

变速器主减速从动齿轮热处理变形控制分析

□ 比亚迪股份有限公司 黄小明
□ 南京科润工业介质股份有限公司 袁 峰



黄小明 质量管理部经理

摘要：变速器主减速从动齿轮热处理后内孔与端面变形对热后加工及产品安装精度影响很大，通过控制主减速齿轮的热处理的工艺，分析毛坯来料组织对变形的影响，采用平放、挂放及堆放进行对比试验。结果表明：淬火温度从820℃降低至790℃与控制产品毛坯组织，降低产品轴向圆跳动，采用堆放装炉方式，明显降低主减速齿轮内孔收缩。

关键词：淬火温度；毛坯组织；装炉方式

变速器齿轮经常在高转速、高负荷、转速和负荷不断交变的情况下工作，根据其工作环境而要求其表面强度硬度高、心部韧性好，故基本采用渗氮或碳氮共渗处理。变速器齿轮在渗碳淬火过程中始终伴随着产品变形，控制产品热处理的变形量一直是热处理工作者探索的目标。在实际生产中，目前主要是依靠加大热处理后产品的磨削余量，以消除热处理对产品尺寸的影响，提高

产品的精度。由于热处理后产品变形不一致，齿轮在磨削过程中同一齿面的不同部位磨削量不一致，导致磨削后齿面渗层深浅不一，特别是齿面的残余应力分布不均匀，影响齿轮的使用寿命，增加了齿轮的生产成本，降低生产效率。

本文试验产品为主减速齿轮，规格如图1所示。其材料选用20CrMoH、17CrNiMo6、TL4521三种牌号，从工艺、合金

元素、毛坯组织及摆料方式四方面进行试验分析对变形的影响。

1. 热处理工艺对变速箱齿轮变形的影响

热处理变形主要体现在加热与淬火过程中，淬火变形起主导

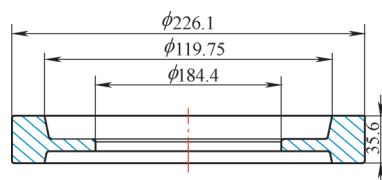


图1 变速器主减速从动齿轮尺寸结构

作用，淬火时在工件中引起的内应力是造成变形的根本原因，当内应力超过材料的屈服强度时便引起工件变形，淬火变形有两种主要的形式：一种是工件几何形状的变化，其表现为尺寸及外形的变化，通常称为扭曲或翘曲，另一种是体积变化，表现为工件体积按比例胀大或收缩^[1]。在主减速齿轮热处理加热与淬火中，主减速齿轮变形往往是几何形状变化与体积变化的相互叠加。热处理工艺上可通过增加预热、降低淬火温度、合理选择淬火冷却介质与渗碳层深度减少变形量，其原始工艺如图2a所示，改进后工艺如图2b所示。

增加预热工序，可减少加热时表面与心部的温度差，心部与表面温差大，会导致心部与表面胀缩不同时性而存在应力，当应力超过材料的屈服强度，便会引起加热过程中热应力引起的变形。降低淬火温度与选择合理的淬火冷却介质均可以降低淬火时因高温快速冷到低温热应力引起的收缩变形。

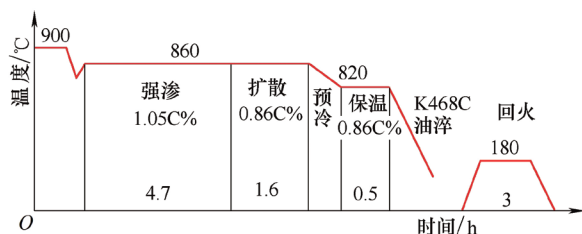
从图2a、2b两种工艺可知：TL4521热处理工艺改进的主要有：渗碳加热790℃预热30min，缩小加热过程中表面与心部的温度差；预冷淬火温度从820℃降低到TL4521材料淬火温度的极限值790℃，保存产品合格的前提下减小产品淬火热应力，降低主减速从动齿轮淬火变形；淬火油由科润等温淬火油K468C改为科润等温淬火油K498C，K498C冷却速度比K468C慢，使用温度比K468C高，产品在采用K498C等

温淬火油的冷却过程中可减小工件表面与心部马氏体转变的不同时性。

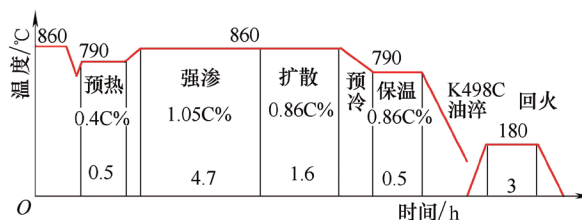
从图3不同热处理工艺生产的产品心部组织可知，图2a工艺1生产的产品（见图3a）心部组织为板条马氏体+少量的粒状贝氏体（5%的含量），心部硬度为45HRC，采用图2b工艺2生产的产品心部组织为板条马氏体+粒状贝氏体（35%的含量），心部硬度为41HRC。图2工艺1与工

艺2生产的产品表面硬度、心部硬度、有效硬化层等均合格，图2工艺2生产的产品心部组织粒状贝氏体较多，粒状贝氏体的比体比板条马氏体的比体积小，有利于减小产品渗碳淬火过程中的组织应力。

根据表1中TL4521热处理工艺1与工艺2的平放变形量对比，改进后的工艺2在内孔与端面圆跳动方面均有一定的改善，减小了产品的变形量。

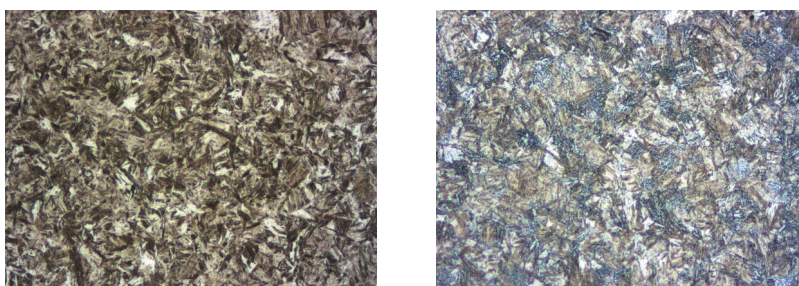


(a) 变速器主减速从动齿轮热处理工艺1



(b) 变速器主减速从动齿轮热处理工艺2

图2 变速器主减速从动齿轮不同的热处理工艺



(a) 工艺1生产的产品心部组织

(b) 工艺2生产的产品心部组织

图3 不同热处理工艺生产的产品心部组织图

表1 TL4521不同热处理工艺热处理（平放）后变形量 (mm)

产品 工艺	热前内孔	热后内孔	热前上轴 向圆跳	热后上轴 向圆跳	热前内轴 向圆跳	热后内轴 向圆跳
工艺1	119.75 ~ 119.785	119.665 ~ 119.696	0.022	0.087	0.020	0.077
工艺2		119.680 ~ 119.702	0.018	0.071	0.021	0.065

2. 合金元素对齿轮变形的影响

齿轮材料加热保温奥氏体化，合金元素融入奥氏体中，等温转变图右移，增加奥氏体的稳定性，提高了材料的淬透性。而合金元素（Al、Co除外）与碳原子强烈地降低了材料的 M_s 点，合金元素越高，材料的 M_s 点降低，若 M_s 点较低，则开始发生马氏体转变时工件的温度较低，在相同渗碳淬火温度情况下，淬火温度至 M_s 点的温差较大，故合金元素的提高会加大产品的淬火热应力变形，且随着奥氏体溶解的合金元素增加，淬火马氏体比体积越大，组织应力略微增大^[2]。不同合金元素对 M_s 点的影响为： $Mn>Cr>Ni>Mo$ 。

从表2可知，材料中合金元素含量： $17CrNiMo6>TL4521>20CrMoH$ ；从表3热处理变形数据可以看出，同工艺与装炉方式热处理的主减速齿轮变形量： $17CrNiMo6>TL4521>20CrMoH$ 。

3. 毛坯组织对变速器齿轮变形的影响

齿轮毛坯一般要求采用等温正火工艺，不允许有混晶，魏氏体组织 ≤ 1 级，带状 ≤ 3 级，组织为等轴状铁素体与珠光体，不允许有粒状贝氏体组织等（如图4a正常毛坯组织）。齿坯预备热处理组织的均匀性和稳定性对齿轮最终热处理变形的影响很大，因为齿轮各部分的原始组织不同，组织一致性差，在热处理加热至奥氏体状态后存在成分的不均

匀，因而可能影响淬火后的组织不均匀，即那些低碳低合金元素区域可能得不到马氏体（而得到的是屈氏体或贝氏体），或者得到比体积比较小的低碳马氏体，从而将造成工件不均匀的变形。

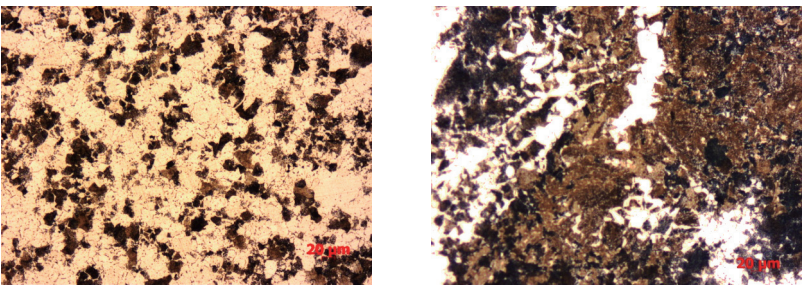
毛坯组织中容易混杂粒状贝氏体（如图4b异常毛坯组织），粒状贝氏体产生是由于热处理正火冷却速度过快，奥氏体转变为贝氏体，其为非平衡组织，在直接渗碳加热奥氏体化过程中容易导致组织遗传，使得奥氏体晶粒粗大，晶粒粗大的产品在受力变形时，晶界位错堆积比较严重，易产生裂纹，会降低齿轮的疲劳

寿命。其次贝氏体硬度比平衡组织高，热前机加工困难，加工切削过程留下的残余应力较大，残余应力在渗碳加热过程中释放，加大产品热处理变形量。

从毛坯组织（见图4）和不同毛坯组织堆放热后变形量（见表4）可得：毛坯组织对变速器齿轮变形影响很大，粒贝与偏析加大产品热后变形量，TL4521来料粒贝毛坯热处理后变形量是TL4521来料正常毛坯的3倍。

4. 装炉方式对变速器齿轮变形的影响

变速器主减速从动齿轮装炉



(a) 正常毛坯组织 (b) 异常毛坯组织（粒贝与偏析）

图4 毛坯组织

表2 不同材料的合金元素含量（质量分数）（%）

材料	C	Cr	Ni	Mo	Mn
20CrMoH	0.17~0.23	0.85~1.25	—	0.15~0.25	0.55~0.9
TL4521	0.16~0.23	0.65~0.85	1.5~1.9	0.28~0.38	0.5~0.8
17CrNiMo6	0.15~0.2	1.5~1.8	1.4~1.7	0.25~0.35	0.4~0.6

表3 三种材料主减速齿轮平放变形数据（mm）

产品尺寸 产品材料	热前内孔	热后内孔	热前上轴 向圆跳	热后上轴 向圆跳	热前内轴 向圆跳	热后内轴 向圆跳
20CrMoH	119.75~ 119.785	119.69~119.74	0.022	0.078	0.020	0.072
TL4521		119.665~119.696		0.087		0.079
17CrNiMo6		119.61~119.67		0.103		0.108

表4 TL4521不同毛坯组织平放热处理后变形量（mm）

材料	热前内孔	热后内孔	热前上轴 向圆跳	热后上轴 向圆跳	热前内轴 向圆跳	热后内轴 向圆跳
TL4521正常毛坯	119.75~ 119.785	119.665~ 119.696	0.022	0.087	0.020	0.079
TL4521粒贝毛坯		119.550~ 119.631	0.028	0.241	0.021	0.215

方式主要有三种：平放、竖放、堆放（见图5）。不同的装炉方式，工件在加热过程受力不同，挂放受自身重力的作用，相对平放，内孔可能较容易产生椭圆，堆放变速器主减速从动齿轮受多个工件直接的作用力，相对而言产品的跨棒距略微增加。不同的装炉方式，主减速齿轮在淬火冷却过程入油的阻力大小与冷却的均匀性均不同。

从表5不同装炉方式变形数测量表明：平放的热后轴向圆跳动>竖放热后轴向圆跳动>堆放热后轴向圆跳动，平放的内孔收缩最大，堆放的内孔收缩最小，但堆放与平放的内孔圆度均较大，主要是由于竖放在加热过程中由于自重的影响而导致圆度误差增大，堆放是由于冷却过程不一致而导致内孔圆度误差较大。同时堆放主减速齿轮外端面冷却快，内端面冷却慢，控制内外端面的冷却速度，使得热后内孔收缩量大幅度减少。

6. 讨论与分析

热处理应变有尺寸变化和形状变化，通常尺寸变化是由组织变化引起的，即由相变引起的膨胀和收缩造成的，形状变化主

要是由于零件的自重引起的下垂和由应力引起的形状走样。热处理应变的出现涉及三个阶段：加热（基于内应力的消除），保温（自重下垂，即下垂弯曲），冷却（基于不均匀的冷却和相变），这三个互相叠加最终导致零件的淬火应变。

本文通过增加预热工序减少热处理过程中加热引起的形状变化，降低淬火温度与选用黏度大且冷速更慢些的淬火油KR498C，增加粒状贝氏体含量，减少奥氏体转变为马氏体比体积的变化而引起的尺寸变化与热应力引起的形状变化；合理要求毛坯组织来料，控制毛坯中贝氏体含量与带状等级，从而降低因毛坯来料组织不均匀而加重热处理过程中产品的尺寸变化；根据主减速齿轮尺寸结构，通过选择堆放主减速齿轮使齿轮外端面冷却快，内端面冷却慢，控制内外端面的冷却速度，从而热处理后内孔收缩量大幅度减少。

7. 结语

（1）毛坯组织对变速器齿轮变形影响很大，粒状贝氏体与偏析加大产品热后变形量，TL4521来料粒贝毛坯热处理后变形量是TL4521来料正常毛坯的3倍。

（2）主减速齿轮采用堆放的装炉方式比挂放与平放的装炉方式轴向圆跳动略微降低，内孔收缩明显减小。

（3）TL4521材料的淬火温度从820℃降低至790℃，热处理后主减速齿轮的心部产生粒状贝氏体，尺寸变化和形状变化均减小，从而减小变形。

参考文献

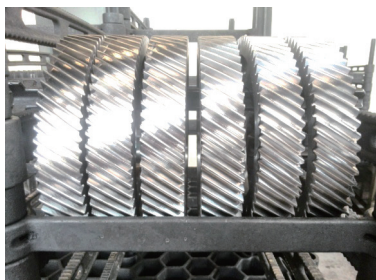
- [1] 崔忠圻, 覃耀春. 金属学与热处理[M]. 北京: 机械工业出版社, 2007: 243.
- [2] 张熹, 崔京玉, 章军. 浅析齿轮钢及热处理工艺对汽车用齿轮性能的影响[J]. 钢铁研究学报, 2009, 21(10): 38-42.

表5 TL4521材料产品不同装炉方式后变形量 (mm)

产品装炉方式	热前内孔	热后内孔	热前上轴向圆跳	热后上轴向圆跳	热前内轴向圆跳	热后内轴向圆跳
平放	119.75~119.785	119.665~119.696	0.022	0.087	0.020	0.079
竖放		119.67~119.74	0.018	0.071	0.021	0.065
堆放		119.71~119.77	0.021	0.073	0.024	0.057



(a) 平放



(b) 竖放



(c) 堆放

图5 不同装炉方式的TL4521主减速齿轮

MW 20161207