FN－0205 材料内花键齿环感应热处理工艺

东风汽车有限公司刃量具厂 （湖北十堰 442002） 杨 锴

我厂在2011年对外承接了一种FN－0205材料的内花键齿环的热处理劳务，其内花键齿环要求感应淬火。技术要求为全齿淬火，有效硬化层深为1～3mm（从齿底算起），齿部硬度不小于42HRC。该产品在试制过程中采用刀具焊接用的超音频电源加热，然后手工淬火，试制成功后，为了满足批量处理的需要开始采用专用的数控立式淬火机床感应淬火，发现内花键处极易产生裂纹。因此，我厂热工技术部门对内花键齿环开裂原因进行分析，并对感应淬火工艺做进一步的试验和研究，确定了新的淬火工艺参数，使得热处理质量得到了有效控制。

1. FN－0205 材料分析

按照结构材料类别，FN－0205归属于铁基结构粉末冶金材料，为多孔材料，常用于制作如齿轮、内齿环等耐磨零件。材料主要成分为Fe、Ni、Cu、Mo、C，是采用铁钼合金粉、镍粉、石墨及铜以二次温压成形而成。该材料收录于美国MPIF－35标准（金属粉末工业联合会标准）中，是通过配料、压制成形、烧结等工艺而制成的材料。加工工艺过程为：粉末的制取→加压成形→烧结→正火→粗磨（留磨量）→碳氮共渗淬火或感应淬火→低温回火→精磨。

这类材料内部孔隙比较多，过热敏感性差，淬透性差，易氧化和腐蚀，因此一般应在保护性气氛中热处理，同时考虑增加密度来提高热处理性能。FN－0205材料理论配方密度≥6.6g/cm^3，基体硬度≥100HBW，抗拉强度≥830MPa，伸长率＞0.5%，弹性模量＞155GPa，主要成分含量w_{Fe}＝91.9%～98.7%，w_{Ni}＝1%～3%，w_C＝0.3%～0.6%。因为该材料为粉末冶金材料，属多孔隙材料，基体硬度测试值有明显偏差，其平均基体硬度为112HBW，满足基体硬度要求。通过直读光谱仪检验材料成分如表1所示。

表1 内花键齿环的化学成分（质量分数）（%）

Ni	Cu	Mo	C	Mn	Fe
1.95	1.69	0.49	0.41	0.11	95.35

2. 开裂原因分析

（1）开裂形式 在前期试制中采用的是刀具焊接超音频电源加热、手工浸油淬火工艺，内花键齿未出现开裂，而改用专用的数控淬火机床后却发生了淬火开裂，开裂形式是齿底裂口，个别产品出现了齿根裂纹（见图1）。



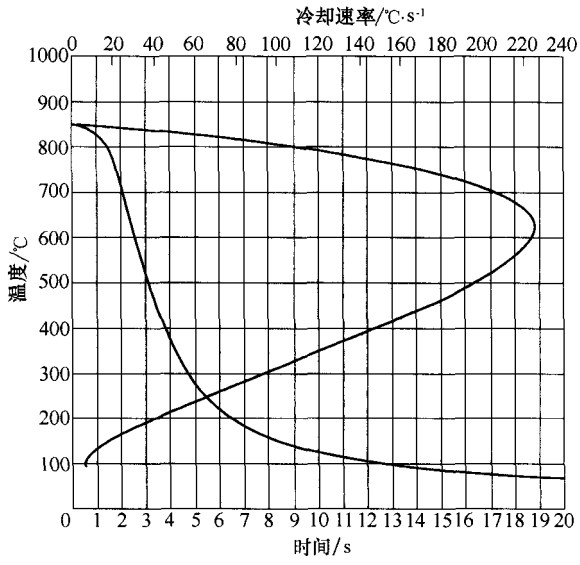
(a) 齿根裂口 (b) 齿根裂纹

图1 内花键齿开裂

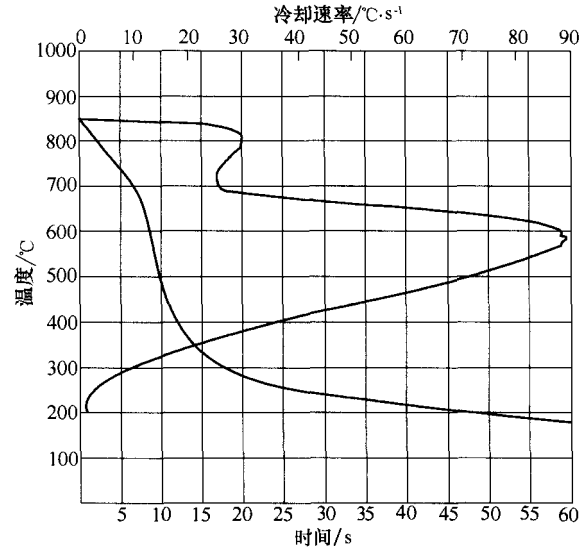
（2）开裂分析 试制用感应淬火工艺和批量处理用感应淬火工艺比较如表2所示。

表2 试制和批量处理感应淬火工艺比较

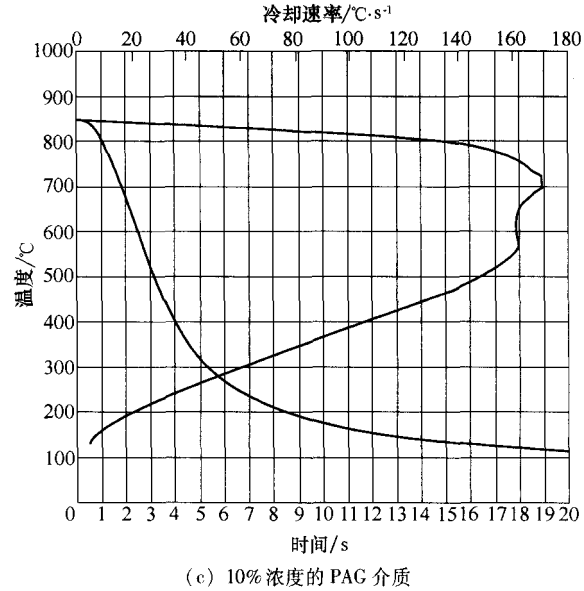
工艺项目	设备	电源功率/kW	电源频率/kHz	感应器与齿顶间隙/mm	淬火方式	开裂情况
试制工艺	刀具焊接超音频电源	60	30～50	8	手工浸油	无开裂
批量处理工艺	专用数控淬火机床	45～50	24～26	1.5	自动喷6%～9%PAG淬火冷却介质	易开裂



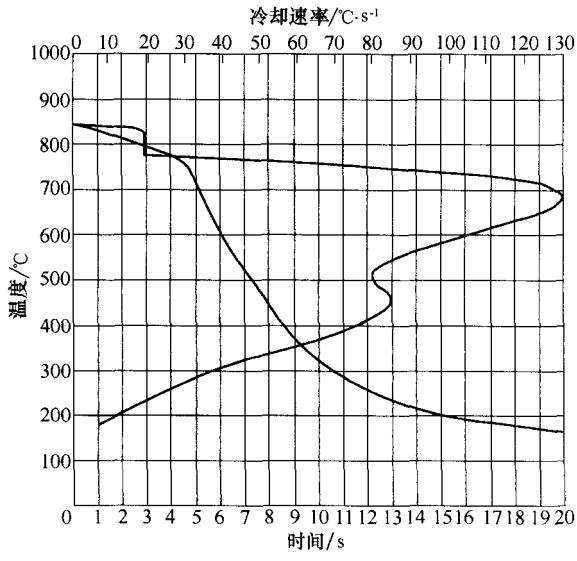
(a) 清水介质



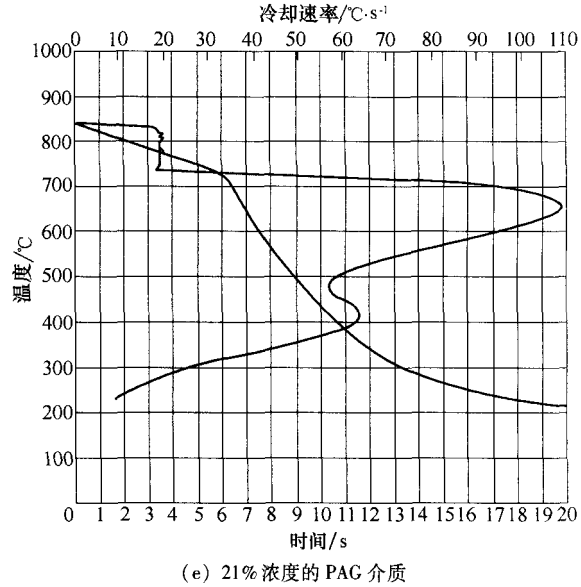
(b) 高温分级淬火油介质



(c) 10%浓度的PAG介质



(d) 16%浓度的PAG介质



(e) 21%浓度的PAG介质

图4 各种淬火冷却介质的冷却特性曲线

表4 不同种类淬火冷却介质的冷却特性

冷却介质	$t_{V_{max}}$ /℃	v_{max} /℃·s^{-1}	v_{300} /℃·s^{-1}	t_{600} /s	t_{400} /s	t_{200} /s
清水，25℃	631	226	92	2.6	3.7	6.5
10% PAG，25℃	714	171	61	2.4	3.9	8.1
16% PAG，25℃	679	131	38	6.1	8.7	15.6
21% PAG，25℃	668	109	27	7.4	10.7	21.5
高温分级淬火油，100℃	585	89	9	8.7	12	49.6

从冷却特性曲线可以看出，清水介质在高温区冷却速度不是很快，而在马氏体转变区的冷却速度又很快，这样更容易产生淬火裂纹和变形。而高温分级淬火油虽冷却性能较好，可是一般适用于多用炉大油槽、大批量淬火用，但不适合于感应淬火小批量热处

理模式。PAG 淬火冷却介质测试数据表明，浓度为10% 的 PAG 淬火冷却介质的高温冷却速度与水相比下降较多，但是低温冷却速度下降的较少，使用该介质来处理淬透性较好的 FN－0205 铁基粉末冶金内花键齿环，淬火开裂的风险仍然很大。浓度为 16% 的 PAG 淬火冷却介质的低温冷速与浓度为 10% 的 PAG 淬火冷却介质相比已经显著下降；而浓度为 21% 的 PAG 淬火冷却介质的最大冷却速度已经与淬火油相差不大。由于浓度为 21% 的 PAG 淬火冷却介质已经较为黏稠，对于淬火冷却的均匀性不利，也不经济，而且按照国际通用惯例，水溶性淬火介质 300℃时的冷却速度为水的一半时即可以用来代替淬火油，所以选择浓度为 16% 的 PAG 淬火冷却介质较为合适。

（4）感应淬火加热参数的确定　内花键齿环的有效淬硬层深为 1～3mm（从齿底算起），电源频率选择超音频 25～30kHz。因为感应器与齿顶的间隙较小（1.5mm），加热效率较高，为了减缓加热速度，选择使用较低的加热功率，适当延长加热时间。为了使感应加热区域的温度均匀，感应加热结束后，先预冷 1s 再喷淬火冷却介质。

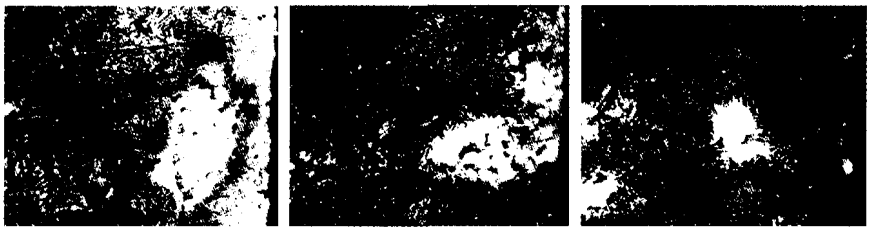
采用较低的温度回火，以获得较高的齿部硬度。表 5 显示在不同的加热功率下随着加热功率的降低适当延长加热时间后的试验结果，表 6 是对热处理硬度梯度比较，图 5 是淬火金相组织比较。

表 5　不同加热功率下的试验结果比较

序号	加热功率/kW	淬火冷却介质	齿底硬度梯度	齿底金相组织	齿部硬度 HRC	开裂情况
1	40	16% PAG	见表 6	见图 5	43.2	无
2	36				44.5	无
3	31				44.8	无

表 6　不同加热功率下的硬度梯度比较

淬硬层深/mm	0.10	0.40	0.65	1.0	1.2	1.5	1.8	2.1	硬度梯度示意图
序号	齿底硬度梯度（HV5）								
1	189.4	242.9	278.7	460.4	403.2	305.4	462.9	246.6	
3	343.5	349.0	272.8	386.3	298.4	300.3	223.3	246.0	
5	445.8	392.5	438.4	305.1	347.2	348.5	360.9	277.7	



400×　　400×　　400×

(a) 40kW　　(b) 36kW　　(c) 31kW

图 5　不同加热功率下的淬火金相组织比较

试验结果表明，降低加热功率，采用冷速缓慢的淬火冷却介质后，内花键齿环感应淬火后不再产生淬火裂纹，但是热处理的质量有所不同。在 40kW 功率下加热，淬火温度较高，齿面硬度稍低，组织中的残留奥氏体较多，齿底硬度梯度较差，即靠近齿底硬度低，距齿底 1mm 处才达到最高硬度。在 36kW 功率下加热的齿面硬度较高，组织中的残留奥氏体较少，淬火硬度梯度有所改善。在 31kW 功率下加热并适当延长加热时间后，组织中的残留奥氏体少，齿面硬度较高，齿底的硬度梯度较好，即靠近齿底硬度较高，这样的组织使得齿面有较高的硬度和较好的残留压应力，更加有利于保证内花键齿环的耐磨性和抗疲劳性。

4. 结语

（1）内花键齿环所用的 FN－0205 铁基粉末冶金材料因 Ni、Mo 含量较多，奥氏体相变点比较低，淬透性较高，局部感应淬火容易产生开裂，因此应采用较低的淬火温度和冷却特性较缓和的淬火冷却介质。

（2）铁基粉末冶金制件的感应淬火应采用较低的加热功率，以减缓加热速度，采取感应加热后的预冷淬火，以减小淬火之前加热区域的温度不均匀性，来防止淬火开裂。

（3）通过工艺试验，确定了新的内花键齿环的感应热处理工艺参数，批量试制后 100% 无裂纹。

MW　（20120222）