齿轮的精密渗碳热处理控制技术

哈尔滨汇隆汽车箱桥有限公司 （黑龙江 150088） 金荣植

获得低噪声、高寿命齿轮的关键在于热处理质量的控制。齿轮精密热处理包含了渗碳层显微组织、心部与表面硬度、有效硬化层深度、残留应力以及热畸变等技术指标的质量分散度，其分散度越小，热处理质量越高。齿轮精密热处理需要的基本条件包括：①齿轮原材料的均匀性。②热处理装备具有良好分布的温度场和流体场。要实现齿轮的精密渗碳，关键在于对炉膛温度、碳势实现精确控制（控温精度≤±1.5℃，有效加热区温度差≤±5℃，碳势≤±0.05%，渗碳层深波动≤±0.1mm）。

一、温度控制

1. 温度控制精度

保证同一批齿轮产品质量的低分散度和不同批产品质量重现度的主要措施是保证热处理过程中工艺参数的精确度和稳定性。对加热设备而言，主要是炉温随时间的波动程度（即温度控制的精确度），以及有效加热区内各边缘位置的温度差别（即炉温均匀度）。GB/T 9452－2003《热处理炉有效加热区测定方法》把控温精度和炉内温度均匀性按6种类型加热炉提出了不同要求。精密渗碳热处理的加热炉应满足Ⅰ、Ⅱ类规定，如表1所示。

表1 精密渗碳炉温均匀性及控制精度要求

类别	有效加热区炉温均匀性/℃	控温精度/℃	仪表精度等级
Ⅰ	±3	≤±1.0	0.25
Ⅱ	±5	≤±1.5	0.3

炉温均匀性一般在空载条件下测定，测试按GB/T 9452－2003进行。推荐精密渗碳热处理炉温均匀性及温度仪表检测周期见表2。

表2 推荐炉温均匀性及温度仪表检测周期

类别	炉温均匀性检测周期/月	温度仪表检测周期/月
Ⅰ	1	6
Ⅱ	6	6

2. 温度仪表及控制系统

热处理炉应配置合适的温度控制仪。采用2只或3只热电偶进行“双联温度系统”（控温及记录二者独立）或“三联温度系统”（控温、记录及报警三者独立）进行监控和报警。

温控仪表采用小型化、模块化和智能化技术，控温精度高，使用寿命长，如日本岛津公司的SR系列（SR91、SR93）智能温度调节仪等。

现代热电偶的质量直接决定了炉温的准确性，应选择优质的热电偶，如沈阳东大的WRKC型渗碳炉专用特种实体热电偶，采用0Cr25Ni20Si2耐热钢作为保护外套，密封效果好，使用寿命长。

随炉检验时需再安装一只检验热电偶，其与温度记录系统热电偶端距离应≥50mm，以避免测温位置的影响。一般在热处理保温阶段测试。随炉检测的温度经误差修正后与温度记录仪指示比较，对于Ⅰ、Ⅱ类炉子两者之差应不超过1℃。

二、碳势控制

1. 碳势控制精度

气体渗碳（碳氮共渗）炉除了应满足有效加热区炉温均匀性能要求外，还应精确控制炉气碳势，以精确控制齿轮表面含碳量、渗层深度、甚至表层碳浓度梯度，满足渗层（金相组织、层深）均匀性和表面硬度均匀性要求。利用氧探头等作为传感器、各类型的碳控仪，以及适合于各种钢材的不同渗碳工艺的数据库和工艺软件，可以实现热处理

工艺过程的在线控制。试样放置位置可参照炉温均匀性检测中的热电偶布点位置，精密碳势控制要求≤±0.05%，渗层深度偏差应≤±0.1mm。

2. 碳势测量方法

（1）直接测定法 将低碳钢箔放在含碳气氛中保持足够的时间，然后测定的钢箔含碳量，即为该气氛在测试温度下的碳势。

（2）间接测量法 目前，碳势的测量大都通过一次仪表（传感器）在线连续测量渗碳气氛的有关成分参数和温度，再由二次仪表（碳势控制仪）根据一次仪表所测参数和建立的气氛碳势数学模型自动计算得到气氛的实时碳势。具体测量方法见表3。

表3 碳势的间接测量方法

测量方法	测控因素	理论依据	采用的气氛分析仪器	使用条件
单参数	CO_2	$Cp=K\cdot P^2_{CO}/P_{CO_2}$	CO_2红外仪	CO基本稳定，CH_4少（一般要求1.0%）
	O_2	$Cp=K\cdot P^2_{CO}/P^{1/2}_{O_2}$	氧探头	
双参数	CO_2+CO	$Cp=K\cdot P^2_{CO}/P_{CO_2}$	CO_2红外仪、CO红外仪	CH_4少（一般要求1.0%）
	O_2+CO	$Cp=K\cdot P^2_{CO}/P^{1/2}_{O_2}$	氧探头、CO红外仪	
三参数	CO_2+CO+CH_4	$Cp=K\cdot P^2_{CO}/P_{CO_2}$ $Cp=K\cdot P_{H_2}/P^2_{CH_4}$	CO_2红外仪、CO红外仪、CH_4红外仪	要了解CH_4起作用的程度
	O_2+CO+CH_4	$Cp=K\cdot P^2_{CO}/P^{1/2}_{O_2}$ $Cp=K\cdot P_{H_2}/P^2_{H_2}$	氧探头、CO红外仪、CH_4红外仪	
综合参数法	O_2	$Cp=K\cdot P^2_{CO}/P^{1/2}_{O_2}$ $Cp=K\cdot P_{H_2}/P^2_{H_2}$	氧探头	CO基本稳定，要了解CH_4起作用的程度和CO及CH_4变化规律

注：表中Cp表示炉气碳势；P_{CO}、P_{CO_2}、P_{CH_4}、P_{O_2}及P_{H_2}分别表示炉气中CO、CO_2、CH_4、O_2及H_2分压；K表示控制渗碳气氛的平衡常数。

3. 碳势控制系统

在保证炉温均匀性和温度精确控制的前提下，采用碳势传感器（如氧探头）和碳控仪进行碳势控制。但在滴注式气氛和直生式气氛条件下，当渗碳气氛中CH_4含量较高时，单独使用氧探头控制，容易产生碳势失控，还需要用红外仪对CH_4或CO_2进行联合控制，得出碳势值才真实反映气氛碳势。从单一“氧势”或“CO_2”参数控制逐渐发展到“氧势-CO_2-温度”三参数控制，碳势控制精度达±(0.025%～0.05%)。

（1）单参数碳势控制系统 此类控制系统通常假设CO、H_2、温度、钢种及炉况等均是恒定的，CH_4含量低于临界值等。当以上条件发生变化时，单参数法的碳势测量精度就会降低。为了保证碳势的测量精度，应考虑CO和CH_4等的影响。

对于连续式渗碳炉，由于每个区的工况（温度、碳势及CO）基本稳定，一般单参数碳势控制法可以满足使用精度要求。

（2）双参数碳势控制系统 对于周期渗碳炉（如井式气体渗碳炉、密封箱式多用炉等），在整个工艺过程中，温度、碳势及CO是变化的，简单的单参数碳势控制方法已不能满足这种工艺的需要。对此应采用控制精度要求较高的双参数碳势控制系统，可满足一般工况的全工艺过程需要（需增加红外仪）。双参数碳势控制系统有：①CO_2当量碳势控制系统。通常采用添加富化气（碳氢化合物）的办法来调整吸热式气氛的碳势。在强渗高碳势范围，利用CO_2当量控制碳势，能获得比利用CO_2或O_2的单参数碳势控制系统更高的控制精度。CO_2、CH_4的含量分别由两台红外线气体分析仪测定，计算单元将测量值换算成CO_2当量，调节器根据CO_2当量测定值的偏差大小及极性，经电磁阀调节富化气流量，使碳势维持在给定范围。图1所示为CO_2当量碳势控制系统。②其他双参数碳势控制系统。由于齿轮渗碳钢种较多，需要在不同温度下进行渗碳，采用“氧势-温度”碳势控制系统，或“CO_2-温度”碳势控制系统较为方便。如果温度恒定，采用“CO_2-CO”或“氧势-CO”碳势控制系统，均能够获得较高的控制精度。

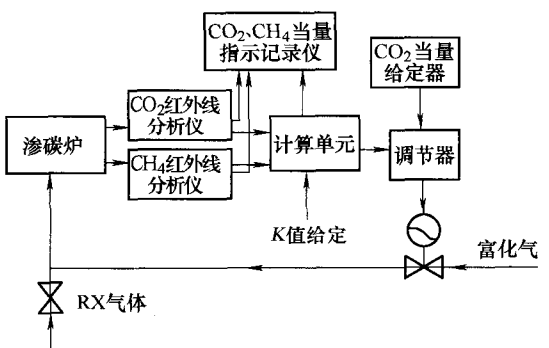

图1 CO_2当量碳势控制系统

（3）三参数碳势控制系统　即碳势、温度及CH_4极限含量的控制，可满足工况变化的全工艺过程控制需要，且碳势控制精度和适用范围更好。根据生产经验得知，在渗碳过程中炉温、CO含量和炉内总压力的变化，对碳势可产生如下影响：炉温变化±10℃，引起碳势变化±0.07%；炉气中CO含量变化±0.5%，引起碳势变化±0.03%；炉内总压力变化±1333Pa，引起碳势变化±0.02%。上述碳势误差是相互独立的，在最不利的情况下，误差可达±0.12%。采用三参数碳势控制系统可进一步提高控制精度。

图2所示为“氧电势-CO-温度”碳势控制系统，由氧探头、热电偶、CO红外分析仪测量氧电势、炉温、CO含量，模拟信号经隔离放大器，再经*A/D*转换成数字信号送入CPU，按给定的碳势数字模型及预先编排的程序处理，获得与碳势偏差成PID关系的控制量。控制量经*V/I*（电压/电流）和*I/F*（电流/频率）两次变换，以控制电磁阀的开关频率来控制渗碳剂（如煤油）滴入量。

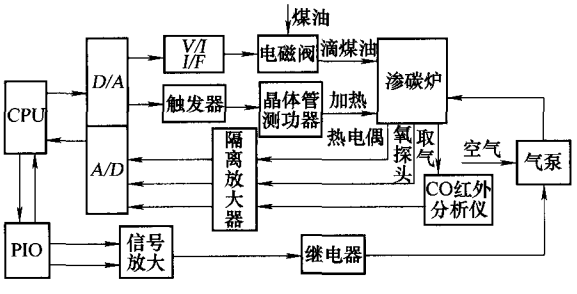

图2　“氧电势-CO-温度”碳势控制系统

4. 碳控仪及碳传感器的选择

应根据炉型选择相应的碳控仪，连续式渗碳炉用碳控仪以美国马拉松、英国欧陆等为代表，密封箱式多用炉碳控仪以日本富士等为代表，大型井式渗碳炉的碳势仪以德国DEMIG仪表和美国HONEYWLL仪表具有代表性。

碳传感器包括氧探头及CO_2、CO、CH_4红外分析仪，其中氧探头具有灵敏度高、碳势控制精度高等特点，应用最为广泛，以美国马拉松、MMI和PE氧探头最具代表性，具有精度高、使用寿命长等特点。使用中，氧探头会出现偏差，对此需连续检查氧探头的精度。常规检查是每天或每周采用薄钢箔测碳方法分析含碳量，通过碳控仪对碳势进行必要的修正，偏差大时应更换新的氧探头。可使用多重气氛测量装置，如二次氧探头或微型氧探头，或CO/CO_2红外分析仪。

三、渗碳专家系统

首先根据齿轮的材料及产品技术要求制定最佳渗碳工艺，并合理选择加热设备的类型和级别。优先采用渗碳专家系统，可精确、自动地完成全部热处理工艺过程。如低压真空渗碳专家系统——赛科沃克/Fine Carb、德国丹纳赫的PMA KS Carbon——气氛炉在线碳势控制专家系统及上海交大气体渗碳智能控制技术等。

（1）赛科沃克/Fine Carb　SECO/WARWICK公司研发的Fine Carb™专家系统可根据产品形状，调配不同成分的渗碳气体（乙烯和乙炔混合气），精确控制碳势，大幅改善工件的渗碳效果。根据气体输入量及渗碳阶段，脉冲控制渗碳气体流量，渗碳消耗小。

（2）德国丹纳赫的PMA KS Carbon　该气氛炉在线碳势控制专家系统具有如下特点：①采用先进的扩散及控制计算方法，可以实时精确地计算出碳在钢材中的扩散分布，并自动调整碳势、炉温、强渗时间及扩散时间，从而高效、精确地完成渗碳或碳氮共渗处理。②KS Carbon系统主要控制指标包括温控精度±1℃，碳控精度±0.02%，渗层深度0.1～5mm，层深精度±0.05mm。可用于可控气氛渗碳炉、多用炉及连续炉等。③KS 92－1 Carbon Profiler高精度智能碳势程序控制器广泛用于井式炉、多用炉和连续炉，特别是中小型井式炉的脉冲滴注式控制。可用于直生式/氮基气氛渗碳或氮碳共渗。

（3）上海交大气体渗碳智能控制技术　不再需要现场工艺人员设定和输入渗碳工艺，由计算机根据工艺要求通过计算机模拟自动优选最佳工艺参数，并自动完成整个渗碳过程的控制。这种智能控制技术的另一个特点是采用计算机在线模拟控制方法，它是按照每一炉的实际炉况实时计算出每一时刻的浓度分布，并不断对工艺参数进行重新优化，随时补偿各种偶然的偏差对最终渗碳结果的影响，确保渗碳质量的重现性。江苏丰东热处理有限公司采用智能控制技术的智能型密封多用炉已投放市场，在浙江汽车齿轮厂运行3000炉次，产品全部合格。**MW**

（20120922）