

Cu 基药芯焊丝 TIG 焊 TA1/Q235B 接头微观组织和显微硬度

罗海龙¹, 张 敏¹, 慕二龙¹, 王晓伟¹, 丁 旭²

(1. 西安理工大学 材料科学与工程学院, 西安 710048; 2. 西安航空学院 材料工程学院, 西安 710077)

摘要: 利用 Cu 基 (Cu-Cr-Co-Ni) 药芯焊丝对 TA1/Q235B 异种金属对接与搭接接头进行了 TIG 焊接试验。通过 SEM、EDS 和 XRD 对接头微观组织进行了详细分析, 通过显微硬度测试了接头的硬度分布。结果表明, 采用 Cu 基药芯焊丝进行 TA1/Q235B TIG 焊接, 对接和搭接均得到了无缺陷的接头。两种接头的焊缝与母材界面处组织分布类似, 其中 TA1 侧主要由 β -Ti 固溶体、FeTi 和 CuTi₂ 化合物组成; Q235B 侧主要由 Fe, Cu 基固溶体和 Fe₂Ti 化合物组成。对接焊缝主要由 Cu 基固溶体, CuTi, FeTi, Cu₄Ti, τ_2 和 τ_3 金属间化合物组成, 而搭接焊缝主要由 Cu 基固溶体、 τ_2 和 Cu₄Ti 组成。对接接头的平均硬度为 449 HV0.1, 搭接接头的平均硬度为 335 HV0.1。

关键词: 钛-钢焊接; 铜基药芯焊丝; 钨极氩弧焊; 固溶体; 金属间化合物

中图分类号: TG 457.19 文献标识码: A doi: 10.12073/j.hjxb.2019400028

0 序 言

钛和钢因具有良好的力学性能和耐腐蚀性能, 备受石油化工、航天航空等领域关注。但是, 钛中的主要元素 Ti 和钢中的主要元素 Fe 反应将生成 FeTi, Fe₂Ti 脆性化合物, 导致钛-钢异质接头发生严重开裂^[1-2]。因此, 要实现钛-钢的异质接头焊接, 需要采用过渡层, 通过控制 Fe 和 Ti 之间的相互反应来达到焊缝的冶金连接。铜是钛和钢熔焊中最常用的中间层, 但是单纯采用铜进行钛-钢异质接头焊接, 焊缝中将存在大量的 Cu-Ti 和化合物, 接头韧性较差^[3]。Lee 等人^[4]提出了采用复合型中间层进行钛-钢异质接头焊接的思路。王廷等人^[5-6]在详细分析 Cu 中间层对 Fe-Ti 脆性相的抑制作用后, 开发出了 Cu/V 复合层结构, 进行钛-钢的电子束焊接。研究结果表明, 当采用 Cu/V 中间层时, 焊缝中 Fe-Ti 相的含量显著降低, 组织分布均匀, 接头抗拉强度最高达到了 395 MPa^[6]。褚巧玲等人^[7]采用 Cu/V 药芯焊丝进行了 TA1/Q345 双层复合板的焊接研究, 但所得的焊缝与钢界面处存在着裂纹。虽然 Cu/V 中间层在钛-钢异质接头焊接中展现了一定的优势, 但是钒作为一种稀贵金属, 从成本考虑无法进行大规模的工程应用。除了钒以外, 镍也经常被用于钛-钢

的异质接头焊接。镍与钛反应将生成一系列 Ti-Ni 化合物, 其脆性较 Fe-Ti 化合物低^[8-9]。

在钛-钢的异质接头焊接中, 除了采用合适的中间层对金属间化合物的含量进行有效控制外, 金属间化合物的分布尺寸也显著影响着焊缝的性能。研究表明, 金属间化合物具有尺度效应, 当合理控制其尺度在微米级以下时, 可以作为增强相, 起到显著增强材料的塑性和强度的效果^[10]。Co, Cr 元素作为 β -Ti 稳定元素^[11], 当其加入焊缝时, 可以细化 β -Ti 固溶体和金属间化合物复相组织, 从而改善焊缝的性能。另外, 接头的合理设计也可以通过改变母材的熔合比来调整整体焊缝的组织分布, 最终达到改善接头性能的目的。

采用自行开发的 Cu-Cr-Co-Ni 药芯焊丝分别进行碳钢 Q235B、纯钛 TA1 和 TA1/Q235B(对接和搭接接头)的钨极氩弧焊 (TIG) 研究, 通过对各个接头的显微组织、相组成和显微硬度进行测量, 研究不同接头设计对焊缝组织和性能的影响。

1 试验方法

采用纯钛 TA1(Fe≤0.2%, C≤0.08%, N≤0.03%, H≤0.15%, O≤0.18%, 余量 Ti) 和碳钢 Q235B(C≤0.20%, Si≤0.35%, Mn≤1.4%, P≤0.045%,

$S \leq 0.045\%$) 作为母材, 厚度均为 2 mm。采用纯度为 99.99% 的 Cr, Co, Ni, Cu 金属粉(粒度为 200 目), 以摩尔比 (1:1:1:0.25) 混合后与 WC 球以等重量填充入尼龙罐中, 用酒精为介质并以 390 r/min 的速度球磨 24 h 后得到均匀混合的焊丝药芯。用纯铜 (T2) 带 ($0.3 \text{ mm} \times 7 \text{ mm}$) 在焊丝拉拔机上制备直径为 $\phi 1.6 \text{ mm}$ 的药芯焊丝。

采用上述药芯焊丝在 Q235B, TA1 试板上进行堆焊试验, 研究焊丝与母材的焊接性, 并分析焊缝组织组成; 对 TA1/Q235B 接头(单 V45°对接和 TA1 单 V45°搭接)进行 TIG 焊接试验。焊接参数为电流 45 A, 电弧电压 17 V, 氩气流量 20 L/min, 背部进行氩气保护。用线切割制备焊缝横截面试样, 并用 30% 的 SiO_2 溶胶(粒度为 150 nm) 进行机械+化

学抛光, 采用 4% 硝酸酒精溶液和 95 mL $\text{H}_2\text{O} + 25 \text{ mL HNO}_3 + 1 \text{ mL HF}$ 分别对 Q235B 和 TA1 进行侵蚀。通过 SEM(ZEISS EVO/MA25), EDS 和 XRD 对焊缝组织及相组成进行分析。XRD 检测步长为 $0.01^\circ/\text{s}$, 扫描范围为 $30^\circ \sim 100^\circ$ 。采用 HV-50 硬度仪对接头显微硬度进行测试, 选择载荷为 0.98 N, 间距为 0.4 mm, 保压 10 s。

2 结果与讨论

2.1 TA1/Q235B 堆焊焊缝组织

Cu-Cr-Co-Ni 药芯焊丝在 TA1, Q235B 上堆焊焊缝的组织分布如图 1 所示。表 1 是焊缝中典型区域的 EDS 检测结果。

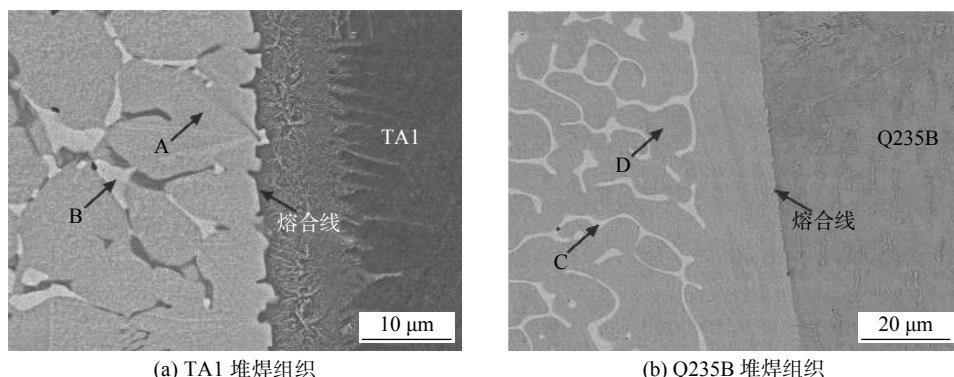


图 1 TA1/Q235B 堆焊焊缝组织

Fig. 1 Microstructures of TA1/Q235B bead-on-plate weld

表 1 堆焊焊缝 EDS 检测结果(原子分数, %)
Table 1 EDS results of TA1/Q235B beading welds

| 位置 | Ti | Cr | Mn | Fe | Co | Ni | Cu | 相组成 |
|----|-------|------|------|-------|------|------|-------|---|
| A | 66.72 | 0.67 | — | — | 0.80 | 1.12 | 30.68 | $\alpha\text{-Ti(s, s)} + \text{Ti}_2\text{Cu}$ |
| B | 61.87 | 3.67 | — | — | 3.55 | 3.18 | 27.72 | $\alpha\text{-Ti} + \text{CuTi}_2 + \text{CuTi} + \text{CoTi}_2 + \text{NiTi}_2 + \text{Cr}_2\text{Ti}$ |
| C | — | 0.39 | 0.50 | 26.00 | 0.39 | 0.93 | 71.78 | Cu(s, s) |
| D | — | 1.35 | 0.11 | 88.85 | 1.05 | 0.93 | 7.70 | Fe(s, s) |

从图 1a 可以看出, 焊缝与 TA1 熔合较好, 无裂纹缺陷。焊缝主要由灰色 A 与白色晶间析出物 B 组成。其中, 灰色 A 区域主要由 Cu 30.68%, Ti 66.72% 组成, 如表 1 所示。结合 Ti-Cu, Ti-Ni, Ti-Cr, Ti-Co 的二元相图^[12] 可知, 当温度在 790 °C 以上时, 焊丝元素均溶于 $\beta\text{-Ti}$ 基体中, 随后在 790 °C 时发生 $\beta\text{-Ti(Cu, Co, Ni)} \rightarrow \alpha\text{-Ti(s, s)} + \text{CuTi}_2$ 转变, 形成 $\alpha\text{-Ti, CuTi}_2$ 固溶体。白色析出物 B 含有 Cu 27.72%, Ti 61.87%, Cr 3.67%, Co 3.55%, Ni 3.18%。根据

相图可知, 在 960 °C 时将发生 $\text{L(Ti, Cu)} \rightarrow \text{CuTi} + \text{CuTi}_2$ 共晶反应, 而 Cr, Co 和 Ni 元素分别在相应的共析点温度发生转变生成 $\alpha\text{-Ti} + \text{NiTi}_2 + \text{Cr}_2\text{Ti} + \text{CoTi}_2$ 混合物。

图 1b 为 Q235B 堆焊焊缝组织, 可以看出焊缝与母材熔合较好, 无裂纹、气孔等缺陷。焊缝主要由白色晶间组织 C 和灰色树枝晶 D 组成。EDS 分析结果显示, C 为富 Cu 相, D 为富 Fe 相。TA1, Q235B 堆焊焊缝 XRD 测试结果如图 2 所示。从图 2 中可

以看出, TA1 焊缝主要由 α -Ti(s, s), CuTi₂, CuTi, NiTi₂, CoTi₂ 和 Cr₂Ti 化合物组成, Q235B 焊缝主要

由 Fe(s, s), Cu(s, s) 组成, XRD 测试结果与 SEM 和 EDS 观察结果基本吻合.

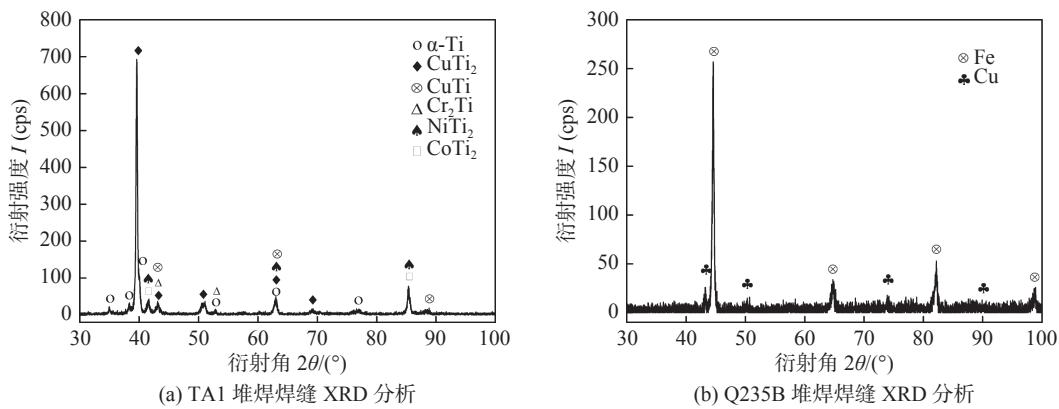


图 2 TA1/Q235B 堆焊焊缝 XRD 分析

Fig. 2 XRD analysis of TA1/Q235B bead-on-plate weld

2.2 TA1/Q235B 接头

2.2.1 TA1/Q235B 对接接头组织

TA1/Q235B 对接接头的显微组织分布如图 3 所示, 表 2 为焊缝个别点的 EDS 检测结果. 从图 3a 看出, 焊缝与 TA1 和 Q235B 均结合良好, 无裂纹缺陷. 图 3b 为焊缝与 TA1 界面处的组织分布, 该区域主要由灰白色 a 和深灰色 b 组成. 结合 EDS 结果和 Fe-Ti-Cu 三元相图可知, Cu 在凝固过程中的再分配支配了焊缝的组织组成. 当熔池逐渐冷却时, 首先发生共晶转变 $L \rightarrow FeTi + CuTi + \tau_3$ ($Ti_{43}Cu_{57-x}Fe_x$, $21 < x < 24$), 形成 $FeTi + CuTi + \tau_3$ 化合物 (基体 e). 接着, 发生另一个共晶转变 $L \rightarrow \tau_2(Ti_{40}Cu_{60-x}Fe_x$, $5 < x < 17) + FeTi + Cu(s, s)$, 形成 $\tau_2 + FeTi + Cu(s, s)$ 化合物

作用下形成 β -Ti(s, s), FeTi 和 CuTi₂ 化合物. 图 3c 为焊缝区组织分布, 焊缝主要由灰白色析出物 c, 浅灰色 d 和深灰色基体 e 组成. 结合 EDS 结果和 Fe-Ti-Cu 三元相图可知, Cu 在凝固过程中的再分配支配了焊缝的组织组成. 当熔池逐渐冷却时, 首先发生共晶转变 $L \rightarrow FeTi + CuTi + \tau_3$ ($Ti_{43}Cu_{57-x}Fe_x$, $21 < x < 24$), 形成 $FeTi + CuTi + \tau_3$ 化合物 (基体 e). 接着, 发生另一个共晶转变 $L \rightarrow \tau_2(Ti_{40}Cu_{60-x}Fe_x$, $5 < x < 17) + FeTi + Cu(s, s)$, 形成 $\tau_2 + FeTi + Cu(s, s)$ 化合物

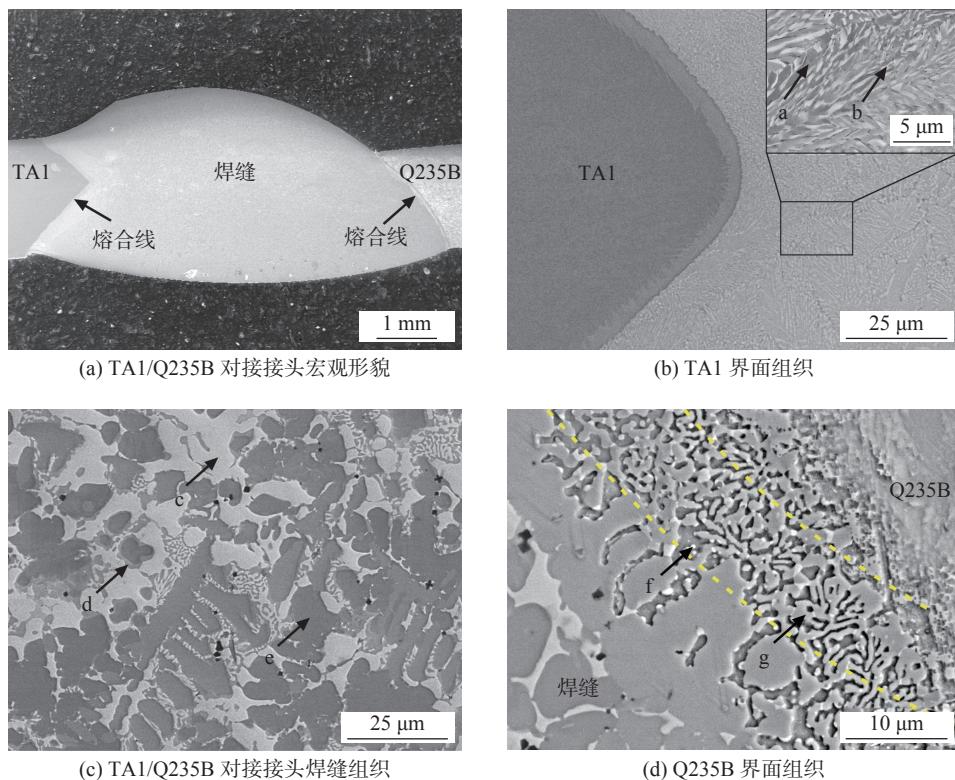


图 3 TA1/Q235B 对接接头组织

Fig. 3 Microstructures of TA1/Q235B butt-welded joints

(d 相). 最终, Cu 含量最高的 c 区发生共晶转变生成 Cu(s, s), CuTi₄ 和 τ_2 . 从上面的观察结果可以看出, Cu 基药芯焊丝通过在焊缝中生成 τ_3 , τ_2 金属间化合物和富 Cu 固溶体, 减少了 FeTi+Fe₂Ti 脆性组织的含量, 从而改善了接头的韧性. 图 3d 为焊缝

与 Q235B 界面处的组织分布, 熔合区主要由白亮粒状析出物 f 和细小的粒状组织 g 构成. 结合 EDS 分析结果和 Fe-Ti-Cu 相图可知, 白亮粒状析出物 f 和粒状组织 g 均主要为 Fe(s, s), Fe₂Ti 和 Cu(s, s) 的混合物, 其中白亮析出物 f 中 Cu(s, s) 的含量较高.

表 2 TA1/Q235B 对接接头 EDS 检测结果 (原子分数, %)
Table 2 EDS results of butt welded TA1/Q235B joints

| 位置 | Ti | Mn | Cr | Fe | Co | Ni | Cu | 相组成 |
|----|-------|------|------|-------|------|------|-------|---|
| a | 62.12 | 0.19 | 1.33 | 7.03 | 0.80 | 0.91 | 27.62 | β -Ti(s, s)+CuTi ₂ +FeTi |
| b | 70.43 | — | 1.55 | 5.21 | 0.49 | 0.54 | 21.78 | β -Ti(s, s)+CuTi ₂ +FeTi |
| c | 7.50 | 0.20 | — | 1.74 | 0.24 | — | 90.32 | Cu(s, s)+ τ_2 +Cu ₄ Ti |
| d | 39.92 | — | 1.78 | 14.87 | 1.46 | 3.20 | 38.77 | τ_2 +FeTi+Cu(s, s) |
| e | 47.44 | — | 1.19 | 26.83 | 3.72 | 4.29 | 16.53 | FeTi+CuTi+ τ_3 |
| f | 11.15 | 0.42 | — | 33.39 | 0.58 | 0.47 | 53.99 | Cu(s, s)+Fe(s, s)+Fe ₂ Ti |
| g | 17.81 | 0.25 | 0.92 | 64.22 | 0.87 | 0.69 | 15.24 | Fe(s, s)+Cu(s, s)+Fe ₂ Ti |

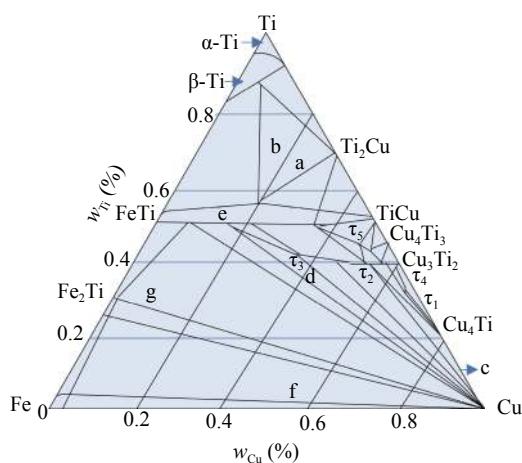


图 4 Fe-Ti-Cu 三元相图
Fig. 4 Fe-Ti-Cu ternary phase diagram

图 5 为 TA1/Q235B 对接接头的 XRD 分析结果, 可以看出, 焊缝主要由 Cu(s, s), Fe(s, s) 和 FeTi, Fe₂Ti, CuTi, τ_3 金属间化合物组成. XRD 谱图中未检测到 τ_2 和 β -Ti 相, 推测可能是由于其体积分数

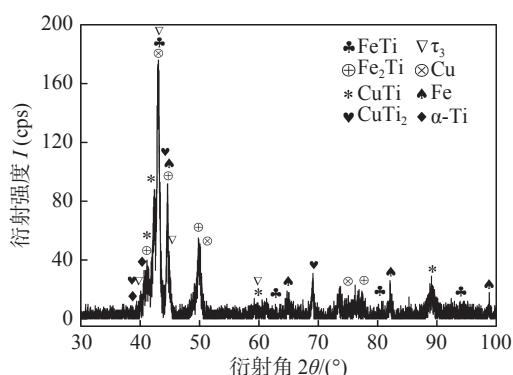


图 5 TA1/Q235B 对接接头 XRD 分析
Fig. 5 XRD analysis of TA1/Q235B butt-welded joints

较小所致.

2.2.2 TA1/Q235B 搭接接头

TA1/Q235B 搭接接头的组织分布如图 6 所示, 相应的 EDS 检测结果如表 3 所示. 从图 6a 接头宏观形貌可以看出, 焊缝与母材均熔合较好, 无焊接裂纹. 图 6b 为焊缝与 TA1 界面处的组织分布, 主要由浅灰色枝晶 i, 灰色 ii 和过渡带 iii 组成. 浅灰色枝晶 i 的化学成分 (Ti 67.53%, Fe 13.26%, Cu 14.06%) 处于 β -Ti+FeTi 包晶组织范围内. 灰色 ii 主要由 Ti 66.14%, Fe 3.24%, Cu 28.15% 组成, 相图成分向富 Cu 侧移动, 因此该区域主要由 β -Ti+FeTi+CuTi₂ 组成. 过渡带 iii 主要为 α -Ti. 图 6c 为焊缝组织分布, 主要由亮白色 iv 和深灰色 v 树枝晶构成. 根据 EDS 结果和 Fe-Ti-Cu 相图, 可知 iv 区域主要由 Cu 基固溶体, Cu₄Ti 和 τ_2 化合物组成; v 区域具有较高的 Cr, Co 和 Ni 含量 (Cr 7.79%, Co 6.54%, Ni 3.65%), 根据相关相图可知, Ti 将优先与以上元素发生反应, 接着才进行 Fe-Ti-Cu 反应. 最终, v 区主要由 Fe, Cu 基固溶体, FeTi, Fe₂Ti 和 Cr₂Ti, CoTi₂ 以及 NiTi₂ 化合物组成. 从图中还可以看出, 亮白色树枝晶 iv 具有和深灰色树枝晶 v 相当的体积分数, 说明焊缝中 Cu(s, s) 含量较高, 这将对改善焊缝的韧性起到重要作用. 图 6d 为焊缝与 Q235B 界面处组织分布, 主要由亮白色 vi 和深灰色 vii 组成. 根据其成分可知, vi 主要由 Cu(s, s)+Cu₄Ti+ τ_2 组成, 而 vii 主要由 Fe(s, s), Cu(s, s) 和少量 Fe₂Ti 组成. 搭接接头与 TA1 界面处的组织分布与前面对接接头类似, 均

主要由 β -Ti + FeTi + CuTi₂ 组织组成。两者焊缝区的组织分布存在差异。由于搭接接头的熔合比较对

接接头小, 导致焊缝中存在较多的 Cu(s, s), 从而起到改善接头性能的作用。

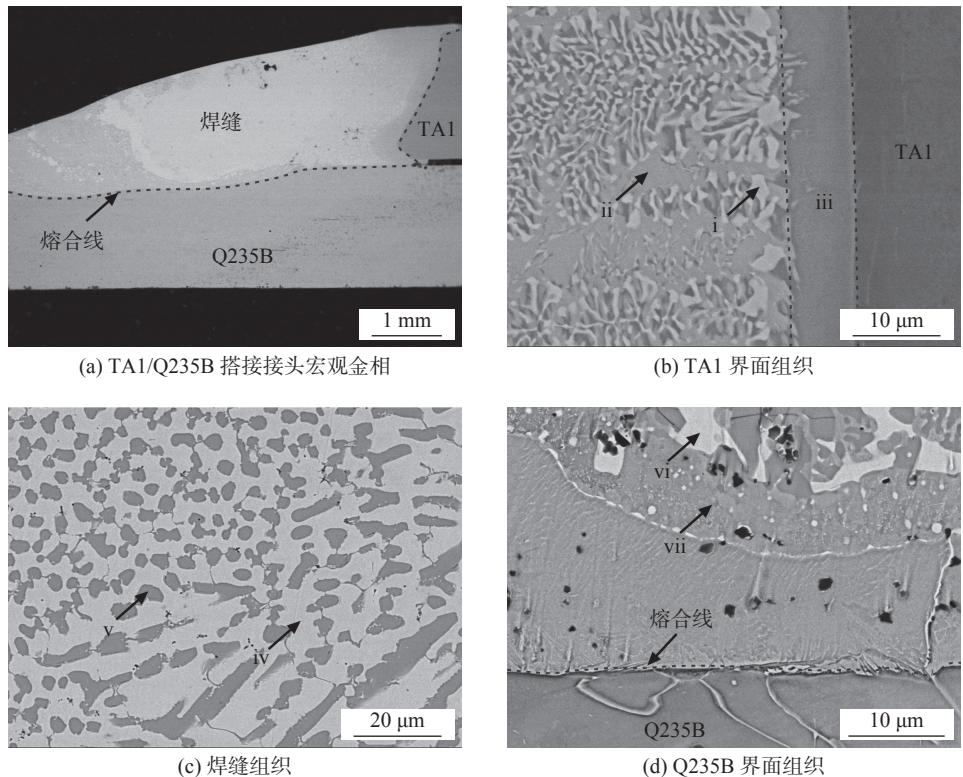


图 6 TA1/Q235B 搭接接头组织
Fig. 6 Microstructures of TA1/Q235B lap joints

表 3 TA1/Q235B 搭接接头 EDS 检测结果 (原子分数, %)
Table 3 EDS results of TA1/Q235B lap joints

| 位置 | Ti | Cr | Mn | Fe | Co | Ni | Cu | 相组成 |
|-----|-------|------|------|-------|------|------|-------|--|
| i | 67.53 | 2.19 | — | 13.26 | 1.49 | 1.47 | 14.06 | β -Ti(s, s)+FeTi |
| ii | 66.14 | 0.28 | 0.19 | 3.24 | 0.54 | 1.46 | 28.15 | β -Ti(s, s)+FeTi+CuTi ₂ |
| iii | 90.62 | 0.33 | 0.20 | 3.69 | 0.61 | 0.48 | 4.07 | α -Ti(s, s) |
| iv | 3.30 | — | — | 2.55 | 0.36 | 1.62 | 92.17 | Cu(s, s)+Cu ₄ Ti+ τ_2 |
| v | 24.16 | 7.79 | — | 54.21 | 6.54 | 3.65 | 3.65 | Cu(s, s)+FeTi+Fe ₂ Ti+Cr ₂ Ti+NiTi ₂ +CoTi ₂ |
| vi | 3.72 | 0.86 | 0.18 | 18.83 | 0.67 | 1.00 | 74.74 | Cu(s, s)+Cu ₄ Ti+ τ_2 |
| vii | 1.56 | 1.30 | 0.14 | 85.98 | 1.28 | 1.27 | 8.47 | Fe(s, s)+Cu(s, s)+Fe ₂ Ti |

图 7 为搭接接头 XRD 分析结果, 可以看出, 焊缝主要由 Cu(s, s), β -Ti, FeTi, Fe₂Ti, CuTi₂, Cu₄Ti, τ_2 , τ_3 组成。Cr₂Ti, CoTi₂ 以及 NiTi₂ 化合物由于其体积分数较小, 未能在 XRD 中检测到。

焊接接头显微硬度分布如图 8 所示。从图 8 中可以看出, 对接接头的平均硬度为 449 HV0.1, 最高硬度为 705 HV0.1, 位于焊缝与 Q235B 界面处。这与该处 FeTi, Fe₂Ti 脆性化合物的存在有关。搭接接头的平均硬度为 335 HV0.1, 最高硬度为 562 HV0.1, 位于焊缝与 TA1 界面处。该处存在 FeTi 金属间化

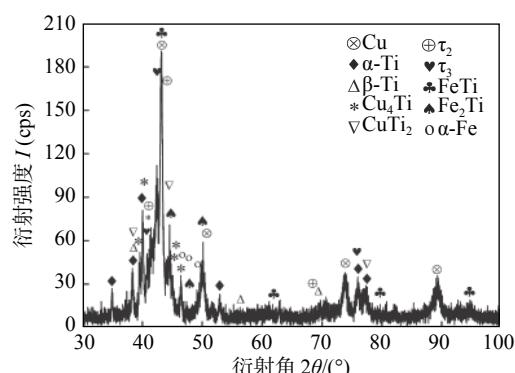


图 7 TA1/Q235B 搭接接头 XRD 分析
Fig. 7 XRD analysis of TA1/Q235B lap joints

合物, 导致硬度较高。由此可见, 接头设计对 TA1/Q235B 异质接头的组织和性能影响显著, 搭接接头具有较低的硬度分布和开裂倾向。

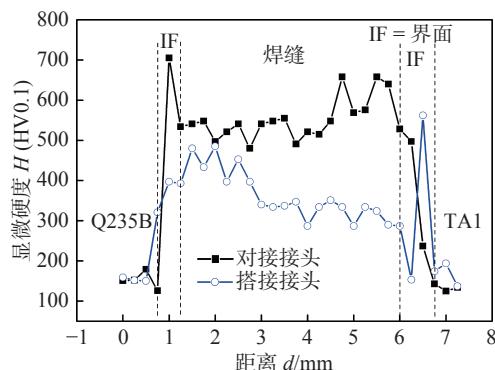


图 8 TA1/Q235B 接头截面硬度

Fig. 8 Microhardness of TA1/Q235B joints

3 结 论

(1) 采用 Cu-Cr-Co-Ni 药芯焊丝进行 TA1, Q235B 试板的 TIG 堆焊试验, 均得到了无缺陷的焊缝。TA1 堆焊焊缝主要由 α -Ti 和 CuTi, CuTi₂, NiTi₂, CoTi₂, Cr₂Ti 金属间化合物组成, Q235B 堆焊焊缝主要由富 Fe 和富 Cu 固溶体组成。

(2) TA1/Q235B 对接和搭接接头组织分布类似, 其中 TA1 界面均由 β -Ti, FeTi 和 CuTi₂ 化合物组成, Q235B 界面均由 Fe, Cu 基固溶体和 Fe₂Ti 化合物组成。对接焊缝主要由 Cu 基固溶体, CuTi, FeTi, Cu₄Ti, τ_2 和 τ_3 化合物组成, 而搭接焊缝主要由 Cu 基固溶体, τ_2 和 Cu₄Ti 化合物组成。搭接接头由于熔合比较小, 焊缝中 Cu(s, s) 含量较高。

(3) 搭接接头的平均硬度为 335 HV0.1, 最高硬度为 562 HV0.1, 位于 TA1 界面处; 对接接头的平均硬度为 449 HV0.1, 最高硬度为 705 HV0.1, 位于 Q235B 界面。

参考文献:

- [1] Tomashchuk I, Sallamand P, Andrzejewski H, et al. The formation of intermetallics in dissimilar Ti6Al4V/copper/AISI 316 L electron beam and Nd:YAG laser joints[J]. Intermetallics, 2011, 19(10): 1466 – 1473.
- [2] 王廷, 张秉刚, 陈国庆, 等. TA15 钛合金与不锈钢的电子束焊接 [J]. 焊接学报, 2010, 31(5): 53 – 56.

Wang Ting, Zhang Binggang, Chen Guoqing, et al. Electron beam welding of TA15 titanium alloy to 304 stainless steel[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2010, 31(5): 53 – 56.

- [3] Wang T , Zhang B , Feng J , et al. Effect of a copper filler metal on the microstructure and mechanical properties of electron beam welded titanium –stainless steel joint[J]. Materials Characterization, 2012, 73: 104 – 113.
- [4] Lee M K , Lee J G , Choi Y H , et al. Interlayer engineering for dissimilar bonding of titanium to stainless steel[J]. Materials Letters, 2010, 64: 1105 – 1108.
- [5] 王廷, 张秉刚, 张艳娇, 等. 采用不同结构 Cu/V 填充层的钛合金/不锈钢电子束焊接试验 [J]. 焊接学报, 2014, 35(8): 71 – 74.
- Wang Ting, Zhang Binggang, Zhang Yanjiao, et al. Experimental research on electron beam welding of titanium to stainless steel based on Cu/V filler metals with different shapes[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2014, 35(8): 71 – 74.
- [6] Wang T, Zhang B, Chen G. High strength electron beam welded titanium-stainless steel joint with V/Cu based composite filler metals[J]. Vacuum, 2013, 94(6): 41 – 47.
- [7] Chu Q, Zhang M, Li J. Experimental investigation of explosion-welded CP-Ti/Q345 bimetallic sheet filled with Cu/V based flux-cored wire[J]. Materials and Design, 2015, 67: 606 – 614.
- [8] He P, Zhang J, Zhou R, et al . Diffusion bonding technology of titanium alloy to stainless steel with Ni interlayer[J]. Materials Characterization, 1999, 43(5): 287 – 292.
- [9] Kundu S, Chatterjee S. Characterization of diffusion bonded joint between titanium and 304 stainless steel using a Ni interlayer[J]. Materials Characterization, 2008, 59(5): 631 – 637.
- [10] Dharmendra C, Rao KP, Wilden J, et al. Study on laser welding-brazing of zinc coated steel to aluminium alloy with a zinc based filler[J]. Materials Science and Engineering A, 2011, 528: 1497 – 1503.
- [11] Froes F H. Titanium: Physical metallurgy, processing and applications[M]. Ohio: ASM International, 2015.
- [12] Bo H, Duarte L I, Zhu W J, et al. Experimental study and thermodynamic assessment of the Cu-Fe-Ti system[J]. Calphad: Computer Coupling of Phase Diagrams and Thermochemistry, 2013, 40: 24 – 33.
- [13] Beek J A V, Kodentsov A A, Loo F J J V. Phase equilibria in the Cu-Fe-Ti system at 1123 K[J]. Journal of Alloys and Compounds, 1995, 217(1): 97 – 103.

第一作者简介:罗海龙, 男, 1982 年出生, 博士研究生。主要研究方向为异种金属焊接, 爆炸焊接。Email: luohailongaa@126.com

通信作者简介:张敏, 男, 教授。Email: zhmmn@xaut.edu.cn