

激光焊接异种钢组织及显微硬度分析

尹燕¹, 康平¹, 路超², 张圆¹, 张瑞华^{2,3}

(1. 兰州理工大学, 省部共建有色金属先进加工与再利用国家重点实验室, 兰州, 730050;
2. 钢铁研究总院, 北京, 100081; 3. 阳江市五金刀剪产业技术研究院, 阳江, 529533)

摘要: 采用激光摆动焊接方法焊接异种钢, 利用 JMATPro 软件计算了母材 3Cr13, VG10 的平衡相图, 通过 XRD, SEM, EPMA 等技术分别对焊缝、熔合区、热影响区的相组成和显微组织进行了分析, 测定了焊接接头的显微硬度分布. 试验结果表明, 焊缝主要为 α 相和碳化物 M_7C_3 ; 从熔合线到焊缝中心, 组织由平面晶逐渐变为胞状晶、胞状树枝晶、树枝状晶、柱状晶、等轴晶. 焊缝组织存在显微偏析, 其中 C, Cr 元素在晶界富集, Fe 元素在晶内富集, 同时在晶界处有条棒状的 M_7C_3 析出. 熔合线附近的母材处有 C 迁移现象, 其中 3Cr13 侧母材处有类针状马氏体组织产生, VG10 侧熔合区存在非对流混合区, 在该位置有块状、岛状组织嵌入母材, 且在该组织上有片层状的碳化物生成. 熔合线两侧的母材硬度值最大, 焊缝区硬度变化较小, 热影响区硬度随着远离焊缝中心距离的增加而逐渐减少.

关键词: 激光焊接; 异种钢; 显微组织; 显微硬度

中图分类号: TG 456.7 **文献标识码:** A **doi:** 10.12073/j.hjxb.20191227002

0 序言

不同成分的材料具有不同的使用性能, 将异种材料焊接在一起, 组合后的构件可以充分发挥良好的综合性能, 同时节约生产成本. 其中, 异种钢材的焊接已经在天然气、石油化工、发电工程、核工业等领域得到了广泛的应用^[1-5]. 激光焊接技术是 20 世纪中期发展起来的一种高精密焊接技术, 它具有高能量密度、可聚焦、深穿透、高效率、高精度、适应性强等优点而受到越来越多的重视. 激光焊接已被公认为最具吸引力的焊接技术之一, 并已被应用于各种金属的焊接^[6-7].

VG10 钢具有优良的强度、耐腐蚀、耐磨损等性能, 通常被用于制作高性能的刀具^[8]. 3Cr13 不锈钢是传统的厨刀制作材料, 锋利度和耐磨性很难满足高性能刀具的要求^[9]. 通过激光焊接技术将高性能刀具材料 VG10 焊接在普通刀具材料 3Cr13 上作为刃口, 这种方法不仅提高了刀具性能, 同时极

大的降低了刀具生产成本.

采用激光焊接 VG10 与 3Cr13, 测试分析了焊缝组织形态变化、焊缝区元素分布及焊接接头显微硬度变化, 以期为该异种钢的激光焊接组合应用提供一定的理论与数据支撑.

1 试验方法

用摆动激光焊接的方式将 VG10 不锈钢刀条焊接在 3Cr13 的刀体上, 刀体与刀条厚度均为 2.8 mm. 其中 3Cr13 和 VG10 母材成分分别如表 1 和表 2 所示. 试验采用德国 TRUDISK 4002 碟片激光器, 波长 1 030 nm、输出功率 80 ~ 4 000 W. 使用日本 FANUC R-30iB Mate 焊接机器人控制激光焊接头的移动. 焊接前将两种母材对接部位用砂纸打磨干净, 同时用酒精擦拭, 去除油污. 通过前期试验, 得到较好的激光摆动焊接工艺参数, 如表 3 所示.

垂直焊缝将焊接接头部位加工成长和宽都为 10 mm 的金相试样, 利用 Axio Scope A1 光学显微镜、QUANTA FE 450 扫描电子显微镜分析焊缝组织及成分. 使用 EPMA-1600 电子探针分析仪对焊接接头部分区域进行线分析. 将焊接试样沿焊缝中部切开, 采用 X 射线衍射仪对焊缝区进行相分析. 运用 HDX-1000 型显微硬度计测量焊接接头显微

收稿日期: 2019 - 12 - 27

基金项目: 阳江市五金刀剪产业高端制造装备及材料开发 (51022 4133196); 阳江市高功率激光应用实验室有限公司支持粤东西北新型研发机构建设 (809099997119); 增材制造粉末真空雾化及设备研发 (2017003); 刀刃激光熔覆增材制造工艺开发 (2017036); 海上风电厚板高功率激光焊接技术开发及应用 (SDZX2019038).

表 1 3Cr13 的化学成分 (质量分数, %)
Table 1 Chemical composition of 3Cr13

C	Si	Mn	Cr	Ni	S	P	Fe
0.29	0.37	0.37	13.8	0.12	0.01	0.02	余量

表 2 VG10 的化学成分 (质量分数, %)
Table 2 Chemical composition of VG10

C	Si	Co	Mo	Mn	V	Cr	Ni	S	P	Fe
0.98	0.41	1.1	0.98	0.41	0.28	14.92	0.32	< 0.01	0.02	余量

表 3 激光焊接工艺参数
Table 3 Parameters of laser welding

激光功率 P/W	焊接速度 $v/(mm \cdot s^{-1})$	离焦量 $\Delta f/mm$	保护气流量 $Q/(L \cdot min^{-1})$	摆动频率/Hz	摆动幅度 A/mm
3 750	43	+2	20	200	0.3

硬度分布情况, 加载载荷为 1.96 N, 加载时间为 10 s. 沿焊缝截面方向由焊缝中部向焊缝两侧母材进行测量, 每隔 0.05 mm 测量一个点, 直至母材区域硬度值不再变化.

JMATPro 软件拥有强大的热力学计算能力, 在热力学平衡相图的计算中应用较广^[10-11]. 试验采用 JMATPro 软件计算两种母材平衡相与温度的关系, 为后期试验结果分析提供参考.

2 结果与分析

2.1 JMATPro 相图模拟

利用 JMATPro7.0 软件计算两种母材的平衡相与温度的关系图, 设定温度区间为 200 ~ 1 500 °C, 步长为 5. 计算结果如图 1 所示. 其中图 1a 为 VG10 母材, 图 1b 为 3Cr13 母材.

计算结果显示, VG10 在 1 405 °C 以上全为液相, 温度降低到 1 405 °C 以下时开始从液相中结晶出奥氏体 γ 相, 随着温度的降低, γ 相含量逐渐增加, 当温度为 1 245 °C 时全为固相, γ 相含量达到最大, 碳化物 M_7C_3 开始析出. 1 091 °C 时在 γ 相中开始析出碳化物 $M_{23}C_6$, 同时碳化物 M_7C_3 开始溶解, 1 036 °C 时溶解完成. 温度达到 812 °C, γ 相开始转化为铁素体 α 相. 室温下 VG10 钢为 α 相、 $M_{23}C_6$ 以及少量的 $M(C/N)$. 3Cr13 在 1 470 °C 开始从液相中结晶出 δ 相, 随着温度的降低, δ 相含量逐渐增加, 当温度降至 1 389 °C 时, δ 相和剩余液相开始转变为奥氏体 γ 相, 在 830 °C 时, α 相开始形成, 温度

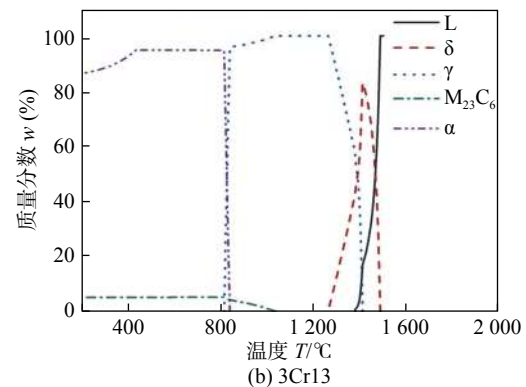
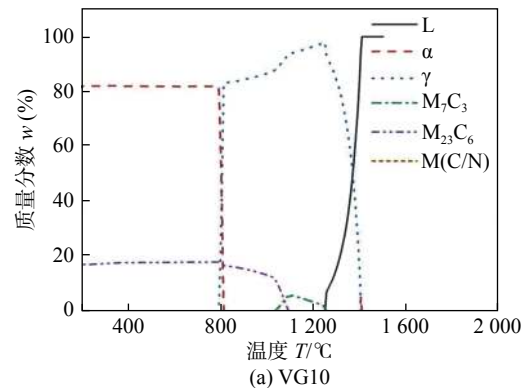


图 1 母材平衡相与温度的关系

Fig. 1 Relationship between precipitated phase and temperature of base metal. (a) VG10; (b) 3Cr13

继续下降, 在 755 °C 时, γ 相完全转化为 α 相. 温度降低的过程中还有其它相产生, 在 1 060 °C 时, 从 γ 相中析出 $M_{23}C_6$, 其含量在 γ 相完全转化为 α 相后基本保持不变.

2.2 焊接接头组织分析

2.2.1 XRD 试验

图 2 所示分别为 VG10, 3Cr13 母材及焊缝区域

的 XRD 试验结果. 母材基体相为 α -Fe, 其中 VG10 有 $M_{23}C_6$ 衍射峰出现, 但在 3Cr13 母材中并未检测出. 焊接后的焊缝区域基体相为 α -Fe, 同时有 M_7C_3 的衍射峰出现.

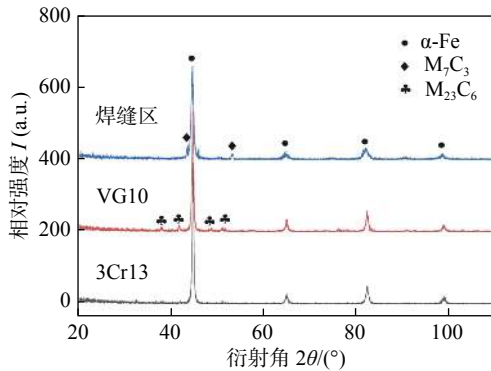


图 2 不同位置的 XRD 图谱

Fig. 2 XRD patterns of different zone of the joints

通过 JMATPro 计算结果发现, M_7C_3 在温度下降时会逐渐转化为更稳定的 $M_{23}C_6$. 焊缝区是由两个母材熔化混合后形成, 因此在焊缝凝固过程中, 在元素化学成分上有条件生成 M_7C_3 . 而激光能量密度高, 焊接速度快, 焊缝熔池凝固时间极短. 因此在实际过程中, M_7C_3 转变为 $M_{23}C_6$ 的条件难以达到, 故在焊缝中检测出 M_7C_3 , 而未检测到 $M_{23}C_6$.

母材的平衡相与温度的关系图中, 两个母材在凝固终了都有 $M_{23}C_6$ 出现, 在 XRD 图谱中只在 VG10 中有的 $M_{23}C_6$, 在 3Cr13 中未检测到. $M_{23}C_6$ 的形成需要较多的 C 及 Cr 元素, 因此在碳含量约为 1% 的 VG10 中更容易达到这一条件, 而含量越高, 越容易检测出, 3Cr13 中碳元素含量较低, 数量较少, 难以检测.

2.2.2 焊缝组织形态

图 3 所示为焊缝组织形态照片. 图 3a, 3e 分别为 VG10 侧和 3Cr13 侧焊缝组织. 在 VG10 侧及 3Cr13 侧焊缝熔合线位置有联生生长的平面晶, 并且随着向焊缝中心伸展逐渐变为胞状晶、胞状树枝晶、柱状晶. 图 3b 为焊缝中部中心位置组织, 其主要为柱状晶、树枝状晶. 图 3c 为焊缝顶部中心位置组织, 该位置有大量的等轴晶存在. 而焊缝底部中心位置主要为树枝状晶, 如图 3d 所示.

在焊缝中, 位置不同液固前沿的成分过冷的程度的不同, 由此形成了不同焊缝结晶形态^[12]. 在整个激光作用形成的熔池结构中, 成分过冷程度由两个母材侧表面沿着熔池结构体中心向后端面逐步递增. 当成分过冷由小变大时, 焊缝结晶形态会从平面结晶形态逐渐转化为胞状晶、胞状树枝晶、树枝状晶、柱状晶以及等轴晶.

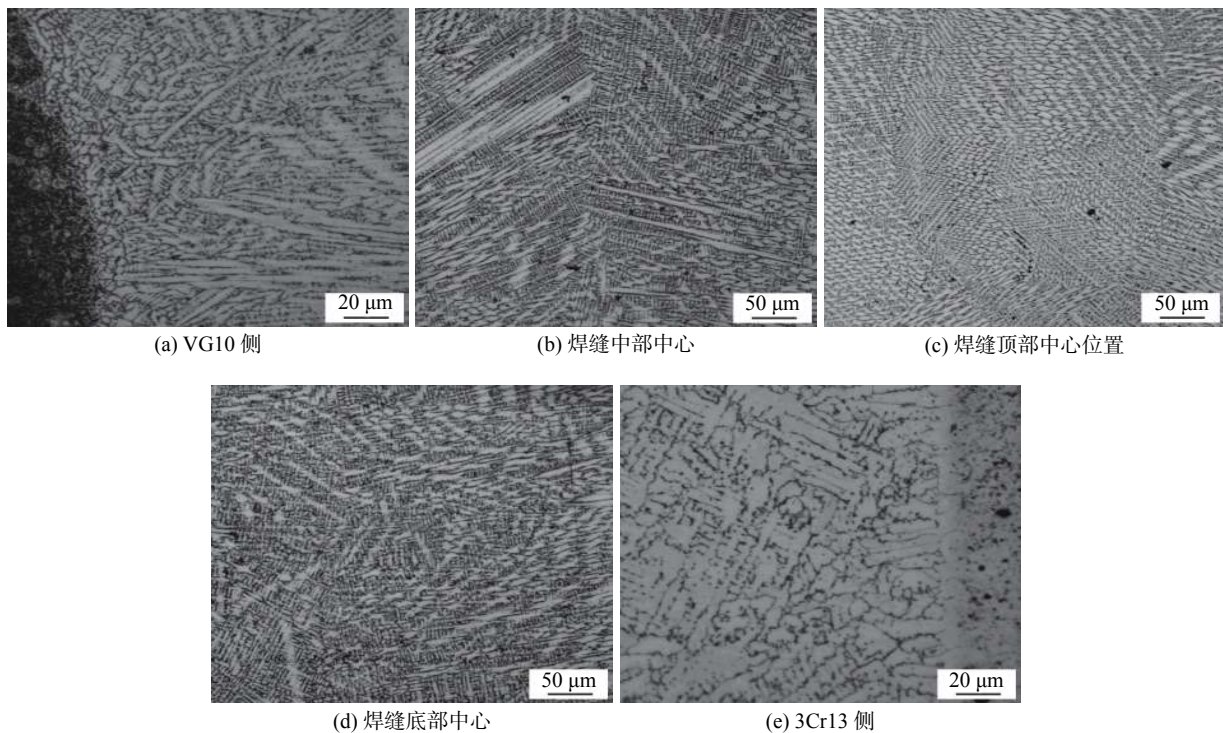


图 3 焊缝组织形态

Fig. 3 Microstructure of the weld. (a) VG10 side; (b) center of weld middle; (c) center of weld top; (d) center of weld bottom; (e) 3Cr13 side

在图 3a, 3e 中可以清楚的看到熔合线两侧为在半熔态的母材晶体表面上生长的平面晶, 而随着向焊缝中心的深入, 平面晶向胞状晶、胞状树枝晶、柱状晶、等轴晶逐渐转变. 焊缝上表面熔池接触空气以及保护气体, 此外焊缝上表面有少量下陷, 因此, 还可以通过母材两侧金属进行散热, 散热比焊缝中部位的速度更快, 使得整体凝固速率高于焊缝中部中心部位. 这样, 在相同的温度梯度下, 由于焊缝上表面的凝固速率更快, 成分过冷更大. 从图 3b 中可以看到, 焊缝顶部中心部位拥有更多的等轴晶粒. 焊缝底部表面有少量下凸, 这样大部分底部焊缝金属与空气接触, 而向焊缝两侧母材金属的散热减少, 使得散热速率减慢, 在相同的温度梯度下, 成分过冷较小, 在图 3d 中多为树枝状晶. 而焊缝中部介于顶部和底部之间, 有较多的柱状晶.

2.2.3 显微偏析及晶界析出物

图 4 所示为焊缝中心组织 EDS 线分析试验结果. 其中, 图 4a 是焊缝中心部位的背散射 (BSE) 照片, 黑色线段表示 EDS 线分析位置, 图 4b, 4c, 4d 分别为 C, Cr, Fe 元素线分布结果. 图 4a 中箭头所指的 E, F 处为条棒状析出物位置. 从图 4a 中可以看到焊缝部位为胞状树枝晶, 其中晶界与晶内颜色深度有差异.

黑色线段为 EDS 线分析位置, 由结果可知, C, Cr 元素在晶界附近富集明显, 而 Fe 元素在晶内较多. 同时在 E, F 所指条棒状析出物上, C, Cr 元素富集更加明显, Fe 元素含量大量减少. 结合 XRD 结果分析, 认为该条棒状析出物为 M_7C_3 . 激光焊接过程中, 高能激光束照射金属, 使金属熔化形成液态, 当激光束远离焊缝位置时, 焊缝金属开始凝固结晶. 在凝固过程中, 当温度降低到结晶温度后, 液相中开始形成晶核, 并同时通过液固界面向液相中排出多余的溶质原子. 这样, 先结晶的晶内溶质原子较少, 而后结晶的晶界溶质原子较多^[11], 因此晶界部位存在较多的杂质原子. 此外晶界处也是晶格缺陷较多的地方. Cr 元素富集于胞状树枝晶的枝晶间为负偏析元素, 而 Fe 元素富集于晶内为正偏析元素^[12]. 在激光的作用下熔化凝固时, 由于固态相变, 该合金从面心立方的 γ 相转变为室温下的 α 相, 由于 γ 相的溶碳量远大于 α 相, 这样使得 C 元素排出晶内, 同时 Cr 元素为强碳化物形成元素, 它们在枝晶间偏析也会加剧 C 元素在枝晶间的聚集, 因而在晶界部位更容易产生碳化物

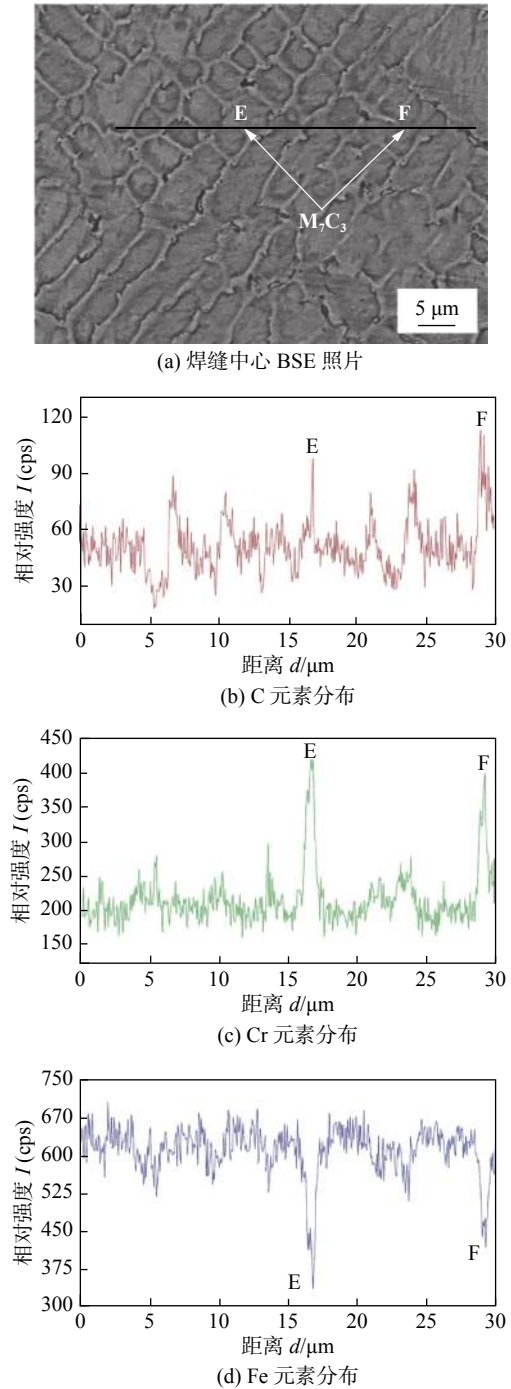


图 4 焊缝中心组织 EDS 试验结果

Fig. 4 EDS test results of weld center structure. (a) BSE photo of weld center; (b) C element distribution; (c) Cr element distribution; (d) Fe element distribution

M_7C_3 . 制备金相试样过程中, 通常使用酸性溶液对试样进行腐蚀. 由于晶界部位为杂质元素及晶体缺陷富集区, 较易腐蚀, 而碳化物耐腐蚀性高, 不易腐蚀, 因此可以在晶界部位观察到条、棒状析出相.

2.2.4 熔合区及热影响区组织形态

图 5 所示为焊缝两侧熔合区及热影响区组织形貌图, 其中图 5a 为 3Cr13 侧组织形貌. 可以看

到 3Cr13 侧的熔合线清晰,但熔合区与热影响区的差别较小难以区分. 图 5b 为图 5a 的局部区域放大图. 在图 5b 中可观察到熔合线附近的母材为淬火状态下的类针状马氏体组织. 图 5c 为 VG10 侧的组织形貌,其熔合线弯曲,同时可以看到熔合区与热影响区有明确的分界线,熔合区大小为 30 μm 左右,从图 5c 的局部放大图 5d 中可以看到熔合区中有非对流混合区,该区域为未充分与焊缝金属混合的母材,在该位置有块状、岛状组织嵌入母材^[13],如 A 所指. 该组织上存在连片分布的片层状的共晶碳化物,碳化物形态如图 5e 所示.

2.2.5 焊接接头元素分布

图 6 所示为电子探针分析结果. 图 6a 是焊缝中部的宏观照片,红线表示 EPMA 线分析位置. 图 6b, 6c, 6d 图分别为 C, Cr, Fe 元素在红线位置的线分布结果. 从图中可以看出, C 元素在熔合线附近聚集,含量有所增加. Cr 元素的分布变化相对较平缓,但在 VG10 侧的熔合线附近母材位置有峰值出现. Fe 元素含量从 VG10 侧向 3Cr13 侧呈逐渐增加的趋势,但分布相对平稳.

根据 EPMA 试验结果, C 在焊缝两侧熔合线附近的母材部位发生了聚集,即发生了 C 迁移现象,在钢铁材料中, C 在固相中的化学位高于在液相中

的化学位^[14], C 元素易于从母材的熔合区向焊缝区扩散迁移,但由于激光焊接热量集中,热输入小、冷却速度快. 使得 C 元素从母材往液态焊缝中扩散时只在熔合线附近聚集,而不能扩散到更远处的焊缝中去. 因此 C 元素只在熔合线附近的母材位置含量增加.

液态焊缝的化学成分为两种母材成分的混合,由于母材 VG10 中含有更多的合金元素,混合后的焊缝成分相对于 3Cr13 母材拥有更多的合金元素和更高的含量. 而 Mo, Mn, V 等合金元素可促使 C 元素的迁移^[12]. 因此在熔合区 3Cr13 侧的 C 元素聚集被加强. 在图 5b 中观察到在 3Cr13 侧的熔合线附近的母材为类针状马氏体组织,在焊接过程中熔合线附近区域的母材温度较高,在该部分的金属相当于经历了淬火处理. 3Cr13 马氏体不锈钢在淬火后一般为板条马氏体,但由于 C 元素在该位置的扩散、迁移,使得板条马氏体转变为高碳的类针状马氏体. 在焊接过程中熔池内部为湍流区,而边界区域为层流区,在熔池流动方式以及填充金属与母材成分差异造成了在非对流混合区有嵌入母材的块状、岛状组织的产生. 在该组织上有片层状的共晶碳化物生成,激光焊接熔池较小,在非对流混合区形成后,在较短时间内将凝固结晶. 在凝固过程中,先结晶的 γ 相通过固液界面向液相排出多余的

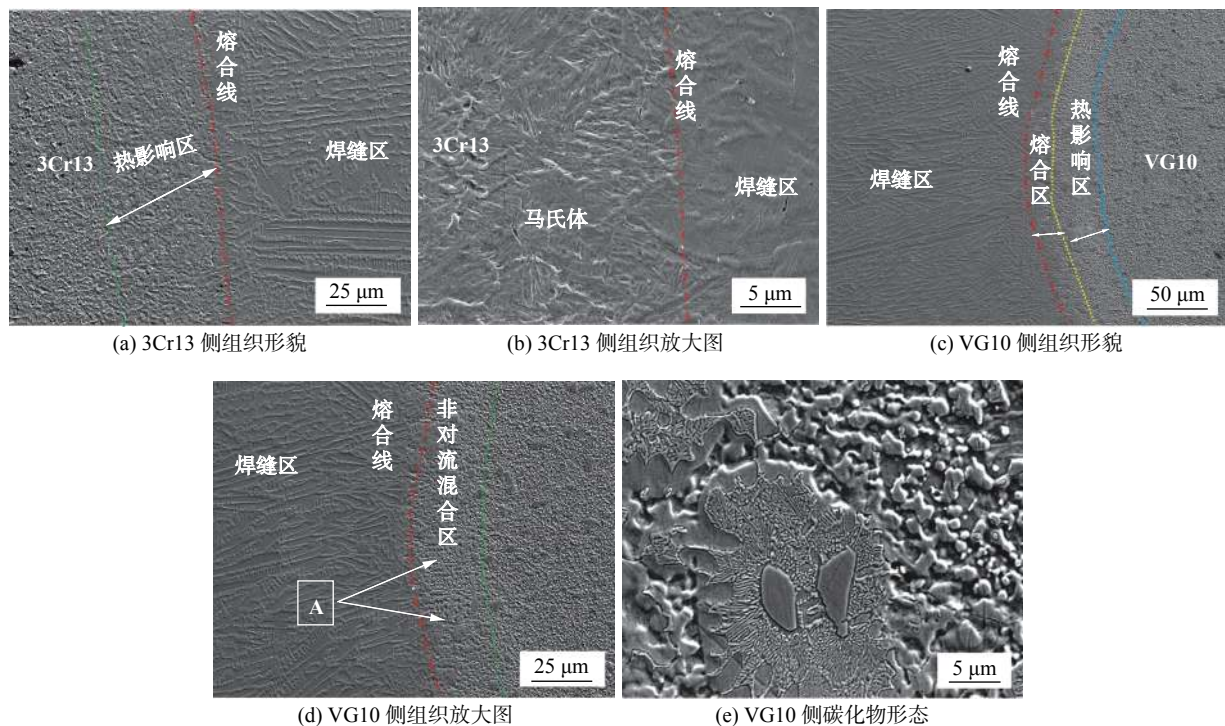


图 5 焊缝两侧熔合区及热影响区

Fig. 5 Fusion zone and heat affected zone on both sides of the weld. (a) microstructure of 3Cr13 side; (b) tissue enlarged view of 3Cr13 side; (c) microstructure of VG10 side; (d) tissue enlarged view of VG10 side; (e) carbide morphology at VG10 side

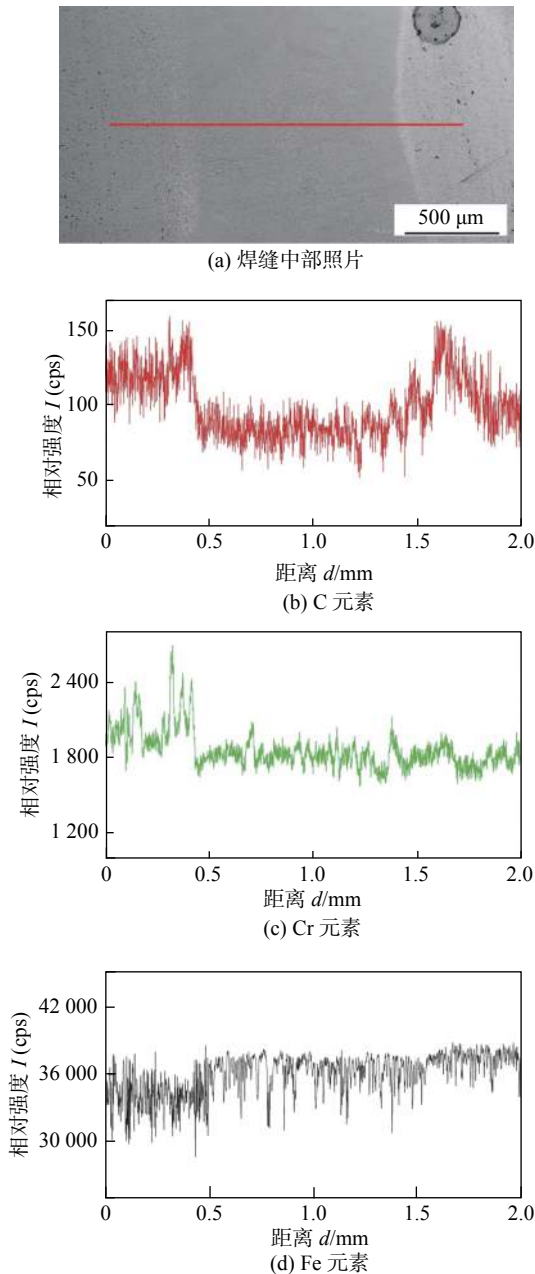


图 6 焊接接头元素分布

Fig. 6 Element distribution of welded joints. (a) photo of weld center; (b) C distribution; (c) Cr distribution; (d) Fe distribution

合金元素, 由于凝固时间较短, 因此合金元素不能扩散均匀. 形成共晶碳化物后, 前段液相部分因为合金元素消耗, 成分达到 γ 相, 又开始析出 γ 相, 这样重复结晶过程直到液相完全转化完全固相. 而在随后的冷却过程中 γ 相转变为 α 相, 最后形成了片层状的碳化物^[15]. VG10 侧母材的 C 含量有迁移、聚集现象, 使得该部分的 C 元素含量进一步的增加, 进而导致了共晶碳化物的形核数量增加, 进一步的促进了共晶碳化物的形成^[16]. 结合前面软件模拟结果及焊缝 XRD 分析, 该共晶碳化物为 M_7C_3 , 此外 VG10 侧共晶碳化的出现使得 Cr 元素在该区

域的分布有波动.

2.3 焊接接头硬度分布

图 7 所示为焊接接头的硬度分布. 焊缝区硬度变化较小、分布均匀约为 355 HV; 3Cr13 侧及 VG10 侧热影响区硬度值陡增, 并且靠近熔合线附近硬度值最大, 其中 3Cr13 侧为 635 HV, VG10 侧为 553 HV. VG10 母材区域硬度值略微高于 3Cr13 母材.

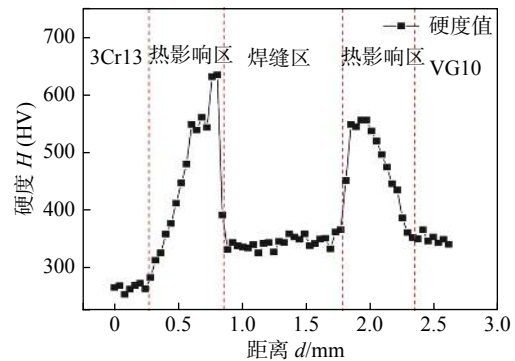


图 7 焊接接头显微硬度与位置关系曲线

Fig. 7 Relationship between microhardness and position of welded joint

VG10 母材中的含碳量更高, 母材硬度高于 3Cr13. 而焊缝区为两种母材成分的混合, 含碳量应介于两种母材之间, 但由于焊缝金属冷却较快, 使得整个焊缝的晶粒较为细小, 细晶强化的作用使得其硬度有部分提升, 焊缝区域的硬度与母材 VG10 相差较小. 在熔合线附近的母材部分, 硬度值有明显的提升, 同时在熔合区附近硬度值最高. 在前文中通过组织分析, 3Cr13 侧熔合线附近母材部分有类针状马氏体出现, 该部位的硬度值最大. 而 VG10 侧的熔合区出现共晶碳化物因此该部分的硬度也有明显的升高. 两侧的热影响区随着与焊缝距离的增加而逐步的减小, 这是因为热影响区与焊缝中心的距离不同受到的温度的影响不同, 使得热影响区晶粒大小发生变化. 同时, 在温度的影响下, C 在 α 相中的固溶量不同, 以及析出碳化物的数量不相同, 因此, 在显微硬度的数值上也有不同的变化.

3 结论

(1) 通过 JMATPro 软件模拟了 3Cr13 及 VG10 的平衡相与温度的关系图, 平衡条件下 VG10, 3Cr13 凝固终了, 其基体相为 α 相, 同时有碳化物 $M_{23}C_6$ 存在, 此外 VG10 中还有少量的 $M(C/N)$.

(2) 分析焊缝组织发现, 焊缝晶粒有元素偏析, 且在晶界部位有条棒状的析出物, 通过 XRD 及 EDS

试验, 确定该析出物为 M_7C_3 。

(3) 焊缝两侧熔合线附近母材处有 C 迁移现象, 由于 C 元素的迁移使得该位置处 C 含量上升, 3Cr13 侧出现类针状马氏体组织, VG10 侧存在非对流混合区, 并且在该部分区域有块状、岛状组织出现, 且在该部分组织上有共晶碳化物 M_7C_3 形成。

(4) 通过硬度试验发现熔合线附近的母材硬度上升较大, 同时热影响区硬度随着与焊缝中心的距离的增加而逐渐减小。VG10 母材侧的硬度高于 3Cr13 母材的。

参考文献

- [1] Mittal R, Sidhu B S. Microstructures and mechanical properties of dissimilar T91/347H steel weldments[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2015, 220: 76 – 86.
- [2] 王瑞, 石玓, 李广, 等. 镍对铜/不锈钢 GTAW 接头导电性及腐蚀性能的影响 [J]. 焊接学报, 2019, 40(12): 53 – 58.
Wang Rui, Shi Yu, Li Guang, *et al.* Effect of nickel on conductivity and corrosion of copper/stainless steel GTAW joints[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2019, 40(12): 53 – 58.
- [3] Liu Liming, Zhou Yanbin. Mechanism analysis of free formation of backing weld by the pulsed MAG-TIG double arc tandem welding[J]. China Welding, 2019, 28(4): 8 – 15.
- [4] Liu G L, Yang S W, Han W T, *et al.* Microstructural evolution of dissimilar welded joints between reduced-activation ferritic-martensitic steel and 316L stainless steel during the post weld heat treatment[J]. Materials Science and Engineering: A, 2018, 722: 182 – 196.
- [5] 刘桐, 杨立军, 邱文聪, 等. 304 不锈钢激光深熔焊元素蒸发及焊缝合金含量变化 [J]. 焊接学报, 2018, 39(2): 8 – 12.
Liu Tong, Yang Lijun, Qiu Wencong, *et al.* Vaporization and composition change of 304 stainless steel during keyhole mode laser welding[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2018, 39(2): 8 – 12.
- [6] 母晓红, 牛旭, 惠文. 激光焊的原理及其应用研究 [J]. 科技创新导报, 2009(8): 5 – 6.
Mu Xiaohong, Niu Xu, Hui Wen. Principle and application of laser welding[J]. Science and Technology Innovation Herald, 2009(8): 5 – 6.
- [7] He Yannan, Song Qiang, Sun Kang, *et al.* Microstructure and properties of in-situ chromium carbide composite coating by laser cladding[J]. China Welding, 2018, 27(4): 10 – 17.
- [8] 宗攀, 张覃轶, 孙伟, 等. 热处理工艺对大马士革 VG10 钢组织和性能的影响 [J]. 金属热处理, 2018(11): 117 – 122.
Zong Pan, Zhang Qinyi, Sun Wei, *et al.* Effect of heat treatment process on microstructure and mechanical properties of Damascus VG10 steel[J]. Heat treatment of metals, 2018(11): 117 – 122.
- [9] 尹燕, 栗子林, 许广伟, 等. 3Cr13 厨刀碟片激光同轴送粉熔覆层的显微硬度与组织 [J]. 焊接学报, 2016, 37(10): 86 – 87.
Yin Yan, Li Zilin, Xu Guangwei, *et al.* Microhardness and microstructure of laser cladding layer on 3Cr13 kitchen knife by disc laser coaxial powder[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2016, 37(10): 86 – 87.
- [10] 徐仰涛, 沙岐振. 基于 JMatPro 软件对不同 B 含量下 Co-8.8Al-9.8W 合金析出相的热力学模拟计算 [J]. 稀有金属材料与工程, 2016, 45(9): 2332 – 2336.
Xu Yangtao, Sha Qizhen. Thermodynamic simulation calculation of Co-8.8Al-9.8W alloy with different B contents based on JMatPro software[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2016, 45(9): 2332 – 2336.
- [11] 王鲁, 杨钢, 刘正东, 等. 基于 Thermo-Calc 和 JMatPro 模拟计算的新型镍基合金设计 [J]. 材料热处理学报, 2017, 38(4): 193 – 199.
Wang Lu, Yang Gang, Liu Zhengdong, *et al.* Design of a new Ni-base alloy based on simulated calculation on Thermo-Calc & JMatPro[J]. Transaction of Materials and Heat Treatment, 2017, 38(4): 193 – 199.
- [12] 黄继华. 焊接冶金原理 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2015.
Huang Jihua. Principle of welding metallurgy[M]. Beijing: China Machine Press, 2015.
- [13] 魏翔云, 张玉生. 碳含量对 Fe-30Ni-20Cr-6Mo 铸造合金元素偏析和耐腐蚀性的影响 [J]. 腐蚀科学与防护技术, 1996(3): 210 – 213.
Wei Xiangyun, Zhang Yusheng. Effect of carbon content on element segregation and corrosion-resistance of cast alloy Fe-30Ni-20Cr-6Mo[J]. Corrosion Science and Protection Technology, 1996(3): 210 – 213.
- [14] 潘春旭. 异种钢及异种金属焊接显微结构特征及其转变机理 [M]. 北京: 人民交通出版社, 2000.
Pan Chunxu. Microstructure characteristics and transformation mechanism of dissimilar steels and metals[M]. Beijing: China Communications Press, 2000.
- [15] Wiecezrak K, Bala P, Stepien M, *et al.* Formation of eutectic carbides in Fe-Cr-Mo-C alloy during non-equilibrium crystallization[J]. Materials & Design, 2016, 94(3): 61 – 68.
- [16] Chang C M, Lin C M, Hsieh C C, *et al.* Effect of carbon content on microstructural characteristics of the hypereutectic Fe-Cr-C claddings[J]. Materials Chemistry and Physics, 2009, 117(1): 257 – 261.

第一作者简介: 尹燕, 1973 年出生, 博士, 教授; 主要从事高效率焊接及激光加工方面的科研及教学工作, 发表论文 40 余篇; Email: yinyan@lut.cn.

(编辑: 马志鹏)

optical microscopy (OM), X-ray diffraction (XRD) and scanning electron microscopy (SEM). The results indicate that, with powder addition ratio increases from 30% to 45%, the microstructure changes from the hypoeutectic to the hypereutectic. The dominant matrix converts changes from γ -Fe to α -Fe and the morphology of M_7C_3 -type carbides transits from inter-granular reticular or dendritic shapes to granular or block-like ones. The results of wear test show that their abrasion resistance is excellent and corresponds to the one of flux-cored wire hardfacing alloys with such processing merits as simple and economic. The wear mechanism mode of hardfacing alloys includes micro-cutting and micro-spalling.

Key words: composite powder particles; solid wire; open arc; hardfacing; high-chromium alloys

Welding deviation measurement method based on welding torch contour feature extraction

WANG Zhongren¹, WANG Xiaogang^{1,2}, LIU Dezheng¹, LIU Haisheng¹

(1. Hubei University of Arts & Science, Xiangyang, 441053, China; 2. Wuhan University of Science and Technology, Hubei, 430081, China). pp 59-64

Abstract: In the welding process of gas metal welding (GMAW), due to the serious arc interference, it is difficult for the vision system to accurately extract the weld and the wire tip at the same time, thus affecting the accuracy of the weld tracking. An approach was proposed to locate the welding torch center instead of the welding wire tip. The feasibility of the method was demonstrated. First, after enhancing the weld seam and weld gun edge contour information in the molten pool image, a rectangular window was set to obtain the edge sampling point. Then, the clustering algorithm was used to screen out the correct edge sampling points. The weld line and the ellipse equation of the torch were fitted by the least squares method according to the sampling points. Moreover, the distance between the center of the current image welding torch and the straight line of the weld was calculated. Compared with the corresponding distance in the reference image, the amount of deviation of the welding torch position and the deviation of the welding gun swing were detected. The actual verification results show that the replacement error between the center of the welding torch and the tip of the welding wire is within 0.2 mm, which meets the requirements of tracking accuracy and has strong engineering practical significance.

Key words: weld seam tracking; welding molten pool image; welding deviation; clustering algorithm; gas metal arc welding

Parameter optimization of laser cladding ceramic repair layer of H13 steel

LIU Lijun^{1,2}, LIU Dayu¹, WANG Xiaolu¹, LI Jiqiang², CUI Yuanbiao³, JIA Zhixin² (1. Harbin University of Science and Technology, Harbin, 150080, China; 2. Ningbo Institute of Technology, Zhejiang University, Ningbo, 315100, China; 3. Harbin Vocational & Technical College, Harbin, 150081, China). pp 65-70

Abstract: In view of surface problems such as wear and corrosion caused by the failure of H13 die steel, nickel-based silicon carbide powder was used to optimize the parameters of the repair layer of H13 die steel. In order to explore the effect of laser parameters on the repair layer in laser cladding, laser cladding experiments were carried out using different laser currents and defocus amounts as optimized process parameters. It was found that changing the size of the laser current and the amount of defocusing had different degrees of influence on the cladding size, microstructure and mechanical properties of the repair layer. The geometric dilution rate of the cladding layer increases as the laser current increases, and the grain size of the cladding layer becomes coarse; The geometric dilution rate of the cladding layer decreases as the amount of defocus increases, and the grain size of the cladding layer becomes finer. The optimized results obtained through the analysis of metallographic microscope, SEM and micro hardness tester showed that the laser current is 115A, the defocus amount is 51mm, and the microhardness value of the cladding layer reaches the highest value, which is about 2.6 times the hardness of the substrate. The above research results provide theoretical and technical basis for improving the quality of the laser cladding repair layer on the failure surface of the mold.

Key words: laser cladding; grain; repair layer; micro-hardness

Microstructure and microhardness analysis of laser welded dissimilar steel

YIN Yan¹, KANG Ping¹, LU Chao², ZHANG Yuan¹, ZHANG Ruihua^{2,3} (1. State Key Laboratory of Advanced Processing and Recycling of Nonferrous Metals, Lanzhou University of Technology, Lanzhou, 730050, China;

2. Central Iron and Steel Research Institute, Beijing, 100081, China; 3. Yangjiang Hardware Knife Cut Industrial Technology Research Institute, Yangjiang, 529533, China). pp 71-77

Abstract: After welding dissimilar steel by laser swing welding, the equilibrium phase diagrams of base 3Cr13 and VG10 were calculated by JMATPro software, and the phase composition and microstructure of weld, fusion zone and heat affected zone were analyzed by XRD, SEM, EPMA and other techniques. In addition, the microhardness distribution of welded joints was determined. The results show that the weld is mainly composed of phases and carbides M_7C_3 , and from the fusion line to the weld center, the structure changes from plane crystal to cellular crystal, cellular dendrite, columnar crystal, dendritic crystal and equiaxed crystal. The microstructure of the weld exists micro-segregation, in which C and Cr elements are enriched at the grain boundary, Fe elements are enriched within the grains, and bar-like M_7C_3 precipitates at the grain boundaries. There is a C migration phenomenon at the base material of the fusion line near. Among them, acicular martensitic structure is generated on the 3Cr13 side, and the unmixed zone exists in the fusion zone on the VG10 side. At this position, the massive, island tissue is embedded in the base material, and there are lamellar carbides on the structure. The hardness of the base metal on both sides of the fusion line is the largest, and the hardness of the weld zone changes little. The hardness of the heat affected zone decreases with the increase of the distance away from the weld center.

Key words: laser welding; dissimilar steel; microstructure; microhardness

Microstructure and shear strength of the C/SiC and Q235 brazing joints

ZHANG Yukun^{1,2}, CHEN Jichun¹, ZHANG Jinsong¹ (1. Shenyang National Laboratory for Materials Science, Institute of Metal Research, Chinese Academy of Sciences, Shenyang, 110016, China; 2. University of science and technology of China, Hefei, 230026, China). pp 78-82

Abstract: C/SiC composites were deposited with Ti coating by magnetron sputtering, and brazed to Q235 with copper interlayer using AgCu₂₈ as filler. The effects of copper interlayer, thickness of Ti coating and brazing temperature on the microstructure and mechanical properties of joints were

studied in details. The results show that Cu interlayer can effectively reduce the residual stress of the joint, and obstruct the diffusion of Si element to Q235 during brazing, thus preventing the formation of FeSi_x reaction layer. The thickness of Ti and the brazing temperature both show a peak relationship with the shear strength of the joint. The maximum shear strength achieved 25.5 MPa at 860 °C with 3 μm Ti coating. A larger number of C fibers and debonding pits can be observed on the fracture surface at Q235 side. The failure occurs within the C/SiC composite about 300 μm from the interface. The reaction layer at C/SiC interface are mainly composed of Ti₃Si₃ phases containing a small amount of TiC phases. TiCuSi phases are formed in brazing seam.

Key words: C/SiC composite; Ti coating; interlayer; shear strength

Failure analysis and control of gold-plated lead solder joint cracks

CAO Rui, WU Yaning, NI Xiaoliang, WANG Zhibin, WANG Xu (China Aerospace Components Engineering Center, Beijing, 100094, China). pp 83-90

Abstract: After experiencing the mechanical and thermal environment test, one kind of electronic assembled Hall element experienced partial function failure due to the gold-plated pin solder joint cracking. Re-examination results showed that part of the Hall element pin solder joints also suffered partial cracking before environmental assessment tests. Due to the small assembly space of the component, it is difficult to effectively check the solder joint status after electrical installation. Therefore, analysis based on the cause of solder joint failure and targeted improvements are of great significance for improving the reliability of the spacecraft. The failure reasons were analyzed by observation of cracking morphology, metallographic testing and analysis of chemical composition. When the component pin welding position is not completely gold removed, brittle Au-Sn intermetallic compound (IMC) was observed along the cracked welding interface, which led to the generation of cracking source. Due to the stress concentration at the crack front, the crack expansion continued and caused solder joints failure under the effect of temperature alternating or external force. Ensuring the de-gold quality at soldering position and controlling the soldering position are of great significance for improving the