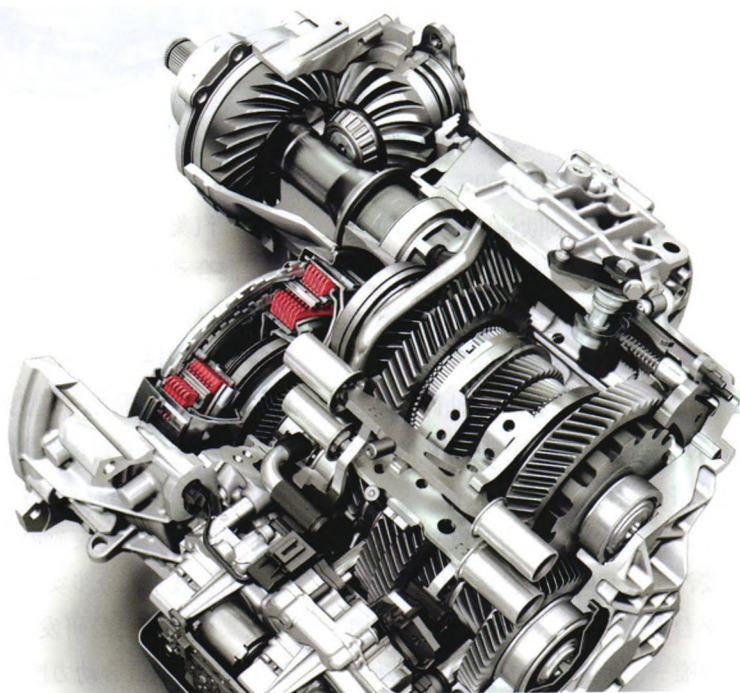


汽车齿轮热处理难点及其解决方案

□ 哈尔滨汇隆汽车箱桥有限公司/金荣植

随着汽车市场竞争日趋激烈，对汽车关键零件——齿轮内在质量的要求日益增高。高精度、低噪声、长寿命已经成为当前汽车齿轮发展方向。但目前汽车渗碳齿轮存在的表面内氧化和非马氏体组织、畸变较大等已成为当前齿轮热处理瓶颈。对此，可从热处理工艺及装备加以改进。



齿轮渗碳内氧化和非马氏体组织及其解决方案

1. 渗碳内氧化和非马氏体组织

汽车齿轮渗碳时，由于表面内氧化，而导致合金元素的迁移和碳的浓度下降，结果使该层的淬透性相应下降。在常规淬火时，就导致非马氏体组织（见图1）的形成，因此非马氏体组织是由于内氧化造成的。较为严重的内氧化和非马氏体组织将会使齿轮表面硬度降低，并产生极为不利的残余拉应力，由晶界或氧化物的应力集中区域萌生细微裂纹，并向更深处延伸扩展，使渗碳齿轮的耐磨性能、接触疲劳性能、弯曲疲劳性能和抗麻点剥落

性能降低，从而导致齿轮早期失效。当表面非马氏体组织的厚度在 $16\mu\text{m}$ 以上时，疲劳强度可降低25%左右；当表面非马氏体组织的厚度在 $40\mu\text{m}$ 以上时，疲劳强度可降低50%左右，由此显著降低齿轮的使用寿命，因此对此类问题应予以高度重视。

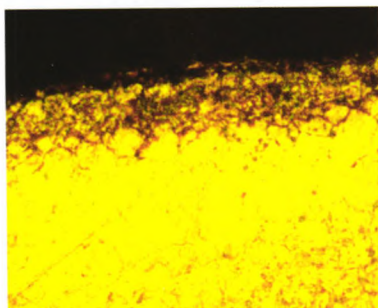


图1 20CrMnTi钢齿轮渗碳淬火后表层非马氏体组织形态（ $\times 100$ ，轻腐蚀）

德国奔驰、宝马、波尔特公司要求非马氏体层厚度必须控制在 $3\mu\text{m}$ 以下，见表1。内氧化的检测通常用光学显微镜在未浸蚀状态下进行。

2. 解决方案

（1）采用稀土渗碳热处理技术。该技术属于我国自有知识产权的先进热处理技术，与传统渗碳工艺相比，在渗碳温度不降低情况下，可提高渗碳速度20%以上；在渗碳温度降低 $40\sim 60^\circ\text{C}$ 条件下，渗碳速度不降低，可显著减少齿轮畸变，还可以明显改善渗层金相组织并提高使用性能。该技术经过30多年的生产实践，现广泛应用于汽

车、拖拉机、工程机械等零部件（如齿轮）等。

一汽集团公司在连续式气体渗碳炉上采用稀土渗碳技术改善汽车齿轮非马氏体组织，具体见表2。稀土抑制非马氏体组织产生的原因分析如下：

由于稀土的加入可以引起炉内气体成分的变化，使炉气中的含氧量降低，还原性气氛更强，从外界上降低了O的含量，导致“内氧化”的降低。同时，稀土作为比较活泼的元素，并且可以渗入钢体表面，当微量O沿着奥氏体晶界渗入钢体并对Fe及合金元素产生作用时，优先氧化稀土，并生成如RE₂O₃稀土氧化物，从而抑制了O对合金元素以及Fe的氧化，即可抑制非马氏体组织的生成；能谱点分析同一试样产生非马氏体组织的晶界和晶内处进行点扫描，测定C、

O以及Fe元素。结果是非马氏体的晶界与晶内分别为3.67%和2.13%，即非马氏体组织的晶界处O含量比晶内高出50%以上。C含量变化不大。因此，非马氏体组织是由于内氧化造成的

(2) 采用真空渗碳技术。真空热处理技术具有无氧化、无脱碳、脱气、脱脂、表面质量好、畸变小，以及综合力学性能优异、使用寿命长、绿色无污染、自动化程度高等一系列突出优点。60余年始终是世界热处理技术发展热点之一，我国近40年也得到迅速发展，现已应用于轿车变速器齿轮、发动机齿轮等的真空渗碳热处理。取得了优异的综合性能及使用寿命。由于该项技术无论从工艺还是设备上已经很成熟，已成为可行替代现行可控气氛渗碳的有效方法。

真空渗碳因无氧化性气氛，所

以没有晶界氧化层，图2为齿轮真空渗碳后金相组织。

目前，真空渗碳热处理技术与设备已在我国汽车行业得到应用。周期式低压渗碳高压气淬炉、半连续式低压渗碳生产线已在上海汽车工业集团、一汽集团、二汽神龙汽车公司等得到应用，用于载重汽车变速器及发动机齿轮、轿车发动机及变速器齿轮、重载汽车的齿套等零件的渗碳热处理。图3、图4分别为德国ALD公司低压真空渗碳高压气淬生产线和法国ECM的ICBP型连续式低压真空渗碳自动生产线。

采用真空渗碳热处理技术解决齿轮内氧化的实例见表3。

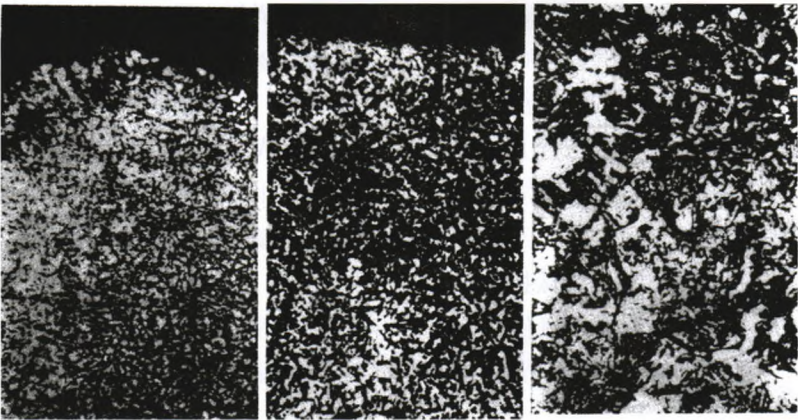
(3) 采用真空低压渗碳与高压气淬技术。真空低压渗碳与高压气淬相结合是当今一种先进的渗碳淬火技术，它具有渗碳速度快、金相组织优良、淬火畸变小、节约能

表1 非马氏体组织的相关标准

GB/T 8539—2000：1级		德国大众		德国奔驰、宝马、波尔舍	
58HRC以上，渗层>0.75mm，非马<12 μm 渗层0.75~2.25mm，非马<20 μm		60HRC以上	非马氏体≤10 μm	61HRC以上	非马氏体≤3 μm
若用HV1转换大约53HRC		HV1转换	金相浅腐蚀	HV1转换	金相浅腐蚀

表2 采用稀土渗碳技术改善汽车齿轮非马氏体组织实例

项目	内容																																										
稀土渗碳工艺方案	在连续式渗碳炉上不同温度、不同推料周期有无稀土渗碳工艺方案：																																										
	<table><tr><td>区段</td><td>1区</td><td>2区</td><td>3区</td><td>4区</td><td>5区</td></tr><tr><td>温度/℃</td><td>900</td><td>930</td><td>930</td><td>910</td><td>840</td></tr><tr><td>RX保护气/m³·h⁻¹</td><td>12</td><td>10</td><td>8</td><td>10</td><td>10</td></tr><tr><td>碳势w（C）（%）</td><td>—</td><td>1.00</td><td>1.15</td><td>1.05</td><td>0.90</td></tr><tr><td>稀土流量/mL·min⁻¹</td><td>0</td><td>20</td><td>25</td><td>15</td><td>0</td></tr><tr><td>推料周期/min</td><td colspan="5">30、40、50</td></tr><tr><td>齿轮材料</td><td colspan="5">20CrMnTi、20CrMoH、20CrNiMo</td></tr></table>	区段	1区	2区	3区	4区	5区	温度/℃	900	930	930	910	840	RX保护气/m ³ ·h ⁻¹	12	10	8	10	10	碳势w（C）（%）	—	1.00	1.15	1.05	0.90	稀土流量/mL·min ⁻¹	0	20	25	15	0	推料周期/min	30、40、50					齿轮材料	20CrMnTi、20CrMoH、20CrNiMo				
	区段	1区	2区	3区	4区	5区																																					
	温度/℃	900	930	930	910	840																																					
	RX保护气/m ³ ·h ⁻¹	12	10	8	10	10																																					
	碳势w（C）（%）	—	1.00	1.15	1.05	0.90																																					
	稀土流量/mL·min ⁻¹	0	20	25	15	0																																					
	推料周期/min	30、40、50																																									
齿轮材料	20CrMnTi、20CrMoH、20CrNiMo																																										
稀土催渗剂	采用YF-Ⅲ型复合稀土催渗剂，以2.5：200V/V溶解于甲醇中使用																																										
稀土渗碳效果	当正确执行稀土渗碳工艺时可获得典型的金相组织，即过共析区沉淀析出细小弥散颗粒状碳化物，此时的表面硬度一般都能保证达到62～64HRC。较好地解决了表面硬度因内氧化导致低头的现象																																										
	由于稀土的加入，炉内碳势均有所提高，提高幅度为3.3%～13%																																										



(a) 齿顶处 (b) 齿工作面 (c) 心部
图2 20CrMo钢齿轮真空渗碳淬火、回火后的金相组织 (×400)



图3 德国ALD公司低压真空渗碳高压气淬生产线



图4 法国ECM的ICBP型连续式低压真空渗碳自动生产线

源和工艺材料，以及处理后无需清洗等优点。

1) 高压气淬密封箱式炉与工艺。齿轮经密封式箱式炉气体渗碳

后，在1~2MPa高压的惰性气体中施行气淬以代替常规油淬，可获得更小的淬火畸变；高压气淬密封箱式炉后室为密封箱式炉结构，前室进行高压气淬。工件在后室保护气氛中无氧化加热或在渗碳气氛中渗碳，在前室进行无氧化光亮淬火；前室中部为工件气淬室，下部为进气管道，上部为冷却回风热交换器。前室外侧安装变频调速大功率风机，通过气态N₂或He的快速循环使工件冷却淬火。

2) 高压气淬推杆式炉气体渗碳生产线与工艺。爱协林生产的可控连续式气体渗碳炉，配以气体淬火室使气淬技术的优点得到发挥，使得气体渗碳生产线有高的生产能力和合理热处理成本。高压气淬系统应用于推杆式连续气体渗碳生产线。在生产线上高压气淬室和加热炉之间采用了两道密封，在气体渗

碳室与供气淬压力室之间有一带有滚动转移系统的中间室，可以使10s以下的速度平稳地转移到气淬室，中间室的入口制作的很小，以使炉子内的O₂和气淬室的N₂相互干扰减小到最低程度。工艺流程为：400℃预热→925℃渗碳→860℃扩散→2MPa氮气高压气淬→170~190℃回火。应用情况：该生产线综合了连续式气体渗碳生产线和高压气淬优势：生产能力大；以高压氮气淬火代替传统油淬火，省去了淬火油和清洗剂的消耗，省去了后清洗，生产成本降低20%，减小了工件淬火畸变。

3) 真空低压渗碳+高压气淬工艺应用。在汽车工业，高压气淬可以采用单室、双室、三室的低压渗碳高压气淬真空周期炉及多室低压渗碳和高压气淬组成的生产线等。汽车齿轮等零件采用此设备与工艺处理后，热畸变控制在非常窄的范围，显著提高了零件的尺寸精度。

4) 采用气体等温淬火工艺解决畸变问题。通过优化淬火冷却工艺来减少齿圈淬火畸变。ECM低压真空渗碳生产线的气体淬火室配备了变频电动机带动气体淬火搅拌风扇，可在不同的时间段，通过程序设置达到不同的转速，从而实现淬火冷却速度的调节与控制。

采用氮气淬火的等温气体淬火

表3 采用真空渗碳技术解决齿轮内氧化的实例

齿轮技术条件	20CrMnMo、20Cr、20Ni4A钢，技术要求：渗碳层深度0.80mm左右，表面碳浓度0.84%左右（质量分数）
设备与工艺	法国ECM公司的ICBP-966型真空渗碳炉；真空渗碳温度980℃
解决内氧化原理	低压真空渗碳的典型气压范围是400~667Pa。真空条件使得碳原子更容易向钢材表面转移，同时因为不存在气体渗碳工艺中的水煤气反应，因而也就没有内氧化现象
效果	渗碳层深度为0.82mm；表面碳浓度0.85%（质量分数）；碳浓度梯度分布与模拟曲线基本吻合。经过渗碳淬火的齿轮表面为金属原色，渗层无内氧化情况，组织细而均匀

工艺：在原有的淬火工艺上，增加淬火搅拌停留时间18s，相当于淬火搅拌风扇停止运转，冷却速度会有一个较快的下降，18s后重新启动淬火搅拌风机，完成淬火冷却过程。使淬火冷却曲线远离贝氏体转变开始线，相当于等温气体淬火，最终获得了较为理想的畸变结果和金相组织。采用气体等温淬火工艺解决畸变问题应用案例见表4。

齿轮渗碳热处理畸变及其解决方案

汽车齿轮经常规渗碳淬火、回火后，常出现畸变较大问题，严重影响了汽车变速器、发动机及驱动

桥的精度，使噪声超差，使用寿命降低。对此，可先进的热处理工艺与装备，以减少与控制齿轮畸变。

1.方法

(1) 采用稀土渗碳（碳氮共渗）技术及BH催渗渗碳技术。稀土催渗剂和BH催渗剂在渗碳淬火工艺中的应用，可细化显微组织，减小齿轮畸变。在不降低渗碳温度下，可减少1/3左右的渗碳周期；在保持相同渗碳层深度的情况下，可降低渗碳温度30~50℃，以获得很好的畸变控制效果。

(2) 采用渗碳后感应淬火技术。渗碳后感应淬火目的是为了更多地提高齿轮表面硬度、耐磨性与

疲劳强度，同时改善硬化层分布并减少齿轮的畸变。

(3) 采用新的模压式感应淬火技术与装备。模压式感应淬火技术综合了感应淬火和压床淬火工艺的优点，齿轮感应淬火后直接采用模具淬火，然后进行原位感应加热回火，不仅简化工序提高生产效率，而且减小齿轮畸变。

(4) 采用低压真空热处理炉与高压气淬设备及其工艺。真空加热淬火：齿轮采用真空加热淬火工艺可以明显减小热处理畸变，配合分级淬火能够减少畸变量50%左右（同直接油淬相比）。该项技术已广泛应用于精密齿轮等的淬火处

表4 采用氮气等温气体淬火工艺解决轿车变速器齿圈畸变

齿轮名称	长安福特轿车自动变速器齿圈				
技术条件	20CrMo钢，要求渗碳淬火，齿圈畸变要求：				
	参数		热处理前后畸变量要求		
	DOB中径跨棒距/mm		0.100		
	齿顶圆直径/mm		0.100		
	齿根圆直径/mm		0.100		
设备与真空渗碳软件	采用法国ECM低压真空渗碳自动生产线与CBPWIN真空渗碳软件				
渗碳温度/℃	920				
加热和均温时间/min	80				
真空度/Pa	1000～2000				
强渗和扩散时间/min	48				
富化气流量/NL·h ⁻¹	2000				
真空淬火工艺	真空淬火工艺：				
	参数		数值		
	淬火温度/℃		920		
	淬火冷却介质		高纯度N ₂		
	风扇转速输出比（%）		50		
	输出时间/s		11		
	风扇转速输出比（%）		50		
	输出时间/s		110		
	风扇转速输出比（%）		85		
	输出时间/s		200		
	风扇转速输出比（%）		100		
	输出时间/s		159		
	效果	齿圈畸变检查结果：			
		项目	DOB中径跨棒距/mm	齿顶圆直径/mm	齿根圆直径/mm
最大		0.126	0.110	0.077	
最小		0.053	0.055	0.010	
均值		0.080	0.0732	0.035	

(下转第25页)

装配误差，热变形等因素使齿轮副之间出现干涉，而这种干涉造成齿面间的相互挤压，同样会使噪声急剧增大。按照以往变速器开发经验，侧隙设计在0.03~0.13mm比较合理，该区间齿轮之间传递不会出现尖锐的啸叫声音，齿轮副噪声较小。故障件常啮合齿面同时产生的振动波纹，齿轮齿面啮合时，直接影响到齿面之间接触质量，有时局部齿面会严重磨损，甚至造成轮齿断裂。

产生故障齿面纹路的原因

齿面加工纹路差常表现为齿面撕裂、齿面啃齿、齿面振纹和齿面鱼鳞斑。故障件齿面的磨齿加工条

纹与齿向成一定夹角，最大夹角大约成75°，为散状的细条纹纹路，且齿面上产生微小的振动波纹，该纹路主要是由于齿轴的工装夹具刚性不好，或受外界振动源影响。解决方法为：消除或者减小振动源，提高刀具刃磨质量，刀轴和工件心轴刚性，提高刀具和齿坯的装夹稳定性或减小进给量，保证充分的切削液润滑等。

生产验证

为了批量验证根本原因，重新更新中间轴常啮合齿磨齿刀具硬度，减小磨齿切削用量，加工1 000件中间轴组件，同时装配了1 000台变速器总成进行验证，空载校验台、加载校验台均没有出现啸叫声

音，整车上NVH测试各挡位声音频谱符合要求，并得到客户满意认可。

结语

变速器是汽车关键动力总成零部件，其声音的变化会直接影响操作者的主观感受，按照一般的逻辑思维，变速器啸叫很多只局限于齿形齿向研究。上述啸叫问题，给问题解决带来了多重困难，类似问题解决可以通过观察故障件和非故障件的齿面纹路差异，可以很快找出问题的出发点，争取一步研究到位，减少问题解决时间，同时对零部件加工提出了更高的要求。

AUTO1950

(上接第19页)

理。低压真空渗碳技术：低压真空渗碳过程通过计算机对渗碳温度、渗碳时间、丙烷（或甲烷、乙炔等）及氮气的流量和压力进行精确控制。可获得均匀的渗碳层、表面硬度、良好的显微组织及较小的热处理畸变，与盐浴加热淬火畸变比较，其畸变量仅为1/3~1/10。高压气淬技术：齿轮加热后在气体中冷却比在液体中冷却的均匀，因此淬火畸变小。高压气淬减小畸变，一方面是由于冷却速度低，热应力和组织应力小；另一方面，由于不存在蒸汽膜沸腾，因此冷却比较均匀。目前，多用于低于1.5MPa压力的高纯度氮气作淬火冷却介质。

2.实例

(1) 某轿车变速器齿套，28MnCr5钢，技术要求：渗碳淬

火有效硬化层深度0.25~0.4mm（630HV1）；平面度<0.05mm，圆度<0.05mm。热处理工艺采用ICBP型低压真空渗碳炉及真空渗碳工艺（Infracarb渗碳专家系统+高压气淬技术）。畸变控制情况：齿套可获得很小的畸变量，保证圆度<0.03mm，平面度<0.03~0.05mm。

(2) BJ121型汽车后桥从动弧齿锥齿轮，20CrMnTi钢，技术要求：渗碳层深度1.1~1.5mm，内孔圆度≤0.15mm，底平面的平面度：内缘≤0.10mm，外缘≤0.06mm。渗碳淬火采用密封箱式多用炉，温度与碳势自动控制，并采用“稀土低温渗碳工艺”（见图5）畸变控制情况：采用两个齿轮背对背紧配合，穿入两个横梁水平放置，通过调整两个横梁间距，来保证圆度畸

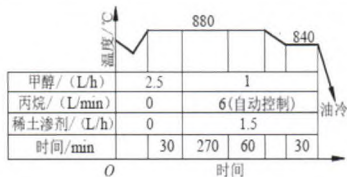


图 5

变合格率；平面度内缘≤0.10mm的占98%，外缘≤0.06mm的占96%，内孔圆度≤0.075mm的占100%。

(3) 一汽变速器分厂同步器滑套（带内外齿），20CrMoH钢，要求渗碳淬火。渗碳淬火采用连续式渗碳炉，1~5区温度分别为840~890℃、840~890℃、840~890℃和840~850℃，2~5区碳势w（C）分别为1.15%~1.25%、1.15%~1.25%、0.85%~1.05%和0.85%~1.05%。采用稀土渗碳工艺后，渗碳温度由920℃降至890℃，同步器滑套（带内外齿）畸变合格率达到96%以上。AUTO1950