

压水堆驱动机构钩爪激光与 GTAW 钴基合金堆焊层组织分析及性能表征

郭宝超^{1,2}, 蒋恩^{1,✉}, 陈亮^{3,4}

- 1 上海第一机床厂有限公司, 上海 201308
- 2 上海交通大学材料科学与工程学院, 上海 200240
- 3 核电安全监控技术与装备国家重点实验室, 深圳 518172
- 4 深圳中广核工程设计有限公司, 深圳 518172

控制棒驱动机构(Control rod drive mechanism, CRDM)是压水堆反应堆本体中唯一的能动设备,是集结构力学、电磁学、流体力学、传热学、自动控制等于一体的设备。钩爪部件形状复杂、结构精密,是压水堆(PWR)一回路的运动执行部件,其销轴孔与齿部钴基合金堆焊层组织与性能要求极高。本工作通过氩弧焊(GTAW)、激光焊(LBW)两种工艺试验,获得了满足设计要求的工艺参数。对两种工艺获得的钴基合金堆焊层进行了组织表征与分析,比较了两种工艺熔敷层的宏观与微观形貌差异,对熔敷层显微硬度进行了测试与对比分析,对熔敷层界面处的Co、Cr、Fe等元素进行了线扫描,通过Fe元素的分布分析了两种不同熔敷层稀释率与硬度差异的关系。两种堆焊层均未观察到微裂纹、夹杂、气孔、未熔合等缺陷,激光熔敷钴基堆焊层晶粒最细,因细晶强化作用,其显微硬度也最高。

关键词 驱动机构 钩爪 钴基合金 氩弧焊 激光焊 枝晶 显微硬度 稀释率

中图分类号: TG455 文献标识码: A

Microstructure Analysis and Property Characterization of Laser and GTAW Co-base Alloy Cladding Layer of PWR CRDM Latch Arms

GUO Baochao^{1,2}, JIANG En^{1,✉}, CHEN Liang^{3,4}

- 1 Shanghai No.1 Machine Tool Works Co., Ltd., Shanghai 201308
- 2 School of Materials Science and Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240
- 3 State Key Laboratory of Nuclear Safety Monitoring Technology and Equipment, Shenzhen 518172
- 4 China Nuclear Power Engineering Co., Ltd., Shenzhen 518172

The control rod drive mechanism (CRDM) is only active component in reactor system, involving structural mechanics, electromagnetics, fluid mechanics, heat transfer, and automatic control. The shape of the latch arms is complex and precise, the latch arms is the motion actuator in primary circuit of the pressurized water reactor (PWR), the cladding layer of pin hole and the ministry of latch arms tooth is welded by the cobalt alloy, so the microstructure and properties of the cladding layer have a great influence on the CRDM. In order to get the appropriate process parameters that meet the design requirements, we carried out the GTA welding and laser welding process test. In addition, we carried out the microstructure characterization and analysis of the cladding layer that welded by the cobalt alloy. We also have compared with the macro and micro morphology of the cladding layer that welded by GTA welding and laser welding, and tested the micro hardness of the cladding layer. The element Co, Cr, Fe of the cladding layer have been tested by the line scanning. The hardness of the two different cladding layer is relation to the dilution rate through the analysis distribution of element Fe. No microscopic cracks, the inclusion, air hole, fusion and other defects were observed in two different cladding layer. Because of the fine grain strengthening, the grain is the most fine in the cladding layer of laser welding. The micro hardness is also the highest in the cladding layer of laser welding.

Key words control rod drive mechanism, latch arms, Co-base alloy, GTA welding, laser beam welding, dendrite, microhardness, dilution rate

0 引言

控制棒驱动机构(CRDM)作为反应堆本体唯一的能动设备,担负着反应堆启动、功率调节和安全停堆等重要功能,同时也是反应堆一回路压力边界的一部分。其中钩爪部件是CRDM设备运动执行部件。每套CRDM含六件钩爪,每三件为一组,上部三件组成提升钩爪,下部三件组成保持钩爪(见图1)。销轴与钩爪销轴孔组成第一个耐磨界面,驱动杆与钩爪齿部组成第二个耐磨界面。因长期在高温、高压环境中经历与销轴、驱动杆的冲击与摩擦磨损,所以对钩爪钴基合金堆焊层组织、致密度、硬度等性能要求极高。

钴-铬合金是以钴元素为基体的合金,一般称为钴基合金^[1]。相对于铁基、镍基合金堆焊,钴基合金在650℃左右具有较高的强度、硬度以及较好的耐磨性^[2]。钴基合金常用于高温状态下工作的零件表面。我国目前投入

运行或在建的核电站绝大多数为压水堆核电站,特别是近年来,CAP1400、华龙一号等中国三代核电技术成为国家核电建设的重点^[3]。控制棒驱动机构的钩爪部件作为压水堆一回路的运动执行部件,其形状复杂精密,销轴孔与齿部钴基合金堆焊层组织与性能要求极高;同时在反应堆压力容器内服役温度高,约为400℃^[4]。高温水在一定的压力下在其中循环,带来剧烈的振动,组件间不断摩擦,这对组件间连接部分的强度和耐磨性提出更高的要求。因此,钴基合金在高温环境中高强度、高耐磨性的特点对保证核电站的安全运行起着非常重要的作用^[5]。随着焊接技术的发展,特别是激光焊等先进焊接技术的应用^[6],为钩爪钴基堆焊提供了更多的可能。本工作通过氩弧焊、激光熔敷两种工艺试验,获得满足设计要求的工艺参数,并对这两种工艺获得的钴基合金堆焊层进行了组织表征与分析。

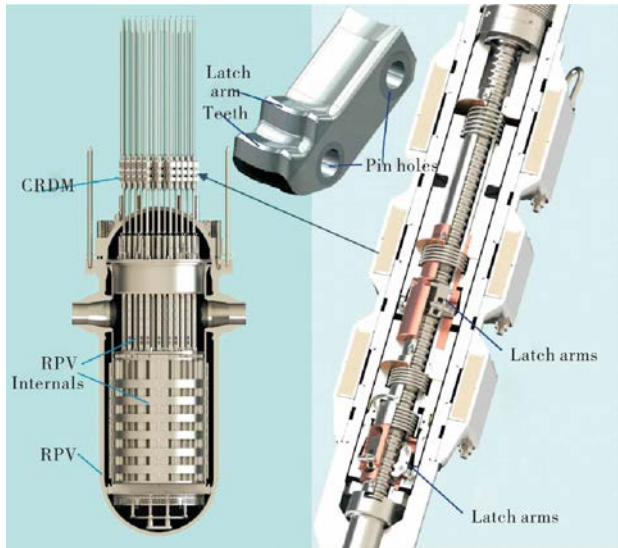


图1 典型压水堆控制棒驱动机构钩爪及位置分布
Fig.1 Position of latch arm in typical PWR CRDM

1 实验

1.1 基体材料

本试验中所用基体材料 00Cr18Ni10N 是一种超低碳控氮奥氏体不锈钢,化学成分: C ≤ 0.030%、Si ≤ 1.00%、Mn ≤ 2.00%、S ≤ 0.030%、P ≤ 0.035%、Cr 17.00%~19.00%、Ni 8.50%~11.50%、N 0.12%~0.22%。传统奥氏体不锈钢通常面临着晶间腐蚀的问题^[7],它是在一定温度区间内,奥氏体不锈钢会沿晶界析出 Cr_xC₆ 碳化物,进而引起晶界周围贫铬所致^[8]。00Cr18Ni10N 作为超低碳奥氏体不锈钢,抗晶间腐蚀性相较传统奥氏体不锈钢要好,且具有较好的力学性能和加工性能(抗拉强度 550 MPa、屈服强度 245 MPa、延伸率 40%),故广泛应用于各个领域。

1.2 粉末材料

本次试验所使用的合金粉末是由 Kennametal 公司生产的 Stellite6 合金粉末^[9],化学成分: C 1.1%~1.6%、Cr 26.0%~32.0%、W 3.0%~6.0%、Ni ≤ 3.0%、Mo ≤ 1.0%、Mn ≤ 1.0%、Si ≤ 2.0%、Fe ≤ 3.0%、Co 余量。其特点是含碳量较高,因此熔覆层的硬度一般较高,具有良好的耐磨粒磨损性能^[10]及抗高温耐腐蚀性能,抗拉强度为 891 MPa、屈服强度为 543 MPa、延伸率为 1%、弹性模量为 207 GPa。粉末形貌如图 2 所示。

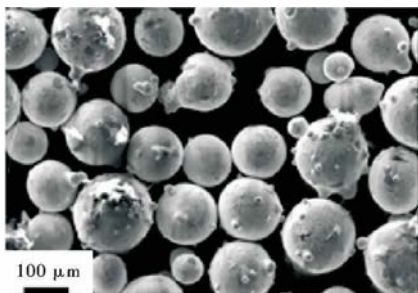


图2 Stellite6 合金粉末形貌图
Fig.2 Morphology image of Stellite6 alloy powder

1.3 试验工艺

试验使用激光焊/氩弧焊两种工艺对 CRDM 钩爪表面进行熔覆,以比较不同工艺方法对涂层组织及性能的影响。

激光焊工艺,即激光熔覆技术^[11],是指以不同的涂料方式在被涂覆基体表面上放置选择的涂层材料,经激光辐射使其与表面薄层同时熔化,并快速凝固后形成稀释度极低、与基体材料形成冶金结合的表面涂层,从而显著改善基体材料表面的耐磨、耐蚀、耐热、抗氧化及电气特性等的工艺方法^[12]。它易实现选区熔覆,且有热变形小、熔覆层成分及稀释率可控等优点;但也存在设备昂贵、投资较高,熔覆前的准备工作量大,工艺条件复杂,对工件和工艺要求高,不宜在施工现场操作,生产环境要求高等缺点^[13]。

氩弧焊工艺是以氩气作为保护气体的一种电弧堆焊方法,电弧发生在焊丝和基材之间,在电弧周围通以氩气,形成保护电弧和熔池的连续封闭的电流。氩弧热量集中,能量密度介于自由电弧和压缩弧之间,而且一般实行手工操作,灵活性高。采用氩弧熔覆制备的涂层在加热冷却过程中无氧化烧损现象,并能有效提高熔覆材料的表面硬度,改善材料表面耐磨性^[13]。但其缺点也明显,比如熔深较浅,焊接壁厚较厚的工件须采用多道焊接,从而增大了工件的变形,特别对于热裂纹有较强敏感性的金属焊接效率低。

1.4 熔敷层表征方法

1.4.1 显微组织与成分分析

采用 ZeISS 公司生产的 AxioCam MRc5 光学显微镜对熔覆层进行微观组织观察,其放大倍数为 25~1 000 倍。为了进一步观察涂层的显微组织,采用 VEGA 3-XMU (LaB6) 型扫描电子显微镜对其组织进行表征,并采用 EDS 能谱对成分进行分析。

试验需在金相显微镜下观察,故需对样品进行腐蚀,腐蚀液为 2 号卡林腐蚀剂(CuCl₂ 5 g, HCl 100 mL, 无水乙醇 100 mL)。

1.4.2 显微硬度测试

采用 Zwick/Roell ZHμ 维氏硬度计对熔覆层的显微硬度进行分析测试。测试前,样品使用 1500#砂纸打磨,以避免表面层(如氧化、污染)对测试可能造成的影响。

2 熔覆层微观组织结构及形态演变

2.1 熔覆层的宏观形貌及组织结构特征

熔覆层表面品质的优劣可以根据熔覆层表面形貌和稀释率两个方面来判断,也就是从宏观上观察熔覆层表面是否平整光滑、有无裂纹和气孔等缺陷,从微观上计算熔覆层稀释率的大小^[14]。

图 3 为不同工艺下得到的 Stellite6 熔覆层横截面形貌。由图 3 可以看出,在不同工艺下,熔覆层的表面成形良好,证明熔覆金属有较好的润湿性,二者表面均光滑平整,熔覆层内部没有发现气孔、裂纹等缺陷。

2.2 两种工艺条件下熔覆层的组织形态及演变

熔覆层组织是熔池在非平衡快速凝固过程中形成的,而

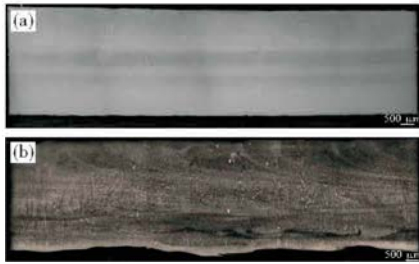


图3 Stellite6 熔覆层横截面形貌:(a)激光焊,(b)氩弧焊
Fig.3 Cross section morphology of Stellite6 cladding layer: (a) laser welding, (b) GTA welding

合金在凝固过程中会发生成分过冷现象,该现象与温度梯度(G)和凝固速度(R)有关,其中, $G \times R$ 决定了晶体的尺寸,而 G/R 则决定了晶体的生长形态。其中,从熔覆层底部和母材的结合处开始到熔覆层顶部为止, G/R 持续减小而成分过冷逐步增大,故一开始在结合处,由于 G/R 具有最大值,成分过冷程度最小,会形成平面晶,而在平面晶上方,因生长速率增大,温度梯度减小,成分过冷程度变大,固液界面失去稳定性,晶体呈胞状生长。同理,在熔覆层中部,成分过冷程度更大,晶体生长进一步转变为树枝状生长。而在熔覆层顶部,由于温度梯度小,且受表面空气对流影响,会形成等轴晶,晶粒相对而言细小无序。

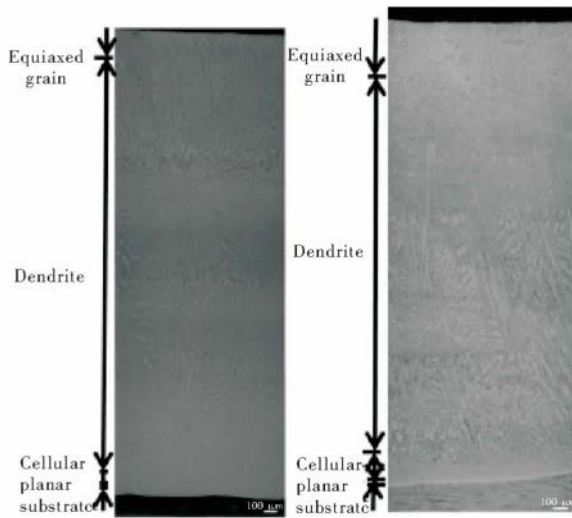


图4 熔覆层中枝晶生长状态:(a)激光焊,(b)氩弧焊
Fig.4 Dendrite growth state in cladding layer: (a) laser welding, (b) GTAW

图4为不同工艺下熔覆层中枝晶生长状态,基本可根据凝固原理分为四个部分:靠近母材的平面晶、平面晶上分布的细小的胞状晶区、熔覆层内面积最大的树枝晶区以及分布在熔覆层顶端的等轴晶区。虽在图4中也可以清楚地看到熔覆层搭接的痕迹,熔覆层交接处出现平面晶和细小的胞状晶,平面晶和胞状晶上长出树枝晶,但总体而言枝晶的生长状态符合四个部分划分。

图4显示,熔覆层与母材熔合良好,未观察到裂纹、气孔、固体夹杂、未熔合等问题,证明这两种工艺所得的熔覆层的品质都比较好。

图5为两种工艺下熔覆层的枝晶臂直径测量,激光焊、氩弧焊的枝晶臂直径测量值分别为 $15.28 \mu\text{m}$ 和 $20.09 \mu\text{m}$,

激光焊的枝晶臂直径明显比氩弧焊工艺要小。综合图5的分析可知,激光焊的冷却速度(R)要比氩弧焊工艺大,根据细晶强化原理,可简单判断激光焊的熔覆层力学性能应该比氩弧焊的熔覆层好。

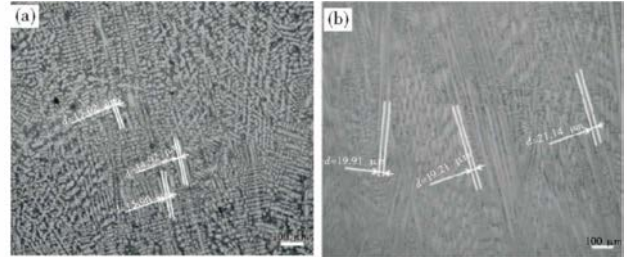


图5 熔覆层的枝晶臂直径测量:(a)激光焊,(b)氩弧焊
Fig.5 Measurement of dendrite arm diameter of cladding layer: (a) laser welding, (b) GTA welding

3 熔覆层力学性能表征

3.1 熔覆层显微硬度测试

图6为两种工艺下得到的熔覆层的硬度分布,其中激光焊熔覆层的硬度高于氩弧焊熔覆层。由于两种工艺下的熔覆层均是多层搭接制成,因此硬度发生波动应和搭接有关。此外,由图5可知,激光焊的枝晶臂直径明显小于氩弧焊工艺,因此具有一定的细晶强化作用,硬度高于氩弧焊工艺。

两种熔覆层所使用的母材相同,均为00Cr18Ni10N,但由图6可知,两种母材的硬度有细微的差异,经分析,母材来源于铸锭,而铸锭的成分往往不够均匀,所以母材硬度有所差异。而根据资料显示,00Cr18Ni10N的硬度高于220HV,故图6中两种熔覆层的母材部分的硬度是符合资料的。

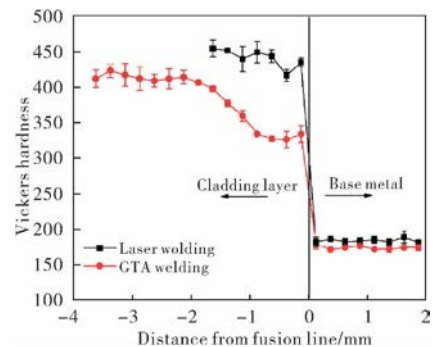


图6 激光焊与氩弧焊工艺堆焊层显微硬度分布
Fig.6 Microhardness distribution of cladding layer in laser welding and GTA welding process

3.2 熔覆层结合处稀释率表征与分析

图7为两种工艺下熔覆层线扫描成分图。由图7可知,激光焊和氩弧焊工艺所得的熔覆层中,Co是Stellite6焊材的基体成分,其分布均呈现出从熔合线向堆焊层陡升的趋势,这与不锈钢母材和钴基堆焊层中Co含量迥异相吻合。关键元素Cr在两种工艺堆焊层中分布类似,从熔合线向堆焊层呈现缓升趋势。熔合线处Fe的含量均为陡降趋势,激光焊堆焊层中Fe含量陡降至平段,而氩弧焊堆焊层中Fe含量陡降后又经历了1mm以上的缓降才进入平段。之后的熔敷层,Fe含量明显低于母材,证明二者熔覆层的稀释率均较低,这也和之前的图7组织分析相一致。因此可判断两种熔覆

层最终表面品质都比较好,但激光焊工艺能以更薄的堆焊层获得不受母材稀释影响的钴基合金使用表面。

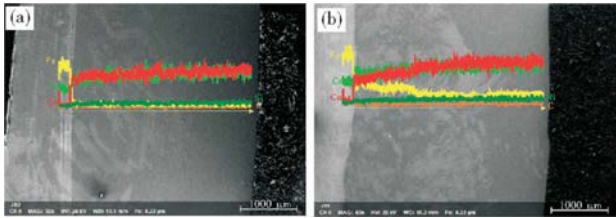


图7 激光焊与氩弧焊工艺熔覆层线扫描成分图:(a)激光焊,(b)氩弧焊
Fig.7 Linear scanning composition diagram of cladding layer in laser welding and argon arc welding process:(a) laser welding,(b) GTA welding

4 结论

(1)两种工艺的熔覆层表面品质都较好;激光焊和氩弧焊的熔覆层结合处界面较为平直,稀释率低。

(2)两种工艺的熔覆层的枝晶生长状态有靠近母材的平面晶、平面晶上分布的细小的胞状晶区、熔覆层内面积最大的树枝晶区以及分布在熔覆层顶端的等轴晶区;激光焊和氩弧焊的枝晶臂直径测量值分别为 $15.28\ \mu\text{m}$ 和 $20.09\ \mu\text{m}$,激光焊的枝晶臂直径小于氩弧焊工艺的;激光焊的熔覆层力学性能等方面比氩弧焊熔覆层的要好。



Baochao Guo, graduated at Shandong University in 2009, is currently an engineer and director of special process subsection of Shanghai No. 1 Machine Tool Works Co., Ltd. He has published more than 10 papers, applied 5 national invention patents and 2 of them were authorized. He participated 3 national science and technology great special projects and is in charge of RP-VI or CRDM welding technology of several nuclear power projects, such as AP1000, CAPI400, Hua Long I'

High Temperature Reactor. His research interests focus on high power beam welding process, welding deformation control, and additive manufacturing of main equipment of nuclear island.

郭宝超,上海第一机床厂有限公司,工程师,特殊工艺室主任,毕业于山东大学。发表十余篇论文,申请5项国家发明专利,其中2项已授权。参与3项国家科技重大专项,负责 AP1000、CAPI400、华龙一号、高温气冷堆等多个核电项目的堆内构件或驱动机构的焊接技术工作。主要从事核岛主设备高能束焊接、焊接变形与控制、增材制造等方面研究工作。

(3)两种工艺的熔覆层,激光焊的硬度高于氩弧焊;两种熔覆层均是多层搭接制成,硬度的波动与稀释率有关。

(4)激光焊和氩弧焊的熔覆层中 Fe 的含量低于母材,二者熔覆层的稀释率低,熔覆层表面品质都比较好。激光焊工艺能以更薄的堆焊层获得不受母材稀释影响的钴基合金使用表面。

参考文献

- 1 李友谊,罗阳,洪杰,等.焊接,2013(4),62.
- 2 周振丰,张文钺.焊接冶金与金属焊接性.机械工业出版社,1987.
- 3 郑红亮,李聪,顾兴国,等.动力工程学报,2015,35(4),336.
- 4 Mennon R. *Welding Journal*,1996,75(2),43.
- 5 郭火明,等.材料科学与工艺,2015(1),69.
- 6 张扬健,陈德胜.节能与环保,2017(1),52.
- 7 王立来,黄大鹏,吴洪.设备监理,2011(1),32.
- 8 周诗光.秦山一期 CRDM 关键部件失效机理及可靠性分析.硕士学位论文,上海交通大学,2008.
- 9 张艺,马志凯,等.热加工工艺,2015(14),40.
- 10 张松,等.激光熔覆钴基合金组织及其抗腐蚀性.中国激光,2001(9),860.
- 11 刘玉珍,桂业炜.机械工程材料,1992(5),1.
- 12 谢明.邵阳学院学报,2004(3),47.
- 13 马壮,李剑,等.热加工工艺,2012(10),162.
- 14 吴健.机械制造与自动化,2004(4),52.



En Jiang, a senior engineer and director of technology dept. of Shanghai No. 1 Machine Tool Works Co., Ltd., published more than 10 papers, applied more than 10 patents and 5 of them were authorized. He managed several national science and technology great special projects, participated manufacturing and technical work of almost all series of Chinese PWR (from 300 MW to 1 000 MW), EPR, HTR and so on, is in charge RVI and CRDM manufacturing technology of AP1000,

CAPI400 and Hua Long I, and design of several nuclear island mechanical equipment in demonstration project of 600 MW fast neutron reactor. His research interests focus on precision machining, welding, assembly and measuring of great components of main equipment of nuclear island.

蒋恩,上海第一机床厂有限公司,高级工程师,技术部部长。发表论文十余篇,申请专利十余项,其中授权5项。主持过多个国家科技重大专项技术工作。参与了从30万千瓦到100万千瓦我国几乎全系列压水堆、高温气冷堆等的制造与技术工作。现担任华龙一号、CAPI400、AP1000等多个第三代压水堆堆内构件和驱动机构的技术负责人及我国首台600MW快中子堆示范工程多个核岛机械设备设计负责人。主要从事核电设备精密加工、焊接、大型零部件精密装配与测量等领域技术研究。