花键齿轮轴热处理工艺优化

宁波东力传动设备有限公司 （浙江 315033） 牛万斌 张华武

一、齿轮轴概况

（1）齿轮轴结构 工件外形及尺寸如图1所示。

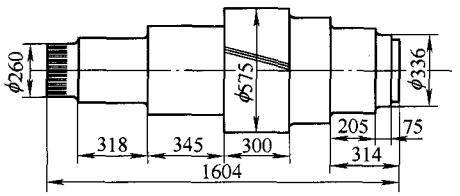


图1 某带花键齿轮轴

（2）技术参数 齿轮轴技术参数如表1所示。

表1 齿轮轴技术参数

部位	法向模数 mn	齿数 z	分度圆螺旋角 β	公法线长度 Wk	精度等级
轮齿部分	20	26	7° 29′ 47″	214.974	6HJ
花键部分	6	55		170.441	5f

（3）齿轮轴材料 采用20CrNi2MoA，化学成分见表2。

表2 20CrNi2MoA钢实测化学成分（质量分数） （%）

C	Si	Mn	S	P	Cr	Ni	Mo
0.19	0.27	0.98	0.017	0.02	0.62	1.95	0.23

（4）技术要求 齿轮轴技术要求如表3所示。力学性能要求：$\sigma_b \geqslant 1080$MPa；$\sigma_s \geqslant 785$MPa；$\delta_5 \geqslant 8\%$；$\psi \geqslant 35$；$A_{KV} \geqslant 47$J。

表3 齿轮轴技术要求

部位	有效硬化层深/mm	齿面硬度HRC	心部硬度HRC	齿/键同轴度/mm	磨削要求
轮齿部分	2.8～3.5	57～61	35～40	≤1.0	齿面无磨削裂纹
花键部分	1.1～1.7	57～61	35～40		

二、差值渗碳法工艺尝试

1. 差值渗碳法

从上述参数和技术要求可以看出，花键和轮齿碳氮共渗层深度分别按每炉10%抽样检查，对变形项目全部进行检验，结果如表2所示。

表2 批量生产检验结果

零件名称	渗层深度/mm	心部硬度HRC	表面硬度HRC	圆跳动量/mm
主动齿轮	0.42～0.45	24～38	56～59	0.036～0.045
Ⅰ轴Ⅱ速齿轮	0.42～0.45	24～34	58～61	0.041～0.056
起动齿轮	0.30～0.35	22～32	56～58	0.043～0.054
Ⅱ轴Ⅲ速齿轮	0.42～0.45	23～35	58～63	0.041～0.056
Ⅰ轴Ⅰ速齿轮	0.42～0.45	24～36	58～61	0.042～0.057
Ⅱ轴Ⅰ速齿轮	0.42～0.45	25～37	58～61	0.041～0.054
Ⅱ轴Ⅱ速齿轮	0.42～0.46	24～36	58～62	0.045～0.058

3. 生产中曾出现的问题及补救措施

我公司生产齿轮近五年，齿轮热处理质量稳定，但也出现过共渗层硬度偏低、共渗层浅等问题，经采取措施顺利地解决了问题，确保了产品质量。

（1）硬度偏低 共渗阶段未严格控制煤油和三乙醇胺流量（即每分钟滴数），易导致齿轮表面硬度偏低。重新在（860±20）℃对齿轮进行碳氮共渗处理，按具体情况调整煤油和三乙醇胺的流量，同时调整保温时间，齿轮质量改善效果较好。

（2）共渗层浅 碳氮共渗阶段保温时间短，易导致齿轮表面共渗层浅。经重新进行碳氮共渗补救，延长保温时间，能达到满意的效果。

4. 结语

生产的7种齿轮经多次抽件切割考核，质量稳定，又经多次装配试车考核证实，经上述热处理工艺生产的齿轮具有较高的接触疲劳强度和耐磨性，使用性能良好，充分表明采用气体碳氮共渗完全能满足产品要求。MW （20120207）

部位的模数相差悬殊，有效硬化层深度要求不一样。为了达到不同的渗层深度，可以进行两次渗碳，即先考虑轮齿部位，而花键部位涂防渗剂，接近或达到技术要求的下限深度。加工好花键部位后，再进行第二次渗碳，目标深度是1.7mm并附加预留磨量。两次渗碳后，再一并完成淬火＋回火处理，整个工艺曲线如图2所示。

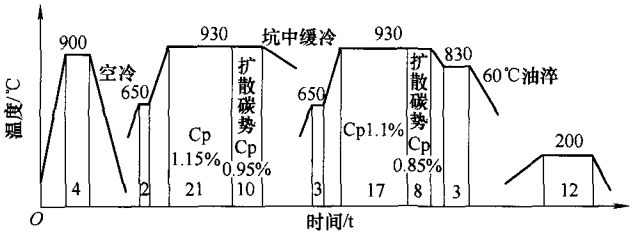


图2　某齿轮轴的热处理工艺

工艺制定原则：900℃正火处理是为渗碳淬火做好组织准备，便于车削加工，同时消除内部应力，减小变形。第一次渗碳主要是解决齿部/花键的渗层深度差值，而第二次渗碳是保证两个部位都达到有效硬化层的深度要求。渗碳后降温至820～830℃保温，然后淬入60～80℃的快速光亮淬火油中，最后经过200℃的回火处理，即可保证两个部位表面硬度均能达到57～61HRC。

2. 渗碳淬火＋回火后的变形情况

2009年，某项目中的15件带花键齿轮轴，按照上述工艺进行热处理，结果产生了不同程度的变形。表4是其中5件的变形量统计，其中同轴度的变化并无一定规律，一般是长径比越大，其变形量就越大，最大的达到2.4mm，最小的也有1.45mm。由于采取了一些特殊的挽救措施，做了多方面的努力，15件产品最终勉强过关。

表4　齿轮经差值渗碳及淬火＋回火后的变形数据

序号	外径尺寸（键/齿）/mm	键/齿外端间距/mm	模数 mn	公法线长度/mm		渗层深度/mm	
			键/齿	键	齿	键	齿
1	320/625	754	6/20	170.287	214.794	1.1～1.7	2.8～3.5
2	340/567	620	6/20	170.296	172.997	1.1～1.7	2.8～3.5
3	225/429	600	5/12	127.132	129.905	1.1～1.7	2.8～3.5
4	188/364	537	4/12	90.059	128.771	0.9～1.2	1.8～2.4
5	188/364	469	4/12	90.059	128.771	0.9～1.2	1.8～2.4

序号	外径变量（键/齿）/mm	键/齿同心度/mm	公法线变量（键/齿）/mm	齿间跳动/mm	长端二阶跳动/mm
1	1.01/1.14	1.45	0.145/1.06	0.20	0.40
2	1.08/1.26	1.52	0.201/1.03	0.20	0.42
3	0.97/1.03	2.44	0.197/0.89	0.18	0.42
4	0.86/1.03	2.32	0.175/0.72	0.16	0.30
5	0.76/0.95	1.85	0.231/0.82	0.18	0.36

由于热处理变形难以控制，风险较大，给冷加工也带来了较大的困难，我们决定只对齿部进行渗碳，而对花键部位的硬度不作要求，加工成形即可。结果，由于花键部位硬度太低（230HBW），加之装配不到位，运转时花键出现了塑性变形，同时由于花键强度不够，轴颈发生断裂。由此看来，花键部位必须具有一定的硬度与强度。

三、工艺改进

根据设计理论计算，花键部分的硬度只要能达到38～42HRC，即可满足承载能力要求。经过技术部门与客户协商，对图样中关于花键部位的硬度要求作出调整，并在此基础上，进行了热处理工艺的优化试验。

1. 工艺试验

常用的中碳合金钢（如35CrMo等）经过表面淬火后均可达到50HRC以上的表面硬度，而对于20CrNi2MoA钢材，表面硬度若能达到40HRC以上即可满足要求。为此，制作了两个相同的ϕ40mm×50mm柱状试样，采取不同方式淬火，试验结果列于表5。

表5　20CrNi2MoA钢材淬硬性试验结果

试样编号	加热方法	冷却介质	淬透深度	淬后硬度HRC
1	火焰加热	水	全部淬透	44～47
2	炉中加热	油	全部淬透	44～47

2. 模拟工件验证

根据20CrNi2MoA试样的试验结果，花键部分采用表面淬火的方法，硬度是可以满足要求的，为了验证可靠性和工艺复现性，再进一步做实物的模拟试验。

试验工件如图3所示。

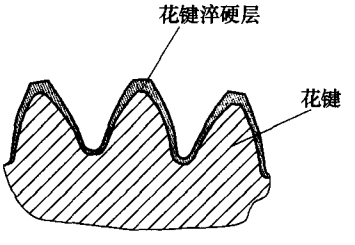


图3　模拟感应淬火工件

（1）试验工件基本参数见表6。

表6 试验工件基本参数

材料	调质硬度HBW	花键参数	外径/mm	花键长度/mm
20CrNi2MoA	246	*m*n7，*z*38	260	230

（2）表面感应淬火工艺参数如表7所示。

表7 表面感应淬火工艺参数

电源频率/Hz	感应器类型	工件/感应器间隙/mm	负载电压/V	负载电流/A	功率因数 $\cos\phi$	适载功率/kW
10000	环形	2.5～3.0	750	168	0.95	120

淬火方式	淬火介质	淬火水压/MPa	移动速度/（mm·min^{-1}）	回火温度/℃
连续	水	0.1	65	330

（3）质量检验 模拟工件的花键部分经过感应淬火＋回火后，进行质量检验，结果如表8所示。

表8 花键表淬后检验结果

花键表面硬度HRC	淬硬层深度/mm	淬硬层分布	表层金相组织	花键变形量/mm	
				径向	轴向
43～45	1.5～2.5	沿齿廓	细针马氏体	0.15～0.2	0.1～0.15

感应加热淬火后的淬硬层分布状况如图4所示，淬硬层沿花键齿廓连续分布，花键表层呈压应力状态，有助于提高花键的弯曲疲劳强度。

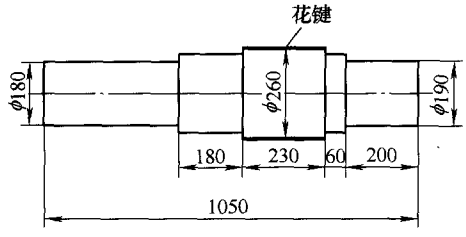


图4 感应淬火淬硬层分布状态

3. 优化后的工艺流程

锻件→粗加工→正火→半精加工→滚齿→渗碳淬火→加工花键→花键感应淬火→精加工→磨齿→装配。

4. 生产应用

2010年，某项目减速机中花键齿轮轴共计28件，其中14件采用差值渗碳+淬火工艺，另外14件采用一次渗碳+花键感应淬火工艺（优化），热处理后的齿轮轴变形情况分别列于表4和表9。从两表数据可以看出，渗碳淬火类型齿轮轴的变形量大于感应淬火齿轮轴，两次渗碳处理加剧了轮齿和花键部分的变形量，特别是二者的同心度变化，有的甚至达到2.44mm。这种“麻花状”变形轻者给精加工带来困难，严重时还会因同心度无法修正而导致产品报废。而采用一次渗碳+感应淬火工艺后，不仅使花键变形量减小，齿轮轴的合格率达到了100%，而且简化了工艺，降低了制造成本，提高了生产效率。

表9 一次渗碳+感应淬火的变形数据 （mm）

件号	齿部热后变形量			花键热后变形量		
	轮齿外径	公法线长度	径向跳动	花键外径	公法线长度	径向跳动
1	0.61	0.61	0.94	0.20	0.21	≤0.20
2	0.62	0.58	0.91	0.23	0.20	≤0.20
3	0.74	0.47	0.52	0.27	0.18	≤0.20
4	0.78	0.12	0.61	0.24	0.18	≤0.20
5	0.69	0.48	0.45	0.29	0.16	≤0.20

四、经济效益分析

花键部分采用感应淬火处理，从生产成本、效率、成品合格率到加工工艺，都优于差值渗碳＋淬火工艺（见表10），而14件带花键齿轮轴的加工制造结果，也充分验证了这种改进工艺的合理性和可靠性，花键感应加热淬火工艺完全可以替代差值渗碳工艺。

表10 两种工艺的经济效益对比

热处理工艺	生产效率/（h·件$^{-1}$）	生产成本/（元·kg^{-1}）	成品合格率（%）	工艺特点
差值渗碳+淬火	35	8	70	复杂
一次渗碳+感应淬火	25	5	100	简单

五、结语

感应淬火工艺简单，工件变形小，不易氧化，易于操作，劳动条件好，而且容易实现机械化和自动化，经过批量生产，充分体现了感应淬火工艺生产效率高，成本低，风险程度低，成品合格率高的优势。对于花键硬度要求为40～45HRC的20CrNi2MoA钢齿轮轴，完全可以用感应淬火工艺替代差值渗碳＋淬火工艺。MW （20120118）