

粉冶齿环与钢制齿轮激光焊接工艺研究与应用

神龙汽车有限公司 （湖南襄阳 441004） 杨月华 冯德学

一、概述

随着汽车产业的高速发展，市场竞争也日趋激烈，在满足产品使用要求的前提下，有效控制制造成本是汽车及零部件制造业努力的方向，国产化之旅也势在必行。2009年，我公司启动了变速箱中四、五档从动齿轮总成件上啮合齿环零件的国产化项目，即用国产粉末冶金啮合齿环（以下简称粉冶金齿环）替代进口钢件啮合齿环。

本文结合该国产化项目研发过程，就粉冶金齿环与钢件齿轮激光焊接形成零件总成的工艺设计及应用情况进行阐述，供读者参考。

二、产品结构与工艺简介

（1）齿轮总成原设计 变速箱中的四、五档

（高速档）从动齿轮总成采用齿环和齿轮分体设计方案，由于功能要求增加用于保证换挡行程的垫片，所以四、五档齿轮总成由齿环、垫片、齿轮通过激光焊接工序完成结合，随后齿轮总成进行碳氮共渗热处理。齿轮、垫片、齿环均为钢质零件，其中齿环和齿轮材料均为结构钢，化学成分接近，两者通过激光焊接工艺结合，生产历史近十年，工艺成熟，焊缝质量稳定可靠，满足产品的使用要求。

（2）齿轮总成产品技术要求 ①激光焊接工序：焊缝静态扭矩 $\geq 3000\text{N}\cdot\text{m}$ ，焊缝表面状态平整光滑，焊缝表面和内部无气孔与裂纹。②碳氮共渗+淬火工序。齿轮：层深 $\text{EC650}=0.35\pm 0.10\text{mm}$ ，心部硬度 $(455\pm 75)\text{HV}$ ，表面硬度 $(800\pm 50)\text{HV}$ ；粉冶金齿环：心部硬度 $(390\pm 70)\text{HV}$ ；热处

表4 宏观检查结果

观察面号	H值/mm	宏观检验结果 (10×)			
		裂纹	未熔合	其他缺陷	宏观组织
1	3.2	无	无	无	正常
2	3.7	无	无	无	正常
3	3.8	无	无	无	正常
4	4.1	无	无	无	正常
5	3.9	无	无	无	正常
6	3.3	无	无	无	正常
7	4.2	无	无	无	正常
8	3.6	无	无	无	正常

5. 结语

通过对0Cr18Ni9换热管与Q345R管板的异种

材质焊接接头的焊接试验，采用H12Cr24Ni13Si焊丝，全自动TIG直流/脉冲焊焊接，焊接试件经宏观检查试验，焊接接头可以满足产品技术条件及相关标准的要求。解决了管板焊接过程中的主要问题，经过焊接性分析和焊接工艺评定，确定了合理的焊接参数和工艺措施，实际焊接中获得了优良的焊接接头。

采用上述工艺对冷凝器管束进行焊接，焊接接头表面成形良好，按图样规定对管束进行水压试验，试验压力2.6MPa，试压过程中无渗漏，试压一次合格。所焊管束投产至今两年来一直运行正常，从而证明按试验所得的焊接工艺是可行的，完全能够满足产品的焊接质量要求。

MW (20120708)

理后焊缝表面和熔池均无裂纹。③齿轮精度满足图样设计及PSA标准B181155。

(3) 粉冶齿环项目的提出 图1中的齿环毛坯为进口件, 存在采购成本高、供货周期长, 另因产能扩大需投资插齿机等一系列问题。2009年, 齿环国产化项目开始立项, 决定将国产粉冶齿环替代钢制的进口齿环。基本方案是国产的粉冶齿环外委其他公司加工, 来料为啮合齿环成品(无需再插齿加工), 直接进入激光焊接工序, 总成零件再经过热处理及热后机加工序, 最终满足产品功能要求。

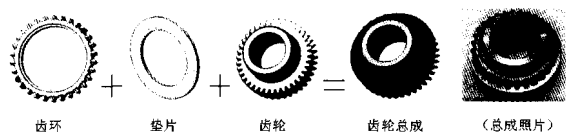


图 1

三、工艺方案设计

1. 四、五档从动齿轮总成生产工艺流程

外委扬州保来得公司生产粉冶齿环, 替代钢件齿环; 取消原钢件齿环生产的插齿、倒尖角、清洗工序, 设备改造它用; 齿轮零件还是按原生产工艺流程进行生产, 工艺流程如图2所示。

钢件啮合齿环→插结合齿→结合齿倒尖角→清洗烘干 工序取消
粉末冶金齿环→外委加工
从动齿轮→车削→滚齿→倒棱
→剃齿→清洗烘干

图 2

2. 粉冶齿环的材料选择

粉冶齿环及钢件齿轮的材料及化学成分对比如表1所示。

表1 粉冶齿环及钢件齿轮的材料及化学成分对比

项目	材料牌号	化学成分 (质量分数, %)					密度 /g·cm ⁻³
		Fe	C	Cu	Ni	Mo	
钢件 齿轮	27MC5	D-AB	0.23	≤ 0.04	—	—	7.85
			~ 0.31				
钢件啮 合齿环	16MC5	D-AB	0.14	≤ 0.40	—	—	7.85
			~ 0.19				
粉冶 齿环	F50 N2U268	D-AB	0.25	~ 1.77	1.75	0.53	≥6.9
			~ 0.45				

从表1可知, 牌号F50 N2U268粉冶齿环的化学成分与齿轮材料基本接近, 所以选择其做工艺试验。

3. 激光焊接技术要求和工艺参数的调试

(1) 激光焊接工艺参数的调试 首先按原钢件齿环的焊接技术要求进行激光焊接工艺参数的调试。

焊缝工艺技术要求: 主要包括有效焊缝深度 h_1 , 焊缝总深度 h_2 , 焊缝宽度 L , 焊缝偏离 a 或 b , 说明如图3、表2、表3所示。

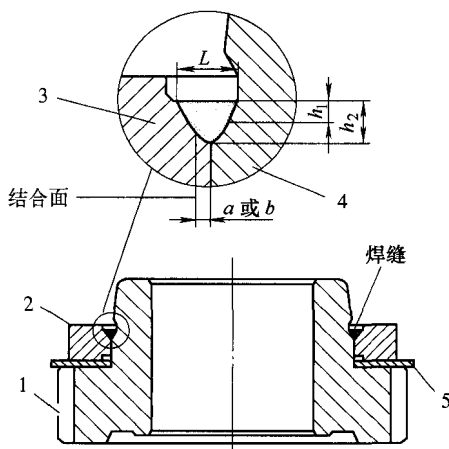


图 3

1、4. 从动齿轮 2、3. 齿环 5. 垫片

表2 钢齿环和粉冶齿环激光焊接技术要求对比

技术要求	有效焊缝深度 h_1 /mm	焊缝总深度 h_2 /mm	焊缝宽度 L /mm	焊缝偏离 a 或 b /mm
钢制齿环	≥1.25	≥1.25	无要求	≤0.1
粉冶齿环	≥1.25	≥1.25	无要求	≤0.1

表3 激光焊接工艺参数

项目	发射功率/W	工件转速/r·min ⁻¹	零件旋转角度(°)
钢制齿环	900	12	365~370
粉冶齿环	900~1135	12	365~370

此阶段分30件、50件、100件的小批量试验, 功率在700~1135W之间调整。

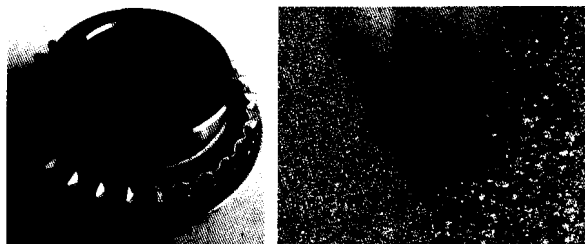
试验过程中抽检零件, 进行焊缝深度、裂纹及气孔的检测, 结果如表4所示。

表4 焊缝深度和金相检测结果

焊接 功率 /W	有效焊缝深度		状态	备注
	左侧	右侧		
700	1.15	1.10	热前	四档, 工艺试验, 有气孔
800	1.25	1.20	热前	四档, 工艺试验, 有气孔
910	1.40	1.50	热前	四档, 工艺试验, 有气孔
950	1.50	1.50	热前	五档, 工艺试验
950	1.40	1.45	热后	五档, 有贯穿裂纹
950	1.40	1.50	热后	五档, 有贯穿裂纹
950	1.44	1.50	热后	五档, 做过台架试验
950	1.30	1.60	热前	五档, 有裂纹
950	1.40	1.50	热前	五档, 有裂纹
1010	1.70	1.80	热前	四档, 工艺试验
1135	1.80	2.00	热前	四档, 工艺试验
1135	1.90	1.80	热前	五档, 工艺试验
1135	2.10	2.10	热前	四档, 有大量气孔
1135	2.00	2.20	热前	五档, 有大量气孔
1135	2.00	2.20	热前	五档, 工艺试验

扭矩检测，抽检了10件，扭矩值分别为3810N·m、3930N·m、3750N·m、4090 N·m、4080N·m、3980N·m，均大于3000N·m，满足了产品要求。

零件焊缝表面平整，熔池没有气孔，100%磁粉探伤检测，裂纹率0%，如图6所示。



(a) 焊接后的成品 (b) 焊缝熔池

图 6

改进结果显示，调整了焊缝技术要求后，焊缝质量合格，扭矩、表面质量、裂纹率均能满足产品的要求。为了提高保险系数，批量生产时将焊缝深度控制在2.0mm以上，固化焊接参数。

4. 优化粉冶齿环的含碳量

最初选择的粉冶材料 w_c 一直控制在0.40%左右，属于中碳钢。材料学告诉我们， $w_c < 0.3\%$ 时，焊接性能较好； $w_c = 0.5\%$ 左右时，易产生高碳马氏体，在焊接材料及工艺控制不好时，随焊缝碳含量增高，导致裂纹产生的风险很大。为了彻底消除裂纹风险，防止焊缝深度波动时出现裂纹，就必须将粉冶齿环的 w_c 控制在0.30%以下，使之与钢件齿轮相接近。

参考钢件齿轮的含碳量范围，重新定义齿环的化学成分标准，将 w_c 控制定义在0.20%~0.30%，供应商 w_c 控制在0.25%左右。

为了验证含碳量的高低对焊接裂纹的影响程度，我们将高碳和低碳齿环同时焊接做对比试验，只有把功率降到一定程度，即焊缝深度低到一定的程度，才能知道含碳量对裂纹的影响。高低碳齿环激光焊接对比试验结果如表8所示。

表8数据显示，激光焊接后，高碳和低碳零件焊深度差异不大。对905W生产的零件，热处理后抽检30件，高碳齿环裂纹率20%，低碳齿环裂纹率为0%，并且低碳齿环焊缝深度更稳定，焊缝无气孔，功率和焊缝深度在很大范围内变动时，热处理

表8 高低碳齿环激光焊接对比试验结果

试验日期：2010.09.27 试验零件：5档从动											
A：低含碳量0.26% B：高含碳量0.42%											
序号	功率	焊缝一					焊缝二				
		h_1	h_2	a	b	L	h_1	h_2	a	b	L
A1	905	1.4	1.5	0.0	0.0	1.8	1.2	1.4	0.0	0.0	1.8
A4	1135	1.5	1.7	0.0	0.2	1.9	1.6	1.5	0.0	0.0	2.0
A7	1335	2.2	2.2	0.0	0.1	1.8	2.2	2.2	0.0	0.0	1.9
B1	905	1.3	1.4	0.0	0.2	1.9	1.2	1.3	0.0	0.1	1.9
B4	1135	1.7	1.8	0.0	0.1	1.4	1.7	1.6	0.0	0.2	1.6
B7	1335	2.2	2.2	0.0	0.0	1.8	2.2	2.2	0.0	0.0	1.8

后均无裂纹。

四、巩固措施

在批量生产半年后，刚好到了四月份霉雨季节，生产过程中发现一批次的粉冶齿环激光焊接后在焊缝表面出现了气鼓包，立即展开分析，经过烘干等试验验证，发现鼓包原因是齿环受潮引起的。为此，制定了一项巩固措施，要求齿环供应商采用真空包装，并在包装袋内放入干燥剂，干燥剂的放置数量以货物到现场拆包时未变色为标准。

为了确保含碳量稳定在新的控制范围，公司理化实验室对每批齿环的含碳量进行监控。

五、效果检查

跟踪一年的生产情况，齿环 w_c 一直控制在0.24%~0.28%，生产30万件四、五档从动齿轮，焊缝深度能稳定地控制在2.2~2.4mm之间，焊缝质量良好，从未出现裂纹。随后公司取消了热处理后100%磁粉探伤工序，巩固措施实施后也再未出现鼓包问题。

我公司粉末冶金材料在变速箱高速档齿轮的应用打破了国内只能用钢件的历史，为公司降低成本又开辟了一种新的模式，同时突破了传统工艺的束缚，采用新的工艺流程、新的检测方法，提升了工艺设计人员的研发能力，积累了新项目自主研发的宝贵经验。**MW** (20120713)