齿轮的化学热处理表面硬化技术

郑州机械研究所 （郑州 450052） 陈国民

随着现代工业的迅速发展，各类齿轮的参数越来越高，原来的正火、调质软齿面齿轮已不能适应要求，因而国际上逐渐发展起来硬齿面齿轮。根据强度计算，合金钢调质到300HB的许用接触应力为850MPa，许用弯曲应力为300MPa；而渗碳淬火到60HRC的许用接触应力和弯曲应力分别达到1600MPa和500MPa。

目前，硬齿面齿轮制造主要有三大体系：①渗碳—淬火—磨齿。②滚、剃齿—渗氮。③滚（剃）齿—沿齿廓感应淬火（磨齿）。

一、齿轮的渗碳（C-N共渗）

尽管齿轮渗碳淬火有温度高、周期长、工序多而且变形比较大的弱点，然而由于渗碳淬火齿轮具有承载能力高、寿命长的最大优点，使其应用越来越广泛。汽车、拖拉机齿轮，工业齿轮中的高速齿轮，大型成套设备中的低速重载齿轮以及机床齿轮也纷纷改用渗碳淬火。所以，渗碳淬火已成为齿轮的主导热处理工艺。

渗碳淬火其影响因素较多，现在的齿轮渗碳已不仅仅限于碳势的控制，而是在更深的层次上进行应用研究。

1. 齿轮钢材冶金质量的控制

渗碳齿轮钢材冶金质量对齿轮强度和工艺性能都有很大的影响，其中尤其是钢的纯净度和淬透性。

（1）钢材的纯净度　钢材的纯净度主要为含氧量。含氧量对齿轮疲劳强度和工艺性能都有明显的影响。根据试验资料，当氧含量从2.5×10^{-5}降到1.1×10^{-5}时，其接触疲劳强度可大大提高，用精炼钢生产的齿轮，其使用寿命由原来的6000h提高到10000h。另外，采用脱气钢和普通钢轴齿轮各100件进行的滚刀试验结果表明，由于脱气钢中氧化物夹杂减少使滚刀寿命提高25%。所以目前齿轮相关标准中的规定钢中最大含氧量不得超过2.5×10^{-5}，并利用新的非金属夹杂物检验方法。

（2）钢的淬透性　钢材的淬透性包含两方面的内容：一是钢材的淬透能力，它主要是保证不同大小齿轮的心部硬度，以满足接触疲劳强度和弯曲疲劳强度的要求；另一个便是淬透性带宽度，尽可能小的淬透性带宽度波动有利于齿轮热处理变形的控制，尤其对批量生产的车辆齿轮就显得更为重要，为此，发展起来了保证淬透性钢（H钢）。

最近我国齿轮协会公布了车辆齿轮用钢市场准入条件，其末端淬透性带宽≤7HRC。

2. 齿坯的预备热处理

渗碳齿轮的预备热处理一直被视为一种不重要的辅助工序，在大批量齿轮生产，尤其在轿车齿轮的生产中，由于齿坯预备热处理质量严重影响到加工质量和效率以及淬火畸变的控制，因而对齿轮毛坯的正火工艺引起了重视。

国外日本、法国和意大利等国的汽车齿轮生产中均采用锻后齿坯等温正火处理，我国也开始进行了系统的试验研究。如20CrMnTi渗碳钢，有效厚度50mm，在1200～1250℃锻造、1000℃停锻后空冷到室温，得到粗大的魏氏组织及粒状贝氏体和珠光体，硬度29HRC，这种毛坯经正常渗碳淬火后，晶粒粗大，并有严重混晶；同样在1000℃停锻后控制冷却到580～650℃区间等温正火90min后空冷，获得块状铁素体和细片珠光体组织，用上述同样的渗碳淬火工艺处理后组织细小而均匀。一汽集团生产实践表明，齿坯采用等温正火使淬火后一次合格率由普通正火的75%提高到95%。

3. 渗碳硬化层深度的控制

由于有效硬化层深度体现了力学性能的本质，所以国际上各种标准都采用了这一概念及相应的检测方法。

（1）有效硬化层深度的确定　我国的渗碳工艺实践中普遍采用金相法或定碳法来确定硬化层深度，这是比较简便易行的方法。但是，用这种方法得到的渗碳层深度存在一个界限的确定问题，通

常，金相法是以渗层表面到心部过渡区的一半处为界限，定碳法则是从表面到含碳量 0.35% 处为界限，即认为这两种方法确定的界限处淬火后的硬度基本上为 550HV。事实上，渗碳齿轮淬火后从表面到有效硬化层深度界限硬度 550HV 相对应的含碳量与齿轮钢材的合金成分、淬火冷却状况及工件尺寸大小密切相关。表 1、表 2、表 3 的试验数据便清楚地表明了这一点。

表 1 界限含碳量与钢材合金成分的关系（J9）

钢材种类	20MnCr5	SCM420	SAE8620	SAE4320	SCr420	20CrMnTi
界限（质量分数,%）	0.45	0.39	0.48	0.28	0.47	0.39

表 2 不同冷速下的界限含碳量

钢材		20MnCr5	SCM420	SAE8620	SAE4320	SCr420
界限（质量分数,%）	120℃/s	0.46	0.42	0.44	0.38	0.43
	18℃/s	0.50	0.49	0.61	0.65	0.60

表 3 界限含碳量与工件大小的关系

试样直径/mm	界限含碳量（质量分数,%）
25	0.30
150	0.38

（2）如何保证有效硬化层深度　从以上的论述知道了有效硬化层深度受多种因素影响，如何在工艺实践中保证有效硬化层深度则需要企业在各自生产条件下对其重要的典型产品通过试验建立起对应的关系。

4. 渗碳齿轮的淬火冷却

对于高参数工业齿轮及批量生产车辆齿轮，相应对渗碳淬火质量及其稳定性提出了严格的要求，从而使淬火冷却技术受到重视。

国内外齿轮生产中采用各种快速淬火油、等温淬火油及硝盐与带搅拌的多功能淬火槽相配合，可显著提高渗碳齿轮的淬火质量。如电力机车中的 ϕ980mm、模数 12mm 齿圈渗碳后采用热油 + 搅拌淬火，比原来淬火后的外圆直径和公法线长度畸变分别降低 64% 和 37%。

近年来，淬火冷却计算机模拟技术的应用对齿轮淬火质量控制，尤其在减小淬火畸变方面会发挥更大的作用。

5. 齿轮渗碳催渗技术

渗碳温度高、周期长、变形大，所以采用催渗以提高渗速，降低工艺温度对细化组织，减小齿轮畸变和降低成本有重要的意义。

我国在催渗技术方面具有很大优势，西北大学北恒公司开发的 BH 系列催渗剂和哈工大开发的稀土催渗剂都在齿轮渗碳中得到成功应用。其明显效果是碳化物细化，在不降低渗碳温度下可减少 1/3 渗碳周期，保持相同渗层深度可降低渗碳温度 30 ~ 50℃。

6. 大型齿轮的渗碳技术

（1）深层渗碳　深层渗碳较之普通的渗碳工艺难度大得多，代表了齿轮渗碳的综合技术水平。

工业机械中的大型轧钢机、大型挖掘机及大型水泥磨等重型机器中的大齿轮承受载荷高，结构尺寸大，要求渗碳层就较深，一般为 3 ~ 5mm，最深可达 8mm，单件齿轮重量从数吨到数十吨。相应渗碳工艺周期达数十小时，最长可达 150 ~ 200h。所以这就对渗碳设备及工艺控制提出了相当苛刻的要求。

我国从 20 世纪 80 年代初开始，组织了工厂、研究所和高等院校共同对齿轮的深层渗碳进行了深入的试验研究，经过十几年的努力，现在已从设备、测试仪器及工艺控制和质量检验方面形成了一套完整的技术，并实现了国产化生产。

深层渗碳工艺的关键是既要快速渗碳以尽量缩短工艺周期，又要限制渗层碳含量过高，以避免不良碳化物的形成及过多残余奥氏体的产生。

深层渗碳工艺初期采用所谓“变温、变碳势”的滴注式渗碳工艺，过程控制主要依靠外试样观察测试来确定，随着计算机控制技术在热处理中应用，开始采用微机碳势控制工艺，现在已发展为微机碳势的动态控制。

（2）大型焊接齿轮的渗碳　渗碳焊接齿轮是大型硬齿面齿轮的一种新型结构形式。它比整体锻造齿轮可节约优质合金钢 58%，重量减轻 42%，大大节约了材料及能源，因而是大型重载齿轮的发展方向，现已在日本和欧洲得到应用。

以前的大型焊接齿轮多为调质处理，工艺比较简单，而渗碳焊接齿轮要先将齿圈焊接后进行渗碳淬火。由于存在着焊接应力、焊缝防渗、淬火冷却均匀性及淬火应力等一系列问题，直接影响到焊缝的开裂及齿轮的畸变，所以技术难度很大。

为了防止焊缝淬火开裂及减小齿轮畸变，通常

采取以下措施：①齿轮上下加盖密封，中心填充物料，以防止因齿圈、轮辐和轮毂截面相差较大而产生各部位冷却不均。②控制淬火终冷温度到 160～180℃出油空冷，借密封填充物的蓄热使齿轮处于“等温马氏体转变”而减小畸变。

7. 低压真空渗碳

近期发展起来的低压真空渗碳对加快渗速，提高渗层质量有明显的优点，特别是采用高压惰性气体冷却淬火可大大减小齿轮畸变。我国摩托车齿轮利用连续真空渗碳淬火已取得明显效果。

二、齿轮的渗氮（氮碳共渗）

渗氮是传统的热处理工艺之一，然而在齿轮上比较广泛地应用还是近些年来的事。长期以来，人们都怀疑薄而脆的渗氮层附着于软基体上是无力承受像齿轮这种零件所受载荷的。然而，由于渗氮温度低，变形小，以及加工工序少的优点而吸引着齿轮制造者。根据目前的应用统计表明，渗碳齿轮精度下降 2～3 级，而渗氮齿轮精度下降仅 1～2 级。

英国自 20 世纪 60 年代便开始研究并在海军驱逐舰上应用，随后扩大到工业齿轮；美国随着 Floe 双程渗氮工艺的开发，渗氮齿轮的应用随之扩大；德国以 Clockner 离子公司为代表，将离子渗氮应用于各类齿轮；日本、瑞士、瑞典和前苏联都采用渗氮来处理齿轮。我国由于离子渗氮工艺的优势，在齿轮的应用上具有很成功的业绩。

1. 渗氮齿轮的强度

渗氮齿轮的应用首先要解决强度问题，即：接触疲劳强度、弯曲疲劳强度、抗胶合强度。

（1）渗氮齿轮的弯曲疲劳强度　按有关标准进行的弯曲疲劳试验结果列于表 4。

表 4　渗氮齿轮的弯曲疲劳极限

材　料	42CrMo	25Cr2MoV	20Cr2Ni4	20CrNi2Mo
σ_F/MPa	280	335	325	226
热处理	渗氮	渗氮	渗碳	渗碳
有效硬化层深/mm	0.7	0.7	1.2～1.3	1.2～1.3

注：渗氮齿轮心部硬度 310～340HB。

（2）渗氮齿轮的抗胶合强度　齿轮抗胶合特性与渗氮层表面相成分关系密切。试验结果见表 5。

表 5　渗氮齿轮的抗胶合性能

齿轮材料	热处理工艺	渗层深度及相结构	抗胶合强度等级
25Cr2MoV	调质＋离子渗氮	0.5mm，α 相	8
25Cr2MoV	调质＋离子渗氮	0.5mm，γ′相	9
25Cr2MoV	调质＋离子渗氮	0.5mm，γ′＋ε	12
齿轮材料	热处理工艺	渗层深度及相结构	抗胶合强度等级
20Cr2Ni4	渗碳淬火	1.2～1.3mm	5
20CrNi2Mo	渗碳淬火	1.2～1.3mm	7

（3）渗氮齿轮的接触疲劳强度　这是人们关心的焦点，因为齿轮受接触负荷产生的最大赫兹应力是在表面以下一定深度，从表 6 接触疲劳性能试验结果看到，渗氮和渗碳齿轮的接触疲劳极限在相同等级范围。

表 6　渗氮齿轮的接触疲劳极限

材料	42CrMo	25Cr2MoV	31CrMoV9	20Cr2Ni4	20CrNi2Mo
σ_H/MPa	1533	1648	1560	1415	1415
热处理	渗　氮			渗　碳	
有效硬化层深/mm	0.7	0.55～0.6	0.54	1.2～1.3	1.2～1.3

注：1. 渗氮齿轮心部硬度 310～340HB。
2. 31CrMoV9 为德国数据。

2. 提高渗氮齿轮强度的方法

从以上试验数据看到，渗氮齿轮强度不比渗碳齿轮差，但这并不表示渗氮齿轮在接触疲劳强度方面能全面与渗碳齿轮相比，因为当齿轮模数增大，其齿廓曲率半径也增大，相应赫兹应力的深度也增加，当渗氮层深度与赫兹最大剪切应力深度之比小于某一值时，便会产生疲劳点蚀或剥落。因而重点解决的问题是提高接触疲劳强度。

（1）提高心部硬度　心部硬度直接影响渗氮层的支承能力。试验表明，当心部硬度由 240～260HB 提高到 310～330HB 时，接触疲劳强度可提高 30%。不仅如此，心部硬度的高低还通过影响渗层的表面硬度来影响齿轮的承载能力。根据美国资料，当心部硬度低于 300HB，其表面硬度只能达 50HRC 左右。因而，渗氮齿轮心部硬度通常应不小于 300HB。

（2）增加渗层深度　目前所进行的试验研究及工业实践表明，用于传递动力的工业齿轮要求层深

（下转第 23 页）

造出全自动曲轴淬火装置，未达到先进技术国产化的目的。现在能否考虑引进技术呢？日本过去的引进政策是只引进一套，第二套就要求国产化。这种政策已证明是成功的，值得我们借鉴。

2. 耗能严重的电源限期淘汰

中频发电机的空载损耗大约在5%～10%。以中频输出100kW、8kHz供电的两班制生产为例，保守推算，每台年浪费电量可达4～8万kW·h工频电。90年代以来，在新的感应加热设备应用以及旧设备改造过程中，首选产品是晶闸管中频电源，但目前仍有相当数量的不同年代生产的中频发电机还在使用，致使大量的电能白白浪费掉。为此，晶闸管中频电源取代中频发电机已刻不容缓，势在必行；另外，用于工业生产的电子管式高频电源能源浪费也相当严重，应随着全晶体管感应加热电源的逐步完善、逐步取代。

3. 短缺部件的开发

IGBT、MOSFET大功率晶体管、高频电容器、高中频电缆等关键部件至今尚未形成产品。因此，对于迅速将科技成果转化为商品的工作，有关部门应予以重视。

4. 提高淬火机床配套质量

除淬火机床的拖架移动、零件旋转、定位机构由厂家或大型企业精心设计制造外，淬火变压器、电容器、各种阀类器件、控制系统、快换接头等部件的采购应选用名牌产品，否则装配、调试问题将颇多，甚至带来不应有的麻烦。另外，机床的可操作性、可维修性及外观质量应予注意。

5. 技术交流

组织技术讲座、专业会议，进行技术交流，掌握专业发展动态信息，这将对新技术的应用起到推动作用。

五、结语

感应加热属电加热，它涉及金属材料、机械设计、计算机、高等数学、电工基础、电子技术基础、大功率电力电子器件、电机与电力拖动等相关知识领域，国内尚没设置这个专业。为提高技术水平，专业工作者一方面靠实际经验的积累，另一方面要经常参加一些感应加热学术会议及经验交流会、展览会来不断扩大知识领域；更重要的是，对外开放以来，感应热处理专业人员出国较多，将进修、考察等的心得总结成资料，供专业人员学习，对专业工作者业务素质的提高将是一项新的、有意义的工作。

我国已正式加入WTO，感应加热和其他行业一样都将受到严峻的挑战，我们每位专业技术人员一定要与时俱进、把握机遇，为使感应加热迅速赶上世界先进水平而努力奋斗。

(20030818)

(上接第18页)

在0.5mm以上，最深超过1mm。因而，在齿轮的渗氮技术中出现了“深层渗氮”的概念。而按传统的渗氮工艺，渗氮层深度大多在0.1～0.3mm，最深也就0.4～0.6mm。

为了缩短渗氮周期，尽量采用离子渗氮工艺。同时采用预氧化渗氮、脉冲时效渗氮、加压脉冲渗氮等催渗技术可进一步取得良好效果。

(3) 改善表面金相组织　从强度试验表明，对接触疲劳而言，应尽量避免白亮层的产生。采用双程渗氮、真空低压渗氮及氮势门槛值计算机控制渗氮等技术均能获得满意的效果。

(4) 渗氮齿轮应用的模数范围　齿轮模数大小与轮齿的曲率半径相关，而轮齿曲率半径又与接触负荷所产生最大赫兹应力的深度有关，因而根据目前渗氮工艺所能达到的最大深度范围，并综合大量成功的工业实践经验，国际上比较公认的模数在10mm以下。表7是英国的应用情况。结合我国的试验应用认为，齿轮模数10mm以下，接触应力1000～1300MPa，相应心部硬度不低于300HB，渗氮层深度大于0.6mm。应当指出，由于渗氮试样的S-N疲劳曲线比较平缓，过载能力较弱，因而不宜用于冲击负荷大的齿轮。

表7　英国工业渗氮齿轮的应用范围

参　数	汽轮机	H/D压缩机	H/D碎煤机	H/D水泥磨	军舰蒸气透平	燃气轮机
功率/kW	6570	4588	336	2237	5787	11190
模数/mm	4.4	4.23	8.47	8.47	6.47	6.47
接触应力/MPa	904	905	835	1014	996	1065
最大剪切应力峰值深度/mm	0.39	0.29	0.39	0.45	0.44	0.61

(20030911)