风电齿轮渗碳淬火变形分析与改善

赵建森，朱百智，占彬，江红兵
南京高速齿轮制造有限公司　江苏南京　211122

摘要：针对风电某大兆瓦平行级齿轮在渗碳淬火过程中齿部畸变严重的问题，通过分析磨齿对中数据，采用平装渗碳，保证在平装渗碳时端面各点均匀支撑，降低零件入炉温度，增加等温阶梯工艺段，延长等温时间，降低渗碳温度；采用挂装淬火，使用两点支撑工装支撑齿轮内孔，淬火料盘工装底部增加网孔阻尼工装，降低淬火冷却介质相对流动速度。经以上改善，零件轴向圆跳动从1.06mm以上降低至0.52mm以下，节圆跳动从0.18mm降低至0.1mm以下，磨齿对中数据显示齿部畸变减小约40%，小批量合格率100%。

关键词：风电齿轮；变形；18CrNiMo7-6钢；装炉方式

1　序言

风电齿轮箱技术创新坚持以“低度电成本和高性能”为目标，正在向着大型化、高可靠性、高扭矩密度、高效率、低振动噪声和易维修等方向发展[1]。海上风力齿轮箱主流机型多为4~10MW，随着风电齿轮箱型号的增大，对齿轮箱的质量稳定性和轻量化提出了更高的要求。

目前，两级行星和一级平行轴结构设计是大兆瓦风电齿轮箱的主流机型之一[1]。为了保证传动比，平行级齿轮齿数增多，而基于轻量化的考虑，平行级齿轮设计时更倾向于扁平状结构，这就增加了平行级齿轮热处理过程的难度，对热处理变形带来新的考验。

图1所示为某公司大兆瓦机型的平行级齿轮，材料为18CrNiMo7-6钢，轮齿模数为10mm，要求采用渗碳淬火。此齿轮外径1680mm，齿宽180mm，内孔直径500mm，采用薄辐板设计。热处理技术要求见表1。

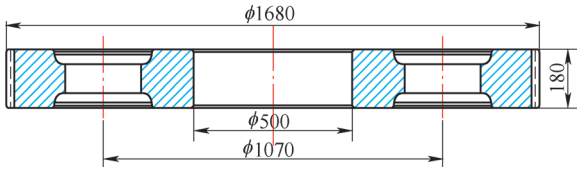

图1　齿轮外形尺寸

表1　18CrNiMo7-6钢齿轮热处理技术要求

有效硬化层深/mm	表面硬度HRC	心部硬度HRC	碳化物	马氏体	残留奥氏体（%）	心部组织	IGO/mm
2.9~3.9	58~64	≥30	ISO 6336：5 MQ级	细针状	≤30	无块状铁素体	≤0.05

2　工艺路线

齿轮加工工艺流程为锻造→正火→粗车→滚齿→倒角→渗碳淬火→喷丸→半精车→精车→插键槽→装配→镗→磨齿→入库。

在试制过程中，该齿轮经渗碳、高温回火、淬火、低温回火及喷丸后，在磨齿加工时，发现齿部畸变较大，试磨削后零件公法线小于要求值，同时齿根位置出现磨削台阶，零件作报废处理。

3　试制工艺及变形机理分析

在试制初期，考虑齿轮径宽比达9.3，辐板较薄，减重孔大，零件容易发生翘曲变形，综合考虑现场实际情况，选择序列号为H1的零件进行试制。试制热处理工艺如图2所示[2, 3]，采用“渗碳-高回-淬火-低回”工艺模式，在升温时采用阶梯升温，淬火采用盐浴淬火[4, 5]。零件使用2m井式渗碳炉工装平装，装炉时为方便操作，选择8间隔的底盘工装，

垫放4块扇形蜂窝板并间隔摆放，如图3所示，在高温回火后淬火装炉更改为挂装，挂装位置为零件内孔，如图4所示。

零件热处理后各项理化指标检测合格，在磨齿工序反馈齿部畸变大，试磨削后零件公法线604.74mm，低于要求值下限605.014mm，部分轮齿齿根存在磨削台阶，零件作报废处理。

为了确定零件的变形原因，收集了H1零件磨齿时的对中数据，并对数据进行分析。

1）查看齿部的磨齿对中余量报告，多个齿形出现齿向交叉，整个齿向变形很大。

2）汇总左右齿面的磨齿对中高点与低点之差，采用雷达图分析，如图5所示，发现在57号~82号齿位置变形最大，其余位置变形尚可接受。

3）对比左右齿面的磨齿余量分配，未发现磨齿时存在显著的偏心，车削内孔和端面基准时满足要求。

4）将左右齿面的磨齿对中数据进行平均，如图6所示，发现零件节圆存在明显的椭圆，椭圆趋势呈梨状分布，椭圆量约0.18mm。

根据对H1零件磨齿对中数据的分析，暂无法判定零件齿向变形是由端面翘曲或齿部畸变造成的。零件的椭圆趋势呈梨状分布，虽无法确定具体位置是否与挂装有关，但根据单点挂装的情况推测，梨柄位置（148号齿附近）应是与工装接触的位置，此处凸起最大；左右齿面变形量最大位置无显著规律，但在椭圆的梨状尾部附近（即挂装下部）变形趋势最大。

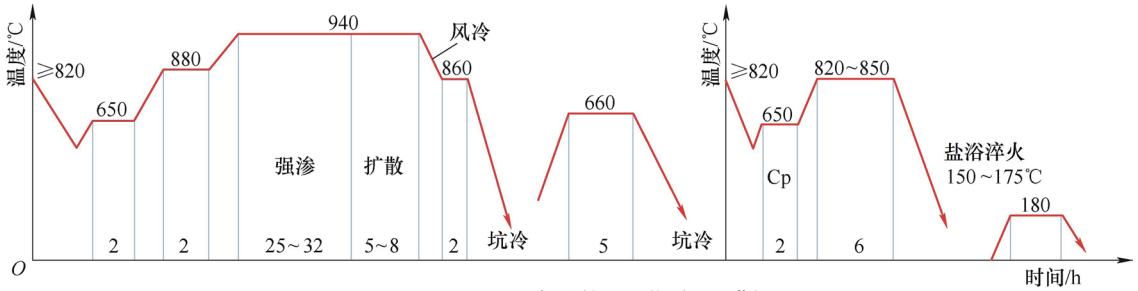

图2　H1零件热处理工艺（原工艺）

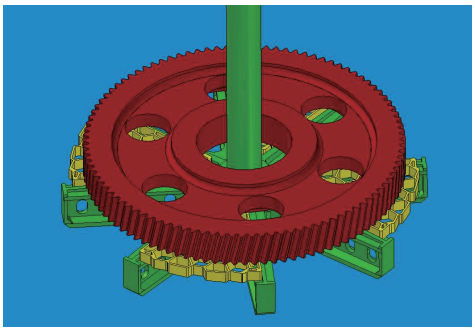

图3　H1零件渗碳装炉

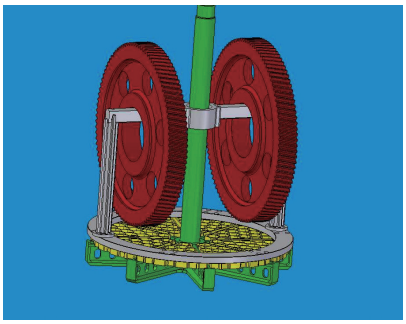

图4　H1零件淬火装炉

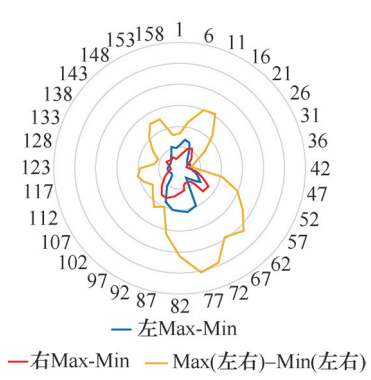

图5　H1零件左右齿面变形

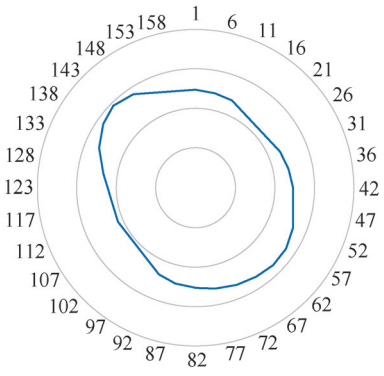

图6　H1零件左右齿面平均磨量

根据以上分析，工件变形的主要原因有：

1）零件齿部变形的随机分布与渗碳工艺有关，如升温速度、渗碳温度等。

2）零件渗碳时仅采用4个蜂窝盘间隔摆放，在渗碳时发生蠕变，端面产生翘曲变形，从而引起齿向交叉。

3）在挂装淬火时，淬火加热时的蠕变引起变形，主要表现为淬火时挂装引起的椭圆。

4）零件盐浴淬火时，最先接触的位置表现出更大的变形趋势，该位置首先与盐浴发生接触，且该位置距离底部搅拌器较近，流体相对流动速度较快。

4　工艺改进

根据对H1零件的分析，我们无法找到引起该零件变形的关键因子。基于分析的原因，首先对热处理工艺进行了改善，同时跟踪齿轮渗碳后的变形情况，以判定在渗碳阶段是否已经发生了较大的热处理变形。试验零件序列号为H2，渗碳装炉方式同H1。

4.1　渗碳工艺改善

为了减小渗碳时零件产生的热应力，减少加热过程中产生的畸变，渗碳工艺更新如图7所示。工艺降低了零件进炉的温度，延长了650℃和880℃的等温时间，增加了770℃的等温段，并降低了强渗段的渗碳温度。

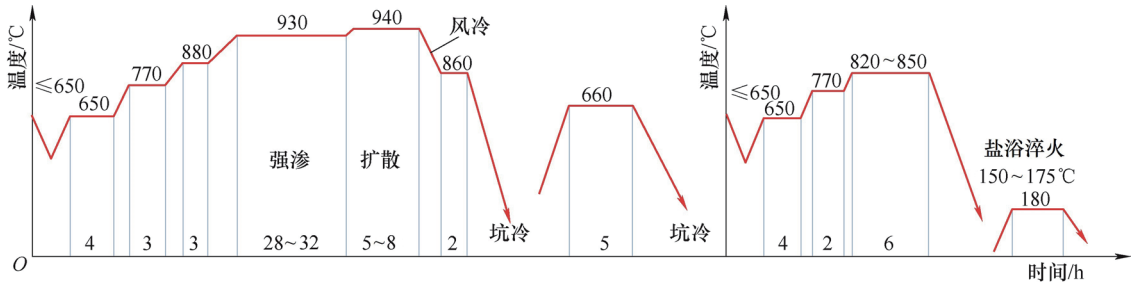

图7　H2零件热处理工艺（改进工艺）

4.2　渗碳装炉改善

为了分析齿轮在渗碳时的端面翘曲，以及端面翘曲对后续磨齿对中齿形数据的影响，H2零件重复了首次生产时H1齿轮的装炉方式，并在高温回火出炉后做好标记，预先车出端面基准，在磨齿机上进行磨齿对中。

在车床车削基准时，发现端面存在严重的跳动，具体数据如图8所示。在蜂窝板支撑到的位置，所有位置均为高点，在未垫放蜂窝板的位置，所有位置均为低点，高点间相差约0.2mm，低点间相差约0.25mm。

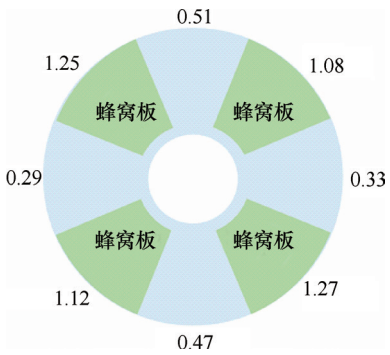

图8　H2零件渗碳后轴向圆跳动

磨齿对中数据显示，零件齿向已经产生明显的齿向交叉，零件未产生明显的椭圆，左右齿面的磨齿对中高低点差最大位置均为未垫放蜂窝板的位置。

通过对H2零件的渗碳装炉方式的摸索，可以确定，渗碳时的蠕变引起轴向圆跳动过大是零件变形的主要原因之一。

为保证齿轮在渗碳后的轴向圆跳动尽可能小，渗碳时底部支撑蜂窝板由4块增加到8块，如图9所示，渗碳淬火后零件的轴向圆跳动可控制在0.52mm以下。

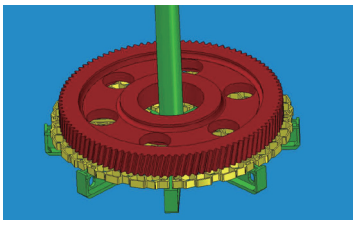

图9　改善后的渗碳装炉

4.3　淬火装炉改善

综上所述，齿轮下部约1/4位置冷速较快是齿轮

变形的影响因素之一[6]，故对淬火的装炉形式进行调整。

使用已渗碳的H2零件进行试验，在底料盘上增加网孔阻尼工装，以减小在淬火时流体对齿轮下端的相对流动速度。随炉携带相同规格的齿形试样验证相关理化指标是否受到影响。

随炉携带的齿形试样淬火后的检测结果见表2，检测结果合格。H2零件淬火后的变形较H1有一定幅度的降低，零件磨齿后公法线较标准值下限小0.03 mm，零件可让步使用。

表2　H2零件热处理结果

项目	有效硬化层深/mm	表面硬度HRC	心部硬度HRC	碳化物	马氏体	残留奥氏体（%）	心部组织	IGO/mm
要求	2.9~3.9	58~64	≥30	ISO 6336：5 MQ级	细针状	≤30	无块状铁素体	≤0.05
实测	3.39、3.46	60.26、59.62	38	弥散	细针状	15	无块状铁素体	0.025

4.4　优化验证

在序列号为H3和H4的零件生产时，同时采用图8的渗碳工艺、渗碳时底部蜂窝板满铺的平放装炉方式（见图9），在挂装淬火装炉时，在底盘上增加网孔阻尼工装，零件渗碳淬火后，变形得到大幅度改善。图10和图11为H3零件的磨齿对中数据汇总雷达图，其中109号齿位置为挂放时的支点位置，从图中可以看出，椭圆与H1零件基本保持一致，整体变形和淬火时与液面首先接触区域的变形均大幅减小。

表3和图12为零件采用不同的渗碳工艺、装炉方式热处理后的变形情况汇总。从对比中可以看出，采用改善后的渗碳工艺、优化的渗碳和淬火装炉方式后，零件齿部畸变降低了约40%。

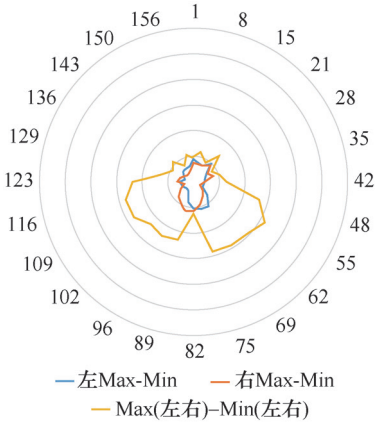

图10　H3零件左右齿面变形

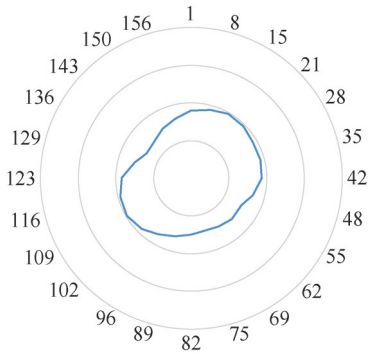

图11　H3零件左右齿面平均磨量

表3　不同装炉和热处理工艺对齿轮变形的影响

零件号	渗碳装炉	淬火装炉	渗碳淬火工艺	椭圆/mm	轴向圆跳动/mm	磨后公法线尺寸/mm
H1	平装4块蜂窝板	挂放无阻尼工装	原工艺	0.18	—	604.74
H2		挂放有阻尼工装	改进工艺	0.14	1.06	604.98
H3	平装8块蜂窝板	挂放有阻尼工装	改进工艺	0.14	0.52	605.04
H4				0.15	0.25	605.06

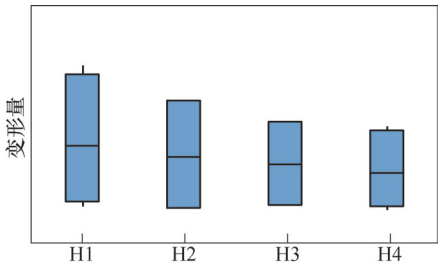

图12　不同装炉方式和热处理工艺变形的箱线图

4.5　批量生产

针对在样机阶段总结的经验，又重新优化了淬火挂装的工装，从原有的单点支撑更改为两点支撑，零件的椭圆从原有的0.14~0.18mm减小至0.05~0.10mm。

在冷热加工配合上，针对该零件在渗碳淬火后公法线呈现收缩，收缩约0.25mm，在热处理前补偿

0.25mm的滚齿公法线留量。经过以上改善，小批量生产的30件齿轮全部合格。

5 结束语

1）对扁平状的齿轮，在渗碳时应保证端面各点均匀支撑，齿轮平装渗碳时从原4块蜂窝盘间隔摆放更改为8块蜂窝板满铺，可降低因蠕变造成的端面翘曲变形。

2）采用挂放工装淬火，在淬火料盘底部增加网状阻尼工装后，由于降低了淬火冷却介质和零件的相对流速，挂装下部区域齿部变形大幅减小。

3）对扁平状齿轮，通过降低渗碳入炉温度，增加升温阶梯段，延长等温时间，降低渗碳温度，可减少热处理时的应力和高温蠕变，有助于变形改善。

4）通过热处理装炉和工艺改善，齿轮端面翘曲变形从1.06mm以上降低至0.52mm以下，节圆跳动从原来的0.18mm减小至0.1mm以下，齿部畸变降低约40%，小批量生产合格率达100%。

参考文献：

[1] 汪正兵，朱百智，陈贺.风电齿轮热处理技术现状和趋势[J].金属热处理，2020，45（1）：34-41.

[2] 封珂，朱百智，郭祺龙，等.18CrNiMo7-6和20CrNi2Mo钢渗碳工艺参数优化与应用[J].金属热处理，2010，35（6）：63-66.

[3] 董汉伟，王大宇，宋利锋，等.淬火温度对渗碳17Cr2Ni2Mo钢组织与性能的影响[J].金属热处理，2015，40（5）：144-146.

[4] 陈国民.对齿轮热处理畸变控制技术的评述[J].金属热处理，2012，37（2）：1-13.

[5] 李小末，朱百智.薄壁齿轮渗碳淬火变形的控制[J].金属加工（热加工），2016（S2）：114-116.

[6] 张峦，王爱香，李宝奎，等.渗碳齿轮盐浴分解淬火工艺研究及应用[J].金属热处理，2015，40（3）：173-178.

MW 20201224

（上接第60页）

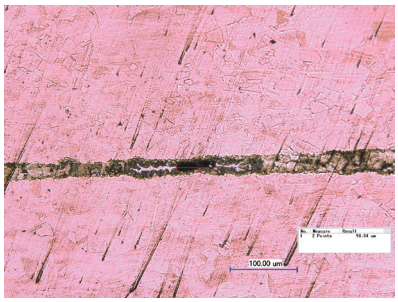

图9 BAg45CuZn钎焊有缺陷焊缝

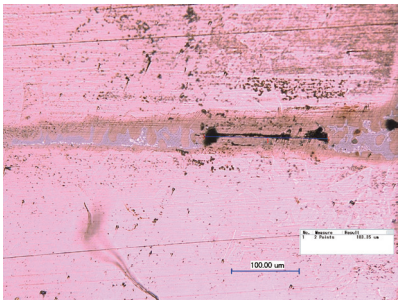

图10 BCu80Ag15P钎焊有缺陷焊缝

钎料在钎焊时需要涂覆钎剂以提高润湿性，焊接时钎剂易挥发，对操作环境存在一定的影响；BCu80Ag15P钎料不需要涂覆钎剂，操作更简单，BCu80Ag15P的银含量为BAg45CuZn钎料的1/3，焊接成本更低。综合考虑，采用BCu80Ag15P钎料进行风电导电铜排的接头焊接更有优势。

5 结束语

1）采用BAg45CuZn和BCu80Ag15P钎料以电阻钎焊的方式搭接焊接风电电动机导电铜排接头均能满足设计要求。

2）BAg45CuZn和BCu80Ag15P钎料电阻钎焊后的搭接接头拉伸均断在母材热影响区，抗拉强度都高于220MPa。

3）钎焊缝的金相检测结果显示，两种钎料的焊合率处于同一水平，均超过了技术要求的90%。

4）从对操作环境的影响、操作的方便程度和经济性来考虑，采用BCu80Ag15P钎料进行风电导电铜排的接头焊接更有优势。

参考文献：

[1] 王岳元，纪玫红.大容量电机转子超厚导电环钎焊工艺的研究[J].上海大中型电机，2008（2）：36-38.

[2] 顾冬林，车三宏，李进泽，等.大型直驱永磁风力发电机定子端环接线铜板焊接工艺研究[J].金属加工（热加工），2017（20）：45-48.

[3] 蔺福民.纯铜与奥氏体不锈钢接头的中频感应钎焊及检测[J].金属加工（热加工），2017（14）：54-56.

[4] 史耀武.中国材料工程大典（第22卷）[M].北京：化学工业出版社，2006：644-646.

MW 20201125