风电高速级薄壁齿轮压力淬火制造技术研究

刘伟，王鹏宇，薛佳威，邱免
太原重工股份有限公司　山西太原　030000

摘要：研究了高速级薄壁齿轮水平装炉及压力淬火装炉两种淬火制造技术的原理、工艺参数及其在工业应用中的效果。通过两种装炉方式进行试验和分析，探究该类齿轮在淬火过程中控制齿部畸变的最优方式，通过淬火装炉方式的改善并结合分析磨齿余量数据，采用压力淬火垂直装卡可有效控制和校正齿轮淬火变形，同时提升生产效率，该种制造技术对产品质量提升具有重大意义。

关键词：薄壁齿轮；压力淬火；变形控制

Research on manufacturing technology of wind power high-speed bargaining gear pressure stress

LIU Wei, WANG Pengyu, XUE Jiawei, QIU Mian
Taiyuan Heavy Industry Co., Ltd., Taiyuan 030000, Shanxi, China

Abstract: In this paper, the principle, process parameters and the effect in industrial application of two kinds of quenching manufacturing technology of high speed thin wall gear horizontal loading and pressure quenching loading are studied. Through the test and analysis of two kinds of loading methods, the optimal way to control tooth distortion in the quenching process of this kind of gear is explored. Through the improvement of the quenching loading method and the analysis of the grinding margin data, the vertical loading of the pressure quenching can effectively control and correct the quenching deformation of the gear and improve the production efficiency at the same time. This manufacturing technology has great significance for the improvement of product quality.

Keywords: thin wall gears; pressure quenching; deformation control

1　序言

在风电增速器中，高速级齿轮扮演着重要的角色，其在增速传动比、平衡负载，负荷承载方面有着极大的作用，其多数为小模数多齿数高速啮合，这种结构往往导致其热处理变形控制的难度加大[1]。渗碳淬火过程中不仅需要控制端面翘曲变形、螺旋角变形，还需要控制椭圆变形及公法线涨量过大，因此对热处理工艺及工装要求相当苛刻[2]。在日常生产过程中，采用水平装炉淬火时，由于工件受到组织应力及热应力的影响，加之其零件结构特殊性，所以难以控制其锥度、圆度及涨量变形，造成控制难度大。本文对水平装炉和压力淬火装炉两种方式进行了对比试验。

第一作者：刘伟，工程师，硕士研究生，主要从事金属材料热处理工艺开发及技术研究，E-mail：553114854@qq.com。

2 生产现状

我公司为某风电主机厂制造的双馈型增速器齿轮箱中高速轮（见图1），为较小模数多齿数高速啮合，这种结构往往给其热处理变形控制造成了很大的难度，薄壁齿轮由于其特殊的结构和工艺要求，在热处理过程中容易出现变形、开裂和尺寸不稳定等问题[3]。该齿轮材料为18CrNiMo7-6钢，模数10.1mm，齿数117，重量1475kg，渗碳淬火后齿部硬度要求58～62HRC，心部硬度要求35～45HRC，硬化层深为1.8～2.5mm。

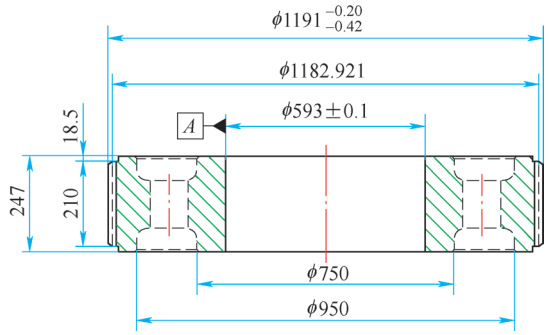


图1 风电高速级薄壁大齿轮

3 工艺及方法

3.1 制造流程

高速级薄壁齿轮一般涉及到双馈增速器机型齿轮箱中高速大齿轮，其主要生产流程为：锻件正火→粗车→调质→半精车→镗孔→滚齿→渗碳淬火→精车→磨齿。

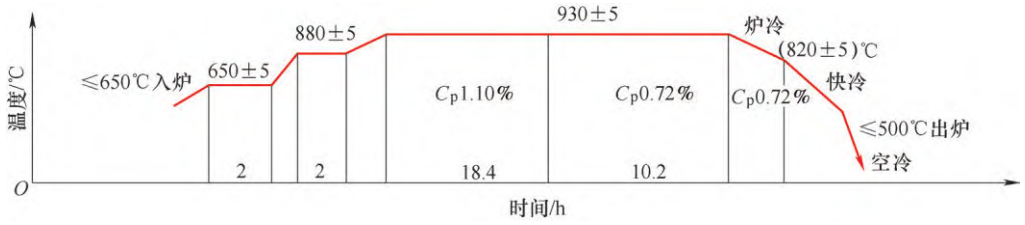
3.2 渗碳淬火＋回火工艺曲线

渗碳淬火工艺曲线如图2所示。通过渗碳淬火工艺参数优化，控制加热温度、保温时间和冷却速度等，可以有效防止零件的形变，并提高产品质量的稳定性。

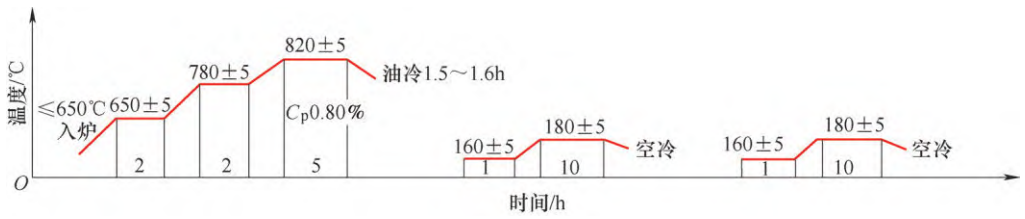
3.3 淬火装炉方式

水平淬火装炉和压力淬火装炉两种方式如图3所示。

改进前采用支撑垫块3点支撑齿轮水平装卡，

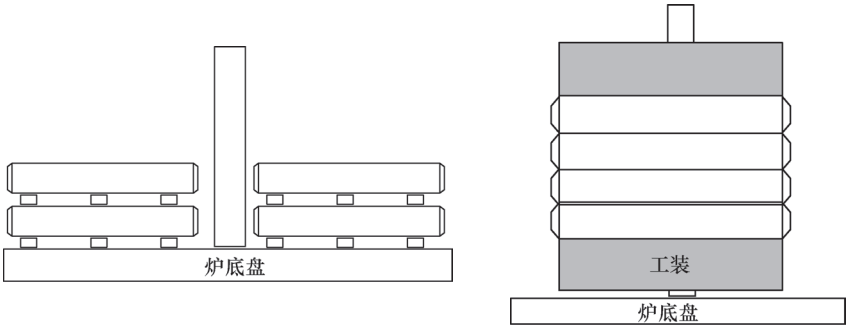


a）渗碳工艺曲线



b）淬火＋回火工艺曲线

图2 渗碳淬火工艺曲线



a）平装淬火（改进前）　　b）压力淬火（改进后）

图3 淬火装炉位置

改进后的淬火装炉方式采取高蓄热、高载荷压淬工装，利用3倍齿轮有效截面厚度的载荷重量压力淬火来控制端面淬火畸变，同时控制零件淬火过程中整个横截面的相变温度均匀变化，从而使组织转变均匀，减小组织应力对淬火变形的影响[4, 5]，利用该工装进行压力淬火，将原有单件平铺3点支撑淬火改为单炉压淬4件进行淬火。

4 变形分析

在工艺改进前，对零件编号A～D的工件进行平装淬火，检测渗碳淬火变形量，结果见表1。工艺改进后，对零件编号为1～12的工件进行压力淬火，检测渗碳淬火变形量，结果见表2。从表1和表2可看出，工艺改进前后工件的渗碳变形量、淬火变形量、涨量及轴向圆跳动参数变化较大，可以明显观察到压力淬火后工件的涨量及轴向圆跳动控制有极大改善，同时发现压力淬火不同位置方向的淬火涨量不同。

图4所示为采用压淬方式下，垂直方向不同压力淬火位置对锥度影响分析。由图4可发现，其最下端齿轮锥度差异量大，且上下端变形差异度与上中部3件齿轮相反，可利用此规律合理改善渗碳锥度差异齿轮进行装卡配炉，有效弥补渗碳锥度变形，最终改善齿轮变形量。

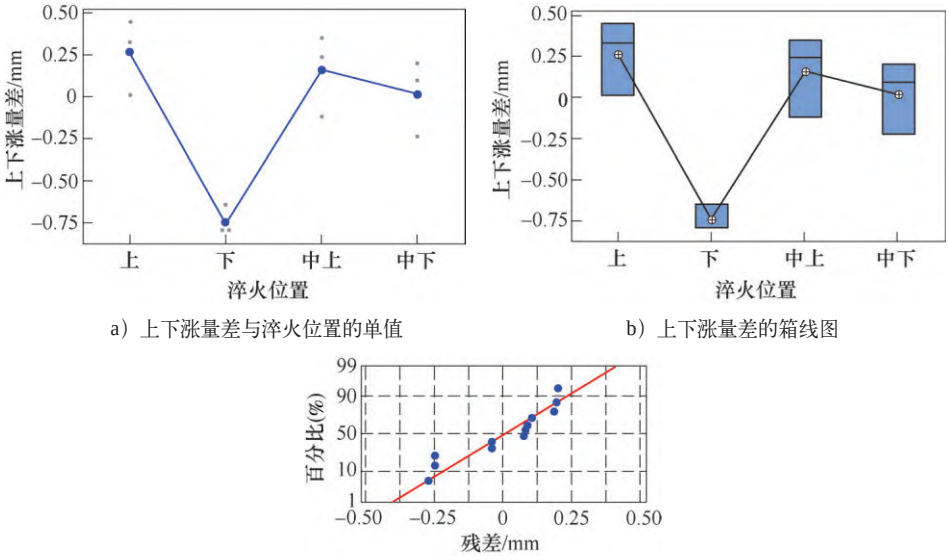
表1 改进前渗碳淬火变形量（渗碳淬火对应上下十字测量齿顶数值差） （mm）

零件编号	渗碳变形量		淬火变形量		涨量		轴向圆跳动
	圆度	锥度	圆度	锥度	上端涨量	下端涨量	
A	0.12	0.72	0.36	0.32	3.02	3.42	0.45
B	0.08	0.82	0.46	0.42	2.88	3.28	0.50
C	0.12	0.64	0.36	0.48	2.68	2.94	0.45
D	0.10	0.46	0.28	0.30	2.86	3.02	0.55

表2 改进后渗碳淬火变形量（渗碳淬火对应上下十字测量齿顶数值差）

零件编号	渗碳炉次	渗碳位置	渗碳变形量/mm		淬火炉次	淬火位置	干预翻转	淬火变形量/mm		涨量/mm			轴向圆跳动/mm
			圆度	锥度				圆度	锥度	上端涨量	下端涨量	上下端涨量差	
1	1#	1	0.06	−0.5	01#	4	翻转	0.15	−0.15	2.11	2.76	−0.65	0.25
2		2	0.12	−0.02		3	不翻转	0.1	−0.25	2.12	2.35	−0.23	0.25
3		3	0	−0.24		2	不翻转	0	0	2.57	2.33	0.24	0.2
4		4	0.08	0.58		1	翻转	0.1	−0.25	2.48	2.15	0.33	0.2
5	2#	1	0.00	−1.1	02#	4	翻转	0.15	0.3	1.75	2.55	−0.8	0.15
6		2	0.05	0.05		3	不翻转	0.2	0.25	2.25	2.05	0.2	0.25
7		3	0.06	−0.28		2	不翻转	0	−0.4	2.45	2.57	−0.12	0.25
8		4	0.02	0.26		1	翻转	0	−0.25	2.52	2.51	0.01	0.15
9	3#	1	0.05	1.25	03#	4	不翻转	0.1	0.45	1.75	2.55	−0.8	0.20
10		2	0.05	0.15		3	不翻转	0	0.25	2.05	1.95	0.1	0.20
11		3	0.05	−0.35		2	不翻转	0	0	2.3	1.95	0.35	0.25
12		4	0.10	−0.9		1	不翻转	0	−0.45	2.45	2	0.45	0.15

改进前后最终磨齿余量分配数据分别见表3、表4。从表3、表4可看出，淬火装炉方式改进前其左



a）上下涨量差与淬火位置的单值　　b）上下涨量差的箱线图

c）正态概率残差关系

图4　压力淬火位置干预锥度影响分析

表3　改进前最终磨齿余量分配结果　　（mm）

零件编号	左齿面最大余量	左齿面最小余量	左齿面余量偏差	右齿面最大余量	右齿面最小余量	右齿面余量偏差
A	0.843	0.495	0.3480	0.798	0.502	0.296
B	0.825	0.345	0.4800	0.802	0.431	0.371
C	0.795	0.398	0.3970	0.765	0.366	0.399
D	0.721	0.322	0.3990	0.714	0.376	0.338
平均值	0.796	0.390	0.406	0.770	0.419	0.351

表4　改进后最终磨齿余量分配结果　　（mm）

零件编号	左齿面最大余量	左齿面最小余量	左齿面余量偏差	右齿面最大余量	右齿面最小余量	右齿面余量偏差
001	0.6310	0.3880	0.2430	0.5850	0.3690	0.216
002	0.5810	0.3560	0.2250	0.5880	0.2750	0.313
003	0.6330	0.3560	0.2770	0.5770	0.3120	0.265
004	0.5680	0.3780	0.1900	0.7090	0.3510	0.358
005	0.7430	0.3270	0.4160	0.6870	0.3880	0.299
006	0.6470	0.2960	0.3510	0.6120	0.3440	0.268
007	0.7150	0.3590	0.3560	0.7210	0.2860	0.435
008	0.7300	0.3690	0.3610	0.7070	0.2860	0.421
009	0.6600	0.3750	0.2850	0.6880	0.2700	0.418
010	0.6830	0.3510	0.3320	0.6560	0.2620	0.394
011	0.7590	0.4880	0.2710	0.6540	0.2710	0.383
012	0.6470	0.3440	0.3030	0.5980	0.3170	0.281
平均值	0.666	0.366	0.301	0.649	0.311	0.338

右齿面磨削余量最大为0.843mm，平均最大余量为0.770～0.796mm，该齿轮设计滚刀触角为0.75mm，有齿根出台风险。采用压力淬火方式后，左右齿面磨削余量最大为0.743mm，平均最大余量为0.649～0.666mm，降低最大磨削量约13.46%。

改进前后最终磨齿余量分配概率如图5、图6所示。从图5、图6可看出，改进后左右齿面最大磨削余量显著降低，同时左右齿面磨削余量差异度明显减小，确保了磨削余量满足触角的情况下减小磨削烧伤的可能性。

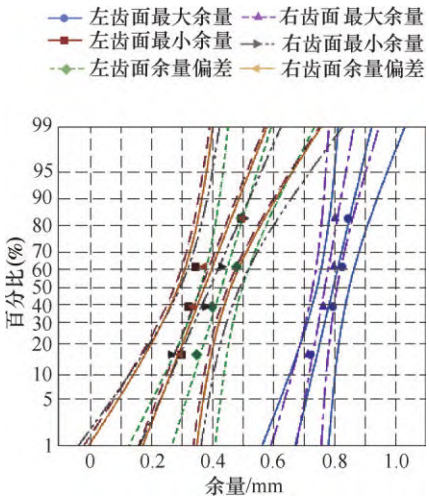


图5　改进前最终磨齿余量分配概率

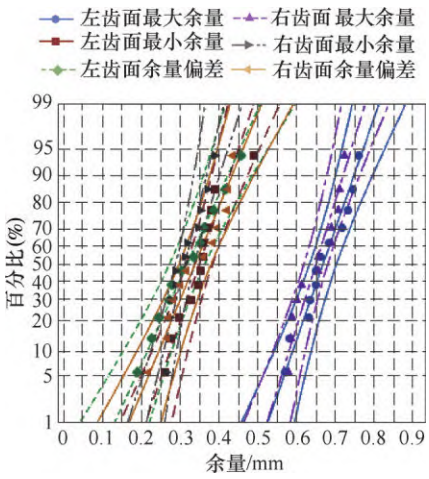


图6　改进后最终磨齿余量分配概率

5　结束语

1）高速级薄壁齿轮压力淬火可以获得良好的薄壁齿轮淬火变形控制效果，垂直式压力淬火可减小淬火引起的不平衡热应力和淬火操作本身产生的相变应力，同时利用其变形规律，合理排布淬火装炉位置，最大限度地减少此类零件的变形，提高产品质量。

2）通过淬火装炉方式的改善并结合分析磨齿余量数据，齿轮轴向圆跳动由0.45～0.55mm降低至0.15～0.25mm，涨量由2.68～3.42mm降低至1.75～2.57mm，磨齿余量分配数据显示齿部畸变减小约13.46%，极大地提升了后续精车及磨齿效率，实现了高速齿轮淬火精益制造。

参考文献：

[1] 黄群超. 风电齿轮渗碳淬火变形研究[D]. 南京：南京航空航天大学，2014.

[2] 牟宗平，牟畅. 从动齿轮压力淬火热处理工艺与变形控制[J]. 金属加工（热加工），2013（7）：42-44.

[3] 张宇庆. 采用淬火压模控制薄壁齿轮的淬火变形[J]. 金属加工（热加工），2021（3）：66-69.

[4] 刘赣华，邹洋，钱锦年. 压力淬火对弧齿锥齿轮齿形影响仿真研究[J]. 机械设计与制造，2018（5）：141-143，147.

[5] 王博，张忠和，王飞宇，等. 大尺寸薄壁渗碳淬火齿轮的畸变控制[J]. 金属热处理，2019，44（10）：209-212.

MW 20240926