

超大型船舶柴油机活塞杆表面硬化工艺试验（下）

大连船用柴油机厂（辽宁 116021） 杨德睿 宋奎元 王金来 左 静

二、试验结果及分析

使用不同的 5 组工艺参数，分别对 K98MC 机型活塞杆和 RTA84T 机型活塞杆的试片进行试验，然后分别对试片进行取样，针对金相组织、SEM、TEM、X 射线探伤等方式取得的结果进行分析。

1. K98MC 机型试验结果及讨论

K98MC 机型 1# 试样经表面淬火后回火，表层淬火组织为回火马氏体，过渡层为铁素体 + 贝氏体回火组织，心部是铁素体 + 珠光体（如表 5 所示）。

表 5 K98MC 机型第一组组织分析

位置	组织
表层	回火马氏体
过渡层	铁素体 + 贝氏体回火组织
心部	铁素体 + 珠光体

由 K98MC 机型硬度测试曲线（见图 6）可见，虽然距外表面 3.5mm 左右处的硬度在 300HV0.3 以上，大于 MBD 标准要求的 1.2~2.2mm 的要求，但是由于从表面到内部 0.5mm 处，硬度随着深度基本上呈直线下降，在 0.5mm 处已经降到 400HV0.3 以下，加工后表面硬度不能满足技术规范的要求。

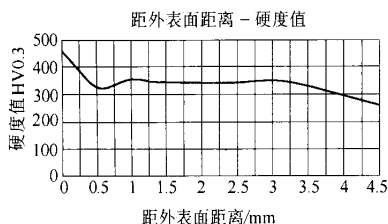


图 6 K98MC 机型第一组试片硬度测试曲线

综合硬度梯度曲线、金相组织报告和金相组织照片可以看出，以第一组工艺参数处理的试片在各方面都不能满足要求。

K98MC 第二组试样的表面淬火组织（见表 6）与第一组试样的表面淬火组织基本相同，表层均为回火马氏体组织，但是由硬度曲线（见图 7）上可以看出，从表面到内部 3mm 处，硬度过渡平缓，在 3mm 处硬度为 350HV0.3。

表 6 K98MC 机型第二组组织分析

位置	组织
表层	回火马氏体
过渡层	铁素体 + 贝氏体回火组织
心部	铁素体 + 珠光体

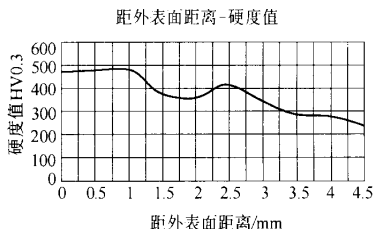


图 7 K98MC 第二组试样硬度梯度曲线

图 8 的三张照片展示的是第一组试片的显微组织，图 8a 与图 8c 的组织均为回火马氏体，只是放大的倍数不同。由图 8c 可以清晰地看出组织为板条状马氏体。由图 8b 可以看到在金属基体中析出的碳化物。

K98MC 另外三组试样经过分析得到的是回火索氏体组织。索氏体组织是珠光体的一种，是珠光体的片间距小到光镜难以分辨时，这种细片状珠光体被称为索氏体。在淬火 + 低温回火的过程中，是不应该得到这种组织的。经分析，确定这是由于在试片的切割过程中，由于进刀量过大、速度过快，引起了试片温度的升高，当试片的温度达到了 300℃ 以上，碳原子全部析出导致固溶强化效应消失而造成的。

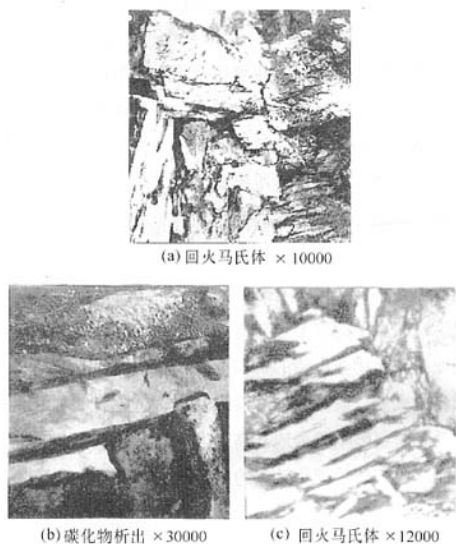


图 8

2. RTA84T 机型试验结果及讨论

RTA84T 机型第一组试样的表层淬火组织为回火马氏体，具体见表 7。由表层、过渡层和心部的组织可以看出基本上是符合规范要求的。

表 7 RTA84T 机型第一组组织分析

位置	组织
表层	回火马氏体
过渡层	铁素体 + 贝氏体回火组织
心部	铁素体 + 珠光体

由显微硬度曲线（见图 9）可以看出，从表面到内部 2.5mm 附近，硬度均在 400HV0.3 以上，并且曲线过渡平缓，能够满足 1.5mm + 磨量的要求。

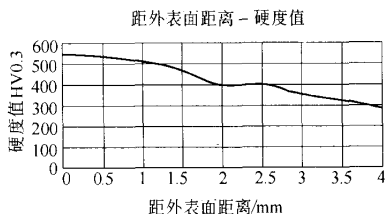


图 9 RTA84T 机型第一组试样硬度测试曲线

RTA84T 机型第二组试样经过金相分析，得到组织结构表层为回火索氏体，具体情况见表 8。硬度梯度曲线见图 10。

表 8 RTA84T 机型第二组组织分析

位置	组织
表层	回火索氏体
过渡层	铁素体 + 贝氏体回火组织
心部	铁素体 + 珠光体

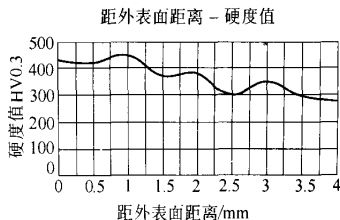


图 10 RTA84T 机型第二组试样硬度测试曲线

由图 11 可以看出，表层得到的马氏体的组织形式同时存在板条状和块状的马氏体。板条状马氏体，每一个板或条均为一单晶，相邻板条不呈孪晶关系，其间夹薄壳状残余奥氏体。残余奥氏体的碳含量较高，也很稳定。

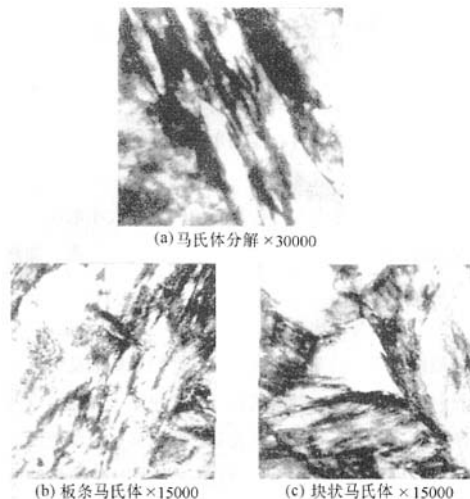


图 11

从试验结果和以上的分析比较可以看出，第一组的工艺参数最合理，并且各项指标均达到或者超过了 MBF 技术规范的要求。

3. 工艺因素分析

(1) 行走速度与转动速度 对于长轴类零件的表面淬火, 感应圈的行走速度与主轴的转动速度的配合是至关重要的影响因素。在功率允许的情况下, 可以适当提高行走速度, 以提高表面淬火的工作效率。转动速度不低于 30r/min, 行走速度不低于 80mm/min, 因为在这种情况下, 在活塞杆表面形成淬火螺旋形凸纹, 在突起的位置硬度较高, 在突起根部硬度较低。转动速度提高到 50r/min 以上, 行走速度在 100mm/min 以上配合淬火后, 形成的淬火螺旋形凸纹, 纹路密集, 没有明显的软点。

(2) 电因素的影响 当中频淬火的工件的尺寸确定之后, 相应的影响频率的电容和匝比确定以后, 工件在淬火过程中的频率也就确定了。由公式 $f = 1/2\pi(CL)^{1/2}$ 可以看出 (C 代表电容, L 代表线圈电感系数), 当电容和匝比确定之后, 频率相应也确定了。电容与匝比的调整, 可以决定电流与电压的输出, 以保证电压与电流的比值在 1:1~1:1.5 之间为宜。

(3) 冷却系统的影响 冷却循环系统是保证淬火质量的重要条件之一。为了保证冷却系统的稳定性和可靠性, 我们在冷却水箱内装上了热电阻, 与热电阻相连的是数字温度表, 可以直观地观察到水箱内水的温度。在进水管上安装了压力表, 可以确保出水的均匀和稳定。

针对超大型活塞杆的淬火要求, 我们选择水作为冷却液。表面淬火的零件在流动水中快速冷却时, 在冷却曲线上显示的蒸汽膜沸腾期、气泡沸腾期及对流换热诸阶段已不能完整地存在。冷却介质的冷速大小取决于水的流动速度及表面加热层的性质 (包括加热温度、加热层深度)。

(4) 淬火与回火控制 淬火加热温度应根据材料、原始组织和零件的要求来确定。根据船用柴油机活塞杆的材料, 我们做了大量的试验, 发现在淬火加热温度与力学性能之间存在着一定的关系。即在某一温度范围内淬火后淬硬层的强度有一个峰值。如果提高加热的温度, 随着奥氏体晶粒的细化, 塑性、强度均提高。经过反复的试验我们得出, 在 900~930℃ 之间是活塞杆的最佳感应淬火温度区间。

回火过程是一个相当复杂的重要的转变过程。淬火态及淬回火后的性能主要决定于马氏体及马氏体分解产

物的性能。但是残余奥氏体及其转变产物对性能的影响也不可忽视。马氏体硬度、强度高, 但塑性、韧性差。马氏体的高强度来自于相硬化强化、固溶强化和时效强化。回火时, 随回火温度的升高, α 基体的回复与再结晶的进行, 相硬化强化效应逐渐消失, 使硬度与强度不断下降, 塑性与韧性有所提高。

在试验过程中, 我们使用了多个不同的温度。回火温度 200℃ 时, 在马氏体中发生了亚稳碳化物的析出, 但 α 基体的 w_c 仍在 0.25%~0.3% 之间, 故经低温回火后, 碳原子的固溶强化仍是主要因素。碳化物的偏聚及亚稳碳化物在位错的析出都对位错起到钉扎作用, 故低温回火后, 硬度与强度极限基本保持不变, 而弹性极限及屈服极限则显著地升高, 当亚稳碳化物的析出量较多时, 由于时效硬化效应的增强, 所以硬度和强度有所提高。

回火温度超过 200℃ 后, 随回火温度的升高, θ 碳化物的析出, α' 中的碳含量不断下降。当回火温度达到 300℃ 时, 碳已经全部析出, 故碳原子的固溶强化效应也就消失。因 θ 碳化物的析出而产生的时效强化将处于主要强化因素, 但其强化效果不明显, 故此强度下降。由此我们得到了最佳的回火温度为 200℃。另外, 我们采用了不同的正火温度对活塞杆进行预处理, 结果发现除对表面感应淬火, 并没有特别明显的变化。

三、结语

(1) 感应圈的喷水孔必须严格校正, 以确保喷水孔喷出的水帘在同一曲面上, 喷水孔的数目并非越多越好, 以满足工件淬火冷却需要为宜, 可适当增设辅助冷却喷水圈。

(2) 对于频率的调整应根据工件的尺寸和需要达到的功率来确定。在满足频率要求的情况下, 电压与电流的比值要满足 1:1~1:1.5。

(3) 冷却系统的压力不宜过大, 要满足在 0.2~0.35 MPa 之间, 水温在 15~30℃ 之间, 这样就没有淬火微裂纹和弯曲变形的危险, 并且冷却效果最好。

(4) 对于超大型活塞杆的表面淬火的感应圈, 行进速度在 100~150mm/min、主轴转速 50~80r/min 为宜。但同时要考虑到设备的额定功率和操作的安全。

(20050928)