

文章编号:1673-5005(2023)06-0154-08 doi:10.3969/j.issn.1673-5005.2023.06.018

基于高熵合金中间层的铜/钢 TIG 焊接头组织与性能

蒋淑英, 张军利, 赵 明

(中国石油大学(华东)材料科学与工程学院, 山东青岛 266580)

摘要:铜/钢复合结构不仅能够满足不同环境对材料性能的要求,还可减少铜材的消耗,将大大降低构件的成本;但铜与钢之间物化性能差异较大,其中极差的相溶性会导致焊后出现液相分离或缺陷。基于焊缝金属固溶-高熵化思路,设计 $\text{Fe}_5\text{Co}_{30}\text{Cr}_{30}\text{Ni}_{30}\text{Cu}_5$ 高熵合金作为中间层,对 T2 紫铜和 Q235 钢进行 TIG 焊接,并对中间层及接头的组织与性能进行分析。结果表明: $\text{Fe}_5\text{Co}_{30}\text{Cr}_{30}\text{Ni}_{30}\text{Cu}_5$ 高熵合金为单相 FCC 固溶体结构,具有良好的强度和塑性;采用该中间层材料,利用 TIG 焊方法可实现 T2 紫铜和 Q235 钢的可靠连接,焊缝成形良好且无气孔、裂纹等缺陷;焊缝区组织为单相 FCC 固溶体结构,具有显著的高熵化特征;焊接接头平均抗拉强度为 225 MPa,达到铜母材强度的 91%,平均断后延伸率达到 44%;接头断裂发生在紫铜侧热影响区,且断口表面呈现大量的韧窝结构,具有显著的韧性断裂特征。

关键词:T2 紫铜; Q235 钢; TIG 焊; 高熵合金中间层; 组织; 性能

中图分类号: TG 422 **文献标志码:** A

引用格式:蒋淑英,张军利,赵明. 基于高熵合金中间层的铜/钢 TIG 焊接头组织与性能[J]. 中国石油大学学报(自然科学版),2023,47(6):154-161.

JIANG Shuying, ZHANG Junli, ZHAO Ming. Microstructure and properties of copper/steel TIG welded joint based on high-entropy alloy interlayer[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2023, 47(6): 154-161.

Microstructure and properties of copper/steel TIG welded joint based on high-entropy alloy interlayer

JIANG Shuying, ZHANG Junli, ZHAO Ming

(College of Materials Science and Engineering in China University of Petroleum (East China), Qingdao 266580, China)

Abstract: The copper/steel composite structure can not only meet the performance requirements of different environments, but also can reduce the consumption of copper materials and greatly reduce the cost of components. However, the physical and chemical properties of copper and steel are quite different, and the extremely poor miscibility will lead to liquid phase separation or defects after welding. Based on the idea of solid solution-high entropy of weld metal, $\text{Fe}_5\text{Co}_{30}\text{Cr}_{30}\text{Ni}_{30}\text{Cu}_5$ high-entropy alloy was designed as the intermediate layer to carry out TIG welding of T2 copper and Q235 steel, and the microstructure and properties of the intermediate layer and welded joint were analyzed. The results show that, $\text{Fe}_5\text{Co}_{30}\text{Cr}_{30}\text{Ni}_{30}\text{Cu}_5$ high-entropy alloy is a single-phase FCC solid solution with good strength and plastic toughness. Using the high-entropy alloy as the intermediate layer material, the reliable connection between T2 copper and Q235 steel can be achieved by the TIG welding method. The welded joint is formed well, without pores, cracks and other defects. The weld microstructure is a simple solid solution with FCC structure, which has a remarkable high entropy characteristic. The average tensile strength value of the welded joint is 225 MPa, reaching 91% of the strength of T2 copper, and the extension ratio after fracture can reach 44%. The fracture of joint occurs in the heat-affected zone on the copper side. There are a large number of dimples on the fracture surface, showing the significant characteristic of ductile fracture.

Keywords: T2 copper; Q235 steel; TIG welding; high-entropy alloy interlayer; microstructure; properties

收稿日期:2023-02-28

基金项目:山东省自然科学基金面上项目(ZR2020ME013)

第一作者及通信作者:蒋淑英(1974-),女,副教授,博士,研究方向为材料焊接新技术及新材料连接技术、材料复合与组装、材料失效与表面改性。E-mail:jsyjsy1225@163.com。

T2 紫铜的导电性和导热性极好,在导电部件、热交换器、化学仪器以及核工业中大量使用。但铜价格昂贵且强度较低,单独使用不利于成本控制且不能满足构件的强度要求。Q235 低碳钢价格低廉、焊接性好,同时具有较高的强度和良好的塑韧性。因此将 T2 紫铜和 Q235 低碳钢组成复合结构不仅可以充分利用各自优异的性能,还能节约贵金属材料、合理利用资源、降低构件成本,该结构在石油化工行业、电力行业和汽车领域具有广泛的应用前景^[1]。例如管壳式换热器、海水净化装置以及储存酸碱性质介质的压力容器,需要大量拼焊并要求有较高强韧性的外壳材料和支撑板材料采用 Q235 钢,起换热作用的管材和起防腐作用的内衬则采用导热性好、耐蚀性强的紫铜,需要将钢-铜焊接以达到固定和密封作用。相比不锈钢和高合金钢,低碳钢与铜组成的复合结构在降低成本、节约贵重金属上具有更大的优势。但固态下 Cu 与 Fe 相溶性很低,室温下几乎为零,采用焊接方法对钢/铜直接焊接,通常会出现液相分离问题^[2]。此外钢和铜的熔点、导热性、线膨胀系数、比热容以及电磁性等物理性能差异较大,极易导致焊接接头产生较大的残余应力、钢侧出现渗透裂纹、焊缝产生气孔和裂纹缺陷、冶金结合不良或者铜侧热影响区晶粒粗大等缺陷^[3]。吕世雄等^[4]利用 TIG 焊,使用纯铜焊丝在钢基体上进行堆焊试验,对钢-铜异种金属的“泛铁现象”进行研究分析,对熔化焊中异种金属因为偏析产生的“泛铁现象”做出初步说明。Cheng 等^[5]使用 MIG-TIG 双面焊对铜-钢两种金属进行焊接,结果表明铜侧受热导致晶粒异常长大而发生软化现象,严重影响接头的综合性能。付俊^[6]使用对接方式对铜和低碳钢进行激光焊试验,结果显示当铜熔化较多时,焊缝中出现裂纹。Shiri 等^[7]使用 TIG 焊对铜和钢进行焊接,采用铜焊丝时得到的焊接接头质量较好,但凝固裂纹以及熔合不足等缺陷依然会出现,焊接过程难以控制,很难保证焊接接头质量。Magna-bosco 等^[8]采用电子束焊对铜与不锈钢进行焊接,焊接接头产生渗透裂纹,并且熔化区有大量气孔出现。邢丽等^[9]使用搅拌摩擦焊完成 T2 紫铜与低碳钢的连接,得到宏观形貌良好且无缺陷的焊接接头,但铜侧热影响区因为受热变得异常粗大,成为焊缝的薄弱区域。陈湘平等^[10]采用火焰钎焊对钢-铜金属进行连接,使用含 Si 的黄铜系钎料,接头有 Fe-Si 金属间化合物生成,导致裂纹产生。近年来,高熵合金的研究处于研究领域前沿,由于其特有的高熵效

应使金属间化合物的产生被抑制,体系更容易形成简单的无序固溶体结构,有利于获得优异的力学性能^[11]。高熵合金对组元有很强的固溶能力,组元在一定范围内变化时固溶体的结构不会发生改变^[12-13]。因此将高熵合金应用到异种材料的焊接领域,利用高熵合金的超级固溶性可以解决异种材料焊接的冶金不相溶问题,从而可以提高接头性能。Bridges 等^[14]采用 Mn-Co-Cu-Fe-Ni 高熵合金对镍基高温合金进行了激光钎焊,实现了良好的连接,焊接接头剪切强度达到 220 MPa。Zhang 等^[15]采用纯 Ti 和 FeCoNiCrCu 高熵合金复合的新型填料对 GH99 高温合金和 ZrB₂-SiC-C 陶瓷进行钎焊连接,焊缝为固溶体结构,接头最大剪切强度为 71 MPa,裂纹主要在 ZSC 陶瓷中传播,远离反应区。Hao 等^[16]采用激光焊方法实现了 TC4/(CoCrFe-Ni)_{100-x}Cu_x/304 不锈钢的良好连接,所有焊接接头均断裂在 Ti/Cu 反应层,最高抗拉强度达到 161 MPa。笔者课题组^[17]将 Co₁₃Cr₂₈Cu₃₁Ni₂₈ 高熵合金作为中间过渡层,采用脉冲 TIG 焊实现了 TA2 钛与 Q235 钢的良好连接,焊缝组织为 BCC 和 FCC 的固溶体结构,无脆性金属间化合物产生,接头强度达到 224 MPa。钨极氩弧焊(TIG)因其热输入小热影响区窄^[18]适用于物性差异较大的异种金属焊接,因此笔者将高熵合金作为钢-铜异种金属焊接的中间层,采用 TIG 焊方法对添加高熵合金中间层的 Q235 钢-T2 紫铜异种金属进行熔化焊接,对接头进行组织和性能分析。

1 试验材料与方法

1.1 中间层设计与制备

采用添加高熵合金作为中间层的方式进行铜/钢焊接,中间层合金元素的选取应主要考虑中间层材料对母材的润湿性以及母材元素的冶金相容性。从润湿性角度考虑,中间层材料应该含有一定量的 Fe、Cu 元素,由于焊接过程中焊缝里必然有母材的熔入,因此 Fe、Cu 元素含量不宜过高。根据高熵合金设计要求,为了使合金具备高混合熵,合金需由超过 5 种不同的元素组成,合金的混合熵必须在 -40 ~ 10 kJ,各成分元素之间的半径差必须小于 12%,并且所选元素原子半径和电负性接近^[19],因此其余元素需在元素周期表中 Fe、Cu 相邻位置进行选择。其中 Co 元素具有铁磁性,能够促进 FCC 相生成,提高合金塑性,此外 Co 在合金中具有黏合剂的功能^[20],从而可以减少焊接裂纹产生的可能

性;Cr 元素可以使合金硬度下降,塑性提高^[21],其加入可以减少焊接应力,保证焊缝的综合力学性能;Ni 元素是一种非碳化物元素,与铁元素和铜元素都能无限固溶^[22-23],增加对母材的冶金相容性,并且其高温韧性好,可以很好地缓解焊接应力。综合以上考虑,选用 $\text{Fe}_5\text{Co}_{30}\text{Cr}_{30}\text{Ni}_{30}\text{Cu}_5$ 作为中间层高熵合金,将纯度为 99.9% 的 Fe、Co、Cr、Ni、Cu 金属单质粉末按配比精确称量,每个试样称取的总质量为 30 g,Fe、Co、Cr、Ni、Cu 金属单质粉末的质量分别为 1.47、9.33、8.23、9.29 和 1.68 g。将称好的粉末球磨混合均匀后,利用 769YP-40B 粉末压机压成片状,压片后利用 WK-II 真空电弧熔炼炉炼制成高熵合金铸锭,再利用线切割机将铸锭切割成尺寸为 30 mm×3 mm×1.5 mm 的高熵合金条。

1.2 试验材料与焊接工艺

焊接母材采用 T2 紫铜板和 Q235 低碳钢板,尺寸均为 50 mm×50 mm×3 mm。T2 紫铜的化学组成为 P、Bi、Sb、As、Fe、Pb、Sn、S 和 Cu,其质量分数分别为 0.001、0.001、0.002、0.002、0.004、0.002、0.002、0.003 和余量,Q235 低碳钢的化学组成为 C、Si、Mn、S、P 和 Fe,其质量分数分别为 0.18、0.25、0.50、0.005、0.005 和余量。

焊前利用细砂纸打磨母材和中间层的所有表面以去除油污、氧化膜等杂质,放入丙酮溶液中进行超声波清洗,而后进行烘干处理。将宽度为 1.5 mm 的高熵合金条夹于 T2 紫铜板和 Q235 低碳钢板之间,采用 TIG 焊直流正接法进行焊接。钨极材料使用铈质量分数为 2% 的铈钨极,直径为 2.4 mm,其端部打磨为锥形;焊接过程使用氩气进行保护,气流量为 25 L/min,钨极伸出长度为 4~6 mm;因为铜的导热性远高于钢的导热性,因此在焊接过程中需将电弧向铜侧偏移 0.5 mm 以补偿铜侧的热量损失;考虑铜侧热影响区极易因为焊接热输入过大而晶粒粗化,导致接头性能降低,因此采用小线能量进行双面焊接成形,双面焊接选取同样的焊接参数,经过前期试验优化出焊接参数为:焊接电压 11.7 V,焊接电流 140 A,焊接速度 1.5 mm/s。焊接示意图如图 1 所示。

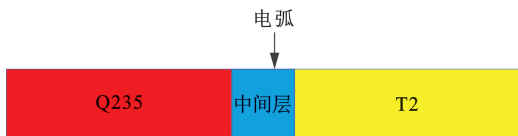


图 1 Q235/HEA/T2 焊接示意图

Fig. 1 Schematic diagram of Q235/HEA/T2 welding

1.3 材料表征及性能测试方法

将焊接接头利用线切割机切成尺寸为 10 mm×10 mm×3 mm 的试样,依次用 180 #~2 500 # 的砂纸打磨,随后进行抛光处理,直至表面光亮无划痕为止。抛光后进行腐蚀,分别使用 $\text{FeCl}_3\text{-HCl}$ 水溶液(比例为 5 g FeCl_3 +10 mL HCl +100 mL H_2O)腐蚀铜侧,硝酸酒精(5 mL HNO_3 +95 mL 酒精)腐蚀 Q235 钢侧,王水(6 mL HCl +2 mL HNO_3)腐蚀焊缝区域。随后利用 Carl Zeiss Axio Scope A1 型金相显微镜、JSM-7200F 型扫描电子显微镜和其附带的 X-Max50 型能谱仪分析其微观组织和成分分布。借助 X-Pert PRO MPD 型 X-射线衍射仪测量焊接接头的物相组成,使用 $\text{Cu-K}\alpha$ 射线源,管电流为 40 mA,管电压为 40 kV,扫描范围为 $20^\circ\sim 100^\circ$ 。使用 HV-1000A 型显微硬度计测量焊接接头的硬度分布,加载载荷为 0.98 N,加载时间为 15 s,从铜母材侧到焊缝到钢母材侧,垂直于焊缝每隔 0.5 mm 取一个点测试硬度,并根据所取得的硬度数据绘制硬度曲线图。将焊接接头利用线切割机制成 3 个标准拉伸试样,在 CTM8000 万能拉力机上进行室温拉伸试验,3 个试样分别取至焊缝的两端和中部。利用 JSM-7200F 型扫描电子显微镜观察其断口微观形貌。焊接接头拉伸试样尺寸如图 2(单位:mm)所示。

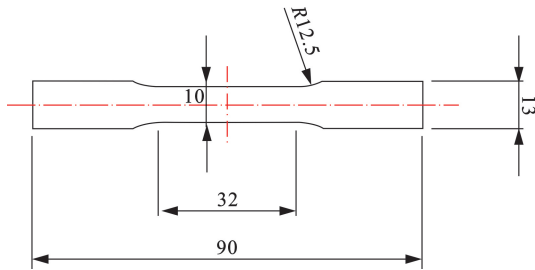


图 2 焊接接头拉伸试样尺寸

Fig. 2 Tensile test sample dimensions for welded joints

2 结果与讨论

2.1 中间层组织与性能

$\text{Fe}_5\text{Co}_{30}\text{Cr}_{30}\text{Ni}_{30}\text{Cu}_5$ 高熵合金的 XRD 衍射图谱如图 3 所示。通过 MDI Jade6.0 软件对衍射峰进行检索,并与 PDF 数据库中的标准卡片进行对比分析,确定该高熵合金由单一的 FCC 型无序固溶体组成,无复杂结构的有序金属间化合物产生。具有简单 FCC 固溶体结构的合金其晶面间距大、滑移方向多,塑性良好,因此用来做焊接中间层可以很好地缓解焊接应力问题。 $\text{Fe}_5\text{Co}_{30}\text{Cr}_{30}\text{Ni}_{30}\text{Cu}_5$ 高熵合金的

微观组织和 EDS 点成分测试位置如图 4 所示。由图 4 可以看出,该合金的微观组织简单均匀,为花瓣状枝晶结构,由枝晶和枝晶间区域组成。图 4 中点 1 位于枝晶内,其 Fe、Co、Cr、Ni、Cu 的原子百分比分别为 7.6、31.0、30.9、26.9 和 3.6;图 4 中点 2 位于枝晶间,其 Fe、Co、Cr、Ni、Cu 的原子百分比分别为 3.6、26.3、27.4、31.5 和 11.2;Cu 元素在枝晶间富集,Ni 元素在枝晶间的含量也高于其在枝晶内的含量。这是由于 Cu 的熔点较低,在其他元素凝固时,Cu 元素仍处于流动状态,被排挤到晶间位置;同时 Cu 元素与 Fe、Cr、Co 元素的混合焓(Cu-Fe:13 kJ/mol、Cu-Cr:12 kJ/mol、Cu-Co:6 kJ/mol)较高,与其互溶性较差,导致 Cu 元素在枝晶间偏聚。而 Cu 与 Ni 同属 FCC 结构,电负性相近,混合焓较小,可无限互溶,因此在富 Cu 的枝晶间也形成了 Ni 的富集。但 Cu、Ni 的富集并没有促使枝晶间析出新相,只是造成了一定程度的成分偏析。

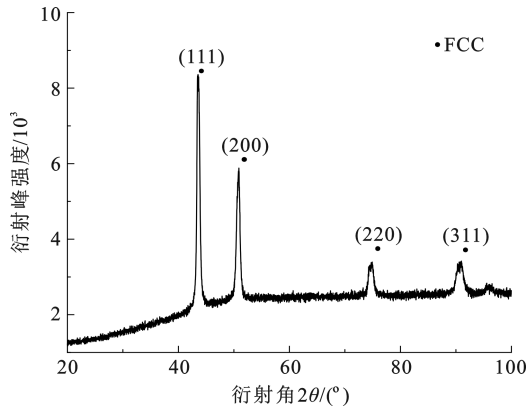


图 3 Fe₅Co₃₀Cr₃₀Ni₃₀Cu₅ 的 XRD 图谱
Fig. 3 XRD pattern of Fe₅Co₃₀Cr₃₀Ni₃₀Cu₅

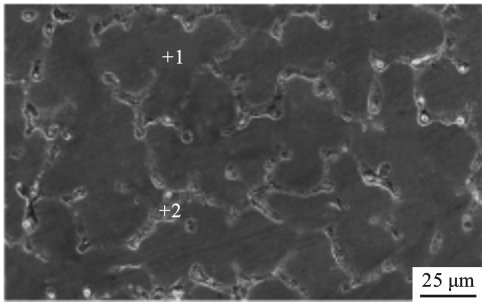


图 4 Fe₅Co₃₀Cr₃₀Ni₃₀Cu₅ 的微观组织及点成分分析
Fig. 4 Microstructures and point component analysis of Fe₅Co₃₀Cr₃₀Ni₃₀Cu₅

采用型号为 WDW-300E 万能试验机对 Fe₅Co₃₀Cr₃₀Ni₃₀Cu₅ 高熵合金纽扣铸锭进行压缩试验,测试中间层高熵合金的强度和塑性变形能力,其室温下的压缩应力-应变曲线如图 5 所示。由图 5 可知,

当加载到万能试验机的最大压力时,试样只是被压成鼓状,没有出现断裂,此时高熵合金的变形量为 59%,最大强度为 704 MPa。因此 Fe₅Co₃₀Cr₃₀Ni₃₀Cu₅ 高熵合金的强度和塑韧性良好,可作为钢、铜异种金属 TIG 焊的中间层材料。

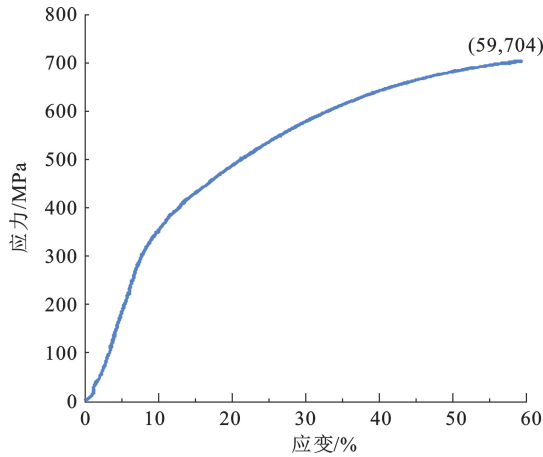


图 5 Fe₅Co₃₀Cr₃₀Ni₃₀Cu₅ 的压缩应力-应变曲线
Fig. 5 Stress-strain curves of compression of Fe₅Co₃₀Cr₃₀Ni₃₀Cu₅

2.2 接头显微组织与结构

图 6 为焊接接头的宏观横截面。由图 6 可以看出,当使用双面焊工艺时焊缝横截面为“工”字形,高熵合金中间层完全熔化,与两侧的 Q235 钢及 T2 紫铜均形成了冶金结合,没有未熔合、咬边、气孔、裂纹、夹杂等缺陷,Fe₅Co₃₀Cr₃₀Ni₃₀Cu₅ 高熵合金作为中间层成功实现了钢-铜异种金属的有效连接,获得成型良好的焊接接头。

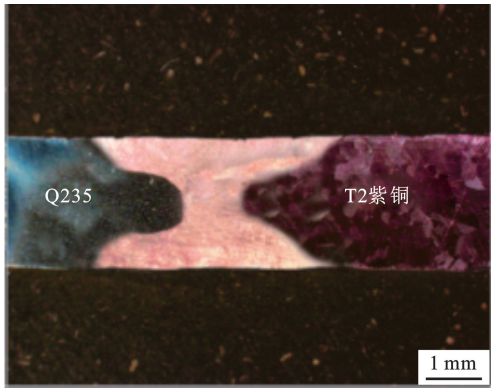


图 6 Q235/HEA/T2 焊接接头宏观截面
Fig. 6 Macro section of Q235/HEA/T2 welded joint

焊接接头的微观组织如图 7 所示。图 7(a) 中靠近 T2 紫铜侧的焊缝组织为典型的柱状晶组织,生长方向朝向焊缝中心。这是因为在焊接过程中焊接电弧偏向 T2 紫铜侧,铜因为其良好的导热性造成焊接熔池中一部分热量快速地通过铜母材侧散失,焊

接熔池体积又小,因此在铜母材侧造成了很大的温度梯度,导致靠近 T2 紫铜侧的焊缝晶粒生长具有强烈的方向性,形成了柱状晶组织。图 7(b)中焊缝中心的组织由致密的等轴晶组成,晶粒均匀细小。采用双面焊时,焊接热输入小,焊缝中心熔池在凝固过程中温度梯度较小,结晶速率较大,成分过冷非常显

著,所以导致大量等轴晶形成且晶粒较小。图 7(c)中 Q235 侧焊缝组织以树枝晶为主,Q235 钢的导热能力低于 T2 紫铜,加之电弧偏向紫铜侧,因此 Q235 侧温度梯度较小,冷却速度较慢,形成了以树枝晶为主的晶粒形貌,明显不同于 T2 紫铜侧的柱状晶形貌。

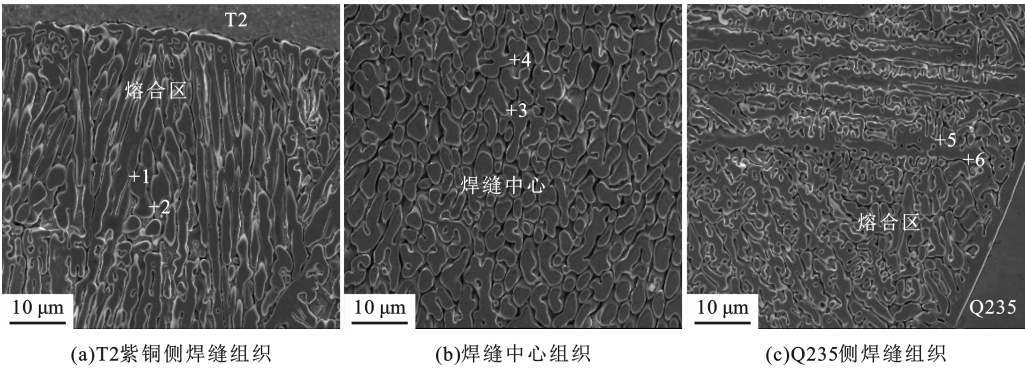


图 7 Q235/HEA/T2 焊接接头显微组织

Fig. 7 Microstructure of Q235/HEA/T2 welded joint

焊缝各区域的 EDS 点成分分析结果如表 1 所示。点 1、3、5 分别是 T2 紫铜侧焊缝区域、焊缝中心以及 Q235 侧焊缝区域晶体内的点成分,点 2、4、6 分别是 3 个区域晶界处的点成分。可以看出,3 个区域无论是晶内还是晶界,其成分均满足高熵合金的元素占比要求(各元素原子占比均在 5% ~ 35%),因此焊缝各区域组织均具有高熵化特征。3 个区域中均有 Cu 元素在晶界偏聚、Fe 元素在晶内偏聚现象。靠近 T2 紫铜侧的晶界处由于母材 Cu 的大量熔入,Cu 元素偏聚最严重;靠近 Q235 侧,Cu 元素偏聚现象大大减轻。Cu 的熔点较低,在其他元素结晶凝固形成高熵合金相时,部分 Cu 元素仍处于流动状态,被排挤到晶间位置,形成晶间富集。而 Cu 与 Fe 的相容性极差,随着晶间 Cu 富集,不能与之相容的 Fe 原子被向晶内排挤,形成 Fe 元素的晶内富集。相比于铸态高熵合金,因为焊缝冷却速度快,熔池停留时间短,结晶快,因此 Cu 元素在晶界处的偏聚不如铸态高熵合金严重,表现出焊缝组织晶粒分布更加致密,晶间区域更加狭小。图 8 为焊缝中心区域的 EDS 成分面扫描图,可以看出,焊缝中心区域各元素分布比较均匀,没有明显的大区域的成分偏析现象。

图 9 为焊缝组织的 XRD 衍射图谱。利用 MDI Jade6.0 软件将衍射图谱与软件中的标准卡片数据库进行比对分析,发现焊缝物相组成与 $\text{Fe}_5\text{Co}_{30}\text{Cr}_{30}\text{Ni}_{30}\text{Cu}_5$ 高熵合金中间层一样,均为单相 FCC 固溶体结构,没有出现新的金属间化合物。在

焊接过程中 Q235 钢和 T2 紫铜均有熔化进入熔池,改变了原有高熵合金中间层的成分占比;但由于高熵合金的超级固溶特性,Fe、Cu 的熔入并没有改变其物相结构,没有脆性金属间化合物产生,也没有钢和铜直接焊接产生的液相分离和晶间渗透裂纹,实现了焊缝金属高熵化的目的。

表 1 Q235/HEA/T2 焊缝各区域的 EDS 点成分分析数据

Table 1 EDS point component analysis results of Q235/HEA/T2 weld seam

位置	原子占比/%				
	Fe	Co	Cr	Ni	Cu
1	20.7	20.8	21.3	20.6	16.6
2	12.9	16.9	17.7	18.0	34.5
3	21.7	21.0	23.4	19.4	14.5
4	13.9	19.0	18.8	17.8	30.5
5	34.3	15.8	16.4	16.4	17.1
6	18.8	20.8	19.3	19.7	21.4

2.3 接头性能与断口形貌

图 10 为焊接接头的维氏硬度分布。由图 10 可以看出,焊缝区的硬度高于 T2 紫铜,略低于 Q235 钢,介于 T2 紫铜和 Q235 钢之间,使整个焊接接头具有良好的硬度梯度。整个焊缝区的硬度近似相等,没有大的突变,进一步说明焊缝区没有脆硬的金属间化合物产生。T2 紫铜侧热影响区的硬度略低于铜母材,出现一定程度的软化,这是铜侧热影响区在焊接热的作用下发生了一定程度的晶粒粗化和位错密度降低的结果。Q235 侧热影响区硬度与钢母材基本相同,这是因为焊接过程中电弧偏向铜侧,加之铜的散热能力

强,使钢侧热输入较小,热影响区过热现象不明显,因此硬度变化不大,没有出现明显的软化。

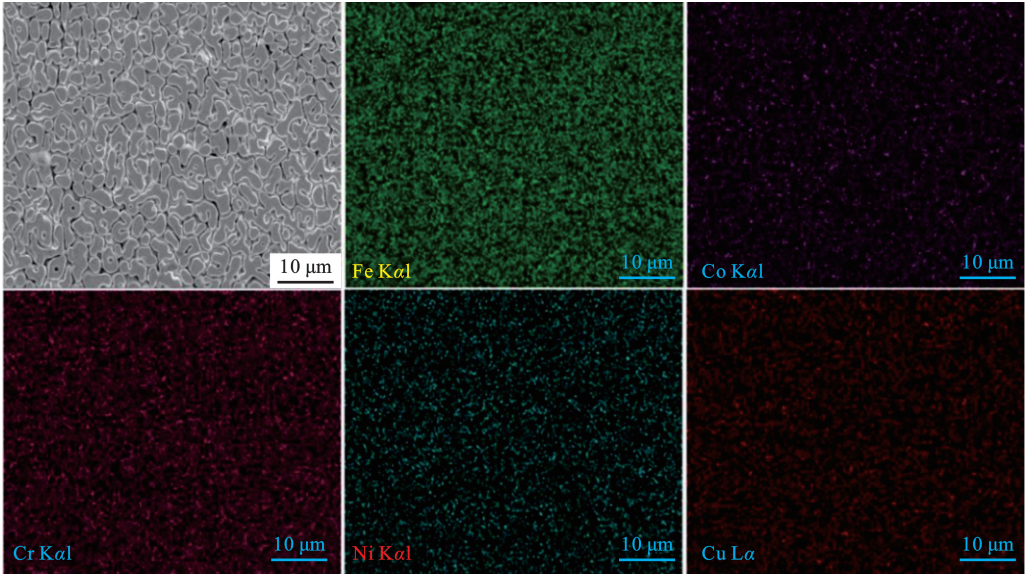


图 8 Q235/HEA/T2 焊缝中心 EDS 面扫描成分分析

Fig. 8 EDS surface scanning component analysis of Q235/HEA/T2 weld center

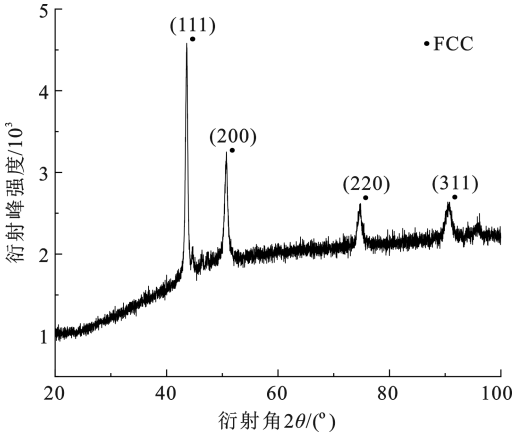


图 9 Q235/HEA/T2 焊缝区的 XRD 图谱

Fig. 9 XRD pattern of Q235/HEA/T2 weld zone

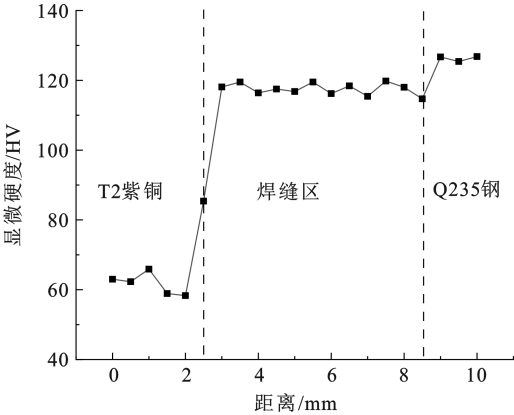


图 10 Q235/HEA/T2 焊接接头的显微硬度分布

Fig. 10 Microhardness distribution of Q235/HEA/T2 welded joint

图 11 为 T2 紫铜和焊接接头的拉伸应力-应变曲线和拉断后的试样形貌。由图 11 可以看出,焊接接头的 3 个拉伸试样均断裂在铜母材侧的热影响区,说明焊缝的结合强度高于铜母材,利用 $\text{Fe}_{50}\text{Co}_{30}\text{Cr}_{30}\text{Ni}_{30}\text{Cu}_5$ 高熵合金作为中间层可以实现

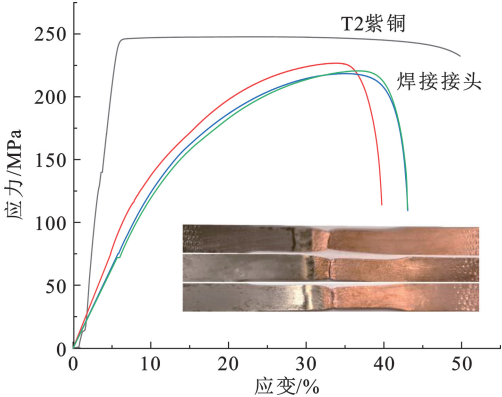


图 11 Q235/HEA/T2 焊接接头的拉伸曲线及拉断后的试样形貌

Fig. 11 Tensile curve and morphology of Q235/HEA/T2 welded joint

钢/铜异种金属的可靠连接。3 个试样的抗拉强度分别为 227、223 和 220 MPa,断后延伸率分别为 40%、43%和 43%。T2 紫铜的抗拉强度为 248 MPa,焊接接头的平均抗拉强度达到 T2 紫铜母材的 91%,焊接过程中铜母材侧热影响区的软化是导致焊接接头抗拉强度略低于 T2 紫铜的主要原因。在电镜下对焊接接头断口的微观形貌进行观察,如图 12 所示。可以看出,断口上有大量韧窝出现,表现

出韧性断裂特征。

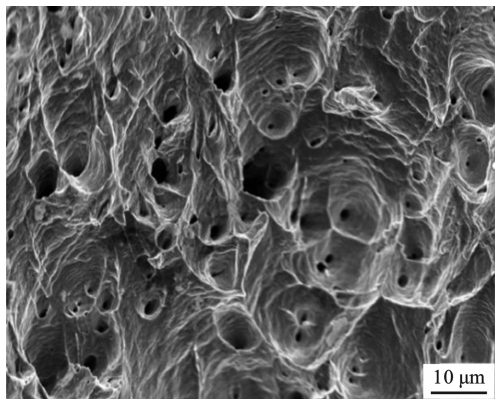


图12 Q235/HEA/T2 焊接接头断口微观形貌

Fig. 12 Fracture micromorphology of Q235/HEA/T2 welded joint

3 结 论

(1)设计出的 $\text{Fe}_5\text{Co}_{30}\text{Cr}_{30}\text{Ni}_{30}\text{Cu}_5$ 高熵合金为单相 FCC 结构,具有良好的强度和塑韧性,可作为铜-钢异种金属 TIG 焊的中间层材料。

(2)利用 $\text{Fe}_5\text{Co}_{30}\text{Cr}_{30}\text{Ni}_{30}\text{Cu}_5$ 高熵合金作为中间层材料,采用 TIG 焊方法实现 T2 紫铜和 Q235 钢的可靠连接,焊缝成形美观,无焊接缺陷,焊缝区组织为单相 FCC 结构,具有显著的高熵化特征。

(3)基于 $\text{Fe}_5\text{Co}_{30}\text{Cr}_{30}\text{Ni}_{30}\text{Cu}_5$ 高熵合金中间层的 T2 紫铜和 Q235 钢的焊接接头平均抗拉强度为 225 MPa,达到铜母材的 91%,断裂发生在紫铜侧热影响区,断口表面有大量韧窝,试样的平均断后延伸率达到 42%,表现出韧性断裂的特征。

参考文献:

- [1] PATRA S, ARORA K S, SHOME M, et al. Interface characteristics and performance of magnetic pulse welded copper-steel tubes [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2017, 245(1): 278-286.
- [2] ZHANG H, JIAO K X, ZHANG J L, et al. Experimental and numerical investigations of interface characteristics of copper/steel composite prepared by explosive welding [J]. Materials & Design, 2018, 154(3): 140-152.
- [3] WANG Y X, LI X J, WANG X, et al. Fabrication of a thick copper-stainless steel clad plate for nuclear fusion equipment by explosive welding [J]. Fusion Engineering and Design, 2018, 137: 91-96.
- [4] 吕世雄, 宋建岭, 杨士勤, 等. 钢基体表面 TIG 铜堆敷层泛铁规律分析 [J]. 焊接学报, 2008, 29(8): 85-88, 117.

LÜ Shixiong, SONG Jianling, YANG Shiqin, et al. Content of Fe in TIG cladding copper alloy layer on surface of steel [J]. Transactions of the China Welding Institution, 2008, 29(8): 85-88, 117.

- [5] CHENG Z, HUANG J, YE Z, et al. Microstructures and mechanical properties of copper-stainless steel butt-welded joints by MIG-TIG double-sided arc welding [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2018, 265(8): 87-98.
- [6] 付俊. 铜钢异种材料激光焊研究 [D]. 上海: 上海交通大学, 2009.
- FU Jun. Research on laser welding of copper and steel dissimilar materials [D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2009.
- [7] SHIRI S G, NAZARZADEH M, SHARIFITABAR M, et al. Gas tungsten arc welding of CP-copper to 304 stainless steel using different filler materials [J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2012, 22(12): 2937-2942.
- [8] MAGNABOSCO I, FERRO P, BONOLLO F, et al. An investigation of fusion zone microstructures in electron beam welding of copper-stainless steel [J]. Materials Science and Engineering A, 2006, 424(1/2): 163-173.
- [9] 邢丽, 李磊, 柯黎明. 低碳钢与紫铜搅拌摩擦焊接头显微组织分析 [J]. 焊接学报, 2007, 28(2): 17-20.
- XING Li, LI Lei, KE Liming. Microstructure analysis of friction stir welding joint between low carbon steel and red copper [J]. Transactions of the China Welding Institution, 2007, 28(2): 17-20.
- [10] 陈湘平, 唐杰, 卫国强, 等. 钢/铜火焰钎焊接头组织和性能研究 [J]. 热加工工艺, 2017(21): 235-237.
- CHEN Xiangping, TANG Jie, WEI Guoqiang, et al. Study on microstructure and properties of flame brazed steel/copper joint [J]. Hot Working Technology of China, 2017(21): 235-237.
- [11] ZHANG Y, ZUO T T, TANG Z, et al. Microstructures and properties of high-entropy alloys [J]. Progress in Materials Science, 2014, 61(4): 1-93.
- [12] JOSEPH J, STANFORD N, HODGSON P, et al. Understanding the mechanical behavior and the large strength/ductility differences between FCC and BCC $\text{Al}_x\text{CoCrFeNi}$ high entropy alloys [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2017, 726: 885-895.
- [13] JIANG S Y, LIN Z F, XU H M, et al. Studies on the microstructure and properties of $\text{Al}_x\text{CoCrFeNiTi}_{1-x}$ high entropy alloys [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2018, 741: 826-833.
- [14] BRIDGES D, ZHANG S H, LANG S, et al. Laser bra-

- zing of a nickel-based superalloy using a Ni-Mn-Fe-Co-Cu high entropy alloy filler metal [J]. *Materials Letters*, 2018,215:11-14.
- [15] ZHANG L X, SHI J M, LI H M, et al. Interfacial microstructure and mechanical properties of ZrB₂-SiC-C ceramic and GH99 superalloy joints brazed with a Ti-modified FeCoNiCrCu high-entropy alloy [J]. *Materials and Design*, 2016,97:230-238.
- [16] HAO X, DONG H, XIA Y, et al. Microstructure and mechanical properties of laser welded TC4 titanium alloy/304 stainless steel joint with (CoCrFeNi)_{100-x}Cu_x high-entropy alloy interlayer [J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2019,803:649-657.
- [17] 裴龙基,胡志月,瞿龙,等. TA2/Co₁₃Cr₂₈Cu₃₁Ni₂₈/Q235 脉冲 TIG 焊接头组织与性能[J]. *焊接学报*, 2021,42(11):90-96.
- PEI Longji, HU Zhiyue, QU Long, et al. Microstructure and properties of TA2/Co₁₃Cr₂₈Cu₃₁Ni₂₈/Q235 pulsed TIG weld joint [J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2021,42(11):90-96.
- [18] 陈娟,宋锦,张悦,等. 高钢级大口径油气管道在役自动焊工艺[J]. *油气储运*, 2021,40(8):914-918.
- CHEN Juan, SONG Jin, ZHANG Yue, et al. In-service automatic welding technology for high-grade large-diameter oil and gas pipelines [J]. *Oil & Gas Storage and Transportation*, 2021,40(8):914-918.
- [19] YANG X, ZHANG Y. Prediction of high-entropy stabilized solid-solution in multi-component alloys [J]. *Materials Chemistry and Physics*, 2012,132:233-238.
- [20] KULKARNI R, MURTY B S, SRINIVAS V. Study of microstructure and magnetic properties of AlNiCo (CuFe) high entropy alloy [J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2018,746:194-199.
- [21] ZHANG M, ZHANG L, FAN J, et al. Microstructure and enhanced mechanical behavior of the Al₇Co₂₄Cr₂₁Fe₂₄Ni₂₄ high-entropy alloy system by tuning the Cr content [J]. *Materials Science and Engineering A*, 2018,733:299-306.
- [22] QIU X W, LIU C G. Microstructure and properties of Al₂CrFeCoCuTiNi_x high-entropy alloys prepared by laser cladding [J]. *Journal of Alloys & Compounds*, 2013, 553:216-220.
- [23] 陈永刚,李广超,李善亮,等. LNG 储罐内罐 9%Ni 钢板立向焊缝自动焊工艺[J]. *油气储运*, 2022,41(4):438-443.
- CHEN Yonggang, LI Guangchao, LI Shanliang, et al. Automatic welding technology for vertical welds of 9%Ni steel plates for inner LNG storage tanks [J]. *Oil & Gas Storage and Transportation*, 2022,41(4):438-443.

(编辑 沈玉英)