

文章编号: 1004 - 0609(2004) 09 - 1569 - 06

铬青铜与双相不锈钢电子束焊接头组织及形成^①

张秉刚¹, 何景山¹, 冯吉才¹, 吴 林¹, 杨卫鹏², 朱春玲², 李宏伟¹

(1. 哈尔滨工业大学 现代焊接生产技术国家重点实验室, 哈尔滨 150001;

2. 西安航天发动机厂, 西安 710061)

摘 要: 对 QCr0.8 与 1Cr21Ni5Ti 的 2 mm 厚平板试件进行了等厚对中电子束焊接; 采用光学显微镜、扫描电镜能谱分析方法对接头区显微组织及成分进行了研究, 确定了显微组织构成; 根据电子束焊接的特点, 建立了 QCr0.8 与 1Cr21Ni5Ti 等厚对中电子束焊接接头形成的物理模型, 对接头不均匀组织的形成机制进行了探讨。结果表明: QCr0.8/1Cr21Ni5Ti 等厚对中电子束焊接接头显微组织形貌为组织及化学成分极不均匀的 Cu(Fe) + (α + ϵ) 的铸态混合组织, 其宏观组织可分为 3 个区域: 显微组织结构相同, 均为以 Cu(Fe) 为主, 内有一定数量不均匀弥散分布的 α + ϵ 相混合组织的焊缝左上部组织区及焊缝底部组织区; 以 α + ϵ 相为主, 内有少量弥散分布的 Cu(Fe) 颗粒混合组织的焊缝中部组织区; 接头组织的形成是由接头金属熔化及匙孔形成阶段, 接头凝固的初期阶段(析出 γ + ϵ 相, 并形成 3 个区域), 接头凝固的中期阶段(γ + ϵ 相结晶完成), 接头凝固的后期阶段(形成 Cu(Fe) 相, 焊缝完全变为固态), 接头凝固的最终阶段(元素扩散及 $\gamma \rightarrow \alpha$ 相变, 形成最终组织)联合作用的结果。

关键词: 铬青铜; 双相不锈钢; 电子束焊接; 组织形成

中图分类号: TG 401

文献标识码: A

Microstructures and formation of electron beam welding joint of QCr0.8 and 1Cr21Ni5Ti

ZHANG Bing-gang¹, HE Jing-shan¹, FENG Ji-cai¹, WU Lin¹,

YANG Wei-peng², ZHU Chun-ling², LI Hong-wei¹

(1. State Key Laboratory of Advanced Welding Production Technology,

Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China;

2. Xi'an Space Engine Factory, Xi'an 710061, China)

Abstract: The electron beam welding was made on 2 mmr thick Qcr0.8 and 1Cr21Ni5Ti. The microstructural characteristics and compositions were investigated by optical microscope and scanning electron microscope. The actual microstructural characteristics were identified. According to the characteristics of the electron beam welding, a physical model was built about electron beam welding joint fomatation mechanism on the equal thick Qcr0.8 and 1Cr21Ni5Ti. The formation mechanism of unhomogeneous joint structure was discussed. The results show that microstructure of QCr0.8/1Cr21Ni5Ti joint consists of Cu(Fe) + (α + ϵ) casting mixed structures, which are very unhomogeneous in microstructure and chemical composition. The macrostructure can be divided into three parts. There are alike microstructure zones at the bottom of the joint and top near QCr0.8, which consist of Cu(Fe) dispersed of some discrete unhomogeneous α + ϵ . There is α + ϵ zone with little discrete Cu(Fe) at the middle of the joint. The joint microstructure is formed through five phases: the metal melting and keyhole forming phase, the initial solidifying phase(γ + ϵ is separated out and three zones are shaped in this phase), the medial solidifying phase(γ + ϵ crystallization), the upper solidifying phase(Cu(Fe) is formed and joint is solidified) and the terminative solidifying phase(elements diffusing, $\gamma \rightarrow \alpha$ phase transformation, final microstructure formed).

① 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50325517)

收稿日期: 2004 - 03 - 17; 修订日期: 2004 - 06 - 17

作者简介: 张秉刚(1971 -), 男, 博士研究生。

通讯作者: 张秉刚, 电话: 0451 - 86417625, 0451 - 86415537; E-mail: zhangbgcnhlj@yahoo.com.cn

Key words: QCr0.8; 1Cr21Ni5Ti; electron beam welding; microstructure formation

双相不锈钢具有优异的力学性能及耐腐蚀性能,特别是具有良好的抗应力腐蚀能力,因此已广泛应用于石油、化工、原子能工程及航空航天发动机制造等领域^[1, 2]。而铬青铜是一种耐蚀性较好、热导率较高的材料,微量元素 Cr 的加入起到了细化晶粒、进一步提高强度的双重作用^[3, 4]。

目前,新一代航天发动机中大量采用新材料及异种材料的连接结构,以充分发挥材料各自的性能优势或结构的特殊用途,从而保证发动机的整体性能^[5, 6]。铬青铜与双相不锈钢 2 种材料的有效组合同时满足了推力室的冷却及高强要求,从而涉及到这 2 种合金的焊接。由于铜钢 2 种材料在化学及热物理性能等方面的显著差异,使其焊接冶金过程极其复杂,采用通常的熔化焊方法易于在接头处萌生气孔、裂纹及形成脆性相等缺陷,同时在焊接区会形成较大的应力和变形,难以实现其有效高质连接^[7, 8]。一些研究者采用钎焊、扩散焊、摩擦焊等非熔化焊方法避免了上述不足而获得了铜合金及钢的良好接头^[9~11],但非熔化焊连接方法大多受到接头型式及服役条件的限制,在诸如航空发动机等高温工作条件下的复杂接头组件制造中又具有局限性。电子束焊接是一种高能量密度的焊接方法,具有加热速度快、焊接热影响区及变形小、参数稳定再现性好、易于控制及适于焊接难熔及异种金属等一系列的优点^[12, 13]。因此,对铬青铜与不锈钢进行电子束焊接的实验研究,分析异种材料电子束焊接接头的显微组织状态,探讨其形成机制,可为寻求其合理的焊接工艺,实现其可靠连接提供理论基础

和实验依据。

1 实验

1.1 材料

实验用铬青铜及双相不锈钢的化学成分及力学性能列于表 1^[14, 15]。

1.2 试件装夹和施焊

先用剪板机将厚度为 2 mm 的 QCr0.8 与 1Cr21Ni5Ti 板材切割成长 100 mm、宽 45 mm 的长方形试件,然后将试件待焊长边端面用 400[#] 直至 1200[#] 砂纸逐级打磨抛光,再先后用无水乙醇和丙酮溶液清洗待焊端面,以清除待焊面上残留的水份和油污。

实验用焊接设备为法国 TECHMETA 公司生产的 MEDARD45 型真空电子束焊机,焊机最大加速电压 60 kV,最大功率 6 kW,本实验所使用的阴极直径为 2.0 mm。将清理好的铬青铜与双相不锈钢试件沿长边对接放入焊机真空室工作台上的自制夹具中紧贴压靠,使其对接缝间隙最大不超过 0.25 mm,然后在真空度为 5.4×10^{-2} Pa,固定加速电压 60 kV 不变,改变电子束束流 I_b 、焊接速度 v 及焦点位置 I_f 的参数匹配情况下,对应对接接头中线下束进行施焊而获得一系列的焊接试件。

1.3 接头组织结构分析

在接头区用电火花将试件切割成尺寸为 10 mm

表 1 QCr0.8 与 1Cr21Ni5Ti 化学成分及力学性能

Table 1 Chemical composition and mechanical properties of base materials

Base material	Chemical composition mass fraction/ %	Ultimate strength/ MPa	Yield strength/ MPa	Elongation/ %
QCr0.8	Cr= 0.4~ 0.7; Fe ≤0.05; Ni ≤0.03 Zn ≤0.015; Si ≤0.002; Mg ≤0.002; Pb ≤0.005; Others ≤0.80	400		≥25
1Cr21Ni5Ti	C= 0.09~ 0.14; Mn= 0.80; Si= 0.80; S= 0.030; P= 0.035; Cr= 20~ 22; Ni= 4.80~ 5.80; Ti= $5 \times (C - 0.02) - 0.80$	600	350	20

× 5 mm × 2 mm 的试样块制成金相试样, 然后用金相砂纸打磨直至 1200[#] 后, 采用 Cr₂O₃ 抛光液抛光。将抛光好的试样用 FeCl₃ 盐酸水溶液腐蚀直至显出清晰的接头组织形貌为止, 采用 PMG3 OLYMPOS 光学显微镜对其接头区进行观察。随后, 在 HX-1000 标准显微硬度计上对应接头金相组织区制作定位标识点, 并利用 S-570 扫描电子显微镜(SEM) 对重新抛光后的接头依据组织区定位点进行局部区域能谱分析, 以定量分析其成分。

2 结果与讨论

2.1 接头区组织结构

图 1 所示为 QCr0.8 与 1Cr21Ni5Ti 电子束焊接头典型组织形貌。由图 1 的接头区上下部组织形貌可以看出, 焊缝的横截面由下至上大致可以分为 3 个区域: 靠近焊缝底部的是一较亮的灰白色区域, 在其中分布着一些颜色较暗的小岛状区; 由此区域向上一一直延伸到焊缝中部靠钢侧, 为一片较暗的灰黑色区域, 其中弥散分布着灰白色的圆形小颗

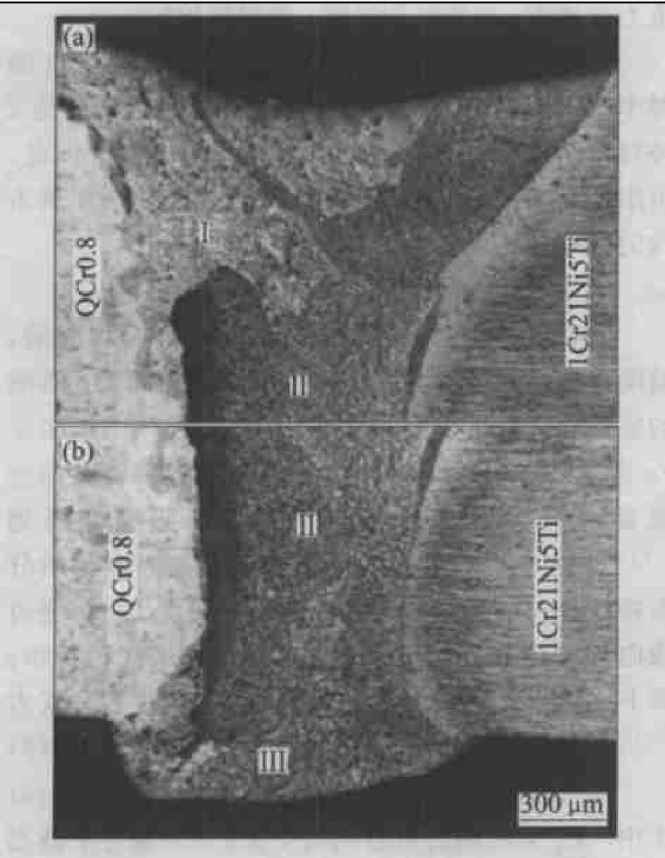


图 1 QCr0.8/1Cr21Ni5Ti 电子束焊接头典型组织形貌

Fig. 1 Typical microstructures of electron beam welding joint of QCr0.8/1Cr21Ni5Ti
(a) —Upper part of weld;
(b) —Middle and underside part of weld

粒; 焊缝上部靠铜侧又出现一灰白色区域, 并有由焊缝上部靠钢侧的灰黑色区域组织的条状富集区延伸到其中。在此把靠近焊缝上部的灰白色区域称为 I 区, 焊缝中部的整个灰黑色区域统称为 II 区, 靠近焊缝底部的灰白色区域称为 III 区。在电子束加速电压 60 kV 不变时, 由改变束流、聚焦电流及焊接速度所得到的一系列试样接头显微组织形貌的分析表明, 无论焊接规范参数如何变化, 接头区宏观组织形貌均大致分为如图 1 所示的 3 个区域。进一步的观察可知, I 区和 III 区分别位于焊缝顶部和底部, 其组织形貌相近; II 区位于焊缝的中部, 组织形态以树枝晶为主。该 3 区大小和分布形态随着焊接规范的变化而变化, 但其出现的基本位置关系和组织形貌未见改变, 也无旧区消失和新区出现的情况。

为了进一步明确上述 3 区的具体组织成分构成, 对接头区进行了能谱分析。通过表 2 的能谱分析结果, 结合 Fe-Cu 相图和图 2 的局部区域微观放大后的组织形貌特征, 可以看出: 焊缝左上部形成的 I 区及焊缝底部的 III 区显微组织结构相同, 均为以 Cu(Fe) 为主, 内有一定数量不均匀弥散分布的 $\alpha + \epsilon$ 相的混合组织, II 区为以 $\alpha + \epsilon$ 为主, 内有少量弥散分布的 Cu(Fe) 颗粒混合组织。总之, QCr0.8/1Cr21Ni5Ti 等厚对中焊接接头显微组织形貌为宏观组织及化学成分极不均匀的 Cu(Fe) + ($\alpha + \epsilon$) 的铸态混合组织。

表 2 QCr0.8/1Cr21Ni5Ti 等厚对中焊接头能谱分析结果

Table 2 EDS results of QCr0.8/1Cr21Ni5Ti joint(mole fraction, %)

Testing region	Fe	Cr	Ni	Cu
I	6.171 9	3.966 7	1.775 5	88.085 9
II	53.789 6	17.247 9	3.700 5	25.262 0
III	10.669 8	5.834 7	1.841 4	81.654 2

2.2 接头组织形成

为了揭示 QCr0.8 与 1Cr21Ni5Ti 等厚对中焊接头不均匀组织结构的形成机制, 根据 QCr0.8 与 1Cr21Ni5Ti 的各自物化性能及结晶反应特点, 结合 Fe-Cu 相图、电子束焊接深穿机理及焊接冶金理论对上述接头组织结构的形成过程进行了分析。

电子束焊作为一种高效高能量密度的焊接方法, 通常焊接速度较快(本文采用的焊接速度为 $v = 1 \text{ m/min}$ 左右), 因此接头金属加热形成熔池的过

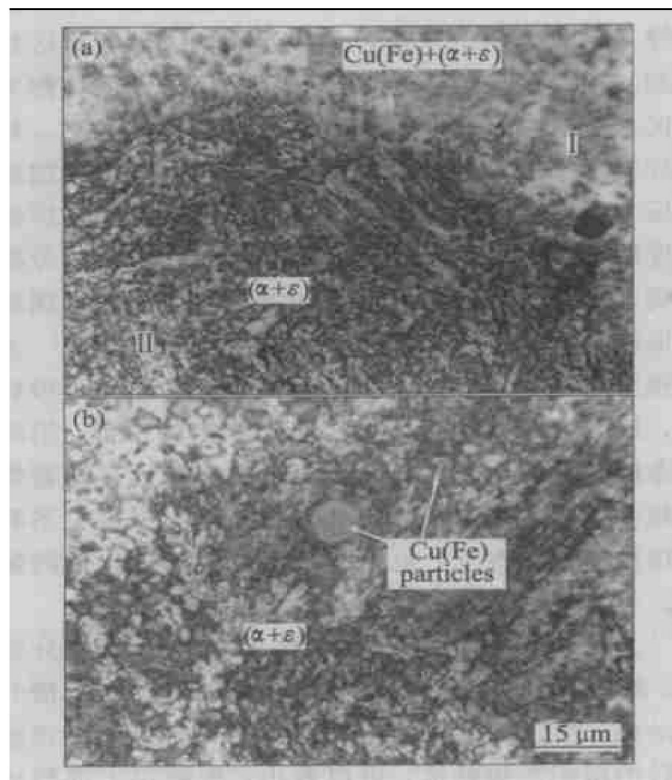


图 2 焊缝局部区域典型微观组织

Fig. 2 Typical microstructures of local joint of QCr0.8/1Cr21Ni5Ti

(a) —Interphase of I and II region;
(b) —II region

程和冷却过程都非常迅速, 导致电子束焊形成的熔池存在时间很短。组织成分均匀一致的异种材料焊接熔池的形成是 2 种熔化金属对流与原子互扩散充分作用的结果, 这是需要一定时间来完成的一个过程。因此电弧焊等常用的熔化焊方法在焊接异种材料时往往可以得到组织成分较均匀的焊接接头。与电弧焊等通常的熔化焊相比, 熔点、密度等热物理性能有显著差异的 QCr0.8 与 1Cr21Ni5Ti 异种材料电子束焊接熔池金属来不及充分混合而形成成分均匀化的高温液态合金熔体就已经开始结晶凝固, 这样在电子束焊接熔池形成到临界凝固状态的极短时间内就形成了未充分混合均匀的 Fe 合金及 Cu 合金熔体, 二者比例随焊接参数的变化而改变。同时, 因高温下液态 Cu 的流动性及 Cu 原子活性均高于液态 Fe, 因此所形成的 Fe 合金溶液的含 Cu 量要高于 Cu 合金溶液中 Fe 含量。

由以上分析, 把 QCr0.8 与 1Cr21Ni5Ti 的等厚对中电子束焊接头形成过程大致分为如下 5 个阶段:

1) 接头区金属熔化及匙孔形成阶段

高能电子束撞击到工件表面对接中心线处, 电

子的动能转变为热能, 使金属迅速熔化和蒸发。在高压金属蒸汽的作用下熔化的金属被排开, 在金属表面形成一下凹区, 露出新的固态金属表面, 后续电子束继续作用新的金属表面而形成新的下凹区, 电子束重复上述过程不断连续作用的结果便在被焊工件上钻出一个钥匙形小孔, 称为“匙孔”, 熔化金属被排斥在匙孔的四壁上。根据电子束熔池力学平衡条件, 要使熔池形成稳定匙孔, 必须满足下式^[16]:

$$p_1 + p_2 \geq p_3 + p_4 \quad (1)$$

式中 p_1 为电子束流压力; p_2 为金属蒸汽的反作用力; p_3 为液态金属的表面张力; p_4 为液态金属的静压力。

由于电子的质量非常小, 据估算 p_1 一般为 300 Pa 左右, 而 p_2 随着金属蒸发速度增加而直线上升, 使得 p_2 远远大于 p_1 , 比值约高达 $10^4:1$ ^[16]。因此, p_1 很小, 可忽略不计, 上式变为 $p_2 \geq p_3 + p_4$, 或为

$$p_2 \geq \frac{2\sigma}{r} + \rho gh \quad (2)$$

式中 σ 为表面张力系数; r 为匙孔底部半径; g 为重力加速度; h 为匙孔深度, 即焊缝熔深。

如图 3(a) 所示, 在 QCr0.8 与 1Cr21Ni5Ti 的对中电子束焊中, 满足式 (2) 的液态熔池金属是 2 种材料熔化后相互混合的非均匀合金熔体。因此, 由图 1(a) 可见, 结晶凝固后的焊缝组织出现宏观不均匀分布。

2) 接头凝固的初期阶段

随着电子束向前移动, 匙孔被液态金属充满, 温度开始降低, 各元素原子的活性逐渐降低, 熔池的液态金属趋于稳定。由于 Cu 合金熔体的密度比 Fe 合金熔体大, 在重力作用下 Cu 合金液态熔池金属要向焊缝底部沉积。当熔池下部温度降到 1500℃ 左右时, 根据电子束焊接熔池温度场的分布特性, Fe 合金液态熔池金属由下至上、由焊缝边缘向焊缝中心开始逐渐结晶析出 $\gamma + \epsilon$ 双相组织。因 Fe 合金熔体含 Cu 量较高, 其结晶反应方程式为



式中 L_1 为结晶时沿液相线变化的 Fe 基合金液态熔体; γ_1 及 ϵ_1 分别为凝固时由液相转变成的 γ 和 ϵ 相的一次结晶组织。

根据凝固结晶理论, 结晶过程中结晶区附近的温度应始终为结晶温度, 当结晶结束后温度再继续下降。由于 Cu 合金熔点较低, 这时 Cu 合金熔体尚

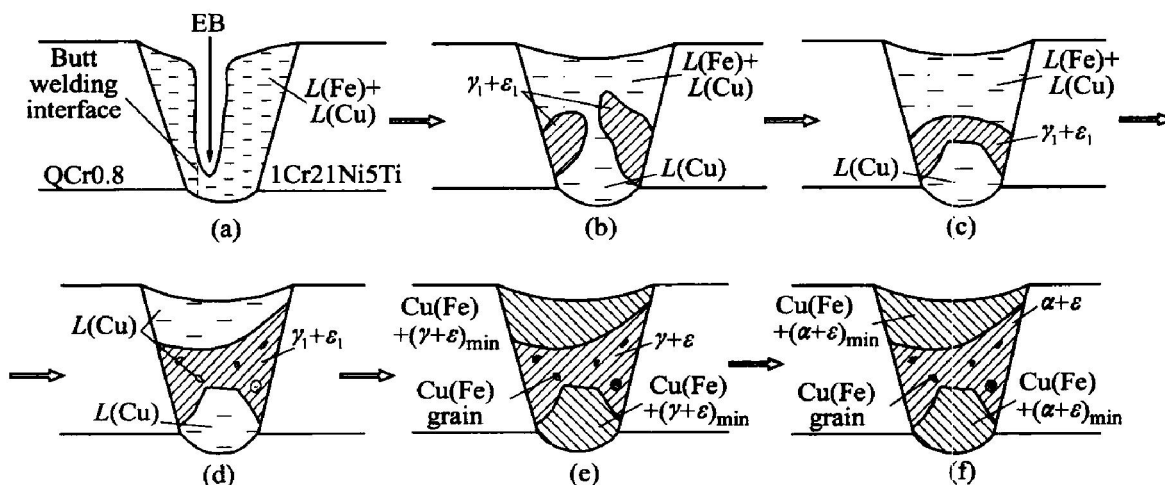


图 3 等厚对中电子束焊接头形成过程

Fig. 3 Physical model about forming mechanism of electron beam welding on centre of butt joint

未开始凝固仍处于液态, 所以在 Fe 合金液态熔池金属结晶过程中 Cu 合金液态熔池金属继续向熔池底部沉积, Fe 的固溶体不断结晶析出促使焊缝下部边缘 Fe 的固溶体与两侧母材不断结合。随着时间的推移, 焊缝中心区的温度也由下至上不断降到结晶温度, 在这种变化规律温度场的作用下, 不断凝固的 Fe 的固溶体的形状就像一个中心孔不断缩小的“倒放的漏斗”一样, 此时 Cu 合金液态熔池金属通过此“倒漏斗”中部的未凝固区继续向下沉积, 如图 3(b) 所示。随着 Fe 继续结晶, “倒漏斗”的中心孔将不断缩小, 当 Fe 的固溶体在焊缝下部的结晶完成时, “倒漏斗”的中心孔完全闭合, 如图 3(c) 所示。这时 Fe 的固溶体组织把焊缝的液态组织分隔成上下 2 部分, Cu 合金液态熔池金属不能再继续向下沉积, 原来已沉积的被隔离在焊缝底部。

3) 接头凝固的中期阶段

焊缝温度继续降低, $\gamma_1 + \epsilon_1$ 相继续向上不断生长。由于焊缝上部温度较高, Fe 合金熔体在结晶时放出结晶潜热及 Cu 合金的熔点较低等综合因素的作用, 此时 Fe 的固溶体区上部仍为液态的 Cu 合金熔池金属, 并随 $\gamma_1 + \epsilon_1$ 相结晶生长被不断向上推移。由以上分析可知, 焊缝两侧热影响区附近比焊缝中部散热要快得多, 因此其液/固界面前沿的过冷度亦高于焊缝中部。这样, 在结晶驱动力的作用下, $\gamma_1 + \epsilon_1$ 组织在两侧热影响区附近的长大速度比焊缝中部要快, 因此继续结晶的结果使上部 $\gamma_1 + \epsilon_1$ 结晶组织呈现出两侧高而中间低的“山谷”形状。当 Fe 合金熔体完全结晶后, II 区形成, 同时把结晶区上部的 Cu 合金液态熔池金属推到焊缝的顶部, 如

图 3(d) 所示。此阶段的结晶反应方程式仍然按式 (3) 及式 (4) 进行。

4) 接头凝固的后期阶段

因为焊缝下部温度低于上部温度, 焊缝底部的 Cu 合金液态熔池金属区域的温度要比上部先降到其结晶温度, 此时该区域沿液相线变化的 Cu 合金液态熔池金属开始凝固结晶析出以 Fe 在 Cu 中的固溶体相为主, 内含少量弥散分布的 $\gamma + \epsilon$ 相组织。其结晶反应方程式为



当焊缝 I 区的温度也降到其结晶温度时, 结晶过程同上。同时, II 区中的一次结晶组织按式 (8) 发生固溶转变, 从而使其 γ 及 ϵ 相的体积分数发生改变。



当焊缝上部的 Cu 合金熔体结晶完成后, 整个焊缝金属的结晶过程结束, 焊缝完全成为固态, 如图 3(e) 所示。

5) 接头凝固的最终阶段

焊缝完全变为固态后温度继续下降, 各元素原子之间还要继续进行相互扩散及相变。当焊缝温度降到 912850 °C 时, γ 相要向 α 相转变, 由面心立方晶格转变为体心立方晶格, 如图 3(f) 所示。反应式为



这样, 接头在室温时形成最终的二次焊缝组织, 即 I 区和 III 区为 Cu(Fe) 和少量 ($\alpha + \epsilon$) 组织, II

区为($\alpha + \epsilon$)相。在金相照片中观察到II区中有少量不均匀弥散Cu(Fe)颗粒,这可能是由于液态时流动性良好的Cu合金在金属蒸汽爆破作用下溅入半凝固状态的II区所致。

3 结论

1) QCr0.8/1Cr21Ni5Ti等厚对中电子束焊接接头显微组织形貌为组织及化学成分极不均匀的Cu(Fe) + ($\alpha + \epsilon$)的铸态混合组织,其宏观组织可分为3个区域:显微组织结构相同,均为以Cu(Fe)为主,内有一定数量不均匀离散分布的 $\alpha + \epsilon$ 相混合组织的焊缝左上部组织区及焊缝底部组织区;以 $\alpha + \epsilon$ 为主,内有少量弥散分布的Cu(Fe)颗粒混合组织的焊缝中部组织区。

2) QCr0.8/1Cr21Ni5Ti等厚对中焊接接头的形成过程可分为5个阶段:接头金属熔化及匙孔形成阶段(熔池为两侧母材熔化后的非均匀液态合金);接头凝固的初期阶段(析出 $\gamma + \epsilon$ 相,并形成3个区域);接头凝固的中期阶段($\gamma + \epsilon$ 相结晶完成);接头凝固的后期阶段(形成Cu(Fe)相,焊缝完全变为固态);接头凝固的最终阶段(元素扩散及 $\gamma \rightarrow \alpha$ 相变,形成最终组织)。

3) QCr0.8与1Cr21Ni5Ti 2种材料的显著物理及化学性能差异,电子束焊接的特点是形成其组织成分非均匀化接头的主要原因。

REFERENCES

- [1] Francis R. Role of duplex stainless steel for downhole tubulars [A]. Proceedings - Annual Offshore Technology Conference [C]. USA: Offshore Technology Conference, 1993. 577 - 585.
- [2] Lagneborg R. Steel development, review and prospects for the future [J]. Scandinavian Journal of Metallurgy, 1997, 26 (6): 255 - 265.
- [3] Fridlyanskij R M, Izmajlov V A, Orlov L M, et al. Recent flow sheets of smelting chromium containing bronzes [J]. Liteinoe Proizvodstvo, 1995, 4 - 5: 64 - 68.
- [4] Grzegorzewicz T, Kuznicka B, Krajczyk L. Modifying effect of zirconium on an aluminum chromium bronze [J]. Materials Research and Advanced Techniques, 2000, 91 (6): 489 - 493.
- [5] Geikin V A, Karasev B E, Logunov A V. Trends in the application of welding to aircraft engine construction [J]. Welding Research Abroad, 1995, 41 (5): 21 - 22.
- [6] Berglund D, Alberg H, Runnemalm H. Simulation of welding and stress relief heat treatment of an aero engine component [J]. Finite Elements in Analysis and Design, 2003, 39 (9): 865 - 881.
- [7] 刘中青, 邸 斌. 异种材料的焊接 [M]. 北京: 科学出版社, 1990. 12.
LIU Zhong-qing, DI Bin. Welding of Dissimilar Materials [M]. Beijing: Science Press, 1990. 12.
- [8] 何康生, 曹雄夫. 异种金属焊接 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1986. 10.
HE Kang-sheng, CHAO Xiong-fu. Welding of Dissimilar Metals [M]. Beijing: Mechanical Industry Press, 1986. 10.
- [9] YU Zhi-shui, WANG Feng-jiang, LI Xiao-qun, et al. Diffusion bonding of copper alloy to stainless steel with Ni and Cu interlayer [J]. Trans Nonferrous Met Soc China, 2000, 10 (1): 88 - 91.
- [10] Sahin A Z, Yibas B S, Ahmed M, et al. Analysis of the friction welding process in relation to the welding of copper and steel bars [J]. Journal of Materials Processing Technology, 1998, 82 (1 - 3): 127 - 136.
- [11] Wittke K, Bleul E. Furnace brazing of copper-steel joints with silver brazing alloys on refrigeration compressors [J]. Schweissen und Schneiden, 1991, 43 (7): 148 - 150.
- [12] College R R. Electron beam welding [J]. Tooling & Production, 1974, 6: 66 - 67.
- [13] Sun Z, Karppi R. The application of electron beam welding for the joining of dissimilar metals: an overview [J]. Journal of Materials Technology, 1996, 59: 257 - 267.
- [14] 任家烈, 吴爱萍. 先进材料的连接 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2000. 6.
REN Jiar-lie, WU Ai-pin. Joining of Advanced Materials [M]. Beijing: Mechanical Industry Press, 2000. 6.
- [15] 森永卓一. 铜及铜合金 [M]. 金宪真译. 北京: 国防工业出版社, 1963. 5.
Shen Y Z Y. Copper and Copper Alloy [M]. Jin X Z tran. Beijing: National Defensive Industry Press, 1963. 5.
- [16] 王之康, 高永华. 真空电子束焊接设备及工艺 [M]. 北京: 原子能出版社, 1990. 9.
WANG Zhi-kang, GAO Yong-hua. Facility and Technology of Electron Beam Welding in Vacuum [M]. Beijing: Atomic Energy Press, 1990. 9.

(编辑 李向群)