

TA2/Co₁₃Cr₂₈Cu₃₁Ni₂₈/Q235 脉冲 TIG 焊 接头组织与性能

裴龙基, 胡志月, 瞿龙, 蒋淑英, 张军利

(中国石油大学(华东), 青岛, 266580)

摘要: 针对钢与钛之间因物化性能差异大, 焊接过程易产生大量金属间化合物而难以实现可靠连接的问题, 依据焊缝金属固溶高熵化思路, 选用 Co₁₃Cr₂₈Cu₃₁Ni₂₈ 高熵合金作为中间过渡层对 TA2 钛和 Q235 钢进行脉冲钨极氩弧焊, 并对 Co₁₃Cr₂₈Cu₃₁Ni₂₈ 高熵合金及接头的组织和性能进行分析研究. 结果表明, Co₁₃Cr₂₈Cu₃₁Ni₂₈ 主要是双相面心立方结构, 分别为富 Cu 的晶间和晶内面心立方结构, 强度和塑性良好; 焊接接头两部分焊缝均成形良好, 无气孔、裂纹等缺陷, 焊缝组织均为简单的固溶体结构, Q235 侧焊缝主要为面心立方结构相, TA2 侧焊缝主要由简单的体心立方结构和面心立方结构相构成, 以体心立方结构相为主; 焊接接头抗拉强度为 224 MPa, 在 TA2 侧靠近高熵合金的熔合线处断裂, 主要由于生成了脆性的 Cr₃O₈, 断口有较多韧窝和一部分解理面, 为混合断裂, 表现出一定的韧性断裂特征.

创新点: 将 Co₁₃Cr₂₈Cu₃₁Ni₂₈ 高熵合金应用于钛/钢异种金属的熔化焊, 获得成型良好并具有一定强度的焊接接头.

关键词: TA2 钛; Q235 钢; 高熵合金; 脉冲 TIG 焊; 组织和性能

中图分类号: TG 444

文献标识码: A

doi: 10.12073/j.hjxb.20210427002

0 序言

钛及钛合金因其较高的比强度和优良的耐腐蚀性等优点而被广泛应用于航空航天、石油化工、医疗器械及舰船制造等领域. 但钛及钛合金价格昂贵, 限制了其在更广泛领域的应用. 钢作为重要工程材料, 价格低廉, 将钛与钢进行连接, 可充分发挥异种材料的性能优势, 在实现轻量化战略目标的同时具有较好的经济性, 具有广阔的应用前景^[1-3]. 钛与钢由于物理性能差异大, 在焊接过程中易产生大量化合物, 如 TiFe₂, TiFe 等, 使焊缝受力易发生脆断, 不能满足强度要求^[4-5]. 国内外研究表明, 解决钛、钢焊接问题的最为有效的方法是阻止 Ti 和 Fe 在焊接过程中相互扩散, 避免 Fe-Ti 化合物的生成, 从而在源头杜绝金属间化合物的产生^[6-8], 因此选择一种对钛、钢两种金属均有一定相容性而又不会产生脆性化合物的中间层成为解决问题的关键.

多主元高熵合金的出现, 为钛/钢异种金属的焊

接带来了契机. 其高熵效应使得传统二元或多元合金间易于产生的金属间化合物被抑制, 体系容易形成简单的无序固溶体结构, 可大大降低多元合金的脆性, 有利于获得优异的力学性能^[9], 因此多主元高熵合金有作为钛、钢异种金属焊接所用中间层的潜力. 侯光远等人^[10]分别设计并优化出了适用于 TA2/Q235 和 TA2/0Cr18Ni9 钨极氩弧焊 (tungsten inert gas arc welding, TIG 焊) 的高熵合金焊接材料 Ti₅Fe₁₅Ni₂₈Cu₂₃V₂₉ 和 Ti₅Fe₁₀Cr₂₈Ni₃₀Cu₂₇, 焊后对焊接接头的组织与性能进行了研究, 发现 TA2/Q235 焊缝组织只存在 Cu₃Ni, V₂Ti, NiTi₂ 等几种简单固溶体, 焊接接头的平均抗拉强度为 201 MPa; TA2/0Cr18Ni9 焊缝组织内形成了富 Ti 相为基体的共晶组织, 存在多种面心立方结构 (face-centered cubic structure, FCC) 和体心立方结构 (body-centered cubic structure, BCC) 相, 抗拉强度为 187 MPa; Hao 等人^[11]采用激光焊的方法实现了 TC4/(CoCrFeNi)_{100-x}Cu_x/304 不锈钢的良好连接, 焊接接头均在过渡层发生断裂, 在高熵合金中 Cu 含量最高时, 接头达到最高抗拉强度 161 MPa. 综上所述, 将高熵合金作为焊接材料成功地用于钛/钢异种金属的焊接已有报道,

但目前的研究还相当有限,能查到的文献数量极少,且获得的接头强度普遍不高,需要进一步研究更合适的高熵合金中间层和焊接工艺,以期获得高强高韧的接头性能.选用 Co₁₃Cr₂₈Cu₃₁Ni₂₈ 系高熵合金作为金属过渡层对 TA2 钛和 Q235 钢进行脉冲 TIG 焊,并对焊接接头进行显微组织分析及力学性能测试,为固溶体高熵合金在异种金属熔化焊方面的应用以及焊缝高强高韧高熵化调控提供借鉴和指导.

1 试验方法

采用添加高熵合金 (high entropy alloy, HEA) 作为中间层的方式进行钛/钢焊接.中间层合金的选取应综合考虑组元间结构和尺寸相近、性能相似及焊接过程中母材的熔化等因素^[12].经预试验成分优化,选用 Co, Cr, Cu, Ni 作为中间层合金元素,原子比为 13:28:31:28.选取这 4 种元素的依据分别为:①Co 与 Fe 可以互溶,与 Ti 不生成金属间化合物,有利于生成 FCC 固溶体,可以提高塑性,降低合金的脆性,防止冷却时产生裂纹^[13];②Cr 促进生

成 BCC 固溶体,降低焊缝的硬度和强度,提高塑性^[14];③Cu 可以与 Fe 在液态下无限互溶,在固态下有限互溶,促进生成 FCC 固溶体,偏聚于晶间区域,会以球形富 Cu 纳米相析出,阻碍形变过程中的位错运动,提高高熵合金的强度和塑性^[15];④Ni 可以与 Fe 无限固溶,与 Ti 形成金属间化合物的倾向很小,有利于生成 FCC 固溶体^[16].将纯度为 99.9% 的 Co, Cr, Cu, Ni 金属粉末按配比精确称量,球磨混合均匀,压片后利用真空电弧熔炼炉炼制成高熵合金锭,再利用线切割机将铸锭制成尺寸为 50 mm × 6 mm × 3 mm 的高熵合金条.母材采用 TA2 钛板和热轧状态的低碳钢 Q235,尺寸均为 50 mm × 50 mm × 3 mm.将高熵合金作为金属过渡层进行脉冲 TIG 焊接试验,具体焊接方式如图 1 所示,焊接工艺参数如表 1 所示.

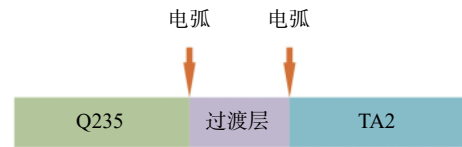


图 1 焊接方式示意图

Fig. 1 Schematic diagram of welding methods

表 1 焊接工艺参数
Table 1 Welding process parameters

焊接位置	峰值电流 I/A	占空比 D(%)	脉冲频率 f/Hz	焊接速度 v/(mm·s ⁻¹)	氩气流量 Q/(L·min ⁻¹)
过渡层Q235侧	150	53	2	1.4	20
过渡层TA2侧	110	50	2	1.5	20

将焊接接头利用线切割机切成 10 mm × 10 mm × 3 mm 的试样,依次用 180 ~ 2500 号的砂纸打磨,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.随后在 MDJ200 型金相显微镜和 S3400N 型扫描电子显微镜 (scanning electron microscope, SEM) 下观察其微观组织.通过 X-射线衍射仪 (X-ray diffraction, XRD) 测量焊接接头的物相组成,随后将焊接接头利用线切割机制成标准拉伸试样,在 CTM8000 型万能拉力机上进行拉伸试验,并用 S3400N 型扫描电子显微镜观察其断口形貌.

2 中间层合金微观组织与性能

2.1 Co₁₃Cr₂₈Cu₃₁Ni₂₈ 高熵合金微观组织

图 2 为中间层高熵合金及焊接接头的微观组

织. Co₁₃Cr₂₈Cu₃₁Ni₂₈ 系高熵合金微观组织如图 2a 所示,该体系的高熵合金为典型的树枝晶与柱状晶组织.为了确定合金中各区域的元素分布,对高熵合金进行了能谱仪 (energy dispersive spectrometer, EDS) 点成分分析,分析结果如表 2 所示, A 点位于枝晶的主干位置, Cr, Ni, Co, Cu 的原子分数分别为 36.9%, 34.5%, 19.3% 和 9.3%. 枝晶内 Cr, Ni, Co 3 种元素的含量基本符合设计的高熵合金元素比例,但 Cu 的含量远低于设计比例. B 点位于晶间位置,由表 2 可以看出,该区域的主要成分为 Cu,其原子分数为 80.6%, Cu 在枝晶间区域偏聚.这是由于 Cu 的熔点较低,在其它元素凝固时, Cu 元素仍处于流动状态,被排挤到晶间位置.同时 Cu 元素与其它元素的混合焓 (Cu-Cr 为 12 kJ/mol; Cu-Ni 为 4 kJ/mol; Cu-Co 为 6 kJ/mol) 较高,与其它元素的互溶性比较差,导致 Cu 元素在晶间偏聚.但

是 Cu 的塑性较好, 分布于晶间可以提高高熵合金的塑韧性. 同时 Ni 元素在晶间的含量大于其它元

素, 这是由于 Ni 与 Cu 的混合焓小于其它元素, 因此在晶间会形成 (Cu, Ni) 固溶体.

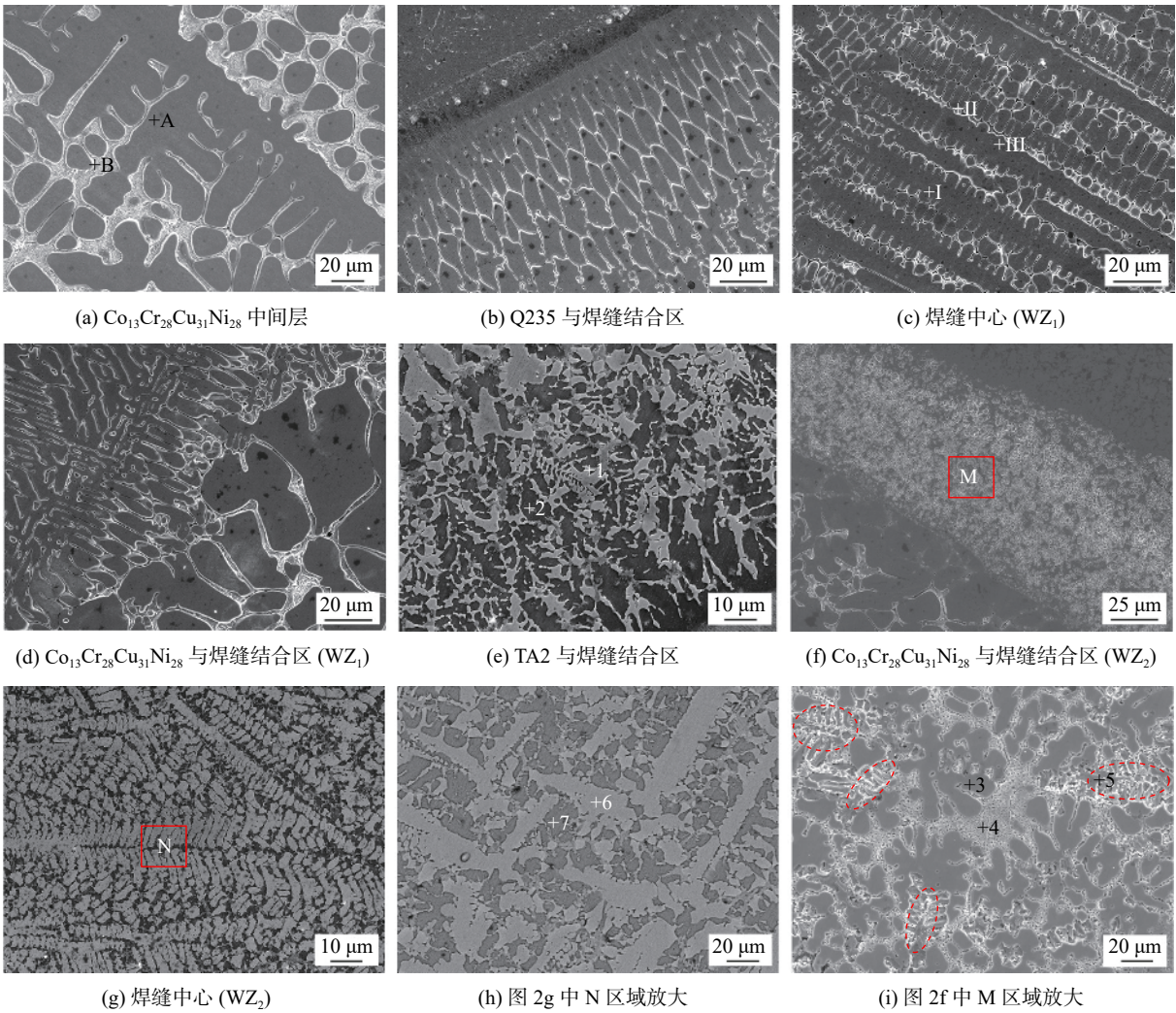


图 2 中间层高熵合金及焊接接头的微观组织

Fig. 2 Microstructure of high entropy alloy interlayer and weld joint. (a) interlayer of Co₁₃Cr₂₈Cu₃₁Ni₂₈; (b) fusion boundary adjacent to Q235; (c) center of weld(WZ₁); (d) fusion boundary(WZ₁) adjacent to Co₁₃Cr₂₈Cu₃₁Ni₂₈; (e) fusion boundary adjacent to TA2; (f) fusion boundary(WZ₂) adjacent to Co₁₃Cr₂₈Cu₃₁Ni₂₈; (g) center of weld(WZ₂); (h) enlarged view of region N in Fig. 2g; (i) enlarged view of region M in Fig. 2f

表 2 Co₁₃Cr₂₈Cu₃₁Ni₂₈ EDS 分析结果 (原子分数, %)
Table 2 EDS analysis results of Co₁₃Cr₂₈Cu₃₁Ni₂₈

测点	Cu	Cr	Ni	Co
A	9.3	36.9	34.5	19.3
B	80.6	3.9	8.9	6.6

对 Co₁₃Cr₂₈Cu₃₁Ni₂₈ 高熵合金和焊接接头进行了 XRD 分析, 其衍射图谱如图 3 所示. 标定后发现 Co₁₃Cr₂₈Cu₃₁Ni₂₈ 高熵合金主要是双相 FCC 结构, 分别为富 Cu 的晶间 FCC 相和晶内 FCC 相, 如图 3a 所示. 因此分析得出 Co₁₃Cr₂₈Cu₃₁Ni₂₈ 组织较为简单, 为双相 FCC 固溶体.

2.2 Co₁₃Cr₂₈Cu₃₁Ni₂₈ 高熵合金力学性能

图 4 为 Co₁₃Cr₂₈Cu₃₁Ni₂₈ 高熵合金常温下的压缩应力-应变曲线. 由图 4 可知, 在室温下已达到万能试验机的最大压力, 此时高熵合金的变形量为 68%, 最大强度为 642 MPa, 试样并没有断裂, 并且有继续增大的趋势, 因此, Co₁₃Cr₂₈Cu₃₁Ni₂₈ 高熵合

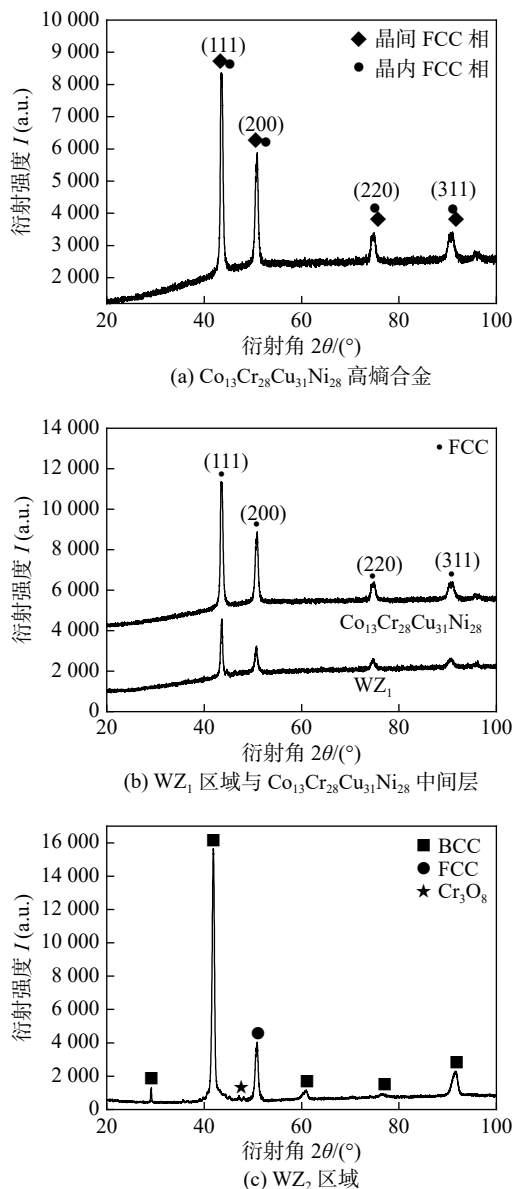
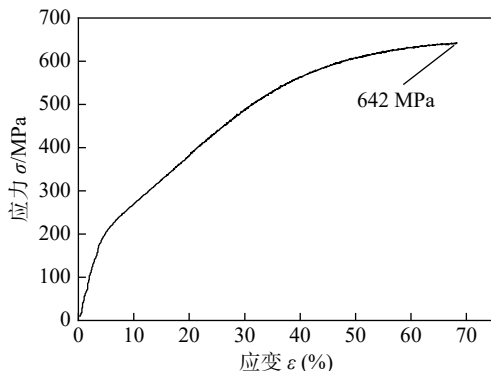


图 3 XRD 衍射图谱

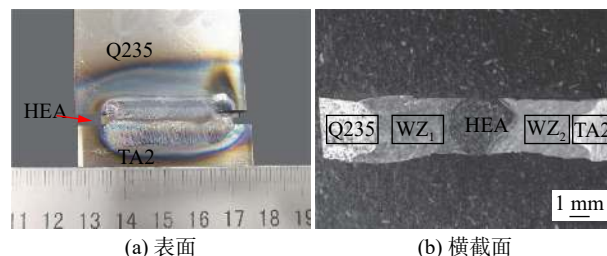
Fig. 3 XRD patterns. (a) HEA of Co₁₃Cr₂₈Cu₃₁Ni₂₈; (b) WZ₁ area and Co₁₃Cr₂₈Cu₃₁Ni₂₈ interlayer; (c) WZ₂ area图 4 Co₁₃Cr₂₈Cu₃₁Ni₂₈ 高熵合金的应力-应变曲线Fig. 4 Stress-strain curve of Co₁₃Cr₂₈Cu₃₁Ni₂₈ high-entropy alloy

金的强度和塑韧性良好, 可作为钛、钢异种金属脉冲 TIG 焊的中间层。

3 接头的微观组织分析

3.1 接头宏观形貌

焊接接头的表面宏观形貌、焊缝横截面形貌如图 5 所示。Co₁₃Cr₂₈Cu₃₁Ni₂₈ 作为金属过渡层成功实现了钛-钢异种金属的有效连接, 焊接接头表面成形良好。可以看出, 整个焊接接头有两道焊缝, 焊缝之间通过未熔化的高熵合金中间层作为过渡层, 焊缝表面均呈鱼鳞状, 焊接接头内部无气孔、裂纹、夹杂等缺陷。

图 5 Co₁₃Cr₂₈Cu₃₁Ni₂₈ 作为过渡层的 TA2/Q235 接头
Fig. 5 Co₁₃Cr₂₈Cu₃₁Ni₂₈ serves as a transition layer for the TA2/Q235 joint. (a) surface; (b) cross section

为了确定焊缝内部各元素的分布情况, 分别对图 5 中的 WZ₁ 和 WZ₂ 焊缝进行了线扫描分析, 线扫描位置及结果如图 6 所示。可以看出, WZ₁ 区域 Fe 含量在左侧熔合线处下降, 并且随着距离靠近 HEA 侧, 含量持续降低, 而 Cu, Ni, Co, Cr 4 种元素在左侧熔合线附近含量升高, 在右侧熔合线附近含量降低, 其分布规律符合所设计的 Co₁₃Cr₂₈Cu₃₁Ni₂₈ 高熵合金中间层中的元素含量分布, 没有在焊缝内部发生过度扩散、偏析现象; WZ₂ 区域从各种元素的整体含量分布来看, 除 Ti 外的其余 4 种元素在焊缝内部相比于 HEA 母材变化不大, 焊缝内部除左侧 HEA 与焊缝熔合线附近 Cr, Ti 发生小部分的突变外, 存在 Ti, Cu, Ni, Cr, Co 5 种元素含量波动较小的部分, 说明焊缝内部有趋于高熵化的趋势。

3.2 WZ₁ 区域的微观组织及相分析

图 2b ~ 图 2d 为 WZ₁ 区域内焊缝内部的微观组织, Q235 和 Co₁₃Cr₂₈Cu₃₁Ni₂₈ 均与焊缝发生了很好的冶金结合, 并未出现裂纹、夹杂、气孔等缺陷。在 Q235 熔合线和 Co₁₃Cr₂₈Cu₃₁Ni₂₈ 熔合线处晶粒都垂直于熔合线生长。焊缝内部无裂纹、气孔、夹杂等缺陷, 主要是由一些等轴晶、树枝晶和柱状晶

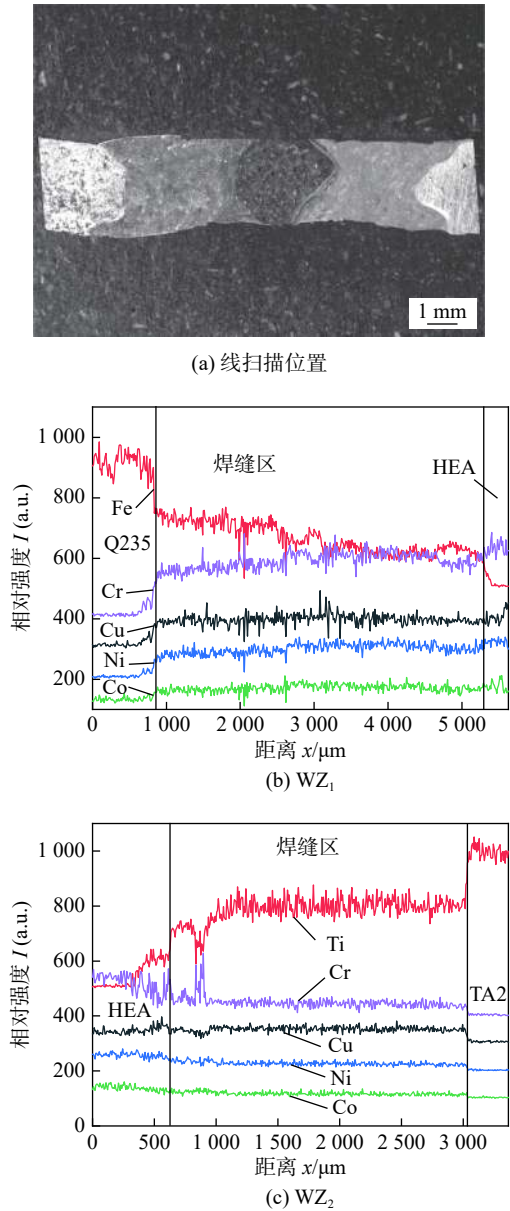


图 6 焊接接头线扫描位置及结果

Fig. 6 EDS line scanning positions and results of weld joint. (a) EDS line scanning positions; (b) WZ₁; (c) WZ₂

构成. 晶粒的方向是不一致的, 这是由于在焊缝内部散热方向不再全部统一, 因此焊缝内部部分晶粒偏向各个方向生长, 部分晶粒还是维持散热方向生长, 在焊缝内部生成了等轴晶和柱状晶等. 表 3 为 WZ₁ 区域内焊缝中心位置各点 EDS 点成分分析结果, WZ₁ 的平均化学成分为 32.2%Fe, 17.2%Cu, 20.37%Cr, 18.87%Ni, 10.97%Co(原子分数), 焊缝内部各元素含量均在 5%~35% 之间, 焊缝内部高熵化. 仅仅根据 EDS 点成分分析还无法确定焊缝内部是否生成化合物, 故对焊缝进行了 X 射线衍射分析. 图 3b 为 WZ₁ 区域的 XRD 衍射图谱与 Co₁₃Cr₂₈Cu₃₁Ni₂₈ 中间层 XRD 衍射图谱对比, 由图

可知, WZ₁ 区域与 Co₁₃Cr₂₈Cu₃₁Ni₂₈ 的衍射图谱高度相似, 焊接接头的 WZ₁ 区域为简单的 FCC 相, 虽然元素较多, 但由于“高熵效应”的影响, 即在焊接熔化后, 体系内的熵值增加, 即混乱程度变大, 所形成的焊缝稳定性也就更高, 热能足够高以使不同元素在结构内具有随机位置, 从而在体系中更倾向生成稳定的固溶体, 而不是生成金属间化合物.

表 3 WZ₁ 区域 EDS 点成分分析结果 (原子分数, %) Table 3 EDS point component analysis results of WZ₁ region

位置	Fe	Cu	Cr	Ni	Co
I	31.5	17.8	21.3	19.2	9.6
II	32.9	16.5	19.2	18.3	13.1
III	32.2	17.3	20.6	19.1	10.2
平均值	32.2	17.2	20.37	18.87	10.97

3.3 WZ₂ 区域的微观组织及相分析

图 2e~图 2i 为 WZ₂ 区域内焊缝内部的微观组织, 表 4 为图 2e~图 2i 中各点 EDS 点成分分析结果. 图 2e 为钛与焊缝结合区的电镜图片, 由图可以看出, 在靠近 TA2 母材一侧, 此区域组织比较简单, 为呈树枝状的组织与较为平整的基体组织, 根据点成分分析结果, 较为平整的基体 Ti 原子分数含量最高为 63.3%, Cu 原子分数含量次之为 18.8%, 其余 3 种元素含量较低, 分析此处主要为 β-Ti 和 Cu-Ti 化合物. 树枝状的枝晶上 Ti 依然为主要元素, 原子分数含量为 51.3%, Cu 与 Ni 含量相当, 分别为 16.8%, 18.8%, (Cu, Ni) 固溶体形成于枝晶上, 改善此处由于生成 Cu-Ti 化合物带来不利的影响; 图 2f 为高熵合金一侧熔合线附近的微观组织形貌, 在此处有一条宽度约为 157 μm 的过渡层, 对过渡层放大至 1000 倍后如图 2i 所示, 发现过渡层晶

表 4 WZ₂ 区域 EDS 分析结果 (原子分数, %)

Table 4 EDS analysis results of WZ₂ region

位置	Ti	Cu	Cr	Ni	Co
1	51.3	16.8	9.3	14.9	7.7
2	63.3	18.8	8.9	7.0	2.0
3	37.9	19.3	6.5	18.3	8.0
4	28.9	29.1	8.7	25.6	7.7
5	5.8	3.6	85.8	2.7	2.1
6	34.3	19.8	17.3	18.9	7.7
7	28.9	29.1	11.7	22.3	7.0

粒较为粗大, 主要由树枝晶、柱状晶和少量的等轴晶组成, 灰白色的组织分布在晶间位置, 另外还析出了颗粒状组织. 结合点成分分析结果, 3 点位于晶干位置, 各元素的原子分数含量为 37.9%Ti, 19.3%Cu, 6.5%Cr, 18.3%Ni, 8.0%Co, 分析晶干还是富钛相, Cr 元素比理论含量低, 其余 3 种元素与理论含量差别不大, 各种元素熔化后重新凝固形成固溶体. 4 点位于晶间位置, Ti, Cu, Ni 含量基本相当, 分析晶间可能形成 Cu-Ni-Ti 固溶体. 5 点是此处析出的颗粒状组织, 可以发现 Cr 的含量最高, 达到了 85.8%, 析出相主要为富 Cr 相, 这也印证了线扫描中 Cr 发生突变的情况. 对此处进行面扫描分析, 结果如图 7 所示, 发现析出相主要是 Cr 和 O 形成的氧化物. 含有杂质的铬硬而脆, 对于焊接接头来说属于不利因素, 可能会严重影响焊接接头的性能. 图 2g 为焊缝中心区域的微观组织形貌, 从图 2g 可以看出, 焊缝内部与钛侧熔合区类似, 由灰白色的柱状晶、树枝晶、等轴晶等和黑色的晶间组织组成. 6 点位于晶干灰白色位置, 其 Ti 含量最高为 34.3%, 其余 4 种元素的含量与高熵合金过渡层的各元素理论值差别不大, 即晶干是 5 种元素互相熔合形成新的固溶体. 7 点位于晶间黑色区域, 由于母材熔化, 带入了较多的 Ti, 故 Ti 含量依然较多, 仅次于 Cu, Cu 与 Ni 含量相当, 分析此处主要以 (Cu, Ni) 固溶体为主, 还产生少量 CuTi₂ 化合物. 综上, 焊缝内部大部分区域元素含量均在 5%~35% 之间 (除熔合线附近部分区域存在 Cr 元素聚集), 符合叶均蔚教授提出的高熵合金的判断准则.

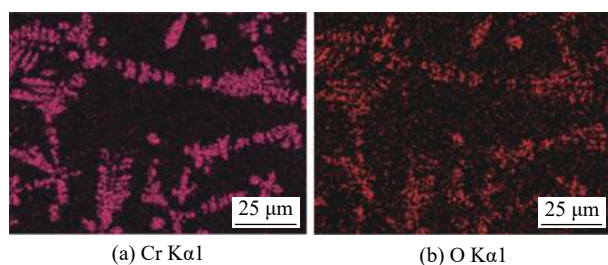


图 7 高熵合金/焊缝结合区 EDS 面扫描结果

Fig. 7 EDS surface scanning results of HEA/weld bonding zone. (a) Cr K α 1; (b) O K α 1

对 WZ₂ 焊缝区域进行了 XRD 衍射测试, 衍射图谱如图 3c 所示, 焊缝内的衍射峰主要为 BCC 及 FCC 结构, 其中以 BCC 结构为主, 与钢侧焊缝内 FCC 相不同的原因是 Ti 元素含量增加, 合金体系的混合熵很高, Ti 与其它元素之间的原子半径差异较大, 因而所组成的晶体结构也会产生严重的晶格

畸变, 当 Ti 含量增加到一定程度, 发生原晶格的崩塌和新晶格的重组, FCC 转变为 BCC, 因此 WZ₂ 焊缝区域相结构主要以 BCC 为主, 同时存在少量的 FCC 相. 图谱在 $2\theta = 48.08^\circ$ 处还出现了一个衍射强度较小的峰, 通过 MDI Jade6.0 软件对衍射峰的检索, 发现此处相为 Cr₃O₈ 氧化物, 可以判断图 2i 中的圈出的富 Cr 颗粒为 Cr₃O₈, 也是线扫描中 Cr 发生突变的原因, 生成 Cr₃O₈ 氧化物说明焊接过程中对接头的保护不够, 空气侵入焊接区, 需要进一步加强保护.

4 接头的力学性能

图 8 显示了高熵合金作为金属过渡层的钛/钢焊接接头的拉伸应力-应变曲线. 从图 8 可以看出, 焊接接头的抗拉强度为 224 MPa, 在 TA2 侧靠近高熵合金熔合线处断裂. 相对于焊后直接断裂的情况, 通过高熵合金中间层的加入, 部分熔化的母材与高熵合金重新熔合形成了简单的 FCC 和 BCC 相, 即形成高熵化焊缝, 完全杜绝了 Fe-Ti 金属间化合物的生成, 因此接头强度大大提高. 图 9 为焊接

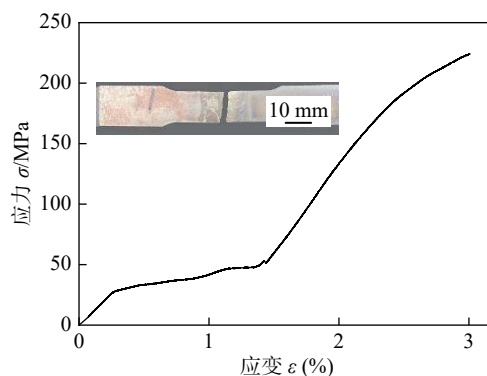


图 8 钛/钢焊接接头的应力-应变曲线

Fig. 8 Stress-strain curves of titanium/steel weld joints

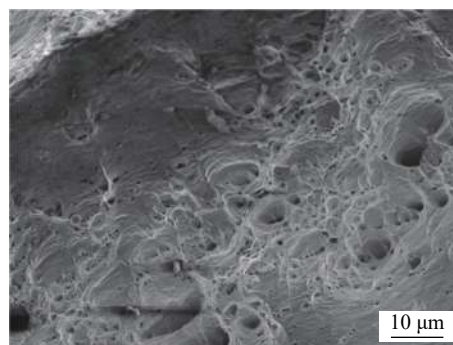


图 9 钛/钢焊接接头的断口形貌

Fig. 9 Fracture morphology of titanium/steel weld joint

接头的断口形貌,断口具有混合断裂的特征,可以看到较多的解理面的一部分韧窝,表现出一定的韧性断裂特征.由于钛的吸气能力强,断口上能看到气孔缺陷.虽然接头中不再存在脆硬的 Fe-Ti 化合物,但是断口处存在硬度较高的 Cr 的氧化物,导致此处脆性较大,成为接头薄弱环节,焊接过程中需要进一步加强对接头区的保护,避免空气进入熔池.

5 结论

(1) 钛/钢焊接用 $\text{Co}_{13}\text{Cr}_{28}\text{Cu}_{31}\text{Ni}_{28}$ 高熵合金中间层为双相 FCC 结构,分别为富 Cu 的晶间 FCC 相和晶内 FCC 相.

(2) 采用 $\text{Co}_{13}\text{Cr}_{28}\text{Cu}_{31}\text{Ni}_{28}$ 作为金属过渡层可避免 Fe, Ti 的直接接触,整个焊接接头由两部分焊缝组成,两部分焊缝均为简单的固溶体结构, Q235 一侧主要为 FCC 相, TA2 一侧主要由简单的 BCC 和 FCC 相构成,以 BCC 相为主.

(3) 焊接接头在 TA2 侧靠近高熵合金熔合线处断裂,主要由于生成了脆性的 Cr_3O_8 , 抗拉强度为 224 MPa. 断口有较多韧窝和一部分解理面,为混合断裂,表现出一定的韧性断裂特征.

参考文献

- [1] 刘全明, 龙伟民, 傅莉, 等. 氢致 TA10 钛合金焊接接头拉伸性能演变 [J]. 焊接学报, 2020, 41(12): 20–24.
Liu Quanming, Long Weimin, Fu Li, *et al.* Tensile properties evolution of hydrogen-induced TA10 titanium alloy welded joints[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2020, 41(12): 20–24.
- [2] 房中行, 史长根, 冯柯, 等. TA2-1060-TA2 复合板爆炸焊接试验及性能测试 [J]. 焊接学报, 2019, 40(9): 87–92.
Fang Zhonghang, Shi Changgen, Feng Ke, *et al.* Explosive welding experiment and property test of TA2-1060-TA2 cladding plate[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2019, 40(9): 87–92.
- [3] 刘坤, 李亚江, 王娟, 等. 填丝 TIG 焊 TA15 钛合金与 18-8 钢接头的微观组织 [J]. 焊接学报, 2017, 38(2): 57–60.
Liu Kun, Li Yajiang, Wang Juan, *et al.* Microstructure of TA15 alloy and 18-8 stainless steel joint by TIG with filler metal[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2017, 38(2): 57–60.
- [4] Ghosh M, Das S, Banarjee P S. Variation in the reaction zone and its effects on the strength of diffusion bonded titanium–stainless steel couple[J]. Materials Science & Engineering A, 2005, 390(1): 217–226.
- [5] Shiue R K, Wu S K, Shiue J Y, *et al.* Infrared brazing of Ti-6Al-4V and 17-4 PH stainless steel with (Ni)/Cr barrier layer(s)[J]. Materials Science and Engineering A, 2008, 488(1): 186–194.
- [6] Isaev V I, Cherepanov A N, Shapeev V P. Numerical study of heat modes of laser welding of dissimilar metals with an intermediate insert[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2016, 99: 711–720.
- [7] Wang T, Zhang B G, Wang H Q, *et al.* Microstructures and mechanical properties of electron beam-welded titanium-steel joints with vanadium, nickel, copper and silver filler metals[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2014, 23(4): 1498–1504.
- [8] Yuan X J, Tang K, Deng Y Q, *et al.* Impulse pressuring diffusion bonding of a copper alloy to a stainless steel with/without a pure nickel interlayer[J]. Materials and Design, 2013, 52: 359–366.
- [9] 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.
- [10] 侯光远. 基于焊缝金属高熵化的钛/钢 TIG 焊研究 [D]. 西安: 西安理工大学, 2015.
Hou Guangyuan. Research on TIG welding of titanium/steel based on high entropy of weld metal [D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2015.
- [11] Hao X, Dong H, Xia Y, *et al.* Microstructure and mechanical properties of laser welded TC4 titanium alloy/304 stainless steel joint with $(\text{CoCrFeNi})_{100-x}\text{Cu}_x$ high-entropy alloy interlayer[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2019, 803: 649–657.
- [12] 翟秋亚, 刘帅宾, 杨全虎, 等. Ta1/Ta₈Ni₃₀Cr₂₀Cu₄₂/0Cr18Ni9 储能焊接接头组织与性能 [J]. 焊接学报, 2020, 41(10): 60–64.
Zhai Qiuya, Liu Shuaibin, Yang Quanhui, *et al.* Microstructure and properties of Ta1/Ta₈Ni₃₀Cr₂₀Cu₄₂/0Cr18Ni9 energy storage welding joint[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2020, 41(10): 60–64.
- [13] 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.
- [14] Zhang M, Zhang L, Fan J, *et al.* Microstructure and enhanced mechanical behavior of the $\text{Al}_7\text{Co}_{24}\text{Cr}_{21}\text{Fe}_{24}\text{Ni}_{24}$ high-entropy alloy system by tuning the Cr content[J]. Materials Science and Engineering A, 2018, 733: 299–306.
- [15] Xin Xian, Lin Lijing, Zhong Zhihong, *et al.* Precipitation and its strengthening of Cu-rich phase in CrMnFeCoNiCu_x high-entropy alloys[J]. Materials Science & Engineering A, 2018, 713: 134–140.
- [16] Qiu X W, Liu C G. Microstructure and properties of $\text{Al}_2\text{CrFeCoCuTiNi}_x$ high-entropy alloys prepared by laser cladding[J]. Journal of Alloys & Compounds, 2013, 553: 216–220.

第一作者: 裴龙基, 硕士; 主要从事高熵合金和钛, 钢异种金属焊接方面的工作; Email: peilongjipei@163.com.

通信作者: 蒋淑英, 副教授; Email: jsyjsy1225@163.com.

(编辑: 戴红)

ficiently and accurately through a few tests.

Key words: high throughput; testing technology; high-power laser welding; process characteristics

Simulation and design of variable polarity GMAW welding power source ZENG Min, YE Qiuji, LI Yang, HU Zixin (South China University of Technology, Guangzhou, 510640, China). pp 83-89

Abstract: A variable-polarity gas metal arc welding (VP GMAW) welding power supply based on STM32F405 is built to solve the problems of high-heat input and easy deformation for the metal sheet, which is applied to adjust the heat input through modulating the duration of EN/EP and the amplitude of output current. The mathematical model of a second inverting stage with coupling inductance is established based on the analysis of the commutation of the output current. Besides, ideal output waveforms and a control method are developed to solve some problems in the process of variable-polarity (VP) welding. On the basis of the research above, a simulation model for verifying the feasibility of the control method provided is carried out to work as a good reference model for the design of a VP power supply. Compared with the experimental waveforms, the results show it lives up to the factual expectation. Finally, an experimental prototype of VP GMAW power supply is developed to perform a bead welding experiment on an 1 mm thick metal sheet. The result shows that the weld surface is smooth and regular, and there is still an effective and stable welding progress in case of the commutation of output current polarity.

Highlights: (1) A new current waveform control schematic applied in variable polarity welding is provided.
(2) The simulation model of variable polarity GMAW welding system is built to work as a reference for the VP power supply design.
(3) On an 1 mm low-carbon steel plate, a good welding effect is attained by a VP GMAW welding power supply built.

Key words: variable polarity; short-circuiting transfer; low-heat input; gas metal arc welding

Microstructure and properties of TA2/ $\text{Co}_{13}\text{Cr}_{28}\text{Cu}_{31}\text{Ni}_{28}$ /Q235 pulsed TIG weld joint PEI Longji, HU Zhiyue,

QU Long, JIANG Shuying, ZHANG Junli (China University of Petroleum (East China), Qingdao, 266580, China). pp 90-96

Abstract: Due to the significant difference in physical and chemical properties between steel and titanium, a large number of intermetallic compounds are formed in the weld, which makes it difficult to achieve reliable connections. According to the idea of solid dissolution and high entropy of weld metal, $\text{Co}_{13}\text{Cr}_{28}\text{Cu}_{31}\text{Ni}_{28}$ high entropy alloy was selected as an intermediate transition layer for pulse tungsten inert gas welding of TA2 titanium and Q235 steel, the microstructure and properties of $\text{Co}_{13}\text{Cr}_{28}\text{Cu}_{31}\text{Ni}_{28}$ high entropy alloy and the weld joint were analyzed and studied. The results show that $\text{Co}_{13}\text{Cr}_{28}\text{Cu}_{31}\text{Ni}_{28}$ mainly has a two-phase face-centered cubic structure (FCC), which is Cu-rich intercrystalline FCC phase and intra crystalline FCC phase, and its strength and plasticity are good. The welded joint is formed well, without stomas, cracks and other defects. The weld microstructure is composed of simple solid solution structures, which are mainly FCC phases on the Q235 side, and mainly body-centered cubic structure (BCC) and FCC phases on the TA2 side, mainly composed of BCC phases. The tensile strength of the welded joint is 224 MPa, broken at the fusion zone near the high entropy alloy on the TA2 side, this is mainly due to the formation of brittle Cr_3O_8 . Many dimples and cleavage planes are observed on the fracture port, which shows certain tough fracture characteristics.

Highlights: $\text{Co}_{13}\text{Cr}_{28}\text{Cu}_{31}\text{Ni}_{28}$ high entropy alloy was applied to the fusion welding of titanium/steel dissimilar metals, and a well-formed joint with certain strength was obtained.

Key words: TA2 titanium; Q235 steel; high entropy alloy; pulse TIG welding; microstructure and properties