化制造砂型铸造工艺流程图

先进快速无模化制造技术所包括的数字化无模铸造精密成形技术与激光烧结快速成形技术是相辅相成的，把这两种技术灵活的结合应用于新产品的开发，会取得显著成效。两种技术的应用一般遵循以下原则：①对于大型复杂的铸件及尺寸精度要求很高的铸件，用组芯的方法完成，并且砂芯容易分型时采用数字化无模铸造精密成形技术制造砂型。②对于零件内部几乎无法用组芯的方法完成、所有管路集中于一个芯体、砂芯无法或难以分型、砂芯壁厚偏薄且易断裂时采用激光烧结快速成形技术制造砂型。

3 先进快速无模化制造技术在柴油发动机新产品开发中应用的分析

3.1 先进快速无模化制造技术的优越性

在铸造生产中，先进快速无模化制造技术的成功研发对传统铸造工艺技术冲击很大，给传统铸造技术带来了工艺革新。其与传统的铸造技术相比，具有无与伦比的优势。两种技术的具体应用情况比较如表1。

表1 先进快速无模化制造技术与传统铸造技术对比

项目	先进快速无模化制造技术	传统铸造工艺技术
模型设计	RP模型设计简单，需要约3~6天	模具设计复杂，需要20~30天
铸件制造时间	约15~20天	约120天
材料费用	低30%~50% (与传统技术比)	高
工人技能要求	普通的技能培训，约14天左右，可进行操作。	专业技能要求高，一般要有3年以上的工作经验，才能独立工作。
工艺适用性	① 无需拔模斜度，减轻铸件重量。 ② 可以制造任何形状的铸件，尤其是形状复杂的精度要求高的自由曲面铸件，能保证精度。 ③ 可以实现一体化铸造，减少简化工序，保证铸件的尺寸精度。	① 需要拔模斜度。 ② 对形状复杂的自由曲面铸件的精度很难保证。 ③ 复杂铸件只能采用多箱造型，工序增加，铸件尺寸产生偏差，机加工工作量增大。
制造管理特性	① 铸件有问题易查找原因。 ② 产品设计有问题时修改三维模型即可进行砂型制造。	① 铸件有问题很难确定是设计问题或模具问题。 ② 产品设计有问题时需先修改三维模型，再进行模具更改，且模具更改花费时间很长，成本高。

由表1可知：使用先进快速制造技术可使设计简化，制造时间短，成本低，且容易满足顾客的需求，在市场多元化竞争中，具有很强的竞争力。

3.2 先进快速无模化制造技术应用于柴油发动机新产品试制的可行性及必要性

(1) 提高新产品试制的成效

在产品样机开发试制阶段，如使用传统的铸造工艺技术，必须要制作大量的模具，而且在验证过程中要不断修改模具。故此开发成本高，且开发时间长，新产品推向市场的速度缓慢，无竞争力。若使用先进快速制造技术，无需制造模具，试制最复杂的核心部件，时间最长不超20天。该技术的应用不仅节省时间和降低成本，重要的是可抢占市场的先机。

(2) 保证超大型铸件尺寸的准确性

大型铸件采用传统的铸造工艺技术时工序多，制造过程各环节都会存在操作误差，造成砂芯形状变形、弯曲、尺寸偏差大，从而导致铸件精度差。而使用先进快速制造技术，简化了铸造工艺流程工艺，制造出来的砂芯形状及尺寸精度高，进而可保证铸件的精确度。

(3) 节能减排环保

节能、降耗、减少污染是现在企业的迫切要求，先进无模制造技术所需材料成本低，又无需做模具，节省大量人力物力，减少了粉尘排放，改变了传统砂型铸造脏乱差局面，是属于非常环保的绿色制造技术。

4 先进快速制造技术在柴油发动机核心部件开发中具体应用案例

以下简要介绍柴油机发动机核心部件等运用先进快速制造技术进行试制的成功案例。



图2 机体砂模实物图

(1) 某大型发动机的机体

某大型发动机机体约600kg，所有的芯和外模全部采用无模制造技术完成，一次开发成功，从RP工艺模型设计到铸件成品只需30天，如图2-3。

(2) 发动机的缸盖

采取数字化无模铸造精密成形技术+激光烧结的方式，1型2件，制造时间15天。所得铸件壁厚均匀，内腔无烧结、无粘砂等铸造缺陷，如图4。



图3 机体成品实物图

(3) 某大型船机气缸体铸件

全部采取数字化无模铸造精密成形技术，铸件重量达3.5吨，砂型外形尺寸为3360mm(长)×2960mm(宽)×1600mm(高)，所得铸件尺寸误差在±0.3mm以内，如图5-8。



图4 缸盖铸件实物剖视图



图5 铸件定位基准砂芯图



图6 铸件侧面砂芯图



图7 砂型组装图



图8 铸件实物图



图9 某机型冷却器盖砂型



图10 某机型冷却器盖清理前铸件实物图

(下转35页)

后波刃锥度铣刀优化设计技术研究

谢鸿, 贇庆芳, 王强, 刘光耀

东方电气集团东方汽轮机有限公司, 四川德阳, 618000

摘要: 基于AdvantEdge仿真软件, 利用二维正交切削数值模拟对合金锥度铣刀几何角度进行优化计算, 获得最佳实际前角、法向前角、径向前角、刃口半径以及螺旋角等刀具制造参数。试验证明, 运用切削过程数值模拟设计的后波刃锥度铣刀切削性能优异, 综合性能达到进口SECO 同类刀具水平, 刀具抗崩刃性能具有明显改善, 具备大批量推广运用的条件。

关键词: 锥度铣刀; 后波刃; 优化

Research on the Optimization Design of Taper Milling Cutter with Waved Edges

XIE Hong, YUN Qingfang, WANG Qiang, LIU Guangyao

Dong Fang Turbine CO. LTD, Deyang Sichuan, 618000

Abstract: Based on the AdvantEdge simulation software, the best processing parameters such as actual rake angle, normal rake angle, radial rake angle, radius of edge and helix angle have been obtained by using two-dimension orthogonal numerical cutting simulation of geometric angle of taper milling cutter. The results from the cutting experiments show: the cutting performance of wave edge taper milling cutter which was manufactured with this method has achieved the same level as similar imported milling cutter like SECO, and the tool edge chipping resistance has been significantly improved, so it possesses the conditions for application of mass promotion.

Keywords: taper milling cutter; waved edges; optimization design

1 前言

硬质合金化是高效刀具的发展趋势, 已经成为国内外刀具行业的共识。硬质合金转子轮槽锥度波形刃铣刀在美国、德国、日本等发达国家已经取得了广泛的运用, 并取得了很大的成功。

在推进“转子轮槽铣刀的整体硬质合金化”的系列化应用过程中, 遇到硬质合金锥度铣刀易崩刃问题, 严重影响加工过程中刀具和产品的安全

性、可靠性, 成为限制硬质合金波形刃锥度铣刀全面推广的瓶颈。仅D20小机上采用了少量的硬质合金波形刃锥度铣刀, 其余大型机组出于加工安全性考虑, 仍普遍采用高速钢锥度铣刀。为此, 解决硬质合金波形刃铣刀的抗崩刃问题, 增加刀具耐用度, 提高切削过程中的安全性、可靠性, 无论从提高加工效率和节约成本方面考虑, 还是从系列化推广轮槽铣刀的硬质合金化考虑都是一项非常具有实际价值的课题。

本文基于AdvantEdge仿真软件, 利用二维正交切削数值模拟对600MW常规机组轮槽加工用合金锥度铣刀几何参数进行优化计算, 力求从原理上解决该类刀具的设计问题, 达到增强刀具抗崩刃性能, 提高刀具的耐用度, 改善刀具切削过程中的安全性和可靠性, 提高轮槽铣削效率, 减少刀具费用, 为实现该类刀具系列化和全面硬质合金化推广奠定技术支撑。

2 刀具最佳几何角度数值模拟计算

2.1 多指标约束正交试验设计

刀具设计不能将几何参数单独进行考虑,而是应该与工件材料、工艺参数相互匹配,才能发挥刀具的最佳切削性能。任何孤立设计刀具几何参数的方法都是不可取的。切削刃口是否安全可靠,由刀具基体材料性能、刃口几何参数、切削用量共同决定。单因素分析法不能确定几何参数的最优化方案,因为当一个因素发生变化时,其他因素也会同时发生变化,各因素彼此之间相互影响,彼此约束。为此,需要

策划正交试验进行精细化定量设计,确定工件材料、几何参数与切削参数最佳匹配方案。

刀具设计本质上是一个多指标约束优化问题。一款性能优秀的粗加工刀具,必须保证在切削过程中同时满足以下五个指标:①刃口应力最小;②切削温度最低;③主切削力最小;④金属去除率最大;⑤切削过程稳定。

各因素的大致区间,见表1:

表1 各因素取值区间

因素	取值区间
实际前角	20°~40°
实际刃口半径	0.025mm~0.035mm
实际单齿进给量	0.1mm/r~0.15mm/r
切削速度	60m/min~100m/min

根据以上各因素及其区间,创建因素-水平表,见表2:

表2 几何参数与切削参数组合的因素-水平表

序号	实际前角 α	实际刃口半径r	实际单齿进给量fz	切削速度v
1	40°	0.025mm	0.1mm/r	60m/min
2	32°	0.028 mm	0.12 mm/r	75 m/min
3	26°	0.032 mm	0.135 mm/r	85 m/min
4	20°	0.035 mm	0.15 mm/r	100 m/min

表3 锥度铣刀大直径位置(上层)正交试验设计表 $L_{16}(4^5)$

序号	α	r	fz	v	空列
1	(1) 40	(1) 0.025	(1) 0.1	(1) 60	(1)
2	(1) 40	(2) 0.028	(2) 0.12	(2) 75	(2)
3	(1) 40	(3) 0.032	(3) 0.135	(3) 85	(3)
4	(1) 40	(4) 0.035	(4) 0.15	(4) 100	(4)
5	(2) 32	(1) 0.025	(2) 0.12	(3) 85	(4)
6	(2) 32	(2) 0.028	(1) 0.1	(4) 100	(3)
7	(2) 32	(3) 0.032	(4) 0.15	(1) 60	(2)
8	(2) 32	(4) 0.035	(3) 0.135	(2) 75	(1)
9	(3) 26	(1) 0.025	(3) 0.135	(4) 100	(2)
10	(3) 26	(2) 0.028	(4) 0.15	(3) 85	(1)
11	(3) 26	(3) 0.032	(1) 0.1	(2) 75	(4)
12	(3) 26	(4) 0.035	(2) 0.12	(1) 60	(3)
13	(4) 20	(1) 0.025	(4) 0.15	(2) 75	(3)
14	(4) 20	(2) 0.028	(3) 0.135	(1) 60	(4)
15	(4) 20	(3) 0.032	(2) 0.12	(4) 100	(1)
16	(4) 20	(4) 0.035	(1) 0.1	(3) 85	(2)

表4 正交试验切削力、切削温度、刃口应力分析

序号	切削力			切削温度				刃口应力			
	FX	FY	MAX	前刀面	刃口	后刀面	MAX	前刀面	刃口	后刀面	MAX
1	275	80	275	481	476	426	476	2481	2318	2134	2481
2	317	89	317	555	545	504	555	2257	2189	2499	2499
3	352	103	352	614	577	529	614	2391	2222	2425	2425
4	383	108	383	681	629	580	681	1971	2174	2480	2480
5	343	115	343	606	556	527	606	1767	2037	2075	2075

(续表)

序号	切削力			切削温度				刃口应力			
	FX	FY	MAX	前刀面	刃口	后刀面	MAX	前刀面	刃口	后刀面	MAX
6	300	115	300	610	571	506	610	2026	2237	2134	2237
7	423	133	423	579	539	502	579	1815	2123	2120	2123
8	391	138	391	608	575	525	608	1939	1923	1886	1939
9	400	146	400	665	584	567	665	1511	1996	2039	2039
10	443	163	443	655	599	566	655	1703	1902	1732	1902
11	330	145	330	562	540	482	562	2077	2111	1897	2111
12	390	163	390	552	529	478	552	2100	2143	1728	2143
13	473	203	473	628	563	538	628	1436	1982	1642	1982
14	443	209	443	571	534	499	571	1708	1929	1561	1929
15	398	191	398	651	599	547	651	1633	1864	1784	1864
16	353	183	353	599	573	510	599	1819	1834	1691	1834

注: 为了保证计算速度, 统一把计算行程长度设置为2.5mm, 总行程设置为4mm, 数据提取为结束前一步距。

表5 正交试验评价指标

序号	评价指标				序号	评价指标			
	Max F	Max T	Max stress	金属去除率 (x103) $V=1000 \cdot fz \cdot v \cdot t \cdot ap$		Max F	Max T	Max stress	金属去除率 (x103) $V=1000 \cdot fz \cdot v \cdot t \cdot ap$
1	275	476	2481	6	9	400	665	2039	13.5
2	317	555	2499	9	10	443	655	1902	12.75
3	352	614	2425	11.475	11	330	562	2111	7.5
4	383	681	2480	15	12	390	552	2143	7.2
5	343	606	2075	10.2	13	473	628	1982	11.25
6	300	610	2237	10	14	443	571	1929	8.1
7	423	579	2123	9	15	398	651	1864	12
8	391	608	1939	10.125	16	353	599	1834	8.5

注: 取 $t=1\text{min}$; $ap=1$

表6 正交试验结果分析

评价指标		α	r	fz	v	空列
单元主切削力	K1	1327	1491	1258	1531	1507
	K2	1457	1503	1448	1511	1493
	K3	1563	1503	1586	1491	1515
	K4	1667	1517	1722	1481	1499
	k1	331.75	372.75	314.5	382.75	376.75
	k2	364.25	375.75	362	377.75	373.25
	k3	390.75	375.75	396.5	372.75	378.75
	k4	416.75	379.25	430.5	370.25	374.75
	极差R	85	6.5	116	12.5	5.5
	因素主→次	$fz \rightarrow \alpha \rightarrow v \rightarrow r$				
优方案	$\alpha(1) r(1) fz(1) v(4)$					

(续表)

评价指标		α	r	fz	v	空列
切削温度	K1	2326	2375	2247	2178	2390
	K2	2403	2391	2364	2353	2398
	K3	2434	2406	2458	2474	2404
	K4	2449	2440	2543	2607	2420
	k1	581.5	593.75	561.75	544.5	597.5
	k2	600.75	597.75	591	588.25	599.5
	k3	608.5	601.5	614.5	618.5	601
	k4	612.25	610	635.75	651.75	605
	极差R	30.75	16.25	74	107.25	7.5
	因素主→次	$v \rightarrow fz \rightarrow \alpha \rightarrow r$				
优方案	$\alpha(1)r(1)fz(1)v(1)$					
刃口应力	K1	9885	8577	8663	8676	8186
	K2	8374	8567	8581	8531	8495
	K3	8195	8523	8332	8236	8787
	K4	7609	8396	8487	8620	8595
	k1	2471.25	2144.25	2165.75	2169	2046.5
	k2	2093.5	2141.75	2145.25	2132.75	2123.75
	k3	2048.75	2130.75	2083	2059	2196.75
	k4	1902.25	2099	2121.75	2155	2148.75
	极差R	569	45.25	82.75	110	150.25
	因素主→次	$\alpha \rightarrow v \rightarrow fz \rightarrow r$				
优方案	$\alpha(1)r(1)fz(3)v(3)$					
金属去除率	K1	41.475	40.95	32	30.3	40.875
	K2	39.325	39.85	38.4	37.875	40
	K3	40.95	39.975	43.2	42.925	39.925
	K4	39.85	40.825	48	50.5	40.8
	k1	10.37	10.24	8	7.58	10.22
	k2	9.83	10.96	9.6	9.47	10
	k3	10.23	9.99	10.8	10.73	9.98
	k4	9.96	10.21	12	12.62	10.2
	极差R	0.54	0.97	4	5.04	0.24
	因素主→次	$v \rightarrow fz \rightarrow r \rightarrow \alpha$				
优方案	$\alpha(1)r(2)fz(4)v(4)$					

经过试验结果分析,见表3-6,可以确定每个指标的最优方案:

(1) 单元主切削力指标的最优方案是 $\alpha(1)r(1)fz(1)v(4)$;

(2) 切削温度指标的最优方案是 $\alpha(1)r(1)fz(1)v(1)$;

(3) 刃口应力指标的最优方案是 $\alpha(1)r(1)fz(3)v(3)$;

(4) 金属去除率指标的最优方案是 $\alpha(1)r(2)fz(4)v(4)$ 。

这4个方案不完全相同,对一个指标是好方案,而对另一个指标却不

定是好方案。如何找出对各个指标都较好的一个综合平衡方案呢?这正是下面要解决的问题。

对多指标正交试验而言,常见的分析方法有综合平衡法和综合评分法。这两种方法要对每个指标都单独进行分析,计算分析的工作量很大,而且还要结合专业知识和经验。由于每个人对各个指标的权重理解并不相同,不同的人有可能获得并不一致的方案,这是该方法的缺点。

本课题引入一种新的分析方法

“正交一矩阵分析法”^[1],该方法可以计算出影响试验结果的各因素各水平的权重,根据权重的大小能够快速得出最优方法以及影响因素的主次顺序,根据该分析法计算步骤,优化方案计算结果见式(1)。

根据以上结果可知,因素 α 的四水平对实验结果的影响权重分别为 $\alpha_1=0.0768, \alpha_2=0.0807, \alpha_3=0.08, \alpha_4=0.0819, \alpha_4$ 的权重最大;同理,因素r中 r_2 的权重最大;因素fz中 f_{21} 的权重最大;因素v中 v_4 的权重最大。由此可

以快速确定正交试验的最优方案为 α 主次顺序为:

(4) r (2) fz (1) v (4), 同时也可以得出各个因素对正交试验指标值影响的

fz \rightarrow α \rightarrow v \rightarrow r

最优方案的验证, 见表7-9。

表7 优化方案参数

序号	实际前角 α	实际刃口半径r	实际单齿进给量fz	切削速度v
1	40	0.025	0.1	100
2	40	0.025	0.1	60
3	40	0.025	0.135	85
4	40	0.028	0.15	100
5	20	0.028	0.1	100

表8 优化方案的切削力、切削温度、刃口应力分析

序号	切削力			切削温度				刃口应力			
	FX	FY	MAX	前刀面	刃口	后刀面	MAX	前刀面	刃口	后刀面	MAX
1	267	84	267	561	556	493	561	2668	1990	1944	2668
2	275	80	275	447	475	403	475	2501	2214	1732	2501
3	340	78	340	601	574	537	601	1828	2065	2233	2233
4	373	89	373	670	611	558	670	1916	1972	2293	2293
5	340	169	340	619	574	530	619	1614	1944	2091	2091

表9 优选方案的综合性能评价

序号	评价指标			
	Max F	Max T	Max stress	金属去除量 (x103) V=1000 · fz · v · t · ap
1	267	561	2668	10
2	275	475	2501	6
3	340	601	2233	11.475
4	373	670	2293	15
5	340	619	2091	10

综上所述, 根据正交-矩阵分析结果, 得出切削刃口最佳几何参数及匹配的切削参数为:

实际前角 20° , 实际刃口半径 0.028, 实际单齿进给量 0.1mm/r, 切削速度为 100m/min。

最优方案中刃口应力最小, 与其他方案相比较, 刃口抗崩刃性最好, 和正交-矩阵分析法得出的结论一致。另外, 必须明确, 在该分析方案中, 所有仿真分析方案都是基于二维正交切削模型或者说是车削模型得出的, 因此, 计算涉及参数都是对应车削模型的。

切削速度表征的是整个机床加工系统完全刚性条件下的极限车削速度, 而不是铣削速度。适用于实际生产的铣削速度则需要针对具体的机床加工系统通过切削试验予以调试。

2.2 螺旋角及结构方案优化设计

在刃口精细化设计分析中已经确定了刃口最佳几何参数, 也就确定了最佳实际前角。根据刀具角度计算关系^[2]。

实际前角计算公式:

$$\sin \gamma_{oe} = \sin^2 \lambda_s + \cos^2 \lambda_s \cdot \sin \gamma_n$$

法向前角与主剖面前角的计算公

$$\text{权重因子 } \omega = \begin{bmatrix} 0.0768 \\ 0.0807 \\ 0.08 \\ 0.0819 \\ 0.0155 \\ 0.0159 \\ 0.0153 \\ 0.0154 \\ 0.0855 \\ 0.0832 \\ 0.0825 \\ 0.0821 \\ 0.0665 \\ 0.0699 \\ 0.0725 \\ 0.0763 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \alpha_1 \\ \alpha_2 \\ \alpha_3 \\ \alpha_4 \\ r_1 \\ r_2 \\ r_3 \\ r_4 \\ f_{z1} \\ f_{z2} \\ f_{z3} \\ f_{z4} \\ v_1 \\ v_2 \\ v_3 \\ v_4 \end{bmatrix} \dots (1)$$

式:

$$\tan \gamma_n = \tan \gamma_0 \cdot \cos \lambda_s$$

径向前角与主剖面前角的计算公

式:

$$\tan \gamma_p = \tan \gamma_0 \cdot \cos K_r + \tan \lambda_s \cdot \sin K_r$$

可以得到法向前角、径向前角与实际前角的关系如表10所示:

表10 法向前角、径向前角与实际前角的关系

序号	螺旋角	实际前角	法向前角	径向前角
1	20°		14.7°	8.34°
2	25°		11.4°	3.43°
3	30°		7°	-3°
4	35°	20°	1.1°	-11.6°
5	40°		-6.9°	-22.9°
6	45°		-18.4°	-37.6°
7	50°		-36.3°	-55.7°

根据金属切削原理可知, 硬质合金的抗压强度比抗弯强度高3~4倍, 切削刃不易因受压而损坏^[3]。硬质合金刀具采用负前角对刀具的抗崩刃性能有明显的改善, 其原理如图1所示, 采用负前角, 一是可以避免最薄弱的刃

口先接触工件而产生冲击,让远离刃口位置的前刀面某位置先接触工件;二是负前角可以改善刃口应力状态,将刃口附近拉应力区域转化为压应力区域。

对锥度铣刀而言,螺旋角就是刃倾角。本文采用3D等厚度斜角切削模拟计算刃倾角对切削温度和刃口应力的影响,模拟最严酷条件下的切削状态,获得最佳刃倾角范围。另外需要说明的是,3D模拟由于模型增大,单元数量增多,与实际状态误差较大,所计算的结果精度不如2D模拟,只能用于定性分析,见表11。

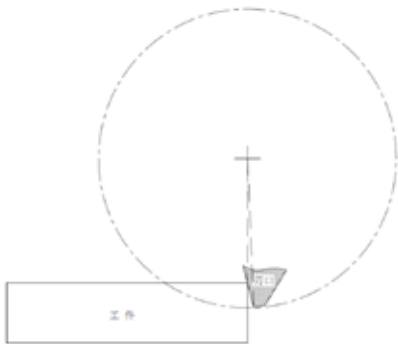


图1 大负前角刃口切削方式

表11 大直径(上层)刃倾角对切削温度和刃口应力分析

序号	切削温度	刃口应力
1	483	2629
2	469	2508
3	474	2595
4	462	1948
5	479	1990
6	460	2000
7	485	2174

从图2可知,刃口切削温度较低,对刀具性能有利。从图3可知,刀具刃口应力随刃倾角的增加呈现先递减后递增的规律,并在刃倾角为35°时刃口应力最小,安全性最好。

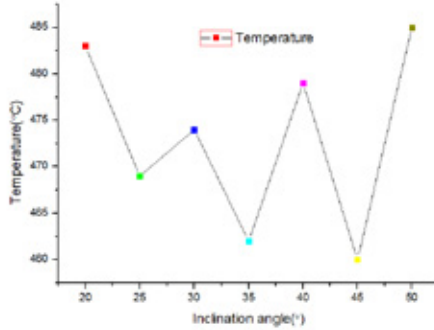


图2 刃倾角与对切削温度的影响

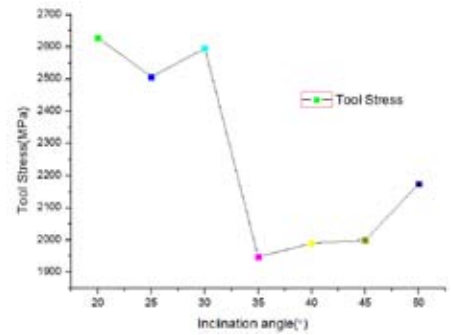


图3 刃倾角与对刃口应力的影响

通过计算及可制造性校核,得到的最佳螺旋角是35°~40°之间。根据表11计算结果,本文取螺旋角为35°进行计算。螺旋角确定之后,就需要确定锥度铣刀中部和小直径(底层)各位置的实际前角,如表12所示。

表12 法向前角、径向前角与实际前角的关系

序号	实际前角	螺旋角	法向前角	径向前角
1	15°	35°	-6°	-19°
2	20°		1°	-11.6°
3	25°		8°	-3.7°
4	30°		14.7°	4.3°
5	35°		21°	12.6°

表13 中端(中层)实际前角单因素分析
(切削速度=60m/min, fz=0.1mm/r, r=0.028, 后角5°)

序号	切削力			切削温度				刃口应力			
	FX	FY	MAX	前刀面	刃口	后刀面	MAX	前刀面	刃口	后刀面	MAX
1	369	196	369	501	516	443	516	1775	1993	1345	1993
2	352	166	352	524	513	449	524	1894	2185	1531	2185
3	339	144	399	515	508	447	515	2065	2197	1529	2197
4	317	120	317	501	502	441	502	2143	2129	1743	2143
5	297	100	297	441	497	395	497	2124	2189	1779	2189

表14 小端(底层)实际前角单因素分析
(切削速度=17.5m/min, fz=0.1mm/r, r=0.028, 后角10°)

序号	切削力			切削温度				刃口应力			
	FX	FY	MAX	前刀面	刃口	后刀面	MAX	前刀面	刃口	后刀面	MAX
1	422	227	422	355	366	329	366	1954	1946	1595	1954
2	381	181	381	324	345	308	345	2096	1985	1256	2096
3	358	146	358	308	331	292	331	2020	2050	1528	2050
4	333	118	333	299	316	281	316	2327	2223	1153	2327
5	315	98	315	276	309	267	309	2135	2433	1719	2433

根据应力最小原则,铣刀中层和底层的最佳实际前角都是15°。根据工具分厂内部试验和工业透平D20机组生产加工实践可知,铣刀小端的切削状态最好,也最不易崩刃,最易崩刃的部位是铣刀中部至铣刀大端之间。为

此,可以根据前角选用原则“在刃口强度足够的前提下,刀具的前角越大越好”,以减小切削力和切削温度。根据该原则,我们确定铣刀中层的最佳实际前角为15°,而铣刀底层最佳实际前角为25°,见表13-14。

综合上述计算和分析, 本文提出优化方案的几何结构参数, 见表15。

表15 优化方案锥度铣刀几何参数

刃口几何参数					
上层	实际前角 20°	径向前角 -11.6°	法向前角 1°	法向刃口半径 0.035	后角 4°
中层	实际前角 15°	径向前角 -19°	法向前角 -6°		后角 5°
底层	实际前角 25°	径向前角 -3.7°	法向前角 8°		后角 10°
结构参数					
	螺旋角 35°	旋向 右旋	不等分齿距 3°~5°		
匹配切削用量					
	实际单齿进给量 0.1mm/r	车削线速度 100m/min			

根据以上分析, 本文创新性的将后波刃锥度铣刀设计为双层结构即主刃+副刃的结构方案, 切削状态恶劣的上层(大端)采用6齿结构, 切削状态良好的下层(小端)依然采用3齿结

构; 齿距均匀分布, 其余参数和表15完全一致。目的是为了通过平衡每齿切削余量而改善刃口切削状态, 适用于大直径锥度铣刀, 锥度铣刀几何尺寸就适合采用该优化方案, 如图4所示。

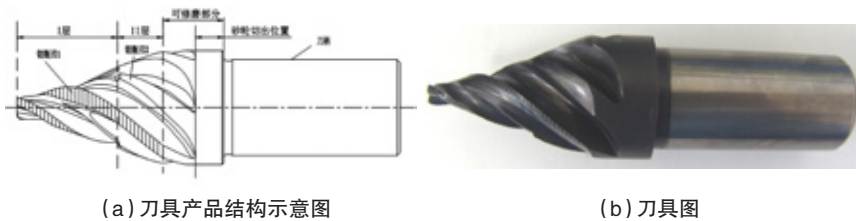


图4 锥度复合铣刀主刃+副刃双层结构方案

3 切削试验

试验内容: 试验刀具耐用度

试验目的: 验证新型硬质合金锥度复合铣刀的耐用度和切削性能

试验机床: 052轮槽铣床

冷却方式: 油冷

刀具几何参数及涂层:

(1) 几何结构参数

① 双层结构; ② 右旋, 螺旋角 35°; ③ 刃口钝化半径 0.035mm。

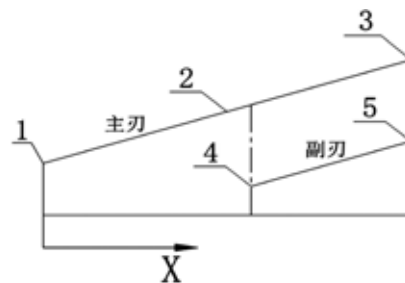


图5 几何角度沿型线分布情况

表16 锥度复合铣刀磨削制造参数

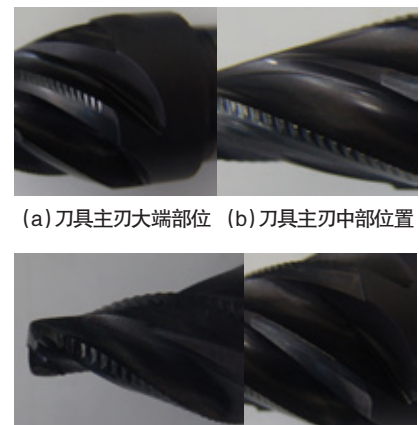
主刃		
NO.	X坐标	径向前角(°)
1	1mm	-5
2	25mm	-17.7
3	49mm	-10.5
副刃		
NO.	X坐标	径向前角(°)
4	35mm	-16.1
5	49mm	-10.7

(2) 涂层: AlTiN

试验过程:

(1) 切削参数为 $n=550\text{r/min}$, 进给 45mm/min

一次下刀方案: 整个过程铣削32个槽, 共计3.7m, 刃口除主刃中部有明显磨损之外, 切削刃其余部位无崩刃现象, 前刀面存在正常的磨损情况, 刀具仍然具备切削能力。刀具刃口磨损及崩刃情况如图6所示:



(a) 刀具主刃大端部位 (b) 刀具主刃中部位置

(c) 刀具主刃小端部位 (d) 刀具副刃(光刃)部位

图6 刃口情况(一次下刀方案)

但是, 一次铣刀方案, 在精加工时, 出现了微量的轮槽上表面铣削不到位的现象, 初步判断是由于主轴刚性不足, 切削力较大, 导致让刀引起的。具体的让刀量数据需要进一步试验确定。

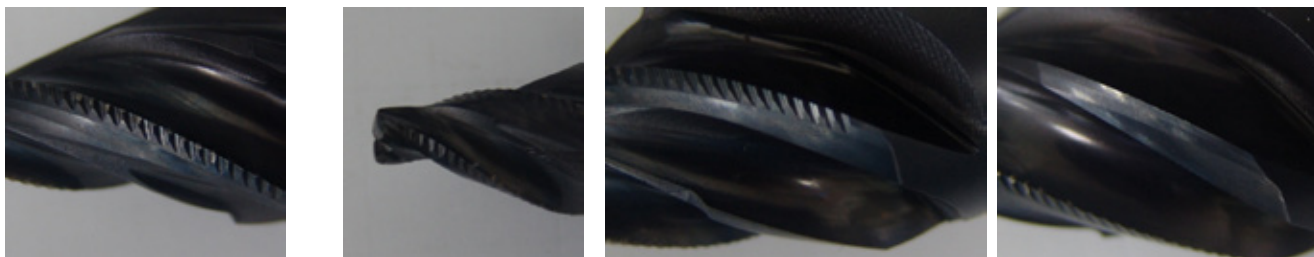
(2) 切削参数为 $n=550\text{r/min}$, 进给 60mm/min

铣削方式为两次下刀，第一次下刀：30.843mm，第二次下刀：46.843mm

整个过程铣削39个槽（轮槽宽度110mm），刀具大端（分水线以上

部位）切削长度为 $39 \times 110 = 4.3\text{m}$ ；小端（分水线以下部位）铣削每槽由于需要使用两次，所以小端切削长度为 $39 \times 110 \times 2 = 8.6\text{m}$ ，刃口除第一次下刀和第二次下刀分水线区间出现较为严

重的崩刃问题之外，刃口其余部位仅出现正常的磨损，无严重崩刃现象，刀具仍然具备切削能力。刀具刃口磨损及崩刃情况如图7所示：



(a) 第一次下刀、第二次下刀分水线区间刃口

(b) 刀具主刃小端部位

(c) 刀具主刃大端部位

(d) 刀具副刃（光刃）部位

图7 刃口情况（两次下刀方案）

试验对比分析：

(1) 现场使用高速钢锥度刀具

① 切削参数为 $n=290\text{r}/\text{min}$ ，进给量为 $f=30\text{mm}/\text{min}$ ；

② 铣削方式采用两次下刀，单件高速钢刀具寿命一般能铣削20根轮槽（轮槽宽度117mm）；

③ 高速钢锥度铣刀耐用度为：

刀具大端切削长度为 $20 \times 117 = 2.34\text{m}$ ；

小端铣削每槽由于需要使用两次，所以小端切削长度为 $20 \times 117 \times 2 = 4.68\text{m}$ 。

(2) SECO锥度铣刀试验

该型锥度铣刀由于尺寸和自主研发的铣刀相近，所以数据具有参考性和可比性。

① 切削参数为 $n=1000\text{r}/\text{min}$ ，进给量为 $f=65\text{mm}/\text{min}$ ；

② 铣削方式采用两次下刀，第一次下刀深度30mm，第二次下刀深度49.314mm；

③ SECO硬质合金锥度铣刀耐用度为：

刀具大端切削长度为5m；小端铣

削每槽由于需要使用两次，所以小端切削长度为10m；

④ 刀具刃口磨损及崩刃情况如图8所示。

4 结论

与高速钢锥度铣刀和SECO刀具相比，新型锥度铣刀具有以下特点：

① 采用锥度铣刀和立铣刀一体式结构设计，减少立铣刀加工工步；

② 采用一次走刀方式完成V形槽加工，而原高速钢刀具采用二次走刀方式完成V形槽加工；

③ 硬质合金锥度复合铣刀切削参数为，转数 $n=550\text{r}/\text{min}$ ，进给 $f=45\text{mm}/\text{min}$ ；而高速钢刀具的切削参数为，转数 $n=290\text{r}/\text{min}$ ，进给 $f=30\text{mm}/\text{min}$ ，综合（1）、（2），新型硬质合金锥度复合铣刀实际加工效率是高速钢刀具的5~6倍；

④ 一件锥度复合铣刀可以完成轮槽加工32槽，共计长度为3.7m，波形刃未发生崩刃现象，前、后刀面存在正常的磨损；一件高速钢刀具可以

完成轮槽加工16~20槽，约为高速钢刀具的2倍；

⑤ 由于采用新型双层结构设计，硬质合金轮槽铣刀在整个切削过程平稳无振动，声音安静；

⑥ 该新型铣刀最佳的铣削方式就是一次下刀，既可以解决刀具中位置的边界崩刃问题，有可以成倍的提高切削效率；

⑦ 同SECO刀具相比，切削效率几乎相当，但是刀具抗崩刃性比SECO优越。**T**

参考文献

- [1] 周玉珠. 数学的实践与认识[J]. 2009, 39 (2) : 202-206.
- [2] 乐兑谦. 金属切削刀具[M]. 北京: 机械工业出版社, 2001.
- [3] 陈日曜. 金属切削原理[M]. 北京: 机械工业出版社, 2002.

作者信息

谢鸿, 东方电气集团东方汽轮机有限公司, 职能组长, 博士研究生, 电子邮箱: xiehong0904@163.com

精锻齿轮的工艺优化与应用

赵树军, 宫庆芳

一汽解放公司长春特种车分公司, 长春, 130102

摘要: 随着载货车对驱动桥在行驶中的平稳性和噪声的要求越来越高, 作为驱动桥中影响这两项主要指标的零件变速器行星齿轮和半轴齿轮的制造精度显得至关重要。我公司作为一汽内生产精锻齿轮的基地, 把提高齿轮制造精度作为长期的工作目标。通过优化工艺, 改变传统工艺方法, 达到提高齿轮精度的目标。经过工艺试验取得了显著效果, 齿轮精度等级提高一级, 目前此项成果成功应用到了生产中。改进模具和夹具制造工艺方法, 提高工装制造质量, 加强序间质量控制以提高齿轮的制造精度。工艺优化是改进原有工艺, 在数控车床进行集中加工方法, 减少工序和制造周期, 是提高制造精度的有效途径。

关键词: 精锻齿轮; 艺优化; 制造精度

The Procedure Optimization and Application of the Final Forging Gear

ZHAO Shujun, GONG Qingfang

FAW Changchun Special Vehicles Branch, Changchun, 130102

Abstract: With the drive axle demand of stability and noise is higher and higher when the truck on the road. The manufacture accuracy of part differential mechanism, planet gear and axle shaft gear, as the most influential factor, is of the essence. As a production base of final forging gear in FAW, improve the gear manufacture precision is a long-term goals of our company. Through the procedure optimization, change the traditional procedure method to improve the precision of gear. Through the procedure test, we have achieved significant effect. The gear precision level has improved. Now, the result has applied to the production. Improve the method of mold and fixture manufacturing procedure, improve the quality of equipment manufacturing, strengthen the quality control between procedures to improve the manufacturing precision of gear. Procedure optimization is to improve the original procedure. Centralized procedure in the numerical control machine, reduce procedure and manufacturing cycle are effective ways to improve gear manufacturing precision.

Keywords: the final forging gear; procedure optimization; manufacturing precision

1 工艺现状简介

目前行星齿轮和半轴齿轮制造工艺采用传统的工序分散的流水工艺方法加工。生产线采用普通车床和数控车床混合使用的工艺布置设计。关键工序采用数控车床加工, 粗车及辅助

工序在普通车床上加工。该种生产线布置设计是基于数控车床不足条件下, 按照原始的工艺方法进行的工艺设计。存在工序长, 多次装卡, 加工精度低, 磕碰伤几率大; 所需工装品种多, 制造周期长, 费用高; 新产品开发周期长等问题。该种工艺方法已经严

重制约齿轮精度提升和新产品开发速度。图1是一对457桥精锻齿轮。

2 精锻齿轮工艺优化

2.1 工序优化

工序优化是工艺优化的重要环节, 是将原来分散的工艺流程进行合



图1 行星齿轮半轴齿轮实物图



图2 半轴齿轮在数控车床上上车背锥



图3 在数控车床上一次装卡加工所有表面



图4 改进前用作加工模具的电极



图5 在加工中心上加工定位体齿形

并工序，减少工序数量，取消普通车床，全部采用数控车床加工，采用先进的工艺流程，使工艺更合理，实现提高加工质量目标。行星齿轮将原来机加工工艺中11序合并为5序，半轴齿轮12序合并为4序。在数控车床上先车背锥（见图2），取代原来在液压车床上上车背锥，然后在数控车床上以齿形定位卡车削后的背锥面一次完成所有其它加工面的加工（见图3）。工艺优化后，所有工序以齿形作为定位基准，实现定位基准统一，提高制造精度，实现工序集中，减少装卡次数，减少磕碰伤。

2.2 工装制造工艺优化

工装的制造精度是精锻齿轮制造质量的根本保证，其中模具的制造精度直接影响精锻齿轮的齿形精度，夹具定位体的制造精度影响加工质量，所以提高工装的制造质量是提高齿轮精度的前提。工装制造工艺优化是提高工装制造质量的有效途径，也是精锻齿轮工艺优化的重要环节。主要包括模具和夹具定位体的制造工艺优化。模具和夹具的制造精度主要体现在齿形的加工精度，原来一直采用电火花加工模具和夹具定位体。这种方法存在电极放电误差和定位基准转换误差，影响模具和夹具定位体加工精

度，精度等级一般在6-7级DIN3965。同时采用该种工艺方法，需要先在加工中心上加工电极（见图4），增加中间环节，加工周期长，增加电极加工费用。

随着高强度加工中心的投入使用，在加工中心上进行了模具和定位体齿形的硬切技术研究和工艺试验（见图5）。采用热前粗切和热后精切齿形的工艺试验并取得了成功。目前已经掌握了模具和定位体的硬切技术并应用到生产中。经检测，加工的模具精度达到4-5级DIN3965。比原来提高2级，为提高精锻齿轮加工精度奠定模具和工装制造基础。

2.3 工装结构设计优化

原夹具定位体的设计结构是全齿定位，半轴齿轮是14-18齿，齿数较多，在生产中工件装卡后齿形部位容易垫铁屑。定位体垫铁屑不仅使齿圈径跳超差，更容易产生废品，所以该环节是控制重点。现生产操作在作业指导书上进行了规定装卡工件前用风管吹净定位体齿形上的铁屑和杂质。从设计上，通过改进夹具结构方式入手，将原来全齿定位结构（见图6）改成三点定位结构（见图7）减少定位齿数，减少垫铁屑的几率。同时采用三点定位结构，增加了排屑空间，利于排屑。也是有利于工序集中切削的必要条件。此项改进已经应用到生产中，效果很好。



图6 改进前全齿定位



图7 改进后三点定位



图8 在偏摆仪上检测行星齿轮球面跳动误差



图9 在偏摆仪上检测半轴齿轮径向跳动和端面跳动误差

3 工艺优化的效果

工艺优化后,对行星齿轮球面跳动(见图8)、半轴齿轮径向跳动和端面跳动误差(见图9)进行了检测。表1和表2分别是457行星齿轮半轴齿轮工艺优化前后热前半成品相关参数的检测数据结果。

表1 行星齿轮试验检测结果

样品编号	齿圈径跳 (mm)	球面跳动 (mm)
1# (1#)	0.036 (0.050)	0.01 (0.06)
2# (2#)	0.045 (0.052)	0.01 (0.05)
3# (3#)	0.042 (0.042)	0.02 (0.06)
4# (4#)	0.035 (0.051)	0.01 (0.05)
5# (5#)	0.040 (0.045)	0.01 (0.05)
6# (6#)	0.045 (0.052)	0.01 (0.06)
7# (7#)	0.032 (0.040)	0.01 (0.07)
8# (8#)	0.028 (0.031)	0.01 (0.06)
技术要求	≤0.065	≤0.08

表2 半轴齿轮试验检测结果

样品编号	齿圈径跳 (mm)	端面跳动 (mm)	径向跳动 (mm)
1# (1#)	0.048 (0.060)	0.01 (0.07)	0.01 (0.10)
2# (2#)	0.046 (0.056)	0.01 (0.08)	0.01 (0.09)
3# (3#)	0.043 (0.050)	0.02 (0.08)	0.02 (0.08)
4# (4#)	0.059 (0.060)	0.01 (0.06)	0.01 (0.08)
5# (5#)	0.042 (0.045)	0.01 (0.07)	0.01 (0.09)
6# (6#)	0.052 (0.062)	0.01 (0.08)	0.01 (0.07)
7# (7#)	0.031 (0.040)	0.01 (0.07)	0.02 (0.06)
8# (8#)	0.030 (0.051)	0.01 (0.06)	0.01 (0.06)
技术要求	≤0.065	≤0.08	≤0.10

注:表中括号内的数据是采用原有工艺加工的齿轮检测数据

通过对表1和表2中的2组检测数据对比分析,可以看出采用工艺优化后的工艺方法,齿圈径向跳动误差得到改善,球面跳动、端面跳动和径向跳动误差明显减小,精度提高3-4倍。这三项指标直接影响齿轮的啮合精度(综合跳动误差、接触区),试验证明,综合跳动误差由原来的0.35mm降低到0.25mm以内。



图10 改进前卡到背锥飞边



图11 改进后卡紧可靠

由于切边模磨损造成锻造毛坯背锥产生飞边,按原来工艺精镗孔时三个卡爪卡紧背锥时,卡到背锥飞边(见图10),卡紧力不均匀导致卡偏,加工后易产生废品。工艺优化后,先车背锥,精车时,卡爪卡在车后的背锥面(见图11),卡紧均匀可靠,解决锻件毛坯背锥有飞边卡不紧的问题。试验证明,此项改进废品率降低了0.2%。

4 热后车削技术的试验与应用

热后车削技术是工艺优化的一部分,主要解决热后能力不足问题。近年来随着高强度数控车床的投入使用,多数齿轮生产企业已经开始应用以车代磨的工艺技术。该项技术在行业内已经是成熟技术。我公司在磨序设备和人员能力不足条件下,对457桥精锻齿轮进行了热后车削技术的工艺试验,试验数据显示,采用热后车削工艺加工的齿轮,精度指标符合图纸要求,该项成果成功应用到生产中。采用了2台数控车床进行行星齿轮热后车里孔,实现1人操作2台数控,相当4台里孔磨床设备生产能力,一人顶4人的工作量。由于球面磨床效率高,热后球面加工暂时未采用车削工艺,但在新产品498桥精锻齿轮的试制中采用了热后同时车削里孔和球面的工艺(见图12),这样球面跳动误差控制在0.02mm以内。半轴齿轮热后同样采用



图12 行星齿轮热后车削里孔球面



图13 半轴齿轮热后车削端面外圆

2台数控车床代替4台外圆磨床车削端面外圆(见图13),效率提高一倍。

热后车削工艺与传统磨削工艺相比,具有如下优点:

(1) 生产效率高,效率提高一倍;

(2) 半轴齿轮采用普通外圆磨床磨端面时,靠砂轮端面磨削,散热不好,工件端面易产生磨糊或龟裂现象,采用车削可以避免上述缺陷,提高表面加工质量;

(3) 对工人的技术水平要求低;

(4) 使用的夹具结构简单,制造成本低,制造周期短。

5 齿轮的检测

5.1 齿圈径向跳动误差检测

通过该参数的检测,主要监测锻件毛坯精度和夹具的调整误差。齿圈径向跳动误差是其中较关键的参数之一,也是最直接的检验手段。因此

在精镗孔工序后检测齿圈径向跳动误差,是及时验证锻件精度的工艺手段,同时也是对机床夹具进行确认的环节。工艺优化后,加大了该参数的检测频次,及时发现模具和夹具对加工质量的影响。该参数在万能侧齿仪(见图14)上检测。当更换模具或夹具时,要对该参数检测。同时,现生产中按工艺要求的频次检验,实现工序间的质量控制。

5.2 精度检测及数据分析

齿轮的精度检测是在齿轮测量仪(见图15)上输入相关齿轮参数,通过探头测量齿形,通过软件同时生成几个参数的检测方法。是一种比较复杂的检测手段。检测的是齿轮的运动精度。检测内容包括:齿距极限偏差、齿距累积公差、相邻周节偏差及齿圈径向跳动误差等参数。

生产中,由于行星齿轮热后以齿形定位磨里孔或车里孔工序,可以校



图14 在万能侧齿仪上检测齿圈径跳



图15 在齿轮测量仪上检测齿轮精度



正热处理变形, 实现基准统一, 其精度一般在8-9级DIN3965, 普遍好于半轴齿轮, 在这里不进行精度检测分析。而半轴齿轮, 热后不磨里孔, 不能校正热处理变形, 无法实现加工基准和检测基准的统一。而且花键孔的变

形对齿轮精度的影响较大, 所以重点应放在提高半轴齿轮精度方面。在工艺优化试验中分别对工艺优化前后加工的半轴齿轮进行精度检测, 表3和表4分别是工艺优化前后加工的半轴齿轮热后成品的精度检测结果。数据显

示, 在工艺优化前加工的半轴齿轮, 检测精度为9-10级, 个别项达到10级。而优化后加工的半轴齿轮, 检测精度为8-9级, 精度等级基本控制在9级以内。数据证明, 工艺优化后, 齿轮精度提高一级。

表3 半轴齿轮工艺优化前精度检测结果

样品编号	1	级别	2	级别	3	级别	3	级别	4	级别
8级齿距累积公差FpT: 0.095										
左齿面齿距累积偏差Fp	0.1253	9	0.1295	9	0.1097	9	0.0603	8	0.0653	8
右齿面齿距累积偏差Fp	0.1158	9	0.1135	9	0.0967	9	0.1055	9	0.0862	8
8级齿距极限偏差fpt: 0.029										
左齿面齿最大距极限偏差fpt	0.0490	10	0.0559	10	0.0438	9	0.0356	9	0.0347	9
右齿面齿最大距极限偏差fpt	0.0260	8	0.0345	9	0.0350	9	0.0385	9	0.0360	9
8级齿圈跳动公差Fr: 0.094										
齿圈跳动公差Fr	0.0404	7	0.0519	8	0.0355	6	0.0587	7	0.0729	8
8级相邻周节偏差fuT: 0.037										
左齿面相邻周节偏差fu	0.0429	9	0.0342	8	0.0471	9	0.0425	9	0.0458	9
右齿面相邻周节偏差fu	0.0352	9	0.0399	9	0.0350	9	0.0452	9	0.0426	9

表4 半轴齿轮工艺优化后精度检测结果

样品编号	1	级别	2	级别	3	级别	4	级别	5	级别
8级齿距累积公差FpT: 0.095										
左齿面齿距累积偏差Fp	0.0434	6	0.0447	6	0.0520	7	0.1140	9	0.0504	7
右齿面齿距累积偏差Fp	0.0492	7	0.4910	7	0.0398	6	0.1040	9	0.0387	6
8级齿距极限偏差fpt: 0.029										
左齿面齿最大距极限偏差fpt	0.0255	8	0.0282	8	0.0277	8	0.0379	9	0.0255	8
右齿面齿最大距极限偏差fpt	0.0225	8	0.0217	8	0.0281	8	0.0375	9	0.0201	7
8级齿圈跳动公差Fr: 0.094										
齿圈跳动公差Fr	0.0695	8	0.0689	8	0.0620	7	0.0426	6	0.0594	7
8级相邻周节偏差fuT: 0.037										
左齿面相邻周节偏差fu	0.0362	8	0.0543	9	0.0448	9	0.0582	9	0.0407	9
右齿面相邻周节偏差fu	0.0342	8	0.0218	7	0.0410	9	0.0387	9	0.0390	9

注: 评定标准为DIN3965

5.3 模具的检测

为了控制锻件毛坯的质量, 模具的制造精度是基本保证。在加工中心采用硬切技术加工模具为提高模具的制造精度提供了工艺基础, 而模具精度的检测则为模具的质量监控提供了数据依据。为了控制模具的制造精度, 增加了模具的精度检测环节。该项检测为模具的使用和毛坯的批次管理提

供了可操作的理论依据。模具的检测在齿轮测量仪进行(见图16), 检测项目与齿轮精度检测相同。



图16 在齿轮测量仪上检测模具精度

6 结语

通过对上述几个环节进行工艺优化使得精锻齿轮的制造精度有了较大提高, 整体质量有了较大改善。精锻齿轮制造涉及到锻造、机加和热处理工艺技术, 包括模具和夹具的制造以及齿轮的检测等环节。每个环节都对齿轮精度和质量有着较大的影响。其

中热处理变形对齿轮精度的影响最为复杂,也是比较难解决的因素。因此,需要跨专业、跨部门共同研究寻求新工艺新方法,最终实现提高精锻齿轮制造精度、提高生产效率和降低制造成本的目标。**T**

参考文献

[1] 任嘉卉.公差与配合手册.北京:机械工业出版社,2000.

[2] 齿轮手册编委.齿轮手册.北京:机械工业出版社,1994.

[3] 徐灏.机械设计手册.北京:机械工业出版社,2000.

作者信息

赵树军,一汽解放公司长春特种车分公司,一汽专家,高级工程师,通讯地址:吉林省长春市经济开发区兴隆大陆6333号,邮政编码:130102,电话:0431-

84599164 (13604339426), 传真: 0431-84582587, 电子邮箱: 1277376414@qq.com。

官庆芳,一汽解放公司长春特种车分公司,一汽专家,高级工程师,通讯地址:吉林省长春市经济开发区兴隆大陆6333号,电话: 0431-84599188 (13944143829), 传真: 0431-84597224, 电子邮箱: 348783757@qq.com。

(上接21页)

(4) 轴管壳类铸件

轴管壳类铸件采用快速制造技术从CAD数据到铸件平均为10天,最短20小时。与传统有模制造相比缩短30-90天,费用平均减少63%。

采取数字化无模铸造精密成形技术+激光烧结的方式,如图11-14。

综上,采用先进快速制造技术可省去制作砂芯和砂型的模具费用,大大降低了成本。以机体模具为例,可降低成本约为100多万元,同时可缩短新品样机开发周期3个月以上。到目前为止,机体、缸盖采用先进快速制造技术已直接为公司节约成本1000万元以上,间接经济效益也相当可观。



图11 某机型飞轮壳砂型图



图12 某机型飞轮壳成品实物图



图13 某机型曲轴砂型图



图14 某机型曲轴铸件实物图

5 结论

(1) 先进快速制造技术,是一种全新的基于三维CAD模型驱动的柔性化、数字化、精密化、绿色化快速制造方法,该技术应用于柴油发动机新产品试制,可缩短开发周期,降低开发费用及成本,提高市场竞争力。

(2) 先进快速无模化制造技术应用于柴油发动机核心部件的试制,已取得显著成效。

(3) 先进快速制造技术,对提升装备制造技术水平,提升企业的核心竞

争能力,促进机械装备制造行业节能减排和可持续发展具有重要战略意义。

T

参考文献

[1] 余立华,林少辉.利用SLS技术烧制复杂液压阀体砂芯[J].特种铸造及有色金属,2012.

[2] 王丽洁,数控加工工艺与装备[M].北京:清华大学出版社,2006.

[3] 王春风,SLS快速制造大型复杂四气门六缸柴油机蠕铁缸盖[C].2010年中国铸造活动周,浙江杭州,2010.

[4] 王晓聪,孙锡红.快速成形技术研究现状及其应用前景[J].精密制造与自动化,2007,(3):57-60.

[5] 单忠德,战丽,董晓丽.无模铸型的数字化快速铸造技术新进展[C].2007年中国机械工程学会,2007,11:89.

作者信息

吕登红,高级工程师,硕士,广西玉柴机器股份有限公司制造技术部科室主任,邮编:537005,邮箱:gxylzlj163.com,联系方式:0775-3222207

重型车发动机智能化绿色制造关键技术及应用

绿色制造是一个综合考虑环境影响和资源效益的现代化制造模式，其目标是使产品从设计、制造、包装、运输、使用到报废处理的整个产品生命周期中，对环境的影响（负作用）最小，资源利用率最高，并使企业经济效益和社会效益协调优化。其关键技术主要体现集成、高效、节能、降耗、环保等方面的技术及应用，是国家实施可持续发展战略的重要支撑。

在2015年3月召开十二届全国人大三次会议的政府工作报告中，李克强总理提出实施“中国制造2025”。其主要内容围绕绿色制造、智能转型、绿色发展等关键环节开展，恰恰体现了政府对绿色制造技术发展及应用的高度重视。

本项目从产品研发、工艺设计、设备选型到供应商开发实行同步工程，全过程嵌入绿色制造理念，完成了产品的全生命周期规划、设计开发和验证工作。

发动机制造系统主要包括机加工、总装、热试和涂装工艺，结合各工艺技术的特点，高度集成了绿色制造先进技术。

1 智能化加工生产线

整线实现了10L/12L两种机型的集成混线生产，大大减少设备投资，提高了设备、夹具、辅具等利用率，体现了节能、环保、绿色的理念。

所有机床均实现了全部刀具的断刀检测、扭矩监控，在达到刀具寿命临界点之前即可预知，提高了刀具寿命，极大的降低了因刀具折损导致的

废品率，节能环保绿色。

所有加工中心均采用多级油雾分离处理，加工过程中产生的粉尘、有害气体等均在经过油雾分离处理达标后排放。

加工中心所需切削液采用集中冷却、过滤系统，冷却液循环利用，整个过程实现计算机智能控制，自动调整切削液中的微生物环境，既能更好的服务于加工过程，又能有效的控制了有害物质的产生。

使用优质、高效的刀具，所有铣削加工实现了无切削液加工，有效降低了切削液的消耗，节能环保绿色。

采用国际先进的机器人高压清洗技术，使用防锈型清洗剂，既能有效的带走铁屑，去除油孔贯穿处的毛刺，又能达到清洗、防锈效果，绿色高效、节能环保。

整个生产线设计充分考虑以人为本，节能、环保、绿色、安全，生产线集自动化、信息化、智能化于一体，工艺先进，实现了绿色高效、节能环保。

2 自动化装配线

总装装配生产线由主生产线（内装配线、外装配线）、缸盖装配线、活塞连杆线等几部分组成，在工艺装备选型思路，围绕节能环保、绿色制造的理念，采用新技术、新工艺、新装备来保证发动机的高质量装配。整个生产线：一是采用高精度先进低能耗设备，确保绿色、节能；二是保证装配节拍，实现高效率；三是多机型多品种产品集成装配，实现高柔性；四是优化控制装配精度，实现高质量。

全线共设置23个自动工位，5个半自动工位，5个在线密封检测工位及其它7处质量检测点，采用5台机器人，并配置力控单元及防错识别功能，其中智能化全自动的活塞环自动装配、活塞连杆组件自动装配、自动调节气门间隙等工序，在行业内处于领先地位。生产线之间物流转运采用自动化激光导引的AGV小车，托盘采用柔性化设计，可满足多机型多品种集成装配，最大化提升装配线的生产效率。

3 发动机下线试验

热试生产线共分为测试预装线（简称预装线）及测试台架线（简称台架线），两条线之间通过无线激光导引AGV自行车自动转运并形成完整的测试工艺系统。该系统可针对发动机各工况点的扭矩、转速、功率、油耗等数十种参数进行测试、对比、监控，满足发动机产品出厂试验质量控制及管理的要求。整个热试过程在箱式试验间内完成，该试验间采用六面体整体密封结构，四维内墙面及顶面采用微孔板吸声技术，门窗采用高弹性中空密封条，整个试验间隔音、降噪、绿色、环保。整个生产线设计充分考虑以人为本，节能、环保、安全，生产线集自动化、信息化、智能化于一体，工艺先进。

4 涂装生产线

前处理工艺采用目前行业内先进的硅烷化绿色处理工艺，硅烷化处理是以有机硅烷为主要原料对金属或非金属材料进行表面处理。



与传统磷化处理相比，硅烷处理技术具有绿色环保性（无有毒重金属离子）、低能耗（常温使用）、低使用成本（每公斤处理量为普通磷化的

5-8倍）、无渣（减少危废品后处理费用）、零排放，可共线处理铁板、镀锌板、铝板等多种基材等优点。

喷漆采用上送风、下抽风的水旋式湿式喷漆室，漆雾捕集效率高。底面漆喷涂方式采用机器人喷涂，人工修补的方式。油漆的输送系统采用国际著名品牌的远程集中供漆系统，机器人在喷漆前通过自动配比系统进行油漆的参数配比，达到对油漆施工参数的准确控制。整线输送采用空中悬挂挂链输送方式，后整理线采用地面板链输送方式。

整个发动机生产制造系统集成了世界顶尖技术，体现节能、环保、绿色制造，受到行业类专家赞誉并引领行业内发动机制造技术转型升级，为发动机绿色制造技术在中国应用奠定了基础。T

项目完成单位：安徽华菱汽车有限公司、安徽华菱汽车有限公司发动机分公司
主要完成人：汪祥支、江益群、汪得亭、王标、王露、周智勇、许建伟、樊霄、刘琳琳、梁加刚、孙维庆、黄岗、储招节、杨学文、杨孝龙

高强度轻量化V型机铝合金缸盖开发

1 项目的重要性和意义

汽车轻量化是汽车现代化发展的主流，轻量化是降低油耗、减少排放和提升安全性的重要技术措施之一。同时柴油发动机重要零部件高质量，高精度、低成本、短周期获得新产品是新产品获得快速验证及新产品抢占市场的关键，也是许多企业所急需解决的技术难题。

2 本项目的立项背景

汽车轻量化对降低油耗减少排放起着至关重要的作用，目前已经成为国内外汽车工业界的发展技术热点。国内的轻量化发动机，主要应用发展在轿车类；而玉柴作为中国绿色动力的领跑者，积极响应国家节能减排号

召，主动在大功率的柴油发动机进行轻量化的技术攻坚，主动参与国际竞争，开发具有自主知识产权的大功率轻量化柴油发动机。

3 主要科技内容及技术经济指标

根据V型柴油发动机轻量化的要求，针对原铸铁缸盖的外形轮廓、缸盖水套的特点、进气及排气道参数要求、缸盖壁厚状况、尺寸精度要求、缸盖重量等因素，进行材料改进；在进行材料改进的同时进行结构优化设计；创新应用快速制造技术进行柴油发动机的缸盖机重要零部件高质量，高精度、低成本、短周期进行产品验证。

此高强度轻量化V型机铝合金缸盖已开发成功，并通过了可靠性试验。

利：《一种铝合金柴油

机缸盖的铸造方法》；并获2014年广西先进工艺工装成果一等奖。

4 经济效益、社会效益及对行业科技进步的推动作用

3D 激光打印技术，大型数字化无模制造技术，是一门新兴快速制造的生产技术，本项目的成功应用为快速低成本生产提供了一个成功的例子，对推动我国快速制造的生产技术高速发展有积极的意义。此款高强度轻量化V型机铝合金缸盖开发成功，开创了玉柴重大零部件材料改进的先河，意义重大。也是玉柴推动国内大功率的柴油发动机轻量化的一个成功的里程碑。T

项目完成单位：广西玉柴机器股份有限公司
主要完成人：谢永泽，陈金源，吕登红，马国胜，张俊，易致达，周梁坚，许振冲，杨基，林铭，傅显珍



此高强度轻量化V型机铝合金缸盖的铸造技术已申请国家发明专利

关于公布2015年中国机械制造工艺协会 优秀会员单位评选结果的通知

各会员单位及有关单位：

2015年中国机械制造工艺协会“优秀会员单位”评选活动已结束，经中国机械制造工艺协会领导小组会议研究，决定授予近年来支持协会行业工作的上海烟草机械有限责任公司、上海电气电站设备有限公司上海汽轮机厂、湖北三江航天万山特种车辆有限公司、山东天瑞重工有限公司、江铃汽车股份有限公司5家单位“优秀会员单位”荣誉称号。

现予公布。

中国机械制造工艺协会
2015年10月30日



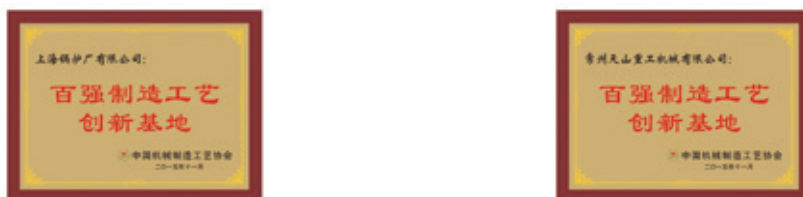
关于公布2015年中国机械制造工艺协会 百强制造工艺创新基地评选结果的通知

各会员单位及有关单位：

2015年中国机械制造工艺协会“百强制造工艺创新基地”评选活动已经结束，经中国机械制造工艺协会组织专家评审，授予上海锅炉厂有限公司、常州天山重工机械有限公司2家单位“百强制造工艺创新基地”荣誉称号。

现予公布。

中国机械制造工艺协会
2015年10月30日



关于公布2015年全国机电企业工艺年会有奖工艺征文评选结果的通知

各专业分会(专业委员会)、各会员单位:

2015年全国机电企业工艺年会有奖工艺征文评审工作已经结束,经专家委员会评审,共评出优秀组织奖获奖单位4家、获奖文章27篇,其中,一等奖3篇、二等奖10篇、三等奖14篇。现予公布。

附件:2015年全国机电企业工艺年会工艺征文获奖名单。

中国机械制造工艺协会

2015年11月5日

2015年全国机电企业工艺年会工艺征文获奖名单

一等奖			
序号	论文题目	作者	单位
1	数控车床磁流变减振装置及半主动模糊控制	李春梅 ^{1,2} 、刘薇娜 ^{1,2}	1. 长春理工大学 2. 长春理工大学光电信息学院
2	先进快速无模化制造技术在柴油发动机新产品开发中的应用	吕登红、陈金源、周梁坚	广西玉柴机器股份有限公司
3	脱硫石膏高效利用技术及装备研究	单忠德 ¹ 、戎文娟 ¹ 、战丽 ¹ 、武发德 ² 、张永 ³	1. 机械科学研究总院先进成形技术与装备国家重点实验室 2. 北新集团建材股份有限公司 3. 北京机械工业自动化研究所
二等奖			
序号	论文题目	作者	单位
1	后波刃锥度铣刀优化设计技术研究	谢 鸿、负庆芳、王 强、刘光耀	东方电气集团东方汽轮机有限公司
2	车辆辅助安全驾驶系统在重型车辆上的应用研究	任红阁、纪云红、王 陶	湖北三江航天万山特种车辆有限公司
3	1000MW级汽轮发电机定子线圈模具研制	谭国威	哈尔滨电机厂有限责任公司
4	精益设计在金刚镗床升级改造中的探索及应用	何祥金	广西玉柴机器股份有限公司
5	精锻齿轮的工艺优化与应用	赵树军、宫庆芳	一汽解放公司长春特种车分公司
6	复合材料叶轮预制体织造方法研究	刘云志、单忠德、战 丽、李志坤	机械科学研究总院先进成形技术与装备国家重点实验室
7	旋塞阀阀体无模铸造工艺应用研究	朱福先、周金宇、卢雅琳、左健民	江苏理工学院
8	无模铸造成形机圆弧加工尺寸精度分析	孙传震、朱福先、卢雅琳、祝理想	江苏理工学院

(续表)

二等奖			
序号	论文题目	作者	单位
9	铸铁屑在高性能铸件中的应用研究	纪昌勇、徐海港	山东时风(集团)有限责任公司
10	C131中置主焊夹具的设计	董 雷	一汽模具制造有限公司
三等奖			
序号	论文题目	作者	单位
1	基于流程规划的产品装配工艺设计	史苏存、钱红梅、崔晓明	中国第二重型机械集团公司
2	成组技术在卷烟包装机制造中的应用	林 齐、吴建军、薛晓敏	上海烟草机械有限责任公司
3	基于KMPDM系统的工艺快速编辑与数据跟踪管理功能二次开发及应用	陈利华	湖北三江航天万山特种车辆有限公司
4	无模数字化快速成形机在缸盖冷芯盒组芯生产工艺研究中的应用	蔡安克、包 晟、陈 莉、冯志明	第一拖拉机股份有限公司
5	EPS材料成型工艺性及耐腐蚀性研究	李春平、王晓丽、卢永平、苏一多、孔繁林	一汽解放汽车有限公司卡车厂
6	研制新工艺装备解决机车制动吊座衬套更换难题	刘昌崇、杜 鑫	中国中车集团大连机车车辆有限公司
7	一种吊装超长部件用吊具的开发	周 宏、毛兆杰	中国中车集团大连机车车辆有限公司
8	喷墨砂型3D打印技术在缸盖试制中的应用案例研究	赵 彬、倪耀源	苏州美迈快速制造技术有限公司
9	三维织造复合材料体积分数研究	李志坤、单忠德、战 丽、刘云志	机械科学研究总院先进成形技术与装备国家重点实验室
10	模切机机体轻量化设计	赵涛春、齐元胜、李 昱	北京印刷学院
11	滚压技术研究与应用	冯立敏、吴 特、黄殿霞	湖北三江航天万山特种车辆有限公司
12	基于数字化铸型制造技术的快速铸造系统开发	李锋军、黄胜操、郭亚辉	第一拖拉机股份有限公司
13	一种高精度盘类零件的磨削夹具设计	毛其彬	上海烟草机械有限责任公司
14	一种撬装式管束式加气装置的开发	陈宝健、杨利芬、姚振龙	新兴能源装备股份有限公司
优秀组织奖获奖单位			

广西玉柴机器股份有限公司

新兴能源装备股份有限公司

湖北三江航天万山特种车辆有限公司

机械科学研究总院先进制造技术研究中心

更正

刊登于2015年10月10日(2015年第4期,总第215期)《机械制造工艺》第43页“2014年机械制造工艺科技成果奖获奖名单”更正为“2015年机械制造工艺科技成果奖获奖名单”。

特此更正。

《机械制造工艺》编辑部

2016年1月10日

关于公布2015年机械制造工艺终身成就奖、杰出青年奖、优秀工艺师奖评选结果的通知

各专业分会(专业委员会)、各会员单位:

中国机械制造工艺协会组织的2015年机械制造工艺终身成就奖、杰出青年奖、优秀工艺师奖评审工作已经结束,经过专家委员会评审,机械制造工艺终身成就奖空缺、共评出机械制造工艺杰出青年奖获奖者4位、机械制造工艺优秀工艺师奖获奖者38位。现予公布。

附件:中国机械制造工艺协会终身成就奖、杰出青年奖、优秀工艺师奖获奖名单

中国机械制造工艺协会

2015年11月5日

2015年中国机械制造工艺协会终身成就奖、杰出青年奖、优秀工艺师奖获奖名单

杰出青年奖				
序号	姓名	单位	职务职称	出生年月
1	肖望强	厦门大学	副教授	1981年04月11日
2	钱东升	武汉理工大学	副教授	1982年07月03日
3	罗添宇	湖北三江航天万山特种车辆有限公司	高级工程师	1976年12月21
4	钱直睿	一汽解放汽车有限公司	高级工程师	1980年12月18
优秀工艺师				
序号	姓名	单位	职务职称	出生年月
1	蔡振铭	上海电气电站设备有限公司上海汽轮机厂	研究员	1958年04月07日
2	潘东杰	浙江省机电设计研究院	教授级高工	1959年09月23日
3	杨春杰	机械工业第九设计研究院有限公司	教授级高工	1964年03月15日
4	马春庆	中国一拖集团有限公司工艺材料研究所	副总工程师	1959年03月25日
5	卢征然	上海锅炉厂有限公司	总工艺师	1960年07月18日
6	孙厚彬	上海锅炉厂有限公司	副总工艺师	1960年03月10日
7	陈英嘉	新兴能源装备股份有限公司	高级工程师	1958年08月25日
8	杨桂江	天津一汽夏利汽车股份有限公司	高级工程师	1960年09月20日

(续表)

优秀工艺师				
序号	姓名	单位	职务职称	出生年月
9	关忠民	一汽解放汽车有限公司	高级工程师	1961年11月05日
10	于春玲	哈尔滨电机厂有限责任公司	高级工程师	1965年02月03日
11	赵树军	一汽解放汽车有限公司长春特种车分公司	高级工程师	1966年06月10日
12	崔闻天	新兴能源装备股份有限公司	高级工程师	1968年02月19日
13	杨利芬	新兴能源装备股份有限公司	高级工程师	1969年02月06日
14	姜国华	哈尔滨电机厂有限责任公司	高级工程师	1970年12月27日
15	王彦	一汽轿车股份有限公司	高级工程师	1972年06月14日
16	吴德海	一汽解放汽车有限公司	高级工程师	1972年07月11日
17	李桂苓	新兴能源装备股份有限公司	高级工程师	1973年01月07日
18	黎静	湖北三江航天万山特种车辆有限公司	高级主管工艺师	1973年09月09日
19	冯立敏	湖北三江航天万山特种车辆有限公司	高级主管工艺师	1981年02月23日
20	钟立蓉	湖北三江航天万山特种车辆有限公司	高级主管工艺师	1985年11月15日
21	张红杰	平顶山煤矿机械有限责任公司	主管工程师	1982年01月09v日
22	苏平	上海电气核电设备有限公司	主任工程师	1983年06月17日
23	李树伟	哈尔滨电机厂有限责任公司	主任工程师	1970年03月18日
24	李方	哈尔滨电机厂有限责任公司	责任工艺师	1960年07月24日
25	李冰	哈尔滨电机厂有限责任公司	工程师	1973年12月22日
26	王维林	山东天瑞重工有限公司	工程师	1975年06月12日
27	覃国杰	广西玉柴机器股份有限公司	工程师	1978年12月02日
28	周智勇	安徽华菱汽车有限公司	工程师	1978年12月10日
29	冯唯	一汽解放汽车有限公司	工程师	1979年12月14日
30	高洪彪	中国第一汽车股份有限公司	工程师	1981年04月14日
31	宫同浩	上海电气电站设备有限公司上海汽轮机厂	工程师	1982年02月28日
32	何小宏	山东天瑞重工有限公司	工程师	1982年05月10日
33	张辉	山东天瑞重工有限公司	工程师	1982年10月06日
34	王标	安徽华菱汽车有限公司发动机分公司	工程师	1983年10月04日
35	姚华雄	广西玉柴机器股份有限公司	工程师	1983年11月11日
36	王露	安徽华菱汽车有限公司	工程师	1985年05月06日
37	谢鸿	东方电气集团东方汽轮机有限公司	职能组长	1980年09月04日
38	赵伟珍	上海锅炉厂有限公司	无	1961年01月11日