汽车齿轮的内功——热处理

□ 哈尔滨汇隆汽车箱桥有限公司 /金荣植

介绍了汽车齿轮热处理工艺、特点与作用，重点描述了激光热处理、现代感应热处理、真空低压渗碳与高压气淬、计算机模拟与智能化、稀土与BH催渗等先进的热处理技术。

目前，我国已成为世界第一汽车制造与销售大国，汽车制造业已成为我国经济不可或缺的支柱产业。汽车齿轮制造与使用量（主机及配件使用）无疑也成为了世界第一。

汽车齿轮主要包括发动机齿轮（如油泵齿轮、曲轴齿轮、传动带齿轮等）、变速器齿轮（、差速器齿轮（如行星齿轮、半轴齿轮）、驱动桥主从动弧齿锥齿轮、里程表齿轮、车窗玻璃升降机齿条、方向机内的齿轮、座椅移动的齿轮等。

汽车齿轮作为汽车上关键零件，主要用于传递动力和运动，并通过它们来改变发动机曲轴和主轴齿轮的速比。汽车齿轮主要装配在汽车变速器和差速器中。在变速器

中，齿轮可以改变传动比，扩大驱动桥转矩和转速的变化范围，以适应经常变化的行驶条件，同时使发动机在有利的工况下工作。齿轮在差速器中，通过车桥齿轮增加转矩，并调节左右车轮的转速。全部发动机的动力均通过齿轮传递给车轴，推动汽车运动，所以汽车齿轮的受力很大，受冲击频繁，其耐磨性、疲劳强度、冲击韧性等均比机床齿轮要求高。同时由于汽车行驶状况随路况变化，因而汽车齿轮的工作状况非常复杂，这就要求汽车齿轮具有很高的质量。

汽车齿轮热处理工艺、特点与作用

汽车齿轮的内在质量主要是指齿轮的显微组织、力学性能等指标能满足技术要求，同时其他缺陷必须控制在规定的技术范围之内。汽车齿轮内在质量的优劣是决定齿轮质量的关键，其完全取决于热处理质量，是齿轮实现低噪声、高精度、长寿命的关键因素。在一定条件下，合理地选择热处理工艺，改善显微组织，减少变形，防止淬裂，提高力学性能，就可有效地提高齿轮内在质量。

汽车齿轮热处理（工艺）包括：一是普通热处理，如退火、正火、淬火、回火、调质；二是表面热处理，其包括表面淬火（如感应淬火、激光淬火等）和化学热处理（如渗碳、碳氮共渗、渗氮、氮碳共渗等）。

1.调质

调质是将齿轮等零件淬火后进行高温（500～650℃）回火的操作。调质处理常用于含碳量（质量分数）0.3%～0.5%的优质碳素钢或合金钢制造的齿轮。

调质可以细化晶粒，并获得均匀、具有一定弥散度、优良力学性能的回火索氏体组织。一般经调质处理后，齿轮硬度可达220～285HBW。调质齿轮的综合性能优于正火。

调质常用于齿轮的预备热处理（如渗氮、感应淬火前的调质处理）和最终热处理。

2.表面淬火

表面淬火是将齿轮等零件的表面淬透到一定的深度，而心部仍保持未淬火状态的一种局部淬火的方法。表面淬火时通过快速加热，使齿轮表面很快达到淬火的温度，在热量来不及穿透齿轮心部时就立即冷却，实现局部淬火。

利用表面加热淬火而得到表面硬化层后，齿轮的心部仍可以保持原来的显微组织和性能不变，从而达到提高疲劳强度和耐磨性并保持心部韧性的优良综合性能，并可以节省能源、减小齿轮淬火变形。

齿轮齿面淬火硬度一般为45～55HRC。表面淬火齿轮承载能力高，并能够承受冲击载荷。通常表面淬火齿轮的毛坯经正火或调质处理，以便使齿轮心部有一定的强度和韧度。

表面淬火主要有感应淬火、激光淬火与火焰淬火等。与渗碳淬火相比，表面淬火变形小、成本低、效率高。

汽车齿轮表面淬火主要采用感应淬火工艺。由于感应加热速度快，几乎没有氧化、脱碳，齿轮变形很小，还易于实现局部加热及自动化生产，热处理成本低。因此，在现代化汽车零部件生产中得到广泛应用。

3.渗碳与碳氮共渗

（1）渗碳淬火。渗碳淬火是先将齿轮等零件放入渗碳介质中，在880～950℃下加热、保温，使齿轮表面增碳，然后进行淬火，使表层得到马氏体等的显微组织。渗碳淬火齿轮常用低碳合金钢制造。渗碳淬火的目的是使齿轮等零件在表面获得高强度和耐磨性的同时，心部仍保持有一定的强度以及较高的塑性和韧性。

汽车齿轮常用气体渗碳工艺。渗碳淬火、回火后齿轮表面硬度一般在58～63HRC。目前，渗碳淬火已经成为重要汽车齿轮（如差速器齿轮、驱动桥主从动弧齿锥齿轮、变速器齿轮等）的主导热处理工艺。

（2）碳氮共渗。碳氮共渗是使齿轮等零件表面同时渗入碳及氮的化学热处理工艺。一般碳氮共渗的渗层深度控制在0.2～0.8mm，应用的范围主要是承受中、低负荷的耐磨零件。与常规渗碳相比，因其表面耐磨性得到很大提高，可获得较高的使用寿命。碳氮共渗常用于汽车变速器齿轮等。

近几年汽车用自动变速器AT渗碳齿轮的齿面在工作中的实际温度约达300℃，远高于正常的回火温度（150～200℃），这种表面的温度将导致硬度降低，引发点蚀的产生。采用碳氮共渗后喷丸硬化可提高疲劳强度。在碳氮共渗时，随着

含氮量的增加ΔHV（硬度降）提高，抗回火性能提高，抗回火温度达到300℃。

4.渗氮与氮碳共渗

（1）渗氮。渗氮是向齿轮等零件表面渗入氮原子形成氮化层的化学热处理工艺。渗氮可以提高齿轮表面硬度、耐磨性、疲劳强度及抗蚀能力。渗氮处理温度低，因此齿轮变形小，无需磨削或只需精磨即可。

渗氮齿轮由于渗氮层薄（约0.15～0.70mm），硬化层有剥落的倾向，因此承载能力一般不及渗碳齿轮高，不宜于受冲击载荷或有强烈磨损的场合使用。

日本在汽车变速器齿轮热处理时采用渗氮工艺，德国Clocker离子公司将离子渗氮应用于汽车齿轮，均提高了齿轮精度和使用寿命。

（2）氮碳共渗。氮碳共渗是以渗氮为主同时渗入碳的化学热处理工艺。氮碳共渗可以显著提高齿轮的耐磨性、抗胶合和抗擦伤能力、耐疲劳性能及耐腐蚀性能。目前，气体氮碳共渗应用于轿车、轻型客车变速器齿轮等零件。

先进的汽车齿轮热处理技术与装备

1.先进的齿轮热处理技术

先进的齿轮热处理技术具有优质、高效、节能、降耗、少（无）污染、低成本的特点，主要有激光热处理技术、现代感应热处理技术、真空低压渗碳与高压气淬技术、计算机模拟与智能化技术、稀土与BH催渗技术等。

（1）齿轮的激光热处理技术作为一种新型的表面强化技术，克服了传统热处理的缺点，获得了理想的硬度和硬化层分布，耐磨性大幅度提高，使用寿命延长，淬火变形微小，齿轮精度等级不受影响，齿面不需要研磨，可代替渗碳、渗氮等表面化学热处理和感应热处理等传统工艺，生产成本低，生产效率高。

激光淬火技术是利用激光将齿轮等零件表面加热到相变点以上，随着材料自身冷却，奥氏体转变为马氏体，从而使材料表面硬化的表面淬火技术。

激光加热淬火可以获得十分细小的马氏体组织，具有比常规淬火更高的组织缺陷密度，由于冷速极快（104～109℃/s），碳原子来不及扩散，因此马氏体含碳量较高，残留奥氏体也获得较高的位错密度，使材料具有畸变强化效果，从而显著提高了齿轮表面的耐磨性能。同时硬化层内残留有相当大的压应力，又显著增加了齿轮表面的抗疲劳性能。

齿轮激光淬火与传统热处理的对比如附表所示。

（2）现代化齿轮感应热处理技术。近年来，国内外感应加热技术在提高产品质量、改善设备性能、增加淬火装置的容量、发展淬火机床、提高机械化和自动化程度等方面都有了很大进展。其在汽车、拖拉机、机车、机床等行业将得到广泛应用。

通常齿轮的整个轮廓需要淬火以获得必须的抗麻点、耐磨以及疲劳强度、较小的变形。而这样的淬火轮廓很难通过常规感应淬火方法获得，对此可以采用双频感应淬火、同时双频感应淬火等，能够得到沿齿廓均匀分布的淬硬层。同时，由于加热速度快、时间短，因此节能效果显著。

齿轮感应淬火取代渗碳淬火的主要优点是周期短、效率高、能耗

齿轮激光淬火与传统热处理的对比

工艺方法	渗碳、渗氮等	感应淬火	激光淬火
处理材料	碳钢、低合金钢	中碳钢、中碳合金钢	各种钢材、铸钢等
淬硬层组织及硬度	马氏体＋碳化物＋残留奥氏体 硬度56～62HRC	马氏体 硬度45～60HRC	隐针马氏体 硬度提高15%～20%
心部组织及硬度	回火马氏体 硬度35～45HRC	正火或调质 硬度＜30HRC	正火或调质 硬度＜30HRC
齿面硬化层形状	沿齿廓分布均匀	分布不均匀	沿齿廓分布均匀
硬化层的可控性	易控制	不易控制	可精确控制
淬硬层残留应力	压应力，分布均匀，小	随硬化形状分布不均，较大	压应力，分布均匀，大
热处理变形	较大	较小	极小
工艺周期及成本	周期长，成本高	周期短，成本低	周期短，成本低

低、变形小。

①齿轮双频感应淬火技术。常规（传统）双频感应淬火是两种频率的电源分别施加到两个感应器，齿轮需要从低频感应器预热之后快速移到另一高频感应器加热并进行淬火。

双频感应淬火是增加淬硬层深度并使硬度分布更为合理的感应加热淬火方法。即用中频-高频依次加热方法可获得沿齿廓分布的硬化层，而且齿轮热处理变形小。例如模数为4mm的齿轮先用中频电流加热（2.5～3s）齿沟和接近齿根的齿侧，然后再用250kHz高频电流加热（0.6～0.7s）齿顶和接近齿顶的齿侧，然后淬火。

东风汽车集团公司对材料为45钢、模数为3的齿轮进行双频感应加热淬火时，能够得到沿齿轮廓均匀分布的淬硬层，淬硬层为0.8mm时，具有最佳弯曲疲劳性能，与SCM420（相当于20CrMo钢）渗碳齿轮疲劳性能基本相当，疲劳极限可以达到1 450MPa。

②齿轮的同时双频感应淬火技术（SDF法）。现代化的双频感应淬火技术是在一个感应圈上同时输出高频和中频两种不同频率，对一个齿轮进行快速热处理，即同时双频感应淬火。如SDF同时双频感应淬火可获得沿齿廓分布的硬化层，可代替部分渗碳淬火工艺，如因锥齿轮齿顶形状很复杂，在渗碳淬火后非常不容易进行磨齿以校正其变形，而采用SDF同时双频感应淬火处理时间与传统渗碳淬火相比，仅为40%左右。加上感应热处理为表面局部加热淬火，因此热处理变形很小，完全可以达到变形公差要求，齿轮不需磨齿。

目前，德国BMW、大众汽车制造商等采用该技术用于齿轮等零件的感应淬火处理。

（3）齿轮的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、淬火变形小、节约能源和工艺材料、环保无污染，以及处理后无需清洗等优点。

①齿轮的真空低压渗碳技术。真空低压渗碳技术可用于高性能齿轮的表面渗碳强化。利用真空低压渗碳工艺软件可以实现真空低压渗碳工艺的辅助生成，促进了该技术的推广和应用。真空低压渗碳易于实现1 000～1 050℃的高温渗碳，从而显著提高渗碳速度，因此可以大幅度减少工艺周期，通常缩短工艺时间近50%，同时渗碳气体消耗量也大大降低。

真空低压渗碳由于不产生内氧化，可避免齿根表面形成黑色组织，从而提高弯曲疲劳强度。同时，真空低压渗碳可显著减小齿轮变形，从而提高齿轮精度，降低生产成本。

对于批量较小的齿轮可采用单室、双室及三室真空炉配以低压渗碳工艺，并进行高压气淬；对于批量较大的齿轮可以多室真空炉进行半连续式低压渗碳高压气淬。淬火室可把许多不同形状、不同厚度的齿轮进行气压淬火，利用1～2MPa高压氮气（N_2）或氦气（He）的冷却压力可以保证齿轮的心部硬度要求。目前，国内汽车齿轮等零件利用真空炉渗碳淬火已取得明显效果。

②齿轮的高压气体淬火技术。齿轮等零件在奥氏体化温度加热后施加1～2MPa高压气体淬火可达到静止油或高速循环油甚至水的淬火效果，齿轮气体淬火变形很小，可实现少无磨削。高压气体淬火采用中性气体N_2、还原性气体H_2和惰性气体Ar、He等，这些气体无污染。处理后的零件表面清洁度高，无须后序清洗和清理抛丸工序。

高压气淬时高压气流可以通过计算机控制气体的压力、流量，改变气体的冷却特性，与钢的过冷奥氏体转变相图相结合，实现最理想的淬火冷却，获得理想的金相组织、有效硬化层深度及热处理变形。

（4）齿轮的热处理计算机模拟与智能化技术。运用计算机模拟与智能化技术，实现对热处理全过程中每一环节都做到精确控制，实现产品“零”缺陷，缩短热处理工艺周期，大幅度减少工艺材料的使用，提高利用率，减少CO_2排放。但在传统的热处理技术中，凭经验或孤立地应用某一学科的知识作定性估计，以至工艺规范的编写和工艺要求的制订都存在不同程度的盲目性，导致质量不稳定、产品使用寿命低、设计不合理、浪费能源与材料等。计算机模拟、智能化技术摆脱依赖于经验的“技艺型”状态，向知识密集型的工程技术转化。应用热处理计算机辅助技术，进行计算机模拟和虚拟生产，以实现热处理计算机智能化控制。

上海交通大学与江苏丰东热技术股份有限公司合作，开发出的采用计算机智能控制技术的智能型密封多用炉自动生产线已在浙江汽车

齿轮厂运行3 000炉次，齿轮渗碳质量全部合格。

（5）稀土与BH催渗技术。稀土与BH催渗技术是具有我国自主知识产权的热处理高新技术。对于渗碳汽车齿轮，采用稀土与BH催渗技术，可以提高渗碳速度，降低工艺温度，可以获得节能降耗、减少齿轮变形、改善显微组织等效果。目前，已经在一汽集团、东风汽车等得到应用。

稀土与BH催渗剂，通常在渗碳介质（甲醇、丙酮、煤油、RX气氛或天然气、丙烷等）中，可提高渗碳速度20%以上，或降低工艺温度40℃左右，保持原工艺渗碳速度不变，降低齿轮成本20%以上。

2.先进的齿轮热处理装备

齿轮热处理装备是保证齿轮热处理质量的重要因素。齿轮热处理装备应保证对热处理工艺参数进行精确控制，这是保证齿轮获得高的内在质量的关键因素之一。先进齿轮热处理装备的应用，不仅可以获得优良的热处理内在质量，而且生产效率高、成本低、环保，代表了当今齿轮热处理装备技术水平。

（1）密封箱式多用炉自动生产线。其适合于多品种齿轮等零件的渗碳热处理，齿轮外观质量好、内氧化程度低、表面硬度高，现已成为汽车齿轮主流热处理设备之一。国外知名生产厂家主要有德国易普森Ipsen公司、奥地利爱协林Aichelin公司等，其生产的密封箱式多用炉自动生产线代表了当今国际先进水平。

（2）推杆式连续渗碳自动生产线。其主要用于大批量汽车齿轮的渗碳热处理生产，可以得到优良的热处理内在质量，并降低生产成本。

国外知名生产厂家主要有德国易普森Ipsen公司、奥地利爱协林Aichelin公司、美国霍尔科夫特AFC-HOLCROFT公司等，其生产的推杆式连续渗碳自动生产线代表当今国际先进水平。

国内长春一汽嘉信热处理科技有限公司等生产推杆式连续渗碳自动生产线已接近国际水平。

（3）真空热处理炉。真空热处理炉主要包括真空淬火炉、真空（离子）渗碳炉、真空（离子）渗氮炉等。真空（离子）渗碳炉常用于精密汽车齿轮（如轿车变速器齿轮、发动机齿轮等）的渗碳热处理，可以满足更高的渗碳热处理质量要求，经真空（离子）渗碳炉处理的齿轮，表面质量优、硬度高、渗碳层深度误差小、变形小。

真空热处理炉

目前，国际上以法国ECM公司等生产的低压真空渗碳炉代表当今国际先进水平。其主要特点：所处理的齿轮无内氧化、渗层深度误差小、抗疲劳性能高，同时具有油淬和气淬的功能及渗碳时间短和碳势控制精确、无污染特点。

目前，低压渗碳高压气淬炉、半连续式低压渗碳生产线已在上汽、一汽集团、神龙汽车公司等得到应用，用于汽车变速器及发动机齿轮等零件的渗碳热处理。

（4）齿轮的双频感应淬火机床。德国eldec公司与EMA公司合作开发的拾取式的齿轮双频感应淬火机床（拾取式，即工装在固定的位置上，齿轮是移动的，由机械手抓取并进行淬火），最终实现齿轮感应淬火加工全自动化。

同时双频感应淬火机床

由于能够准确地知道齿轮等零件的感应处理过程中能量和变形量的变化情况，能量控制的精度可达到±2%，并且有准确的记录，而这在渗碳炉中是做不到的。

（5）齿轮激光热处理成套设备。武汉金石凯激光技术有限公司生产的GS-RC型系列齿轮激光热处理成套设备代表国内及国际水平。其主要由激光器、水冷机组和加工机床及光路系统组成。

（6）高压气淬密封箱式炉和高压气淬推杆式连续渗碳生产线。目前，已经成功将高压气淬技术用于密封箱式炉和推杆式连续渗碳生产线，以进一步提高齿轮等零件热处理质量和生产效率，降低齿轮热处理成本。

①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

连续式低压真空渗碳自动生产线

淬。齿轮在前室进行无氧化光亮淬火。在后室保护气氛中实现无氧化加热或在渗碳气氛中渗碳，前室中部为工件气淬室。经高压气淬后的齿轮无氧化，表面呈银灰色，变形小，避免了油淬后所需的清洁等工序，节省了机械加工费用和淬火油的消耗。

②爱协林公司开发的将高压气淬系统应用于推杆式可控气氛连续渗碳生产线，不仅提高了齿轮热处理质量（如减少齿轮淬火变形、内氧化等），而且降低了生产成本约20%，并避免了环境污染。

汽车齿轮热处理的发展趋势

未来汽车齿轮正向重载、高速、高精度和高效率等方向发展，并力求尺寸小、重量轻、寿命长和经济可靠。

汽车齿轮热处理工艺（技术）的发展除了对齿轮产品质量（如组织、变形、层深及硬度）实行更加严格的控制之外，也更加重视节能与环保。同时，在信息时代，汽车齿轮热处理工艺（技术）会更加充分利用计算机技术，使热处理生产、管理、工艺过程控制、工艺设计及质量预测分析实现高度数字化、智能化。汽车齿轮热处理工艺（技术）发展趋势，总体将朝着高品质、低能耗、环保、智能化方向发展。

（1）高品质。进行齿轮热处理变形控制技术研究、开发新型汽车齿轮用钢材料及精密齿轮加工技术。主要表现在：材料的均匀性，即要求材料具有良好的成分和组织的均匀性；温度场和流体场，即不断改善温度场和各种流体场，如渗碳、渗氮、碳氮共渗的流体场和淬火的液体场的改善，进一步提高齿轮内在质量。

（2）低能耗。齿轮热处理先进装备的研制和发展，如开发更好的炉衬耐热和保温节能材料，尽可能降低炉壁温升，减少炉壁热损耗；废热综合利用，如锻造余热的利用，进行锻造余热正火等，降低齿轮成本。

（3）环保。研究开发齿轮的新工艺，这些新工艺少（无）污染、环保，如低压真空渗碳、离子渗氮、双频感应淬火、激光淬火、稀土及BH催渗等技术的发展。

（4）智能化。智能化是齿轮热处理控制技术发展的必然趋势，计算机、传感器、智能库将构成智能热处理的核心，主要表现在：根据齿轮等零件的材料、技术要求等，系统自动生成工艺；生产过程的完全闭环自动控制；齿轮等零件的热处理质量的预测、预判；系统故障自动诊断与处置；在线的自适应及应急应变能力，如开发了离子渗氮、碳氮共渗所用的氮势传感器和低压渗碳的碳势传感器等。AME

金荣植

高级工程师，副总工程师，黑龙江省热处理学会理事，中国热处理协会理事，已在专业杂志上发表论文80余篇，其中有5篇被美国工程索引（Ei）收录，1篇获中国热处理行业协会优秀论文奖，已出版4部热处理著作，获省、市科技成果各一项，获4项发明专利和2项实用新型专利。