

深层离子渗氮工艺及设备的开发

郑州机械研究所 (河南 450052) 卢金生 顾敏

渗氮工艺由于其硬度高、变形小等优势正越来越多地应用于硬齿面齿轮的表面处理,如美国费城齿轮公司的硬齿面齿轮中有40%以上采用渗氮工艺,德国、法国、日本、英国和前苏联也在重要的齿轮上大量地采用渗氮处理工艺,如轧钢机、柴油机、卷扬机和汽车齿轮,最大直径已达4m。

我国是离子渗氮工艺研究应用最早的国家之一,齿轮渗氮工艺在国内也取得了成功应用,其应用的工业领域包括:钢铁、化工、机床、汽车和能源等,特别是在一些高速、重载、精密齿轮上的应用。近年来,由于行星传动具有体积小、质量小、结构紧凑和传动效率高等特点,正越来越多地被应用,其中一般都有内齿圈,还有新型清洁能源产业风电中的偏航齿圈等都需要渗氮热处理。其他的处理工艺方法很难满足内齿圈对变形的要求。蜗杆的表面硬化已普遍首选渗氮工艺。特别是齿轮深层渗氮工艺可以在一定范围替代渗碳淬火工艺而省掉磨齿的工序,节约制造成本与工期。随着经济的发展,齿轮渗氮工艺的工业应用具有很大的发展潜力。

早期进行的渗氮工艺由于渗层浅、心部硬度低,齿面承载能力不高,在实际应用中受到一定的限制。特别是受“蛋壳效应”观念的影响,对渗氮在齿轮中的应用都比较保守,如国外某机构规定产品设计中渗氮齿轮的接触疲劳极限和弯曲疲劳极限分别取渗碳淬火齿轮的70%和75%。因此,如何进一步提高渗氮齿轮的承载能力就成为了相关工程技术人员努力的方向。

通过大量的试验研究可知,决定硬齿面齿轮承载能力的关键是硬化层过渡区所受的正交剪切应力与显微硬度之比,其大小又取决于载荷、齿面曲率半径、硬化层深度、心部硬度及过渡区的残余应力等。为防止齿轮的接触疲劳失效,必须使从齿面到心部任何一处均应满足相关的条件。因而增加有效硬化层深,改善过渡区硬度

梯度的分布可有效地增加齿轮的疲劳强度。文献中的接触疲劳试验表明,在其试验条件下,心部硬度由240~260HBW提高到310~330HBW,可提高接触疲劳强度约30%;渗层厚度由0.5mm增加至0.8~1.0mm,可提高接触疲劳强度约25%;表面以 γ' 相为主的化合物层比 $\varepsilon + \gamma'$ 双相层能提高接触疲劳强度近40%。因此采用中硬调质+韧性深层渗氮是提高渗氮齿轮承载能力的重要途径。

近十几年来,随着相关技术的发展,离子渗氮设备有了很大的发展,新的技术和元器件不断被采用,炉体趋向于低能耗、多功能。脉冲电源的市场推广应用也取得了很大的成效,自动化控制水平不断提高,使齿轮渗氮工艺的实施有了坚实的设备保障。本文论述了离子深层渗氮工艺的技术要点,并通过一个设备开发的实例介绍了设备特点及应用效果。

一、深层可控离子渗氮的选材及工艺

在齿轮上采用深层渗氮工艺,国内外对此都进行了探索与研究。早期成功运用的实例有:美国费城齿轮公司,进行深度达1mm的气体渗氮,工艺周期要150h,而后磨掉表面的白亮层;国内郑州机械研究所对深层离子渗氮工艺进行了开发研究,仅用60~70h可使渗氮层深度达0.8~1.2mm,表面获 γ' 单相组织,不需磨掉白亮层加工,并取得了国家专利。国内学者对深层快速渗氮的工艺、组织和机理等方面也开展了深入广泛的研究,进行了循环变温离子渗氮、热循环离子渗氮、增压渗氮、低压脉冲渗氮、稀土催渗、形变促渗和高温渗氮等工艺试验,加上对渗氮齿轮承载能力、力学性能的研究试验,促进了深层渗氮工艺在齿轮上的应用。

1. 材料及预处理

选用合适的材料是进行深层可控离子渗氮的先决条件,对深层可控离子渗氮用钢的基本要求是:

(1) 具有较高的淬透性,保证一定截面尺寸的齿轮

能淬透。

(2) 具有较高的回火稳定性，确保长时间渗氮后的
心部硬度不下降。

(3) 渗氮速度较快，不易产生缺陷组织。

(4) 基体的强韧性好，硬度分布平缓。

(5) 杂质含量低、缺陷少。

一般要求原材料中含有易于形成氮化物的合金元素，
如：Cr、Mo、V、Al 等，在国产的常用钢材中，筛选了
以下材料，见表 1。渗氮齿轮的母材强化水平和硬化层
的厚度都是关系到齿轮承载能力及使用寿命的关键因素。
齿轮深层渗氮后要和渗碳淬火的承载水平相媲美，齿轮
毛坯必须进行中硬调质预处理，以获得均匀细小的回火
索氏体组织，如图 1 所示。

表 1 齿轮深层离子渗氮常用国产材料及预处理工艺

材 料	中硬调质处理工艺	调 质 硬 度
42CrMo	850℃ 淬火 + 550℃ 回火	297 ~ 342HBW (32 ~ 37HRC)
40CrNiMo	850℃ 淬火 + 570℃ 回火	297 ~ 342HBW (32 ~ 37HRC)
25Cr2MoV	940℃ 淬火 + 650℃ 回火	305 ~ 352HBW (33 ~ 38HRC)
34CrNi3Mo	860℃ 淬火 + 600℃ 回火	305 ~ 352HBW (33 ~ 38HRC)

由于 38CrMoAl 材料的过热敏感性较强，以及易产生
渗氮缺陷、渗氮速度过慢等原因，而不推荐作为齿轮的
深层渗氮材料。



图 1 25Cr2MoV 中硬调质后的索氏体组织

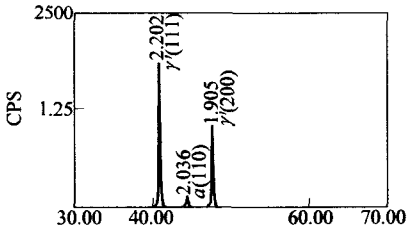


图 2 单相组织的 XRD 分析图谱

其中，25Cr2MoV 是推荐的性能较好的齿轮渗氮材
料，预处理后对常规力学性能进行测试，并与渗碳钢
20CrMnMo、20Cr2Ni4 淬回火状态进行对比，各项指标均
达到或超过渗碳钢淬回火状态水平。

表 2 25Cr2MoV 中硬调质与渗碳
钢淬回火状态常规力学性能对比

钢 号	热处理工艺	σ_b /MPa	σ_s /MPa	δ (%)	ψ (%)	α_k /J · cm ⁻²	硬度 HBW
25Cr2MoV	中硬调质	1245	1205	14.3	63.9	78.4	310 ~ 340
20CrMnMo	850℃ 淬火/ 200℃ 回火	1176	882	10	45	68.6	—
20Cr2Ni4	同上	1176	1078	10	45	78.4	—

2. 渗氮层组织的控制

渗氮层表面的组织直接影响到齿面的脆性、齿轮的
疲劳强度等力学性能。离子渗氮工艺的主要优点之一就
是可以控制炉内气氛中的氮、氢比例获得不同的相
成分。某文献介绍，在其试验条件下，在 $w_{Ni} = 8\% \sim$
12% 的介质气氛中进行离子渗氮时，可获得 γ' 单相的化
合物层组织，当含氮气量为 5% 时可得到无化合物层的
纯扩散层组织。而对于 $w_c \approx 0.4\%$ 的 42CrMo、40CrNiMo
材料，由于含碳量偏高，会形成一定量的 ϵ 相，而不易
得到完全 γ' 的单相组织。

3. 渗氮层深的获得

常规渗氮层厚度一般在 0.6mm 以下，进行 0.8 ~
1.2mm 的深层渗氮，势必大幅度延长处理时间。为使深
层渗氮工艺便于在工业上应用，必须保证工艺周期不过
长，行之有效的措施是提高渗氮温度，但这又受到中硬
基体和良好的渗氮层硬化效果的约束，需采用三段工艺
进行处理。

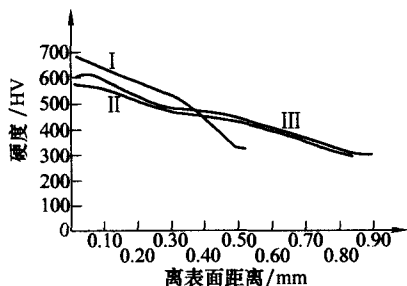
第一阶段强渗：该阶段处理的目的，是使齿轮外表
层在尽可能短的时间内富有较高的氮浓度，以获得较大
的氮浓度梯度，为以后的较高温度下的扩散形成较高的
势垒，增大氮的扩散速度。温度一般取 520 ~ 530℃，时
间 12 ~ 15h，可使表面的氮浓度达到饱和状态，时间延
长，意义不大。

第二阶段扩渗：在第一阶段的基础上，需加强氮原
子在钢内部的扩散，就必须适当地提高处理温度，以增
加氮的扩散系数，获得较深而且硬度梯度平缓的硬化层。
温度的升高不能影响中硬基体的强度，还要兼顾到温度
升高对齿轮变形的副作用，一般取 570 ~ 580℃，扩渗时
间选取 40h 左右即可。

第三阶段补渗：经扩渗之后在表层 0.3mm 深度范围
内，显微硬度有不同程度的下降。这是因为经过较高温
度下长时间的扩散，使一定深度范围内的氮浓度有所降

低,而且氮化物有一定程度的聚集长大并与母相的共格关系破坏,弹性畸变应力场作用削弱,对位错运动的障碍力减小。为此采用与第一阶段强渗基本相同的工艺进行补渗,以提高渗层硬化效果。

三段渗氮过程中各阶段完成后的显微硬度梯度情况,如图3所示。渗层深度可达0.8~1.2mm(见图4),表面硬度可达550~570HV,表面获得以 γ' 相为主或单相的化合物层组织。



I、II、III为渗氮各阶段

图3 深层渗氮各阶段处理后的渗层硬度梯度变化

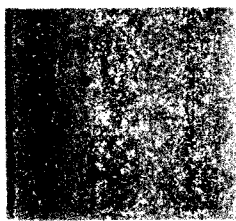


图4 42CrMo的渗氮层深1.2mm 50×

二、用于齿轮深层渗氮的计算机控制离子渗氮设备的开发

工艺的顺利实施需要先进的设备来保障,但目前国内用于工业生产的离子渗氮炉大多数结构简单,自动化程度不高,结构也不够合理。近年来,随着电力电子技术和工业自动化控制技术的发展,国产脉冲电源的技术已经成熟,由于其一系列的优越性,已被市场所接受,得到了普及应用,计算机控制的离子渗氮设备也逐步被开发,功能也日趋完善。

本文针对为某企业的齿轮产品(齿圈、蜗杆和小模数齿轮等)而设计开发的离子渗氮设备系统加以描述,其中集成了目前国内较先进的配置,并且配置了计算机控制系统,开发了有关软件。

除此之外,还增加了炉内辅助加热系统,有利于提高加热温度,改善炉温均匀性,减少打弧清洗和升温时间,特别是将提供等离子体为主的离子电源与提供热源

的加热系统分开控制,有利于减少弧光放电的出现,以便更广泛地调节和控制工艺参数。

该设备的主要技术参数和配置如下:有效工作区为 $\phi 1600\text{mm} \times 1500\text{mm}$,离子加热功率为200kW,辅助加热功率为75kW,配2X-70和2X-30旋片式真空泵各一台、离子加热变压器和辅助加热变压器各一台、电源控制柜一台、PC计算机一台,系统配置与连接如图5所示。现就其主要特点分别论述如下。

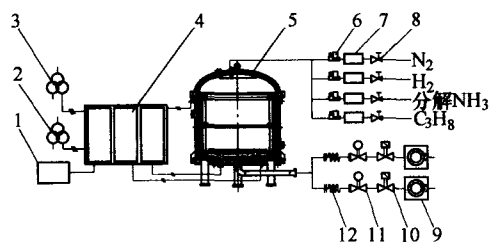


图5 离子渗氮系统的配置与联接

1. 控制计算机 2. 辅助加热变压器 3. 脉冲变压器
4. 脉冲电源柜 5. 真空炉体 6. 质量流量计
7. 气体净化器 8. 减压阀 9. 真空泵
10. 电磁阀 11. 电动蝶阀 12. 波纹管

1. 辅助加热系统

辅助加热电阻丝采用 $\phi 8\text{mm}$ 的0Cr25Al5铁铬铝合金丝垂直固定于炉内隔热屏之上,与隔热屏之间采用瓷座绝缘,辅助加热线电压为90V,电流输出为0~480A,沿圆周方向共30根均匀分布,每组加热器为5根串联,然后采用并联星型接法。加热功率的调节采用双向晶闸管进行控制,可以进行连续给定。

2. 主要仪器、仪表的选用

以往的离子渗氮炉真空测量多采用电阻真空计,电阻真空计对所测介质成分较敏感,它是按照空气介质进行标定的,在炉子预抽真空时可用,而渗氮过程中炉内通气以后读数就没有参考价值了。因此我们选用目前较先进的CPCA-100Z型电容薄膜式绝对压力变送器,可以在实际渗氮过程中准确地测量并控制炉压。

普通的玻璃转子流量计只可手动调节,且因精度和稳定性较差,而无法实现自动化控制。在本系统中选用的D07-7B型质量流量计,可以不受介质压力、种类等的影响,进行流量的精密测量和控制,共有4路质量流量计分别通入氮气、氢气、分解氨和丙烷气,以满足不同工艺的需求。

真空蝶阀的驱动采用 Nucom—Z 驱动装置, 可以通过电源柜上的给定定位器得到 4~20mA 的电流信号, 加到驱动装置上, 可将蝶阀开启角度控制在 0~90° 的任意位置, 代替人工的调节, 从而达到控制真空泵抽气速率的目的。

3. 计算机控制系统

本系统采用三菱可编程控制系统和 PC 机, 配以北京昆仑通态智能全中文人机界面, 系统连接如图 6 所示。

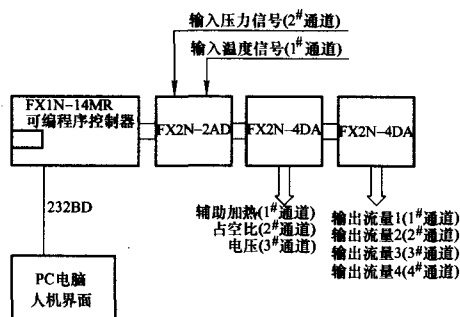


图 6 渗氮炉计算机控制系统的组成

软件主菜单中包括了五个子菜单, 如图 7 和图 8 所示, 其中“升温保温参数设定”子菜单中可进行 10 段的温度设定和 10 段的压力设定, 在此界面还可进行电压、时间、辅助加热功率和介质流量等各参数的设定。将工艺的有关参数输入、存储, 可进入运行界面, 实现工艺的全自动运行, 工艺执行过程中的温度、压力参数可实时记录, 并可调出、打印。

此设备应用于齿轮的深层渗氮生产。

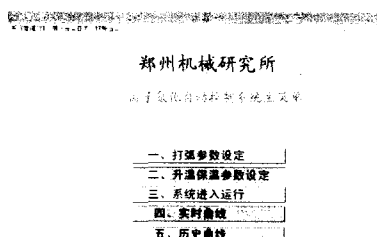


图 7 控制系统主菜单

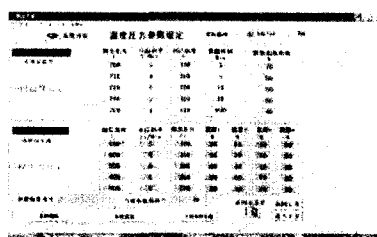


图 8 控制系统参数设定菜单

三、齿轮深层渗氮的应用实例及推荐的应用范围

多年来, 郑州机械研究所在齿轮深层渗氮的工业应用方面进行了许多卓有成效的工作, 所涉及齿轮的模数为 2.5~10mm, 精度为 5~7 级, 最高线速度达 118m/s, 形状有直齿、斜齿、双圆弧、螺旋锥齿, 内齿圈、非圆齿轮和蜗杆等。以下为两例深层渗氮的实际应用, 分别见图 9 和图 10。实例 1: 镇海石化总厂年产 250 万 t 主风机高速双圆弧齿轮, 齿轮模数 4.5mm, 线速度 118m/s, 负荷系数 1.63kN/m², 材料 34CrNi3Mo, 表面硬度 620~650HV, 有效硬化层深 0.8mm, 脆性 1 级。实例 2: 宝钢焦化厂主卷扬机减速机输入轴齿轮, 齿轮模数 9mm, 精度 7 级, 材料 25Cr2MoV, 表面硬度 730~760 HV, 有效硬化层深 0.85mm, 脆性 1 级。

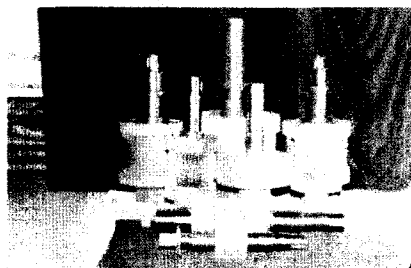


图 9 深层渗氮的应用实例 1



图 10 深层渗氮的应用实例 2

根据多年来国内外在齿轮渗氮领域的研究和实际工程的应用经验, 推荐在以下工况条件下选用齿轮渗氮工艺 (见表 3)。

表 3 选用渗氮处理的推荐齿轮参数

齿 轮 参 数	选 用 范 围
齿轮模数 m	2~10mm
载荷系数 K	$\leq 3.0 \text{ kN} \cdot \text{mm}^{-2}$
圆周线速度 v	$\leq 120 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$
加工精度 (GB 10095—1988)	7~6 级

渗碳淬火与离子渗氮 齿轮的经济性分析

宁波东力传动设备股份有限公司 (浙江 315033) 牛万斌 张华武

在齿轮的表面硬化技术中,渗碳淬火是一项历史悠久、非常成熟的传统工艺,随着温度控制、碳势控制等配套技术的发展,一直是齿轮强化的首选工艺,但是由于氮化技术,尤其是离子氮化技术所具有的独特优势,近年来在齿轮产品上的成功应用实例越来越多,也成为齿轮表面硬化的一个重要途径。

本文试图从经济性方面,对渗碳淬火和离子渗氮技术进行对比分析,为齿轮设计和工艺选择提供参考。

1. 对比分析

进行对比分析的前提,是两种工艺下的齿轮产品具有彼此相当的承载能力。这里选择我公司最常用的渗氮齿轮用钢 42CrMo 和渗碳齿轮用钢 20CrNi2Mo 作为比较的基础,从原材料、热处理及相关工序成本进行系统分析。

有数据表明,离子渗氮件比渗碳淬火件的表面耐磨性要高出 70%~80%,其渗氮层具有良好的耐磨性能已基本达到共识。表 1 和表 2 分别列出了两种齿轮的弯曲疲劳极限和接触疲劳极限数据,这是衡量齿轮承载能力的两项最基本指标。

表 1 齿轮弯曲疲劳极限 ($R=99\%$)

齿轮材料	热处理工艺	有效层深/mm	σ_F/MPa
42CrMo	调质+离子氮化	0.7	280
20CrNi2Mo	常规渗碳淬火	1.2~1.3	226

表 2 齿轮接触疲劳极限 ($R=99\%$)

齿轮材料	热处理工艺	有效层深/mm	σ_H/MPa
42CrMo	调质+离子氮化	0.7	1533
20CrNi2Mo	常规渗碳淬火	1.2~1.3	1415

从表 1、表 2 可以看出,0.7mm 渗氮层的 42CrMo 齿轮与 1.2~1.3mm 渗层深度的 20CrNi2Mo 渗碳淬火齿轮相比,具有彼此相当甚至略高的承载能力。本文以此作为对比分析的基点。

20CrNi2Mo 渗碳淬火齿轮的基本工艺流程为:外购锻件→正火→制齿→滚齿及清理→渗碳淬火及回火→抛丸→磨齿。42CrMo 渗氮齿轮的基本工艺流程为:外购锻件→调质→插齿及清理→渗氮。这也是两种齿轮制造成本的主要组成部分。

(1) 原材料成本 按照目前市场行情,42CrMo 钢材

四、结语

虽然深层渗氮工艺在齿轮上得到了一定程度的应用,但还有需多的问题尚待解决,除了受传统观念的影响之外,还需要冷热加工的配合,由于基体硬度的提高,对制齿工艺和刀具具有新的要求;省去了磨齿的工序,就要尽量地减小变形,不仅在渗氮工艺过程中进行控制,在前期工序中也要控制,如精加工前增加去应力回火等措施。为了更加熟练地掌握、应用深层渗氮的工艺,建议从以下几点进行努力:

(1) 原材料的选用 目前可选用的国产材料钢种有

限,有些钢种还不易采购,需要开发一些齿轮渗氮的专用钢材,如沉淀硬化钢,可在渗氮过程中使基体的硬度进一步提高。

(2) 工艺研究 进一步提高渗速,增加深度,减少变形,探索研究新的工艺。

(3) 数据积累 探索组织与疲劳性能之间的关系,积累渗氮齿轮的力学性能数据,不断完善有关标准。

(4) 设备开发 建立齿轮渗氮的专家智能系统,提高设备的控制水平,并解决大批量生产情况下的自动化程度不高的问题。MW (20080918)