

主减速从动齿轮 低压真空渗碳热处理工艺

M1X变速器总成是一款由通用欧宝公司开发的横置紧凑型六挡手动变速器及AMT变速器,根据原设计要求,为了实现低成本、高性能,主减速从动齿轮采用环保的低压真空渗碳、高压气体淬火技术进行热处理。

该工艺相对于常规的可控气氛渗碳热处理有以下优势:

- 1) 可以采用高温技术而不会产生有害表面物质。
- 2) 在低压真空下进行渗碳,零件表面活性高,渗碳效率提高,工艺周期较常规的可控气氛渗碳热处理可以减小20%~50%。
- 3) 零件处于真空状态下,不会产生内氧化、表面非马组织和表面黑色组织等,同时零件不会产生表面合金元素贫化及其带来的表面淬透性降低等问题。零件表面硬度、表面残余压应力水平明显提高,进而明显降低零件的表面早期失效,提高零件的使用寿命。
- 4) 低压真空渗碳与高压气体淬火技术相结合,可减小热处理畸变,提高产品精度。

本文主要针对M1X主减速从动齿轮采用低压真空渗碳、高压气体直接淬火热处理过程中,齿面金相组织控制、热处理变形及工艺优化进行了探讨。

材料及热处理技术要求

材料牌号及化学成分(熔炼分析)见表1,材料淬透性参见表2。

M1X主减速从动齿轮热处理技术要求有:表面硬

表1 材料化学成分 (质量分数, %)

材料 牌号	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Al	Cu
QS	0.23	≤	1.10	≤	0.020	1.00	≤	0.015	≤
1927	~	0.30	~	0.025	~	~	0.25	~	0.25
S0	0.28		1.30		0.040	1.25		0.050	

表2 原材料淬透性

距末端距离/mm	淬透性范围/HRC
5	45~50
9	40~46
15	33~40

度680~790HV10,心部硬度360~460HV10;有效硬化层深,成品要求0.45~0.75mm(600HV1),考虑磨齿余量,热后要求0.6~0.85mm(600HV1)。热处理工艺流程为:上料→清洗→脱脂+预氧化→低压真空渗碳+高压气淬→低温回火→风冷→下料。

渗碳、淬火工艺参数确定

低压真空渗碳Infra-carb Process热处理的原理,实际上是在低压(一般≤2kPa)真空状态下,采用脉冲方式,通过多个强渗(通入渗碳介质)+扩散(通入保护气体,如氮气)与一个集中的扩散过程,实现渗碳过程并满足图样的渗层深度和金相组织的要求。该工艺的控制方法为“饱和值调整法”,即在强渗期使奥氏体固溶碳原子并饱和,在扩散期使已固溶的碳原子向内部扩散达到目标要求值,通过调整渗碳、扩散时间比,达到控制表面碳浓度和渗碳层深度的目的。

低压真空渗碳模拟程序输入的参数包括渗碳温度、被渗工件原始碳浓度、渗碳后表面饱和碳浓度、扩散后表面碳浓度、最终表面碳浓度、渗层深度和介质在工件表面的富化率。

1.渗碳温度及富化率

富化率 (Flux) 指单位时间内单位面积表面吸附的碳量，表示低压真空渗碳过程中，零件表面的富碳能力。处理零件的表面积为1~15 000cm²，Flux与渗碳温度的关系为直线关系，渗碳温度越高，零件表面富碳能力越强，渗碳效率越高，生产节拍越短，产能越高。但并不是所有钢材都适合采用高温渗碳工艺。根据我厂真空渗碳的经验，M1X主减速从动齿轮采用940℃渗碳，渗碳介质为乙炔 (C₂H₂)，对应的Flux值为8.5mg/h·cm²。

2.饱和碳浓度

依据铁-碳相图，确定940℃的饱和碳浓度值为1.3%。如果饱和碳浓度值设置过高，可能会导致齿角及齿面残留奥氏体高，而饱和碳浓度太低会引起工件表面碳浓度降低，影响工件的耐磨性、硬度及疲劳强度。

3.强渗后的碳浓度设定 (扩散前的碳浓度)

根据渗碳原理，为了提高渗碳速度并防止齿面碳浓度过高引起的残余奥氏体含量太高，一般设定饱和碳浓度0.45%~0.50%，并与最终碳浓度匹配，确保后续的扩散均匀。

4.最终碳浓度 (齿面热处理后碳浓度)

为了保证齿面的接触疲劳强度，根据ISO 6336、QC/T 262等国内外标准和经验，齿面的碳浓度一般控制在0.65%~0.95%最佳。但是在真空渗碳过程中，过高的碳浓度会导致齿角残余奥氏体太多，影响零件的使用寿命。由于真空渗碳条件下，脉冲渗碳无法实现碳势的检测和控制，只能通过试样简介测试，且根据经验模拟碳浓度一般比实际碳浓度低约0.07%~0.10%，因此在模拟工艺中一般设定碳浓度0.62%~0.66%，然后通过试样进行验证。

实际在上述参数的设定过程中，将根据模拟后的脉冲参数，依据乙炔为渗碳介质的条件，以实现从第二个脉冲开始，强渗脉冲在45~55s为目标，进行设定参数优化，从而实现程序指令的最优化。

5.低压真空渗碳过程渗碳介质的流量设定

设定依据为处理零件的表面积，因此为了准确设定和控制渗碳介质的流量，最好采用质量流量计。M1X主减速齿轮采用乙炔渗碳，计算乙炔流量的经验公式为：乙炔流量 (NL/h) =1250 (NL/h) +125 (NL/h·mm²) ×零件表面积 (mm²) ×零件数量/10⁶。一般情况下，实际乙炔流量值的确定，可以根据实际情况在计算结果上浮10%左右。M1X主减速齿轮表面积86 763.982mm²，装炉量为64件/炉，根据经验公式计算乙炔流量=1944NL/h，实际工艺取 2000NL/h。

6.淬火工艺的确定

根据自身的经验，采用改变淬火压力和时间的方式实现分级淬火，通过风扇搅拌的大小来控制冷却速度，淬火参数见表3。

表3 M1X主减速齿轮高压氮气淬火参数

淬火时间/s	风扇搅拌 (%)	淬火压力/kPa
15	50	900
300	70	900
105	70	700

淬火工艺主要分为“快-慢-快”三个过程：

- (1) 快 让工件表面避开TTT曲线鼻尖，不产生中间转变组织 (贝氏体或珠光体)。
- (2) 慢 让工件表面和心部温度的温差尽量减小，在表面已完成马氏体转变的同时，控制心部马氏体的量 (尽量转变成贝氏体)，减少淬火畸变。
- (3) 快 让工件尽快冷却至室温，完成整个淬火过程。

金相结果及讨论

根据上述确定的关键参数，模拟出M1X主减速齿轮的渗碳节拍，共11个强渗mini节拍，每个mini节拍持续49~55s，扩散节拍共12个，总渗碳时间为125min。淬火工艺总淬火时间为7min。按照此工艺完成11炉M1X主减速齿轮的热处理，可获得稳定的金相组织和热处理指标。

如图1所示，有效硬化层深 (600HV1) 稳定在0.6~0.8mm，满足热后要求，验证渗碳温度、强渗节拍、扩散节拍设定合理。表面硬度700~720HV10，心部硬度378~436HV10，由图2可知，心部组织均匀，主要是板条马氏体+上贝氏体+少量铁素体。

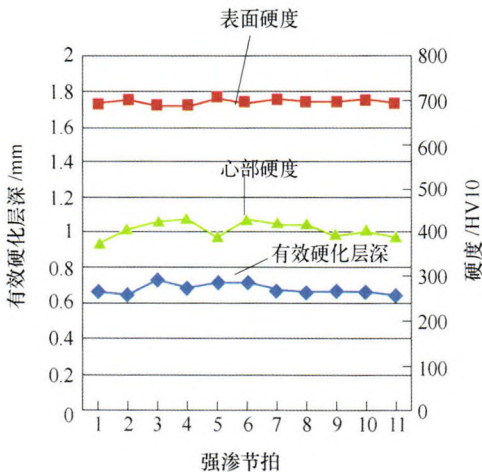


图1 M1X主减速齿轮的表面硬度、心部硬度及有效硬化层深

按照我公司标准QG24225132（2010）对组织进行评判，金相照片见图2和图3，结果见表4，组织符合规范要求。

表4 金相组织评判结果

技术要求	齿角		齿面			齿根圆角		心部组织	
	碳化物	残余奥氏体 30% max (%)	碳化物	残余奥氏体 30% max (%)	马氏体针/mm	从表面到次表面（第一个25%有效硬化层深范围内）为完全的马氏体组织	次表面（第二个25%有效硬化层深范围内）组织特征	组织特征	晶粒度大小，ASTM E112
结果	1级	22	1级	9	0.005	合格	合格	板条马氏体+上贝氏体+少量铁素体	6级

热处理装架方式及热变形结果

M1X主减速齿选择H形料棒，采用串挂的方式进行热处理（见图4），有利于加热和淬火的均匀性。H形料棒的宽度和槽深是料架设计的关键尺寸，按照热处理变形控制重心最低原则，结合零件的尺寸，经计算，H形料棒的宽度在50mm（壁厚8mm）时，主减速齿轮重心最低，热变形的趋势最小。

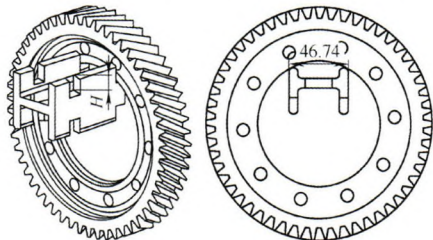
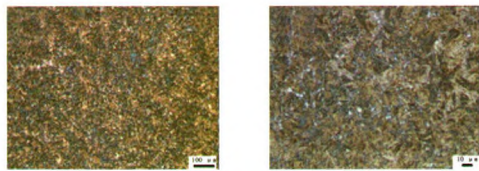


图4 M1X主减速齿轮热处理工装示意

根据主减速齿轮的结构尺寸，确定H形料棒的槽深为13mm。槽太深，会导致主减速齿轮在气淬过程中由于高压气体冲击而引起的摆动受约束，进而影响平面度；反之，槽太浅，起不到固定工件的效果，在物流



(a) 100× (b) 500×

图2 齿轮心部组织



(a) 齿轮齿牙宏观形貌 (b) 齿轮齿顶 (c) 齿根圆角渗层和心部组织，100×



(d) 齿根渗层回火马氏体，500× (e) 齿面节圆位置渗层与心部组织 (f) 齿面节圆位置渗层回火马氏体，500×

图3 金相组织

运输过程中工件易发生敲毛碰伤，导致废品率上升。

通过上述料架设计和热处理后，对连续三炉热后主减速齿轮进行100%平面度测量，平面度在0.05mm以内的高达95%。

当然，作为GAMMA工装，该料架的设计也有不足之处：装炉量不理想，影响成本；在拆装架时，工人需要同时提起八个主减速齿和料棒的重量约20kg，劳动强度大。后续将会根据现有经验数据，进一步优化料架的设计。

结语

对M1X主减速从动齿轮采用Mini低压真空渗碳技术，合理优化强渗和扩散节拍，获得了理想的热处理硬化层深度和组织；分级淬火可实现表面/心部组织的转变，获得理想的表面硬度及心部硬度值；对称、紧凑的零件结构及选择合理的料架设计，直接通过高压气淬即可获得理想的主减速齿热处理后平面度。

关键词：

主减速从动齿轮 低压真空渗碳

（收稿日期20131002）