

9310钢薄壁空心轴渗碳淬火 工程化应用

李克, 张莉, 罗强

(中国航发南方工业有限公司, 株洲 412002)

[摘要] 研究了涡轴发动机 9310 钢薄壁空心轴渗碳 + 淬火复合型热处理技术, 通过调整低压真空渗碳加热、冷却方法实现了 9310 钢薄壁空心轴 0.5mm 渗碳层加工。采用分级淬火方法、改进装炉方式、半精加工后增加稳定处理等, 有效控制了空心轴的微小变形, 获得高硬度、高耐磨和尺寸精度高的零件, 并通过了涡轴发动机 150h 持久试车考核, 实现了薄壁空心轴渗碳淬火的工程化应用, 为小尺寸薄壁轴类零件渗碳及淬火变形控制提供参考。

关键词: 9310 钢; 空心轴; 渗碳淬火; 变形

DOI: 10.16080/j.issn1671-833x.2017.15.097



李克

高级工程师, 主要研究方向为航空材料热处理技术应用。发表学术论文 20 篇, 拥有国家发明专利 5 项、国防专利 1 项, 主持完成 20 余项航空发动机科研项目, 合编专业书籍两部, 主编航空标准 3 项, 荣获全国优秀 QC 项目, 多次获科技进步奖。

随着第三、四代涡轴航空发动机的技术发展, 不仅对燃气涡轮高温部件提出了耐高温、抗腐蚀等高要求, 对离子分离器、压气机等冷端部件的性能要求、加工精度也提出了更为严格的服役要求。

某涡轮轴发动机的空心输出轴是发动机中的一个重要零件, 用来连接动力涡轮传动轴和螺旋桨, 在发动机中的作用是向前传递发动机功率。空心轴的后端通过一个内花键与动力涡轮传动轴套接, 前端通过另外一个内花键与螺旋桨套接, 在工作过程中, 要不断接受滑动、滚动等相对运动过程, 并与其他零件之间有摩擦, 同时还承受了一定的交变弯曲应力和接触疲劳应力, 有时还会有一定的冲击力, 工作条件非常恶劣。与服役条件相应, 该零件常见的失效形式有过量磨损、表面剥落, 甚至断裂等。因此, 对该零件的技术要求是表面具有高硬度、高耐磨性、高接触疲劳抗力, 而心部

应具有良好的综合力学性能。

目前, 航空发动机轴类零件主要采用渗碳 + 淬火的复合型热处理工艺技术来获得良好的心部组织、高的表面硬度, 以及较高的尺寸精度。在某薄壁空心输出轴的整个加工过程中, 渗碳是关键工序, 需要对两个内花键及外圆进行渗碳。零件渗碳的目的是使表面保持高的硬度、耐磨性及高的接触疲劳强度和弯曲疲劳强度。但由于渗碳后表面和心部的成分、组织不同, 具有不同的体积比和奥氏体连续冷却转变曲线, 因此其渗碳淬火后的热处理变形特点和规律不同于一般工件, 变形也更加复杂。加上, 涡轴发动机零件渗碳深度一般很浅, 深度不足 1.0mm, 零件经过渗碳后基本不进行余量加工。因此, 相对于一般零件的热处理, 渗碳薄壁类零件^[1], 特别是薄壁轴类零件的渗碳变形控制问题是个技术难题。

本文重点从低压真空渗碳工艺

方法、淬火装炉方式、分级淬火方法,以及淬透性试验、试车考核等方面,对涡轴发动机首次使用的 9310 钢薄壁空心轴渗碳、淬火质量控制等方面进行研究。

薄壁空心输出轴技术特点

某涡轴发动机空心轴为典型的薄壁空心轴类零件,选用首次应用的 9310 钢材料进行加工。9310 合金结构钢是一种低成本且具有优良综合性能的轴类用高强度渗碳钢,使用温度一般在 150℃ 以下,具有高的抗拉强度和高的韧、塑性^[2]。经渗碳并淬火加低温回火,表面具有很高的硬度,心部的强度、韧性和塑性配合良好。9310 钢的主要化学成分(C 为 0.12%; Cr 为 1.5%; Ni 为 3.50%; Fe 为 94.5%)^[3]。

空心轴零件的热处理技术要求为:零件为典型的小尺寸薄壁空心轴,轴向长度 200mm,小端外圆尺寸 45mm,大端外圆尺寸 80mm,最小壁厚仅为 6mm;对花键 A_Q、B_W 及表面 B 段进行渗碳,渗碳深度:0.4~0.5mm,表面硬度: HRC ≥ 60,心部硬度: HRC35~40,检验等级 I-I_c。两处内花键 A_Q、B_W 尺寸精度高。

工艺过程

1 热处理工艺

空心轴首次采用的加工路线为:棒料→粗加工→预备热处理→半精加工→渗碳淬火→精加工→终检。

目前,由于零件变形要求高,渗碳前的预备热处理工艺采用调质状态^[4],具体制度为:

- (1) 正火:900℃,保温 2h,空冷;
- (2) 高温回火:600℃,保温 2h,空冷。

调质的作用有两方面:一方面调整组织,获得回火索氏体组织,为后续的渗碳做组织准备;另一方面获得合适的硬度,利于后续机械加

工。

渗碳工艺为:

(1) 真空渗碳炉:900℃保温 1h,自动渗碳。渗碳结束移入冷室通氩气冷却。

(2) 淬火工艺为:800℃保温 2h,淬入 200℃油槽后转入常温油槽中冷却。

(3) 冷处理:≤ -70℃,2h,空冷。

(4) 回火:150℃保温 2h,空冷。

2 存在问题

在试验初期,9310 钢空心轴零件采用上述工艺进行渗碳、淬火后,经常出现两类技术质量问题:

(1) 零件经渗碳淬火后,零件变形是最主要的质量问题,主要表现为:渗碳后, A_Q 以及 B_W 两花键齿型齿向及跳动超差,专用计量通规无法通过 A_Q 以及 B_W 两花键,轴向尺寸(高度)均缩短约 0.25mm,并且 A、B、C 3 段直径缩小;零件淬火后,专用计量通规无法通过零件 A_Q 以及 B_W 花键,轴向尺寸缩短了 0.20~0.40mm,超过了下偏差, A、B、C 3 段直径胀大,3 段变形形貌均类似鼓筒状态;冷处理回火后尺寸无变化。

(2) 零件心部硬度偏低。渗碳淬火后,渗碳淬火回火后的金相试料心部硬度可达 HRC35~36,而选取零件剖切检查发现心部硬度仅为 HRC30,不满足设计图样 HRC35~40 要求。

原因分析

1 渗碳淬火变形原因分析

造成零件变形的原因不外乎 3 种情况^[5]:

(1) 零件尺寸差异和形状突变引起的变形;

(2) 机加工过程中应力释放情况不同引起的变形;

(3) 热处理过程中的变形。

其中热处理过程中的变形是最受关注的。

热处理中的应力主要在于:

(1) 加热冷却速度不同,形成的温度梯度造成的热应力;

(2) 表面与心部及不同截面区域之间的相变先后不等时造成的组织应力;

(3) 不同相的组织比容不同引起的相变应力。

而热处理 3 种应力引起的变形,以温度梯度造成的热应力引起的变形影响最大。

结合该零件的加工流程和热处理过程,具体分析该零件的变形原因。

1.1 机加应力引起变形

零件渗碳前经过机加车间插齿,该工序进给量大、切削力大、残余应力较大;同时没有经消除应力处理,机械加工造成的残余应力在渗碳前没有得到有效释放,机加应力在热处理中导致零件变形。

1.2 热应力引起变形

通过计量零件热处理变形的情况,渗碳后零件各个尺寸都有缩短,花键扭曲变形,符合热胀冷缩规律,说明渗碳结束后的零件热应力大,造成零件收缩。通过分析输出轴渗碳、淬火工艺及过程,发现在渗碳装炉时,零件直接摆放在料框中,大头朝下,这种装炉方式容易带来两个问题:冷却时小端冷却快,大端冷却慢,冷却不均匀;零件摆放不平也会导致变形。

空心轴零件选用的材料为 9310 钢,具有较大的热导率。在渗碳时组织转变为奥氏体,进入高塑性状态,渗碳冷却为强制气冷,冷速较快,由于零件各部分壁厚不均匀使零件冷却不均匀、差异大,热应力导致变形大。虽然零件的 A_Q、B_W 花键经过渗碳,但热应力起决定性作用,因此在渗碳过程中改进零件装炉摆放方式、严格控制零件的冷速尤为重要。

1.3 组织应力引起变形

经渗碳的零件由于沿截面存在表面和心部的成分及组织不同,具有不同的体积比和奥氏体连续冷却转变曲线,因此淬火时的相变顺序与普通淬火不同。渗层内碳含量由表及里逐渐降低,相应的马氏体相变温度 M_s 点则逐渐升高,导致马氏体相变开始往往不是从表面而是从渗层下某一部位首先开始,待表层温度降到外层的 M_s 点以下发生马氏体相变时,内层马氏体相变已经发生,导致伴随外层高碳马氏体相变的体积膨胀,由于受到内层的阻碍,于是表层产生了很大的压应力,心部则为拉应力。由于冷却的不均、成分的变化、截面尺寸的突变都会使这些应力的分布发生变化,从而导致变形。3种应力的综合作用下,导致薄壁空心轴零件发生复杂的变形。

2 零件心部硬度偏低原因分析

空心轴零件心部硬度偏低,而试料硬度合格。经查发现,试料采用盐炉直接淬火,而零件淬火时为减少变形,会参考航空发动机轴类零件典型渗碳淬火工艺^[6]:采用 200℃油分级淬火,即 800℃保温 2h,垂直淬入 200℃油槽后再油冷。

经初步推测:可能是该输出轴零件淬火时心部没有淬透,引起的心部马氏体量太少、硬度偏低。因此有必要对 9310 钢的淬透性进行研究。

2.1 淬透性试验

根据零件淬火时的实际有效厚度尺寸,取 $\phi 24\text{mm}$ 长棒料一根,与渗碳试料同炉热处理。经渗碳、淬火、回火后取棒料中间位置的圆片(10mm厚)作为硬度测试试片。取样方式见图 1。对样品沿径向选取 2 条测试路径,两两垂直,每一条测试路径从圆片边界 2mm 开始测试硬度,采用洛氏硬度计测试(HRC),两点之间间距约 3mm。中心位置点硬度单独测量。硬度检测结果见表

1。

从表 1 中可知,与零件有效厚度相当的试棒,圆柱试样经渗碳、淬火、回火后,采用截面硬度法分析,发现测试点的硬度值分散度不大,淬透性好,硬度为 HRC35~37.4,符合设计图样要求(HRC35~40)。

可见, $\phi 24\text{mm}$ 的圆柱试棒采用直接油淬均可以淬透,由此得知:空心轴零件直接油冷不存在未淬透的问题。

2.2 原因分析

零件出现的心部硬度偏低的主要原因,是采用了分级淬火时,在

200℃左右油温控制不好的话易进行贝氏体转变区,可能已发生了贝氏体转变,因此二次进入常温油淬时马氏体形成量相对较少。

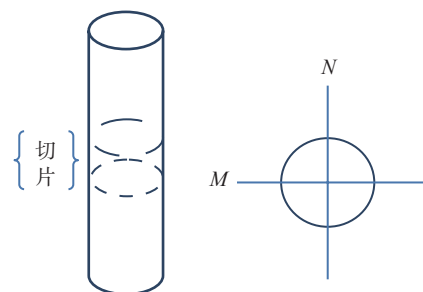


图1 淬透性分析取样图

Fig.1 Hardenability analysis sampling scheme



(a)改进前



(b)改进后

图2 改进前后渗碳装炉方式

Fig.2 Carburizing furnace charging mode

表1 淬透性试样硬度检查结果

项目	外圆硬度 HRC			中心硬度 HRC	外圆硬度 HRC			
水平线 M	36.2	35.5	36.0	35.8	35.8	35.9	36.5	37.1
垂直线 N	37.2	36.3	36.7	36.6	36.5	35.7	35.8	37.4

工艺调整及变形控制

1 变形控制方法

1.1 机加应力消除

半精加工后增加稳定处理工序,消除半精加工后的机加应力。工序为:半精加工→消除应力→渗碳淬火→精加工→终检。

消除应力制度:300℃,保温 2h,空冷。

1.2 渗碳工艺调整

为了进一步减少渗碳过程中的空心轴的变形量,对渗碳工艺参数进行了调整。采用低压真空渗碳工艺仿真模拟后,确定了台阶升温,降低升温速率的方法。

具体参数:抽真空后先升温至 500℃,1h 后升至 900℃,保温 1h 后自动渗碳。渗碳完毕后先炉冷至 500℃以下,再通氩气冷却。

1.3 装炉方式及工装夹具改进

对于零件的上下端形状差异较大的问题,通过试验摸索,对装炉方

式进行两个方面改进:

(1)设计一个料架和卡座,使零件能垂直放置,操作时使用水平仪测试,保证零件的垂直。

(2)将零件小端朝下,这样工装、底座的散热能对小端进行热补偿,这样可以在升温阶段延长小端的升温速率,在降温阶段可以延迟小端的降温速率。通过炉底板的吸收热量的作用,以减小上下两端升温和降温过程中的差异。具体操作如图 2 所示。

2 心部硬度偏低控制

淬火工艺调整,改变冷却方式:800℃,保温 2h,淬入 100℃ 淬火油槽中。

验证

1 试生产

按调整后的渗碳、淬火工艺制度进行空心轴热处理工艺质量控制。

零件经渗碳淬火后,按照 HB/

Z20024 航空技术标准^[7]对渗碳层进行检测,结果如表 2 所示。典型显微组织形貌见图 3、4。渗碳淬火后的力学性能检测结果如表 3 所示。

2 输出轴批生产

试生产合格后,对 9310 钢空心轴零件进行批量渗碳淬火加工。2016 年累计加工 4 批共 40 件,100% 合格交付。

3 试车考核

上述渗碳淬火加工的空心轴零件装机,在某型涡轴发动机上进行 150h 试车考核。试车后分解检查,花键、齿轮表面未见明显磨损,剖切后检查渗碳层深度、表面硬度均符合设计图样要求。

考核结果:渗碳淬火的 9310 钢输出轴通过 150h 持久试车考核。

结论

(1)采用 600℃ 台阶升温后 900℃ 渗碳的方法,设计专用夹具保证薄壁空心轴小端朝下的装炉方式,以及半精加工后增加稳定处理的工艺方法,有效实现了空心轴微变形控制,尺寸精度高。采用 100℃ 分级淬火油冷方法,解决了薄壁空心轴渗碳、淬火后心部硬度偏低的难题,获得了良好的渗碳层组织,渗碳层深度达到 0.5mm,表面硬度达到 HRC60 以上。

(2)渗碳、淬火加工的 9310 钢空心轴零件已在某型航空涡轴发动机上进行了 150h 持久试车考核,实现了薄壁空心轴的工程化应用,可为小尺寸薄壁轴类零件渗碳及淬火变形控制提供参考。

参考文献

[1] 唐明华,张蓉,张岚原.解决薄壁零件渗碳淬火变形的措施[J].热加工工艺,2003(3):60-62.

TANG Minghua, ZHANG Rong, ZHANG Lanyuan. The solution measures for distortional

(下转第 107 页)

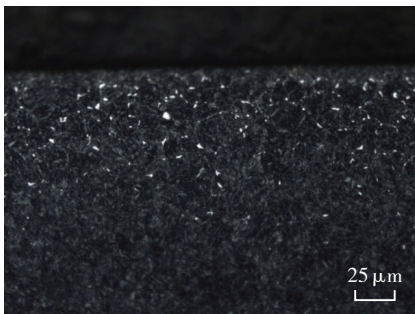


图3 渗碳层金相(400×)

Fig.3 Carburized layer metallographic

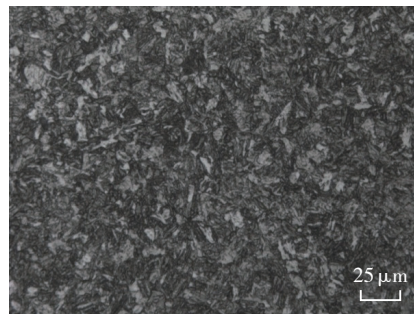


图4 心部组织金相(400×)

Fig.4 Metallographic examination of heart tissue

表2 零件试生产结果

项目	渗碳深度/mm	表面硬度 HRC	心部硬度 HRC	渗碳层显微组织	变形
要求	0.4~0.5	≥ 60	35~40	I c	≤ 0.05
试料预 淬火	0.45~0.5	62	38	符合 HB20024 要求	合格
零件淬火	0.5	63	39.5	符合 HB20024 要求	合格

表3 渗碳后力学性能检测结果

热处理状态	抗拉强度 R _m /MPa	屈服强度 R _{p0.2} /MPa	断后伸长率 A/%	断面收缩率 Z/%	洛氏硬度 HRC
技术要求	≥ 1000	≥ 900	≥ 20	≥ 60	35~40
调质+渗碳+淬火+ 冷处理+低温回火	1125	964	25	77	35~37.2