

船用低速发动机焊接结构件热处理工艺技术

高兰云, 刘英伟, 江宗昆

中船发动机有限公司 山东青岛 266520

摘要: 焊接变形主要是因为焊接热输入和焊接顺序不合理, 导致结构件焊后残余应力集中或分布不均匀而产生的。焊接应力的消除最常规的方法是将工件进行焊后整体热处理, 以最大限度地消除应力。介绍了船用发动机机座结构件的焊后热处理工艺, 同时对施工作业进行了规范说明。

关键词: 船用发动机; 机座; 焊后热处理

Heat treatment technology of welded structural parts of marine low speed engine

GAO Lanyun, LIU Yingwei, JIANG Zongkun

CSSC Engine Co., Ltd., Qingdao 266520, Shandong, China

Abstract: Welding deformation is mainly due to unreasonable welding heat input and welding sequence, resulting in residual stress concentration or uneven division of structural parts after welding. The most common method for eliminating welding stress is to perform overall heat treatment on the workpiece after welding to minimize stress. This paper introduces the post-welding heat treatment process of Marine engine frame structure, and provides a standardized explanation for construction operations.

Keywords: marine engine; bedplate; post-welding heat treatment

1 序言

随着我国造船业的飞速发展, 对大功率船用发动机的焊接制造提出了更高的要求。由于船用发动机为保证舰船正常运行提供动能, 并实现能量转化和分配, 因此它也被称为船舶的心脏。因其结构复杂、型号多样, 所以生产组织过程相对比较离散, 其相关技术一度被国外垄断。机座作为船用低速发动机的关键部件, 主要承受交变载荷、冲击载荷, 对焊缝的强度和韧性要求较高, 需具备较高的疲劳极限和抗冲击能力。为了满足这些性能要求, 需采用焊后热处理方法进行产品的性能优化^[1]。消除焊接应力最常规的方法是将工件放到热处理炉内加热到一定温度后进行保温和缓冷, 即进行焊后整体热

处理^[2], 使内应力高的地方产生塑性流动达到平衡分布, 以最大限度地降低或消除, 保证产品质量。

焊前预热和焊后热处理可最大限度地消除焊接应力、改善焊缝金相组织和消氢, 对降低尺寸变形, 改善母材和焊缝接头性能, 防止产生延迟裂纹等缺陷都具有积极的改善作用。因此, 进行大功率低速船用发动机机座焊后热处理的工艺研究具有非常重要的意义。

我公司生产的发动机机座由铸钢ZG200-400 (S17F) 和Q235B级船板两种材料焊接组成, 铸钢机架的厚度达到300mm以上, 单台机座的焊接毛坯重量达到130t以上, 焊接周期通常在30天左右,

焊缝填充量大，应力和变形难以控制。同时，为了防止两种材料焊接出现裂纹等缺陷，进行了反复的焊接工艺试验，包括焊前预热、刚性固定、焊接顺序、退火热处理等工艺方法的验证，确保了大型机座两种材料焊接的质量稳定性。ZG200-400 (S17F) 常见裂纹缺陷如图1所示。

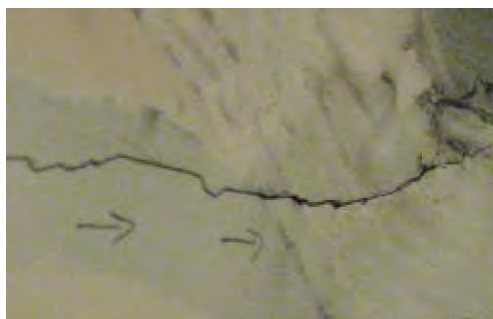


图1 ZG200-400 (S17F) 常见裂纹缺陷

2 船用低速发动机机座热处理工艺试验及应用

2.1 焊接工艺试验

采用GMAW和FCAW两种焊接方法，焊丝分别采用 $\phi 1.2\text{mm}$ 实心药芯焊丝。试件采用PA和PC两种位置焊接，预热温度 80°C 以上，焊缝层间温度控

制在 250°C 以内，焊接接头形式如图2所示，焊接顺序如图3所示，焊接参数及过程记录见表1。

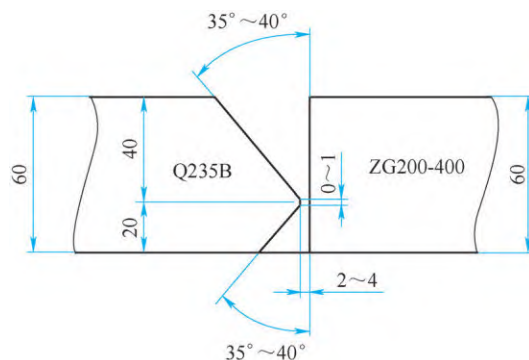


图2 焊接接头形式

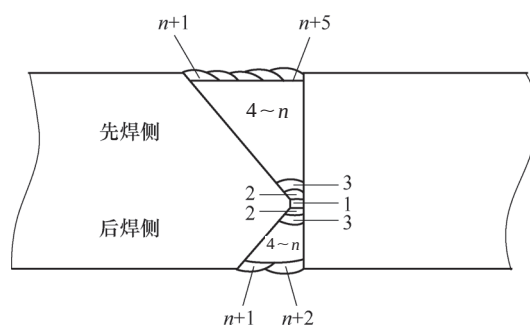


图3 焊接顺序

表1 焊接参数及过程记录

焊道号	焊接方法	位置	焊丝直径/mm	焊接电流/A	电弧电压/V	电流极性	送丝速度/(mm/min)	焊接速度/(mm/min)	最大热输入量/(kJ/mm)	焊道形态	道焊数量
1	GMAW 135	PC 横焊	1.2	130~150	18~26	DC+	3~4	120~170	1.9	线状	单道焊
2	FCAW 136	PC 横焊	1.2	200~240	24~32	DC+	9~10	200~300	2.3	线状或摆动	单道焊
3~n	FCAW 136	PC 横焊	1.2	260~300	26~35	DC+	12.5~13.50	250~400	2.5	线状或摆动	多道焊
n+1以上	FCAW 136	PC 横焊	1.2	200~240	24~32	DC+	9~10	250~400	1.8	线状或摆动	多道焊

2.2 性能试验

将2组试件分别进行UT、MT、VT无损检测合格后，按照计划进行了冲击、硬度和宏观检测。20℃冲击吸收能量最大平均值为240J，接头中热影响区冲击吸收能量最高，焊缝和热影响区冲击吸收能量比较接近，热影响区的冲击吸收能量稍高于焊缝。硬度检测（位置见图4）最大值为259HV10，宏观观察无裂纹等焊接缺陷，试样符合产品质量要求。检测结果见表2~表4，焊接接头宏观形貌如图5所示。

2.3 机座热处理

1) 检查工件是否完整，应无遗漏地装焊零件，确保无焊接缺陷、几何尺寸符合图样和建造标准的公差要求。

2) 机座距热处理台车底面垫高最小100mm，焊件底部使用等高的垫铁支撑垫平，消除焊件变形和倾斜等安全隐患。

3) 热处理过程中火焰不得直喷工件，整个过程保证炉温均匀。

4) 在热处理过程中，对产品的加热温度和曲线

表2 冲击性能检测结果 (J)

试样编号	缺口位置	- 20℃ 冲击吸收能量		
34-W2-1~3	焊缝表面	151	140	132
34-W15-1~3	焊缝根部	159	159	163
34-W15-1~3-0R	熔合线根部, 碳素钢侧	146	165	164
34-W15-1~3-0C	熔合线根部, 铸钢侧	193	216	214
34-H-1~3-0R	熔合线, 碳素钢侧	176	202	174
34-H-1~3-2R	熔合线+2mm, 碳素钢侧	233	245	242
34-H-1~3-5R	熔合线+5mm, 碳素钢侧	176	189	174
34-H-1~3-0C	熔合线, 铸钢侧	149	180	214
34-H-1~3-2C	熔合线+2mm, 铸钢侧	113	96	78
34-H-1~3-5C	熔合线+5mm, 铸钢侧	62	88	100

注：试验标准执行GB/T 2650—2008《焊接接头冲击试验方法》(ISO 9016: 2001《金属材料焊接的破坏性测试 撞击力测试 测试样品位置》)。冲击试样尺寸为55mm×10mm×10mm, 缺口深度为2mm。

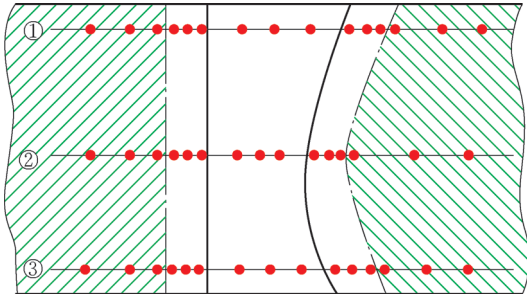


图4 接头硬度检测位置

表3 硬度检测结果 (HV10)

试样编号	位置	母材			热影响区			焊缝			热影响区			母材		
34-M1	①	183	170	171	197	227	228	234	202	243	180	183	182	153	150	152
	②	171	165	162	181	189	213	189	193	193	191	173	168	136	138	133
	③	176	164	173	161	207	204	244	233	245	213	197	180	149	147	148
34-M2	①	162	160	161	229	247	259	227	200	231	189	214	212	151	156	149
	②	165	159	165	194	189	206	203	203	207	183	175	165	142	142	143
	③	168	166	162	178	181	201	229	214	225	182	180	171	158	155	158

注：试验标准执行GB/T 4340.1—2009《金属材料 维氏硬度试验 第1部分：试验方法》(ISO 6507-1: 2005《金属材料 维氏硬度试验 第1部分：试验方法》)。

表4 宏观检测结果

试样编号	裂纹	气孔	夹渣	未熔合	未焊透	其他
34-M1	无	无	无	无	无	无
34-M2	无	无	无	无	无	无

注：试验标准执行GB 226—1991《钢的低倍组织及缺陷酸蚀检验法》(ISO 4969: 1980《钢产品用强无机酸的低倍检查》)。

进行监测, 机座的热电偶监测点如图6所示。

5) 机座热处理工艺曲线如图7所示。

升温：炉膛升温过程中热电偶显示升温速率≤100℃/h。

保温：产品加热温度达到(600±20)℃，间断点火控制工件温度，保温时间根据机型指定时间执行，见表5。



a) 34-M1试样



b) 34-M2试样

图5 焊接接头宏观形貌

降温：关闭各个烧嘴和燃气总阀，使产品在炉内冷却，炉冷至300℃出炉空冷。

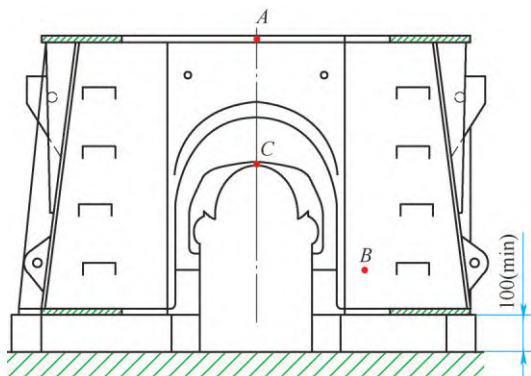
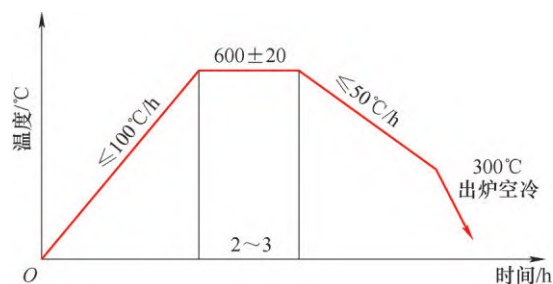


图6 机座的热电偶监测点

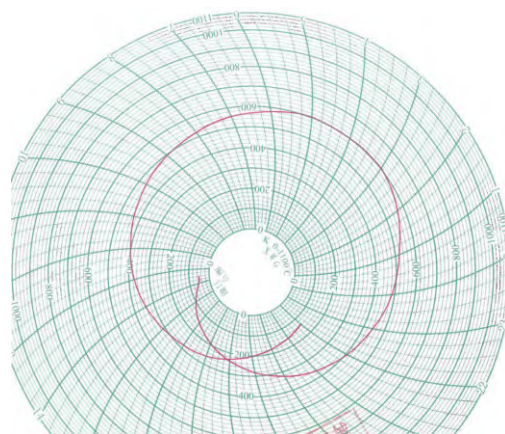
注：图中A、B点为机座顶板、耳板温度传感器位置，C点为机座中间体温度传感器位置。

表5 各型机座热处理保温时间

序号	机座型号	升温速度 / (℃/h)	保温温度 /℃	保温时间 (最短) /h	降温速度 / (℃/h)	最高出炉温度 /℃
1	S35	100	600±20	2	50	300
2	S40/G45	100	600±20	2.5	50	300
3	S50/G50	100	600±20	2.75	50	300
4	S60/G60	100	600±20	3	50	300
5	G70	100	600±20	3	50	300
6	G80	100	600±20	3	50	300



a) 热处理工艺曲线



b) 记录曲线

图7 热处理工艺及记录曲线

3 结束语

船用低速发动机机座毛坯选用焊后退火工艺，以达到消除残余应力和去氢的目的，焊后热处理对金属的抗拉强度、蠕变极限的影响与热处理的温度和保温时间有关，同时热处理过程中的加热和冷却也不宜过快，要使内部温度达到均衡。

参考文献：

- [1] 邹朝辉. 热处理工艺对ER316H熔敷金属力学性能影响的研究与分析[J]. 金属加工（热加工），2024（3）：101-101，106.
- [2] 王静鸽，银润邦，鲁进波，等. T91-奥氏体不锈钢异种钢接头热处理工艺研究[J]. 金属加工（热加工），2024（3）：91-96.

MW 20240425