抽蓄球阀密封环导向面铝青铜堆焊工艺研究

甘洪丰[1, 2]，杨年浩[3]，田井成[1, 2]，张奎良[1, 2]，乔宏来[1, 2]，段伟赞[1, 2]

1.哈尔滨电机厂有限责任公司　黑龙江哈尔滨　150040
2.水力发电设备国家重点实验室　黑龙江哈尔滨　150040
3.中国三峡建工（集团）有限公司　湖北武汉　430000

摘要：通过铝青铜堆焊件焊接保护气纯度分析、堆焊层与基材结合力测试、堆焊层横截面宏观检测及微观金相组织分析、堆焊层横截面熔合线SEM形貌观察及EDS成分分析，确定了抽蓄球阀密封环导向面铝青铜堆焊质量问题的要因并制定、验证了改善工艺措施。通过提高焊接保护气纯度极大地改善了铝青铜堆焊层加工后表面无损检测暴露出的点状缺陷问题；通过开发应用氦氩混合保护气的PJ-TIG等离子流高效钨极氩弧焊接专机堆焊过渡层＋脉冲MIG机器人盖面堆焊工艺的铝青铜堆焊层，加工后基本杜绝了堆焊层与基材分离脱壳的情况。以上措施的采用，明显改善了球阀密封环导向面铝青铜堆焊质量。另外，铜及铜合金的焊接对人体有害，通过脉冲MIG焊接机器人工作站、PJ-TIG等离子流高效钨极氩弧焊接专机的应用，可实现铝青铜自动化堆焊，取代手工操作，改善焊工劳动条件，降低职业病风险。

关键词：球阀；铝青铜堆焊层；PJ-TIG等离子流高效钨极氩弧焊；脉冲MIG；保护气体比例

Research on aluminum bronze surfacing welding process for sealing ring guide surface of pumped storage ball valve

GAN Hongfeng[1, 2], YANG Nianhao[3], TIAN Jingcheng[1, 2], ZHANG Kuiliang[1, 2],
QIAO Honglai[1, 2], DUAN Weizan[1, 2]

1. Harbin Electric Machinery Company Limited, Harbin 150040, Heilongjiang, China
2. State Key Laboratory of Hydropower Equipment, Harbin 150040, Heilongjiang, China
3. China Three Gorges Construction Engineering Corporation, Wuhan 430000, Hubei, China

Abstract: By analyzing the purity of welding protection gas for aluminum bronze overlay welding parts, testing the bonding force between the overlay layer and the substrate, conducting macroscopic and microscopic metallographic analysis of the cross-section of the overlay layer, observing the SEM morphology of the fusion line of the cross-section of the overlay layer, and analyzing the EDS composition, the main causes of the quality problem in aluminum bronze overlay welding of the sealing ring guide surface of the suction ball valve were determined, and improvement process measures were formulated and verified. By improving the purity of welding protection gas, the problem of point defects exposed during surface inspection of aluminum bronze overlay after processing has

基金项目：黑龙江省重点研发计划项目（No. 2022ZX04A01）；黑龙江省自然科学基金资助项目（No. YQ2021E007）。

第一作者：甘洪丰，大学本科，高级工程师，主要从事水力机械焊接工艺研究工作，E-mail：ganhongfeng2004@163.com。
通信作者：田井成，大学本科，正高级工程师，主要从事水力机械焊接工艺研究工作，E-mail：tjc@hec-china.com。

been greatly improved. By developing a PJ-TIG plasma flow high-efficiency tungsten inert gas arc welding special machine for the application of helium argon mixed protective gas, the aluminum bronze overlay welding layer with transition layer welding and pulse MIG robot cover welding process has been processed, which basically eliminates the separation of the overlay layer and the substrate, i.e. “delamination”. The adoption of the above measures has significantly improved the quality of aluminum bronze overlay welding on the sealing ring guide surface of ball valves. In addition, the welding of copper and copper alloys is harmful to the human body. Through the application of pulse MIG welding robot workstations and PJ-TIG plasma flow high-efficiency tungsten inert gas arc welding special machines, aluminum bronze automatic surfacing can be achieved, replacing manual operations, improving the working conditions of welders, and reducing the risk of occupational diseases.

Keywords: ball valve; aluminum bronze overlay welding layer; PJ-TIG plasma flow high-efficiency tungsten inert gas arc welding; pulse MIG; protective gas ratio

1 序言

如图1所示，一般在抽蓄机组引水管道系统末端设置有进水球阀，球阀密封环导向面通过熔敷铝青铜或不锈钢堆焊层（见图2）来获得抗磨及耐蚀等特定性能，一般以铝青铜堆焊结构居多，根据产品的性能需求，铝青铜堆焊层材质选用w_{Al}=8.5%～11%、w_{Fe}≤1.5%的铝青铜合金（AWS A5.7 ERCuAl-A2等同GB SCu6180）[1]，主要的合金元素为Al和Fe。铝青铜二元相图理论性分析如图3所示。由图3可知，铝青铜室温组织为一定比例的α相、马氏体β相及少量的高硬度γ_2相[2]，这种相的组成使堆焊层在有较高强度、硬度的同时，还能维持良好的伸长率。通过与上下游法兰形成摩擦副，实现密封抗压、摩擦磨损及耐蚀等设计使用功能。

铝青铜堆焊层室温组织决定了其强度、伸长率及硬度等性能，而相及组织组成物的最终构成与焊接材料、焊接工艺密不可分。通过工艺改善获得具有预期性能的高质量铝青铜堆焊合金组织是关键部件铝青铜堆焊生产应用的核心。

因铝青铜堆焊层与铁基母材热膨胀系数差异较大，且铝青铜堆焊层金属热导率高，所以在铁基母材上堆焊铝青铜易造成堆焊层截面熔合问题。同时，铝青铜堆焊层冷却速度快，易造成未熔合、气孔及夹渣等缺陷[3, 4]。铝青铜堆焊传统上多采用熔化极气体保护焊方法，由于堆焊方法的局限性及手工焊接受制于操作者技能水平，因此导致铝青铜堆

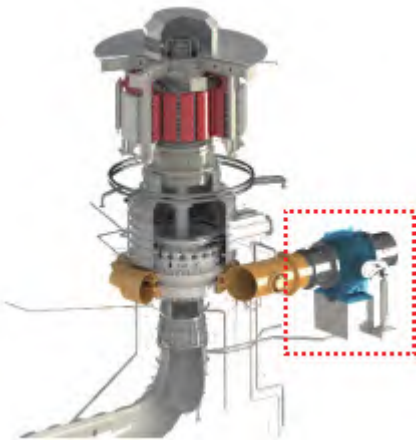


图1 抽蓄机组进水球阀安装位置

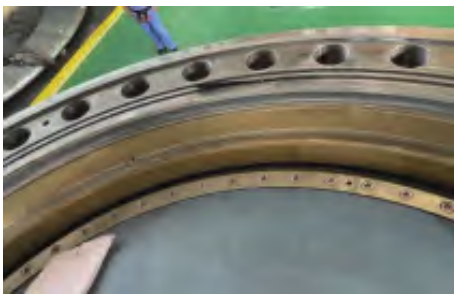


图2 球阀密封环导向面铝青铜堆焊层

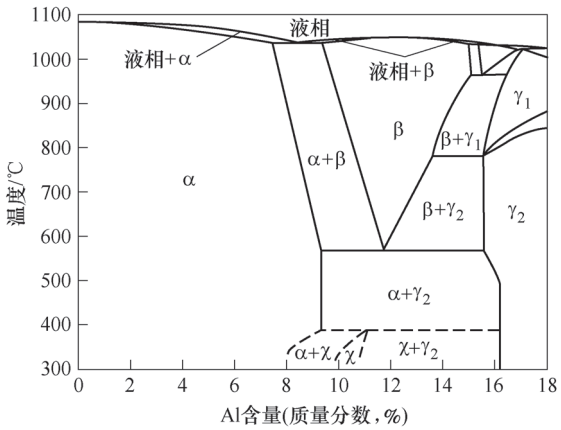


图3 铝青铜二元相图理论性分析

焊质量不稳定，实际生产中铝青铜堆焊层返修率较高。另外，铝青铜堆焊时会产生有毒气体，焊工因铝青铜焊接而发生的发烧、中毒事件频发，因此迫切需要高质量的铝青铜自动化堆焊工艺方法。

目前，国内针对铝青铜堆焊组织与性能、焊接工艺及焊接方法等方面的研究较多，但对于铝青铜在铁基母材上堆焊产生典型缺陷的研究却鲜有报道，而铝青铜堆焊典型缺陷的产生原因与改善措施研究对于铝青铜堆焊组织性能和构件服役可靠性具有重要意义，着手解决工程应用中遇到的铝青铜堆焊质量问题迫在眉睫。

如图4所示，铝青铜堆焊常见的缺陷主要有堆焊层加工后表面无损检测发现的点状及线性缺陷、UT检测或肉眼可见的堆焊层与基材分离脱壳，铝青铜堆焊层内部缺陷在部件运行中可能产生扩展、连通最终导致堆焊组织功能失效，造成质量损失。

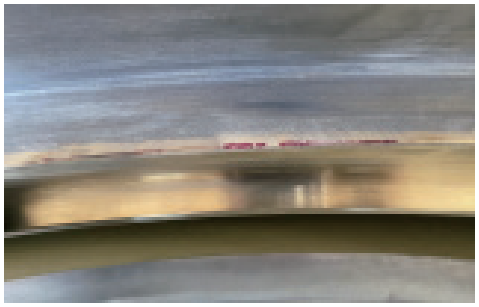


图4　铝青铜堆焊层缺陷

本文通过对铝青铜堆焊典型缺陷多维度的检测与分析，确定了铝青铜堆焊过程中出现典型缺陷的性质及主要成因，并就其形成过程深入分析，从多个角度提出了综合改善措施，取得了良好的预期效果，可为铝青铜堆焊在工程应用中获取高质量堆焊组织提供理论和试验依据。

2　原因分析与要因确定

碳素钢表面堆焊铝青铜合金的难点主要由二者热导率、线膨胀系数、收缩率和熔点的较大差异所导致。以下将从铝青铜堆焊方法与工艺的各个环节详细分析，以最终确定缺陷产生的要因及改进方案。

2.1　保护气体纯度

针对铝青铜堆焊层加工后点状缺陷表面质量问题，判断保护气体纯度的影响。

抽蓄机组球阀、上下游法兰铝青铜堆焊一般采用熔化极气体保护焊方法，保护气体为99.99%Ar，铝青铜堆焊层时有点状缺陷产生。

经过分析测试，99.99%Ar中含有0.01%的杂质，这些杂质包括N_2、O_2、水分、油脂和其他不纯物质，见表1。铝青铜在焊接中易产生析出型气孔类缺陷，而将99.99%纯氩保护气体更换为99.999%的高纯氩保护气体后，铝青铜堆焊层加工后的点状缺陷表面质量问题得到了明显改善，因此，铝青铜堆焊表面点状缺陷影响因素主要为保护气体的纯度。

表1　纯氩与高纯氩气体组分

成分	Ar（%）	H_2 /ppm	O_2 /ppm	N_2 /ppm	$CH_4+CO+CO_2$ /ppm	H_2O /ppm
纯氩	≥99.99	≤5	≤10	≤50	≤5+5+10	≤15
高纯氩	≥99.999	≤0.5	≤1.5	≤4	≤1	≤3

注：$1ppm=10^{-6}$。

2.2　堆焊方法及工艺

针对铝青铜堆焊层出现与基材分离即“脱壳”情况的质量问题，判断不同堆焊方法及工艺对堆焊层结合力的影响。

对4种堆焊方法、3种保护气体堆焊试件的结合力进行测试，结果如图5所示。由图5可知，所有数值均高于铝青铜焊接材料570MPa的实测强度，其中采用PJ-TIG等离子流钨极氩弧焊方法＋混合气的堆焊试样平均结合力最高。由此可见，采用不同堆焊方法及工艺的试样结合力虽有一定差异，但测试数

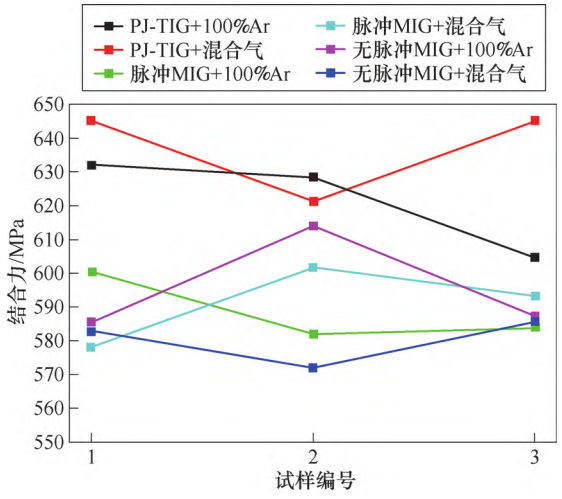


图5　铝青铜堆焊层与基材结合力测试曲线

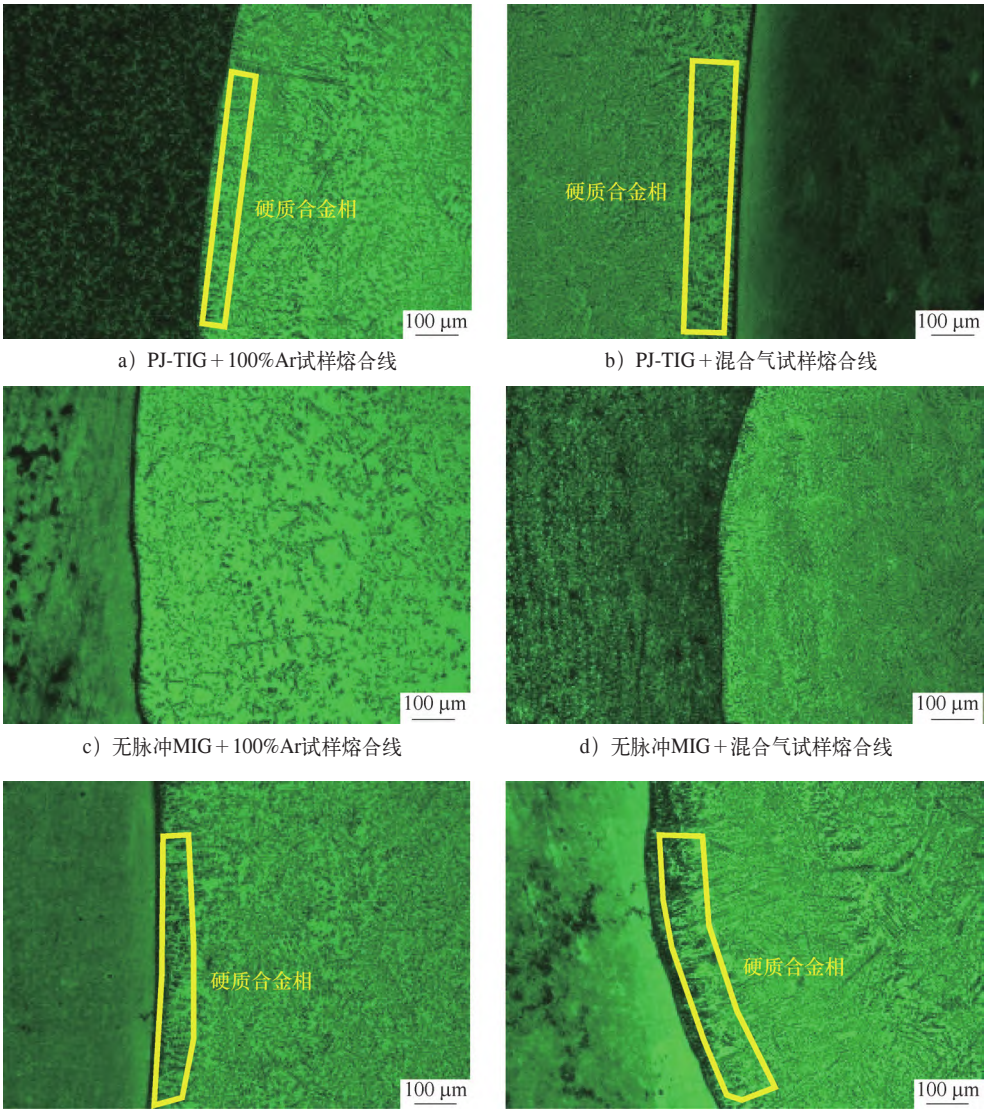
值均高于焊接材料甚至基材强度，可以判定其不是导致铝青铜堆焊层出现与基材分离即“脱壳”的直接原因。

判断不同堆焊方法及工艺对平衡状态下铝青铜堆焊层室温合金组织构成的影响，堆焊层横截面金相组织如图6所示。从铝青铜堆焊试样熔合线附近的显微组织可以看出，主要为α-铜及树枝晶组织，靠近基材熔合线的焊缝有泛铁现象，主要由铁含量较高的块状核心和铁基树枝晶组成。在同等条件下，当采用PJ-TIG、脉冲MIG堆焊方法或采用加入一定比例氦的混合气作为焊接保护气时，基体与铝青铜堆焊层熔合区内硬质合金相增多，并有形成枝状晶生长趋势，这种方式有利于提高基体与铝青铜之间的结合力。

2.3 稀释率

为保证铝青铜堆焊层特定的性能需求，必须保证堆焊层有较低的稀释率，如果稀释率过高会降低堆焊层的性能，也会影响熔合线渗透裂纹敏感性，稀释率是考量堆焊质量的重要参数，可通过熔合比、熔合线附近显微组织化分侧面反应稀释率大小。

选择合理的堆焊方法，降低堆焊层稀释率可以降低渗透裂纹倾向。PJ-TIG＋100%Ar试样及PJ-TIG＋混合气试样的熔合线SEM图谱如图7、图8所示，不同堆焊工艺所得堆焊层横截面熔合线EDS分析如图9所示。由图7～图9分析可得出，当堆焊方法一



a）PJ-TIG＋100%Ar试样熔合线　b）PJ-TIG＋混合气试样熔合线

c）无脉冲MIG＋100%Ar试样熔合线　d）无脉冲MIG＋混合气试样熔合线

e）脉冲MIG＋100%Ar试样熔合线　f）脉冲MIG＋混合气试样熔合线

图6　铝青铜堆焊层横截面金相组织

定，采用加入一定比例氦的混合气作为焊接保护气时，其堆焊层焊缝区靠近熔合线附近的显微组织中Fe元素的平均含量增加一倍，稀释率更高；当保护气一定，采用非熔化极的PJ-TIG堆焊方法时，其堆焊层焊缝区靠近熔合线附近的显微组织中Fe元素的平均含量与熔化极MIG堆焊方法相比更低，说明其稀释率更低。

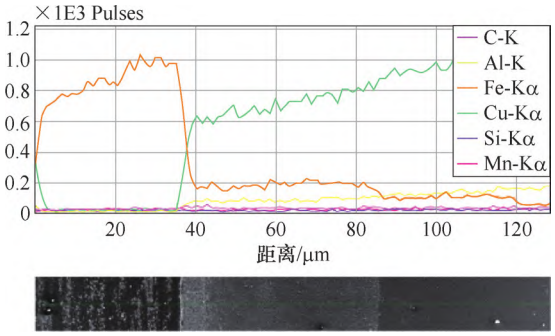


图7　PJ-TIG＋100%Ar试样熔合线SEM图谱

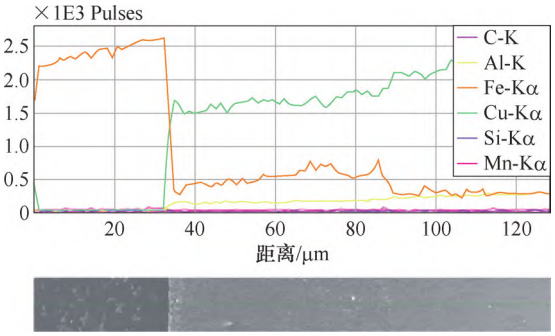
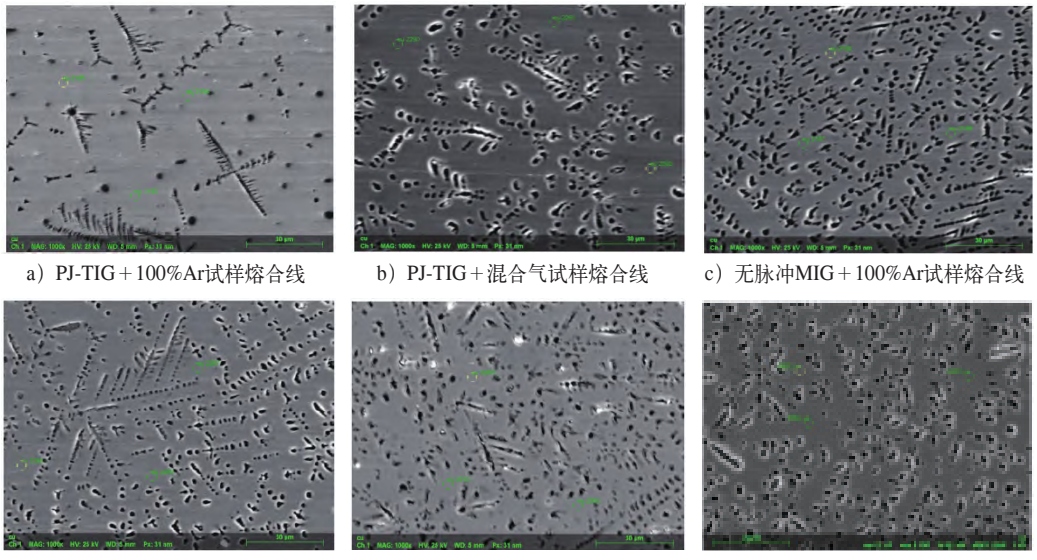


图8　PJ-TIG＋混合气试样熔合线SEM图谱



a）PJ-TIG＋100%Ar试样熔合线　b）PJ-TIG＋混合气试样熔合线　c）无脉冲MIG＋100%Ar试样熔合线

d）无脉冲MIG＋混合气试样熔合线　e）脉冲MIG＋100%Ar试样熔合线　f）脉冲MIG＋混合气试样熔合线

图9　铝青铜堆焊层横截面熔合线EDS成分

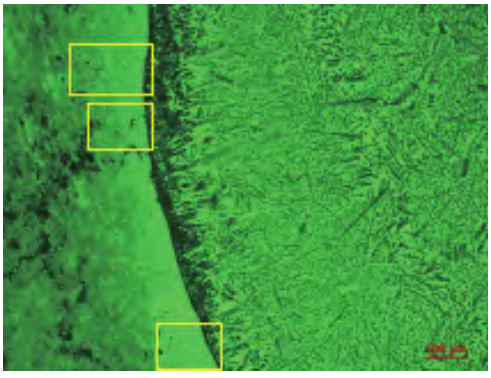


图10　铝青铜堆焊试样熔合线金相组织

2.4　表面状态

分析基材表面杂质和细小缺陷对堆焊层熔合线处线性缺陷的影响。图10所示为铝青铜堆焊试样熔合线附近的显微组织。从图10可看出，基材侧熔合线处有线性缺陷，原因可能为以下几方面。

1）基材表面油污等杂质未清理干净时，容易导致未熔合。

2）基材表面焊接飞溅未清理彻底时，容易导致夹杂缺陷。

3）基材表面杂质形成的低熔共晶在拉应力作用下使固态晶粒开裂。

4）基材表面在细小缺陷毛细作用下渗入液态铜，在冷却过程中，因受界面处焊接拉应力的共同作用而拓展成渗透裂纹[5]。

3　改善措施与验证

深入分析问题产生的原因，确定改进方案并经

试验验证后实施，拟在堆焊设备及工艺、球阀制造工序优化等方面加以改进。

3.1 保护气体纯度

经过分析，铝青铜堆焊中表面缺陷影响因素为保护气体的纯度。经试验验证，通过将保护气体Ar纯度由99.99%提升至 99.999%，表层加工渗透检测质量优良，堆焊层表面质量可得到有效改善。

3.2 新焊接方法与工艺应用

解决熔合线处线性缺陷的对策：可通过基材待堆焊表面的打磨或加工、有机溶剂或激光清理，以及在基材表面及铝青铜堆焊层之间使用稀释率低的焊接方法，先堆焊一层过渡层，以阻断液态铜渗入固态基材金属表面，进而降低熔合区渗透裂纹产生倾向。目前，行业上出现一种PJ-TIG系统，通过在TIG焊枪内部增加内喷嘴，并通过内喷嘴内的高速气流使焊接电弧收缩，进而提高电流密度，实现高效、高质焊接。

通过试验验证，应用PJ-TIG系统进行球阀密封环铝青铜过渡层堆焊。同时，考虑到效率问题，使用机器人脉冲MIG焊接工艺进行盖面堆焊。另外，分段焊接应用也有利于减弱收缩应力造成的分离现象。使用PJ-TIG系统完成球阀密封环导向面不锈钢或铝青铜堆焊，焊接速度为常规TIG焊的2倍，熔深最大为常规TIG焊的2倍。与常规MIG焊相比，可提高堆焊层与基材的结合力以及堆焊质量，兼顾效率和质量。

通过堆焊试样宏观检测、低倍试验验证，确定在设定工艺条件下，铝青铜堆焊层与基材熔合良好，无缺陷，从而确定了最佳的预热温度、焊接电流、电弧电压、焊道偏移量，以及焊枪与水平夹角等关键参数。

针对抽蓄机组球阀及上下游法兰密封面铝青铜堆焊结构，开发了氦氩混合保护气的PJ-TIG专机堆焊过渡层＋脉冲MIG机器人盖面焊的铝青铜堆焊工艺（见图11）。经过试验及产品验证，基本杜绝了铝青铜堆焊层加工后表面无损检测存在的点状及线性缺陷、铝青铜堆焊层PT检测时发现的堆焊层与基材间分离脱壳等情况（见图12），明显改善了球阀密封环导向面铝青铜堆焊质量。

另外，铜及铜合金的焊接对人体有害，通过脉冲MIG焊接机器人工作站、PJ-TIG专机的应用，可实现铝青铜自动化堆焊，取代手工操作，改善焊工劳动条件，降低职业病风险。

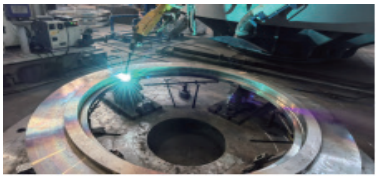


图11 上下游法兰脉冲MIG机器人铝青铜堆焊

图12 球阀铝青铜堆焊层加工后PT检测结果

4 结束语

1）99.999%的高纯氩保护气可有效降低铝青铜堆焊层析出型气孔类缺陷倾向。

2）当采用PJ-TIG、脉冲MIG堆焊方法或采用加入一定比例氦的氦氩混合气作为焊接保护气时，基体与铝青铜堆焊层熔合区内硬质合金相增多，并有形成枝状晶生长趋势，有利于提高基体与铝青铜堆焊层间的结合力。

3）当堆焊方法一定，采用加入一定比例氦的氦氩混合气作为焊接保护气时，堆焊层与基材间界面稀释率更高；当焊接保护气一定，采用非熔化极PJ-TIG堆焊方法时，堆焊层与基材间界面稀释率更低。

4）采用非熔化极的PJ-TIG堆焊方法用于铝青铜过渡层堆焊时，可有效降低基材与铝青铜堆焊层界面熔合区域渗透裂纹倾向。

参考文献：

[1] 牟晓风. 脉冲MIG焊堆焊铝青铜的工艺研究与应用[J]. 机电元件，2022，42（2）：38-39.

[2] 李甫. 耐磨铝青铜材料冶金机理与行业应用[J]. 模具材料及热处理技术，2023，23（6）：80-82.

[3] 高宗让. 铝青铜与合金钢焊接工艺研究[J]. 金属加工（热加工），2018（11）：39-41.

[4] 刘广超. 铜合金与低碳钢异种材质焊接研究[J]. 金属加工（热加工），2024（10）：61-64.

[5] 韩启勇，朱征宇，张磊，等. 采用中间层的高强钢表面CMT堆焊耐腐蚀铜合金研究[J]. 江苏科技大学学报（自然科学版），2019，33（4）：13-17.

（收稿日期：20250119）