

大型环形薄壁锻件调质工艺研究

王旋, 范永红, 王昌志, 胡明勋, 邱旺成

中国长江动力集团有限公司 湖北武汉 430200

摘要: 某大型环形薄壁锻件的材质为30CrMnSiA钢, 最大直径为1630mm, 高230mm, 壁厚约25mm, 要求调质后硬度满足33~38HRC, 且翘曲变形程度不得超过3.28mm。通过使用专用工装, 经900℃油冷淬火和500~520℃回火处理后, 检测多件锻件的硬度值和变形程度。结果显示: 硬度值控制在35~38HRC, 变形量控制在3.28mm, 有效解决了该锻件调质过程中的硬度不足和变形过大问题, 为生产制造该类型工件提供了有力的技术支撑。

关键词: 大型环形薄壁锻件; 热处理工艺; 变形; 调质

Research on the quenching and tempering process of large ring forgings

WANG Xuan, FAN Yonghong, WANG Changzhi, HU Mingxun, QIU Wangcheng

China Chang Jiang Energy Corporation, Wuhan 430200, Hubei, China

Abstract: The material of the large annular thin-walled forging is 30CrMnSiA steel, the maximum diameter is 1630mm, the height is 230mm, the wall thickness is about 25mm, the hardness after quenching and tempering is required to meet 33~38HRC, and the degree of warpage deformation shall not exceed 3.28mm. Forgings are tested by using special tooling, after 900℃ oil-cooled quenching and 500~520℃ tempering, the hardness value and deformation degree of multiple forgings are detected, and the hardness value is controlled in the range of 35~38HRC, and the deformation is controlled with in 3.28mm. It effectively solves the problem of insufficient hardness and excessive deformation in the process of quenching and tempering of the forging, and provides an technical support for the company's production and manufacturing of this type of workpiece.

Keywords: large annular thin-walled forgings; heat treatment process; deformation; quenching and tempering

1 序言

大型锻件的调质处理往往比小锻件的热处理更加困难, 某大型环形薄壁锻件尾环壳体(以下简称“工件”)是固体火箭发动机上的核心零件, 如图1所示。在发动机运行过程中, 工件一方面要支撑扩张段绝热层, 增加其强度; 另一方面, 对于柔性喷

管, 其摆动时壳体大端还要承受伺服作动器作用的集中力。同时, 其刚度还要满足伺服作动器的控制精度。该工件直径较大, 厚度较薄, 调质过程中易变形, 且变形后无法进行校正。另外, 其硬度要求较高, 且不允许多次淬火。本文从热处理工艺、工装设计和生产过程三个方面进行探讨, 从工艺和工

第一作者: 王旋, 助理工程师, 本科, 主要从事航天产品、汽轮机产品的热处理研究, E-mail: 1587642461@qq.com。

通信作者: 邱旺成, 高级工程师, 本科, 主要从事航天产品、汽轮机产品制造工艺研究, E-mail: qwc_2007@163.com。



图1 工件示意

装适用性方面,来提高工件的整体质量。

2 工件介绍

工件材质为30CrMnSiA钢,最大直径为1630mm,高为230mm,壁厚约25mm。

技术要求:硬度33~38HRC。

变形要求:翘曲变形不得超过3.28mm。

表面质量:不允许存在麻点、裂纹等缺陷。

30CrMnSiA钢的化学成分见表1。

表1 30CrMnSiA钢的化学成分(质量分数)(%)

C	Cr	Mn	Si	P	S
0.28~0.34	0.80~1.10	0.80~1.10	0.90~1.20	≤0.02	≤0.02

3 工艺制定

大型锻件的调质多数情况下是作为最终热处理,赋予大型锻件的最终性能。因此,对其进行热处理必须严谨,大锻件的内部存在较多缺陷,锻件的尺寸和重量越大,合金成分越多,缺陷问题就越严重。本文所讨论的就是关于30CrMnSiA钢的大型环形锻件的调质处理。

3.1 淬火工艺

(1) 淬火温度 与小锻件相比,大型锻件热处理过程中更容易出现问题,其内部存在较多的冶金缺陷,对于整只钢锭锻造造成的锻件,加热时往往采用规定温度的上限^[1]。

(2) 加热方式 在大型锻件进行热处理时,对其有效截面尺寸进行计算分析,控制好装炉温度和加热速度。通常对于有效截面尺寸小的锻件,装炉时不限制升温速度。对于合金元素含量高的锻件,必须选择阶梯加热的方式。按照常规热处理经验,选定650℃为中间均温温度。

(3) 均温与保温 当仪表到达工艺温度时,就意味着均温开始。一般均温时间选择1~1.5倍保温

时间。保温时间的选取则按照工件的有效截面尺寸来确定,保温时间一般按0.8~1.0h/100mm选取。中高合金钢取上限,低合金钢取下限。该工件淬火工艺的淬火温度阶段的保温时间为1~1.5h。

(4) 淬火冷却 大型锻件淬火时,首先最关键在于冷却速度,其次是终冷温度^[2]。对于合金钢锻件,一般选择油淬,锻件在油中冷却速度比在水中小,因此工件内外温差小,可显著减小工件开裂和变形的倾向。淬火冷却时间很大程度上决定了工件的热处理效果,若时间过短,则工件性能达不到所要求;若时间过长,终冷温度过低,则会加大工件淬裂的危险性^[3]。终冷温度与工件的内在质量有关,为此选取50~80℃为终冷温度。

基于以上分析,该工件最终淬火工艺如图2所示。

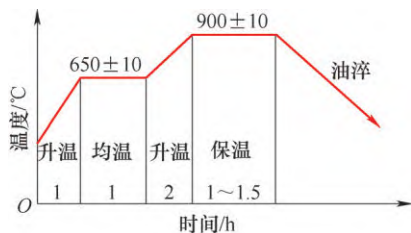


图2 淬火工艺曲线

3.2 回火工艺

大型锻件淬火后应及时回火,防止工件开裂,原则是不超过2h。淬火后回火是为了获得最终力学性能,并消除内应力,获得稳定的回火组织^[4],以达到工件的技术要求。

(1) 回火温度选择 大型锻件的回火温度依照组织、性能的要求确定,可以进行工艺试验再确定回火温度。

(2) 回火均温、保温时间 大型锻件回火时,应依据工件形状的复杂程度来控制升温速度,有时为了防止工件中缺陷扩大,在350℃保持一定的时间,然后再升高到工件回火温度^[5]。工件回火保温时间一般是与工件有效截面有关,在300~600℃回火时,空气炉中的保温时间为40~60min加上最大厚度乘以2~3min/mm。该工件回火工艺的总保温时间为均温时间加上保温时间,共4~6h。

(3) 回火冷却 对于30CrMnSiA钢,回火冷却选用水冷或油冷均可。通常冷却速度为:水冷>油冷>空冷>炉冷,随着冷却速度的增大,洛氏硬度逐渐增大,冲击韧度逐渐提高。为获得较高硬度,

回火采用水冷方式。

该工件最终回火工艺如图3所示。

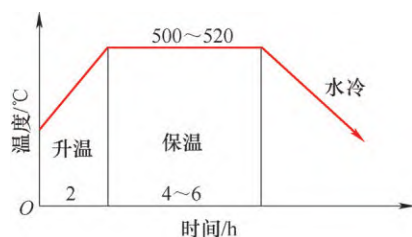


图3 回火工艺曲线

3.3 炉型的选择

根据工艺要求及工件尺寸大小,选择型号为RT3-265-10的全纤维台车炉,该设备为Ⅲ类炉,额定温度为1000℃,额定功率为265kW,有效尺寸为2200mm×1800mm×900mm,能够满足工艺的温度范围要求及工件的尺寸要求。

4 工装设计

4.1 外形设计

由于工件呈环形,在高温起吊过程中,受到不均匀的力会导致工件严重变形,因此在设计工装时,就设计成一个顶端起吊结构形式,如图4所示。

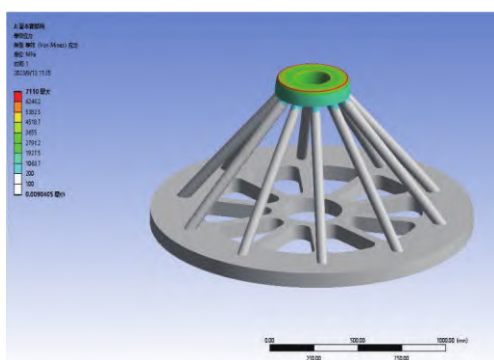


图4 工装结构示意图

工装由上圆板、下圆板和钢管焊接而成,顶端的圆板用于起吊。该外形工装能够对工件起全支撑作用,以保证工件在高温起吊过程中均匀受力,从而降低工件的变形量。另外,在起吊工件时,钢管焊接部分能够对工件起到固定作用,保证工装使用的安全性。

4.2 强度计算

设计的工装要进行强度计算,避免在高温起吊过程中,工装因受力过大失效,而造成人员伤亡。

对工装进行有限元分析,边界条件设置为工装

上表面起固定支撑,按照所承受工件重力,对工装下圆板上表面施加2600N的力,环境温度按照工件淬火温度设置,为900℃,有限元分析如图5所示。

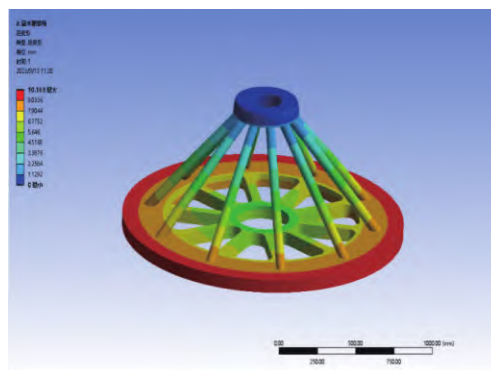


图5 工装有限元分析示意

经过有限元分析计算,工装上圆板受力较小,工装下圆板受力较大,若在下圆板受力最大位置放置工件,则其变形量会达到10.16mm,但工装是均匀变形,高温起吊过程中仍然能够对工件起到均匀支撑的作用,因此工件的外形设计合格。要使工装变形量减小,只需更换材料,将普通碳素钢更换成耐高温材料,或增大下圆盘厚度,这些都能改善工装在起吊过程中的变形问题,并延长工装的使用寿命。

在后续的使用过程中,逐渐对工装进行改进,在工装下圆盘上表面焊接相同尺寸的铁棒,在淬火时,让工件的底面能够接触到淬火冷却介质,并添加不同尺寸的楔铁作为调整工具,以延长工装的使用寿命。通过多次对工装进行改进,迭代后的工装,如图6所示。

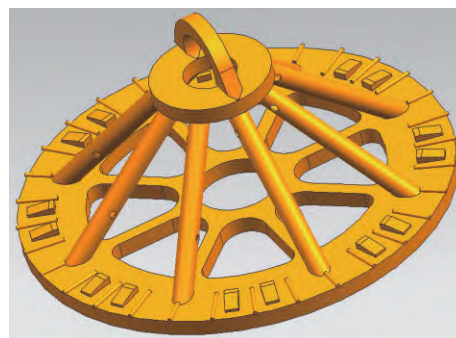


图6 改进后的工装示意

5 工件热处理

5.1 生产操作

首先进行来件检测,检查工件表面是否有裂纹

等明显缺陷，检查是否存在尖角。

将工件放置在专用工装上，注意工件需平稳放置，工件底面需全接触工装，无接触部分采用楔铁垫平。工件和工装一起进炉加热，工装在炉内也需放置平稳。起吊时需平稳升起，快速进入油槽淬火，注意冷却时间，终冷温度控制在50~80℃，淬火后需进行硬度检测，为回火温度的选择提供数据，淬火完成后应及时回火。

5.2 检测结果

采用此工艺和工装，调质完成6件工件，依次对其进行硬度和翘曲变形检测，并对同炉试样采用光学显微镜进行金相分析，检测位置示意如图7所示。硬度检测淬火硬度和回火硬度，检测设备使用便携式硬度计，检测点位为圆周方向90°，间隔检测小端A面和大端B面共4点；变形检测工件小端A面、大端B面及内锥面C面，每面检测8个点位，沿圆周方向均匀分布。金相组织如图8所示，硬度和翘曲变形检测数据统计分别见表2和表3。

由表2可知，A面淬火和回火后硬度普遍高于B面，且回火后所有工件硬度均控制在35~38HRC，满足工件33~38HRC的要求。

由表3可知，3#工件B面的第5点变形量最大，达到3mm，在要求的3.28mm范围内。

从图8可看出，经900℃淬火和500~520℃回火后的金相检测组织为均匀的回火索氏体。

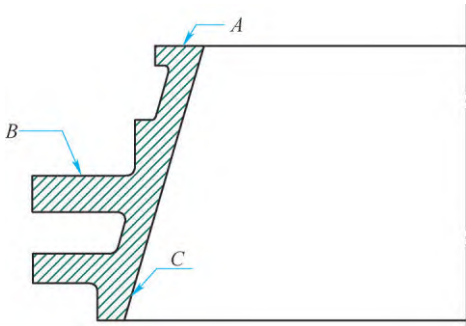
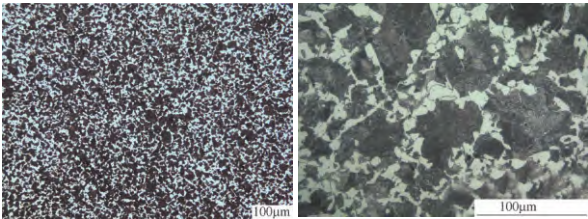


图7 检测位置示意



a) 100× b) 500×

图8 30CrMnSiA钢经900℃淬火和500~520℃回火后的金相组织

表2 硬度检测数据统计 (HRC)

工件 编号	检测点				检测点			
	A ₁	B ₁	A ₂	B ₂	A ₁	B ₁	A ₂	B ₂
1#	45.2	43.6	45.8	44.1	36.8	35.7	37.6	36.1
2#	45.5	44.3	45.7	44.2	37.2	36.5	37.1	36.3
3#	46.2	45.4	45.6	45.3	38.0	37.3	37.4	37.2
4#	44.8	45.6	45.8	43.6	36.8	37.5	37.8	35.4
5#	45.2	44.6	44.1	44.3	37.1	36.7	36.3	36.4
6#	45.5	43.9	45.6	45.6	37.3	35.7	37.5	37.1

表3 翘曲变形检测数据统计 (mm)

工件 编号	检测 面	检测点							
		1	2	3	4	5	6	7	8
1#	A	1.2	1.7	1	0.3	1.3	2	0.8	0.6
	B	0.2	1	1	1.7	1.6	0	2	2.7
	C	1.5	1	1.2	1.1	-0.3	0	1	1.2
2#	A	1.1	1.6	1.2	0.3	1.2	1.1	0.5	1.1
	B	1.2	1.8	1.2	0.3	1.8	1.8	0.4	0.1
	C	1.4	1.9	1.3	-0.1	1.7	1.5	-0.2	0
3#	A	1.3	1.5	0.3	1.3	1.5	0.4	0.1	1.6
	B	1.3	1.8	1.5	2	3	0.4	1.6	0.1
	C	1.4	1	1.3	1.5	0.7	-1.4	0.2	0.5
4#	A	0.2	1.3	1.8	1.9	1	1.6	0.7	2
	B	1.9	2.1	0.3	0.8	1.5	0.7	2.3	1.6
	C	0.3	0.8	-0.1	0.3	0.8	1.1	1.3	1.1
5#	A	1.5	1.8	0.9	1.2	2	1.6	0.7	1.4
	B	0.8	1.2	2.2	1.6	1.7	0.4	1.8	1.5
	C	1.1	1.6	1.5	0.4	0.7	1.3	0.6	0.5
6#	A	2.1	1.5	1.8	1.3	2.2	0.8	1.3	1
	B	1.5	0.6	1.3	1.1	1.6	1.3	0.9	0.4
	C	1.5	1.2	0.8	0.9	-0.2	1.4	1.5	0.5

6 结束语

- 1) 大型环形锻件在热处理过程中极容易变形，且有效壁厚越薄，变形量越大。淬火时采用阶梯式升温的方法可有效减小热应力。
- 2) 装炉方式对工件的变形量有较大影响，因此装炉时应注意工件或工装是否能够全面接触热处理炉支撑平台，保证加热时受力均匀。
- 3) 工件在淬火起吊时需平稳，保证起吊过程受力均匀，淬火时控制好油淬时间，掌握终冷温度，淬火后还需检测淬火硬度，且淬火后尽快开始回火。

(下转第110页)

起皮的附着物主要含Al、O、C及Si等元素，其中Al元素含量最高，对发动机涡轮转子前零件进行检查，发现第3~7级压气机工作环内侧等离子喷涂的封严涂层均存在不同程度的磨损，呈现凹槽状。封严涂层的主要成分为Al、BN，见表9。

表9 工作环封严涂层化学成分（质量分数）（%）

涂层	Al	BN	SiO ₂
封严涂层	余量	18.0~23.0	4.0~8.0

综上所述，某型航空发动机高压涡轮工作叶片附着物形成原因：发动机压气机叶片工作过程中与工作环涂层碰磨形成封严涂层粉末，主要成分为Al，随气流至燃烧室，在高温中形成氧化物，在燃气冲刷高压涡轮工作叶片时附着在叶片表面，形成灰黑色附着物。

2.6 故障跟踪情况

根据附着物形成原因，通过增加涂层厚度检测要求，在制备工作环封严涂层时控制其厚度，控制工作环与压气机叶片的装配间隙等措施，避免封严涂层异常磨损。跟踪后续发动机试车分解情况，高压涡轮工作叶片未出现类似附着物。

3 结束语

1) 某型发动机高压涡轮工作叶片叶盆表面灰黑色起皮为外来附着物，首先主要含Al、O、C及Si等元素，其中Al元素含量最高，是NiCrAlY + AlNiY涂层最外层Al元素含量的两倍，其次是O、C氧化腐蚀元素，Ni含量较低，附着物具有氧化物特征。

2) 附着物未脱落区域具有Al、O含量高以及Ni含量低特征，脱落位置Al含量略有下降，Ni含量升高，但仍然与涂层元素含量不相符。结合涂层金相照片可以判定，NiCrAlY + AlNiY涂层未被破坏，叶盆附着物区与附着物脱落区涂层厚度符合规定要求。

3) 发动机分解后发现第3~7级压气机工作环内侧等离子喷涂的封严涂层被磨损，该封严涂层主要成分为Al，磨损脱落的涂层经过高温氧化后附着在叶片叶盆上，形成灰黑色附着物，不是叶片涂层脱落导致的。

参考文献：

[1] 赵明，邓明，刘长福. 航空发动机结构分析[M]. 西

安：西安工业大学出版社，2016.

- [2] 潘钢，王轶，古文学，等. 发动机涡轮叶片真空电弧镀Al-Si-Y涂层性能[J]. 金属热处理，2007，32（8）：12-14.
- [3] 王心悦，辛丽，韦华，等. 高温防护涂层研究进展[J]. 腐蚀科学与防护技术，2013，25（3）：175-183.
- [4] 运广涛，李其连，程旭东. MCrAlY涂层在航空发动机热端部件上的应用[J]. 热喷涂技术，2015，7（2）：6-11.
- [5] 郭洪波，官声凯，徐慧彬. 先进航空发动机热障涂层技术研究进展[J]. 中国材料进展，2009，28（Z2）：18-26.
- [6] 彭小敏，夏长清，吴安如，等. 真空热处理对NiCrAlY涂层组织与性能的影响[J]. 中国有色金属学报，2013，23（11）：3147-3153.
- [7] 王冰，官骏，黄美东，等. 合金元素再MCrAlY涂层中的行为[J]. 材料保护，2001，34（4）：7-9.
- [8] 彭新，姜肃猛，段绪海，等. (MCrAlY + AlNiY)复合涂层的高温氧化行为[J]. 金属学报，2009，45（4）：379-384.

(收稿日期：20250423)

(上接第104页)

参考文献：

- [1] 耿学明，黎定旺. 大型锻件的调质热处理实践[J]. 金属加工（热加工），2010（5）：40-41，45.
- [2] 李晓宏，杨迪，黄守己. 大型环类锻件调质处理[J]. 大型铸锻件，2018（2）：26-27，35.
- [3] 沈黄富. 关于大型锻件调质热工艺的探讨[J]. 金属热处理，1982（8）：27-33.
- [4] 齐加胜. 淬回火对30CrMnSiA高强度钢组织与力学性能的影响[J]. 热加工工艺，2022，51（24）：125-128.
- [5] 吴子恺，陈伟，周海铭，等. 回火温度对30CrMnSiA钢力学性能的影响[J]. 金属热处理，2019，44（4）：163-167.

(收稿日期：20241230)