

GCr15钢活塞件真空热处理工艺优化

徒玉龙¹, 王玲玲²

1. 中国航空工业集团公司金城南京机电液压工程研究中心 江苏南京 211106

2. 中国航发贵州红林航空动力控制科技有限公司 贵州贵阳 641404

摘要: 某型号随动活塞材料为GCr15钢, 零件最厚处约20mm, 经真空油淬后, 在硬度检测时出现软点等缺陷。为此对原始组织、加热时表面状态、淬火冷却介质冷却能力及操作过程等可能导致淬火后出现软点问题进行逐一分析, 最终确认淬火后出现软点的主要原因是工艺方法欠佳而导致的, 如: 装炉方式不当、真空淬火时油表面压力较小等。改进工艺后, 盲孔朝上装炉、淬火油表面压力调整至1kPa以上, 则活塞件重新淬火后表面硬度的均匀性分布较好。

关键词: GCr15钢; 软点; 真空淬火油; 油面压强; 装炉方式

Process optimization for vacuum heat treatment of GCr15 steel piston

TU Yulong¹, WANG Lingling²

1. Nanjing Jincheng AVIC Engineering Institute of Aircraft Systems, Nanjing 211106, Jiangsu, China

2. AVIC Guizhou Honglin Aviation Power Control Technology Co., Ltd., Guiyang 641404, Guizhou, China

Abstract: The following piston material of some models is GCr15 steel, the thickest part of the part next to 20mm. The soft point appears in the hardness test after vacuum oil quenching. Therefore, the original tissue, the surface state during heating, the cooling capacity of the quenching medium and the operation process may lead to the soft points after the quenching are analyzed one by one. The main reasons for the soft points after the quenching are inappropriate methods, such as improper furnace loading method, and insufficient oil surface pressure during vacuum quenching, etc. After the improved process, the surface pressure of the blind hole confronts the furnace and the quenching oil is adjusted to above 1kPa, and the surface hardness of the piston is distributed uniform after re-quenching.

Keywords: GCr15 steel; soft point; vacuum oil quenching; oil surface pressure; furnace loading mode

1 序言

GCr15是一种合金含量较少、具有良好综合性能, 以及应用最广泛的高碳轴承钢。该钢经淬火+回火后具有高而均匀的硬度、良好的耐磨性、高的接触疲劳性能^[1]。GCr15轴承钢的硬度与疲劳强度、

耐磨性、弹性极限有着密切的关系, 直接影响使用寿命^[2]。GCr15钢受尺寸因素的影响, 其淬透性有一定的限制。导致出现局部软点问题, 本文结合活塞件产生软点的原因进行分析、验证, 以期获得正确的工艺规范。

第一作者: 徒玉龙, 工程师, 主要从事金属热处理技术工作, E-mail: tuyulong88899@163.com。

2 活塞件的技术要求及生产工艺

(1) 活塞件技术要求 材料为GCr15钢，规格尺寸如图1所示。要求淬火后硬度为60~64HRC。

(2) 生产工艺 每炉装活塞件120件，使用双室真空油淬炉（有效加热区400mm×400mm×600mm）。原工艺要求为：真空淬火（850℃保温80min后油冷）→冷处理（-80℃保温150min后空冷）→回火（180℃保温150min后空冷）。按此工艺生产的零件，经洛氏硬度计检测发现活塞件局部存在软点，无法达到技术要求。

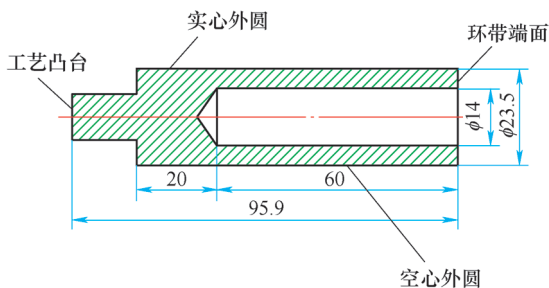


图1 随动活塞件规格尺寸

对同一批次活塞件全部采用同一洛氏硬度计（载荷1470N）进行硬度检测，其中11个活塞件硬度不均匀（用线切割制样），检测结果见表1。

表1 随机抽取同一批次活塞零件硬度检测情况（HRC）

序号	硬度			
	工艺凸台端面	空心外圆	实心外圆	环带端面
1	49.1	18.2	12.5	17.6
2	41.5	16.1	8.6	15.6
3	60.2	58.4	60.7	60.4
4	54.6	24.8	14.1	21.6
5	51.7	21.5	15.5	30.4
6	58.8	39.9	44.8	57.7
7	39.9	13.8	7.3	14.5
8	61.5	59.7	60.0	61.7
9	60.6	51.3	56.7	60.2
10	58.4	33.3	9.4	35.1
11	48.0	13.2	15.1	12.4

表2 不同软点区域显微维氏硬度阶梯硬度值

离表面距离/mm	0	0.05	0.10	0.15	0.20	0.25	0.30	0.35	0.40	0.45	0.50	0.55	0.60	0.65
局部软点硬度HV0.5	612	645	697	706	722	702	667	666	732	660	610	634	646	613
同一截面处异常硬度点HV0.5	323	322	330	303	298	307	308	299	290	301	300	319	289	279

从表1可看出，活塞件工艺凸台端面、空心外圆横截面、实心外圆横截面及环带端面位置的硬度均未达到技术要求。

活塞件最厚处尺寸约20mm，查阅热处理手册，GCr15钢采用油淬透临界直径约为15mm^[3]。理论上该随动活塞件采用真空油淬存在局部软点的“可能”，但实践中通过控制活塞件装炉间隔、增加油搅拌力度等手段可以达到技术要求。

3 原因分析

热处理后的软点，会显著降低零件的使用寿命。产生软点的主要原因是：原始组织不均匀、零件表面局部脱碳、淬火冷却介质冷却能力不足和操作不当等^[4]。因此，对产生软点进行检测、分析。

3.1 原始组织要求

GCr15钢必须进行球化退火^[5]。按GB/T 18254—2016《高碳铬轴承钢》执行，在直径≤60mm的轴承钢材料球化级别中，一般控制在2~4级，其中2级为特级，3级为高级，4级为一般组织，1级和5级为不合格组织^[6]。原材料按GJB 6848—2009《舰炮火控设备设计定型试验规程》要求的军用高碳铬轴承钢规范材料供货状态要求执行。

3.2 表面质量要求

加热时零件表面有氧化皮、锈蚀等，会造成表面局部脱碳^[7]，局部脱碳位置在硬度检测时会出现软点。采用真空淬火工艺可以达到对金属材料表面进行真空脱气、真空脱脂、真空金属元素的蒸发（但真空度不能太高，否则会脱铬）、真空净化和真空保护作用。在一定真空度下，对GCr15钢而言，加热时的真空度在0.1~133Pa范围进行^[8]。

经真空油淬后零件表面光亮，无明显氧化色。为验证是否局部脱碳导致软点产生，选择软点及同一截面处异常硬度点区域取样后，进行表面显微维氏硬度检测，结果见表2。

从硬度阶梯结果来看，局部软点区域、同一截

面处异常硬度点处零件表面与中心硬度并无明显降低, 零件表面状态不佳导致淬火后软点形成的因素可以排除。

3.3 淬火冷却介质冷却能力测定

钢淬火时一般需采取快冷, 使其冷速大于临界冷却速度, 以避免过冷奥氏体发生分解^[4]。真空淬火油(KR328)取样后委托南京科润科技有限公司进行冷却性能检测, 淬火油冷却性能符合GJB 509B—2008《热处理工艺质量控制》中对快速光亮淬火油的相关要求。KR328真空淬火油达到馏程窄、饱和蒸气压低、抗氧化能力强、不易挥发、易抽真空、杂质与残碳少、酸值低、易清洗、油的损耗少及长寿命的特点, 得到广泛应用。冷却性能测量见表3。

表3 KR328冷却性能测量

温度/℃	时间/s	冷却速度/(℃/s)
600	6.0	92.1
500	7.2	60.4
400	10.0	17.5
300	22.3	5.5
200	45.9	2.7

由表3可知, 淬火油冷却性能不佳导致淬火后软点形成的因素可以排除。

3.4 操作过程

(1) 装炉方式 为保证零件质量, 应选择正确的冷却方法即选用合适的淬入方式, 以最小的阻力方向淬入油中, 对于盲孔类的工件应使腔口(孔)朝上淬入油中^[3]。

在生产过程中, 操作者为便捷装炉采用盲孔朝下的装炉方式, 在油冷过程中盲孔处局部位置形成的蒸汽膜无法迅速破裂, 阻碍冷却速度的正常进行, 这种冷却方式无法满足奥氏体连续冷却组织转变图(CCT曲线)临界冷速要求, 造成零件局部出现非马氏体组织, 导致GCr15钢活塞件淬火后软点的产生。

(2) 冷却过程

1) 油温的影响。根据真空淬火油的使用要求及HB/Z 191—1991《航空结构钢不锈钢真空热处理说明书》规定, 真空淬火油温度需控制在20~90℃。真空淬火油温度变化会改变淬火油的物理特性, 当

油温升高时, 淬火油黏度降低, 流动性增强, 蒸汽膜更容易破裂, 更早地进入核沸腾阶段, 有利于提高高温段冷却, 但是油温过高会导致温差减少, 从而降低低温段冷却强度^[9]。在实际生产过程中, 淬火温度一直控制在60℃, 因此淬火油温度的影响可以排除。

2) 油表面压力的影响。在真空环境下, 压力的变化会引起莱登弗罗斯特温度的变化^[10], 根据研究油面压力升高, 莱登弗罗斯特温度和沸点均升高, 加速高温阶段的冷却, 同时沸点升高也会导致更早进入对流换热阶段^[9]。对GCr15钢通过回充惰性气体的方式来达到, 即先充氮气再油冷、或先油冷后充氮气。工艺文件中未明确规定回充惰性气体量, 实际生产过程中, 淬火油面压强一般控制在 $5 \times 10^4 \text{Pa}$, 油面压力低是导致GCr15淬火后软点产生的主要原因。

对零件局部软点区域金相组织检查呈现回火马氏体、黑色屈氏体及少量碳化物(见图2), 零件组织与冷却过程中未超过临界冷却速度。

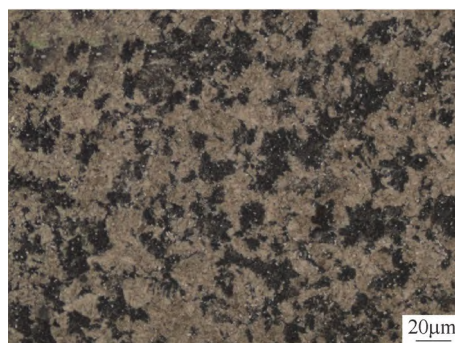


图2 局部软点的金相组织(50HRC左右区域)

综上所述, 装炉方式不对、油表面压力偏低是造成硬度偏低的原因, 从金相组织出现托氏体+碳化物, 并未发现回火马氏体组织, 托氏体产生原因是加热温度偏低, 致使局部区域合金化程度过低, 冷却时在该处即析出未淬硬的托氏体组织并呈团状分布, 如图3所示。

经核查设备运行状态及温度仪表记录, 设备温度监控正常, 未发现异常情况, 零件硬度出现异常应与零件空心外圆、实心外圆及端面位置局部区域在加热与保温过程中局部未达到奥氏体转变温度有关, 为确认设备真空滞后时间, 特对真空油淬炉进行加热滞后时间测定, 测定过程及结果如下。

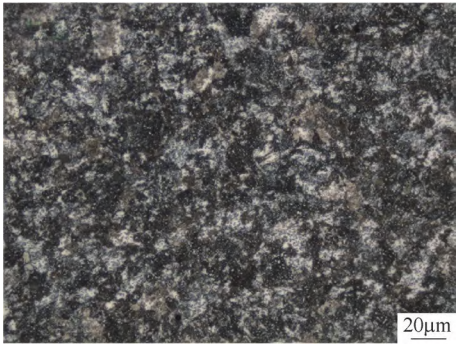


图3 与原材料硬度相近区域金相组织

在真空炉内进行负载块配重加热测试，选择具有代表性有效厚度的圆形试样开孔负载，直径选择

依次为 $\phi 10\text{mm}$ 、 $\phi 20\text{mm}$ 、 $\phi 35\text{mm}$ 、 $\phi 45\text{mm}$ 、 $\phi 55\text{mm}$ 、 $\phi 70\text{mm}$ 、 $\phi 80\text{mm}$ 和 $\phi 90\text{mm}$ ，见表4。

负载块按有效加热区均匀分布，满载装炉，热电偶布置与负载块试样中心位置测定加热滞后时间见表5。

从真空加热滞后时间测定结果来看，现行工艺保温时间应能实现零件透热，整体达到淬火温度。但实际真空油淬后出现局部软点与密集装炉方式不当有关，零件局部受遮蔽效应影响，保温结束后零件局部未达到完全奥氏体化温度。该批次GCr15钢活塞件真空油淬后出现50HRC局部软点现象应与淬火冷却方式有关。

表4 不同直径规格的试块 (mm)

试样直径	$\phi 10$	$\phi 25$	$\phi 35$	$\phi 45$	$\phi 55$	$\phi 70$	$\phi 80$	$\phi 90$
试样高度 L	30	60	80	100	120	150	170	190
热电偶检测深度 H	10~15	25~30	35~40	45~50	55~60	70~75	80~85	90~95

表5 负载块加热滞后时间

测试时间 / min	加热速率 / (°C/min)	真空度 / Pa	设定温度 / °C	试样尺寸/mm							
				$\phi 10$	$\phi 25$	$\phi 35$	$\phi 45$	$\phi 55$	$\phi 70$	$\phi 80$	$\phi 90$
				滞后时间/min							
90	10	0.13~13.3	550	30	30	35	38	42	45	52	60
			750	20	22	25	26	28	31	35	39
			900	14	15	17	17	19	21	23	25
			1050	9	10	11	12	13	15	17	19

4 工艺改进及验证

为了消除活塞件内孔 $\phi 14\text{mm} \times 60\text{mm}$ 钻孔时的应力，需要进行650℃不完全退火。数量控制在单炉100件，盲孔朝上摆放装炉，淬火时采用回充高纯氮至真空计显示10kPa进行淬火，淬火后硬度均匀，未发现软点。

对零件厚度最大位置解剖后，采用洛氏硬度计

进行检测，未发现软点。随机抽取2个零件实心外圆处取样进行显微维氏硬度检测，结果见表6。从表6可看出，零件硬度整体均匀，未发现明显硬度波动。

对零件厚度最大位置解剖后采用金相显微镜进行检测，零件组织均匀呈回火马氏体+碳化物，如图4所示。

表6 随机抽取2件零件实心外圆处显微维氏硬度阶梯硬度值

离表面距离/mm	0	0.05	0.10	0.15	0.20	0.25	0.30	0.35	0.40	0.45	0.50	0.55	0.60	0.65
零件1硬度HV0.5	860	879	826	857	823	821	862	859	843	815	816	797	820	820
零件2硬度HV0.5	842	845	818	815	827	847	823	817	859	829	823	829	823	798



a) 截面中心位置



b) 截面边缘位置

图4 改进工艺后零件热处理金相组织

5 结束语

生产实践证明,对于局部最大厚度 $\leq 20\text{mm}$ 的GCr15钢随动活塞零件,采取合理选择装炉量,保证装炉零件间隔,真空淬火时采用回充惰性气体,分压 $\geq 10\text{kPa}$,以及使盲孔(有盲孔时)朝上装炉等措施,则活塞件表面硬度的均匀性分布较好,效果明显。

参考文献:

- [1] 赵振业. 工程材料实用手册(第一卷)[M]. 北京: 中国标准出版社, 2002.
- [2] 王林梅. 提高轴承钢性能的热处理工艺研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2008.
- [3] 侯增寿, 樊东黎. 热处理手册[M]. 3版. 北京: 机械工业出版社, 2001.
- [4] 胡光立, 谢希文. 钢的热处理(原理和工艺)[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2010.
- [5] 尹德福, 汪开忠. 球化退火工艺对GCr15轴承钢组织和疲劳性能的影响[J]. 热处理, 2023, 38(1): 37-39.
- [6] 王锡樵, 邹磊, 陈坤. 轴承套圈的热处理[J]. 热处理, 2024(2): 7-14.
- [7] 吕永顺. 软点产生的原因和预防补救的办法[J]. 机械工人(热加工), 1998(6): 23.
- [8] 王锡樵. 轴承钢热处理应用技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2023.
- [9] 刘静, 李家栋, 王昭东, 等. 真空油淬过程中换热系数的测算[J]. 材料热处理学报, 2021(9): 159-164.
- [10] OREJON D, SEFINACE K, TAKATA Y. Effect of ambient pressure on Leidenfrost temperature[J]. Physical Review E, 2014, 90(5): 1-12.

MW 20240813

(上接第78页)

- [28] OSADA T, GU Y, NAGASHIMA N, et al. Optimum microstructure combination for maximizing tensile strength in a polycrystalline superalloy with a two-phase structure[J]. Acta Materialia, 2013, 61(5): 1820-1829.
- [29] WANG G L, LIU J L, LIU J D, et al. Temperature dependence of tensile behavior and deformation microstructure of a Re-containing Ni-base single crystal superalloy[J]. Materials & Design, 2017, 130: 131-139.

- [30] REED R C. Superalloys: Foundations and Applications[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2006.
- [31] WANG G L, SUN Y, WANG X, et al. Microstructure evolution and mechanical behavior of Ni-based single crystal superalloy joint brazed with mixed powder at elevated temperature[J]. Journal of Materials Science & Technology, 2017, 33(10): 1219-1226.

MW 20241101