

7A52 铝合金-钢异种结构 CMT 熔钎焊接头组织及镀镍层的行为与影响

葛佳棋, 王克鸿, 周琦, 张德库

(南京理工大学 材料科学与工程学院, 南京 210094)

摘 要: 以 ER4043 铝硅焊丝为填充金属, 研究了 Q235 钢螺柱与 7A52 铝合金板 CMT 焊接工艺, 在焊接电流 115 ~ 135 A, 电弧电压 14.5 ~ 16.5 V, 焊接速度 0.3 m/min 条件下, 焊接过程稳定, 焊缝成形连续美观. 结果表明, 7A52 铝合金侧熔合区界面为熔焊特征, 铝母材发生熔合, 熔合良好; 钢螺柱侧熔合区为钎焊特征, 界面存在反应层, 由靠近钢螺柱的 Fe_2Al_3 层和靠近焊缝侧的 FeAl_3 层组成, 整体反应层厚度由根趾向焊趾方向逐渐减小. 焊趾部位出现富镍区, 主要由 Al_3Ni 的共晶组织及少量 Al_3Ni_2 组成. 与无镀镍层焊缝比较表明, 镀镍层在焊接过程的行为降低了界面反应层厚度, 且通过形成富镍区, 降低了接头的脆性, 使接头抗剪强度提高了 15% ~ 19%, 最高达到 146.9 MPa, 满足了高强铝合金螺柱焊接的质量要求.

关键词: 7A52 铝合金; 熔钎焊; 螺柱; 金属间化合物

中图分类号: TG406 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-360X(2016)04-0024-05

0 序 言

7A52 铝合金是国内自行研发的一种防腐性能高、可热处理强化的高强铝合金结构材料, 在兵器、船舶、航天航空等产品上获得大量应用^[1-3]. 其中装甲车辆作为国内陆军的主要作战平台, 每辆车需要焊接大量钢螺柱, 用来进行控制装置、仪器、仪表的安装, 目前普遍采用手工 MIG 焊方法. 由于铝钢物理性能存在较大差异, 焊接时容易产生严重变形, 且存在残余应力导致裂纹产生, 熔融界面易生成大量金属间化合物, 导致接头力学性能下降^[4,5].

冷金属过渡 CMT 技术是在短路过渡基础上开发的一种数字化焊接系统, 与普通 MIG 焊相比, CMT 工艺可自动控制短路过渡的过程, 严格控制焊接热输入量, 在进行铝和钢的连接时, 可实现铝合金母材熔化, 而钢母材不熔化的熔钎焊连接. 且 CMT 工艺

可精确控制弧长, 使得电弧更加稳定, 焊缝成形均匀美观^[6].

利用冷金属过渡 CMT 技术, 提出一种对钢螺柱和 7A52 铝合金板进行异种结构的新型焊接方法, 研究焊接工艺和接头组织性能特点. 结合对表面无金属镀层的钢螺柱与铝合金板 CMT 熔钎焊分析, 通过在钢螺柱表面镀镍金属层, 分析镀层在焊接过程中的行为及其对接头组织性能的影响.

1 试验方法

试验材料选用 7A52 铝合金板, 将其切割成 100 mm × 100 mm × 12 mm 试板, Q235 钢螺柱, 规格 $\phi 16$ mm × 60 mm, 表面镀有 10 μm 厚的镍层. 采用 $\phi 1.2$ mm 的 ER4043 铝硅焊丝进行焊接, 母材与焊丝主要成分见表 1. 保护气体为纯氩气, 通气量 18 ~ 20 L/min.

表 1 两种母材与焊丝的化学成分(质量分数, %)
Table 1 Chemical compositions of base metals and wire

材料	Mg	Zn	Si	Fe	Cu	Mn	Zr	Ti	Cr	Al
7A52	2.44	4.44	0.075	0.23	0.11	0.24	0.072	0.062	0.17	余量
ER4043	0.05	0.1	4.5 ~ 6	0.8	0.3	0.05	-	0.2		余量
材料	C	Mn	Si	S	P	Ni	Cr	Fe		
Q235	≤0.18	0.35 ~ 0.8	≤0.30	0.04	0.04	0.021	0.70	余量		

CMT 5000i 系列焊接设备和德国 KUKA 焊接机器人手臂. 将 7A52 铝板和 Q235 钢螺柱组成的焊接件固定在变位机的中心,并在螺柱顶端施加压力保证螺柱与铝板之间位置不变动,确保变位机转动时,钢螺柱只进行自转,圆心不发生偏离. 焊枪偏离钢螺柱轴线 30° 对准铝板与钢螺柱结合位置. 焊接时,焊枪固定不动,变位机带动铝板与钢螺柱绕圆心旋转一周完成焊接,焊接示意图如图 1 所示,焊接工艺参数如表 2 所示.

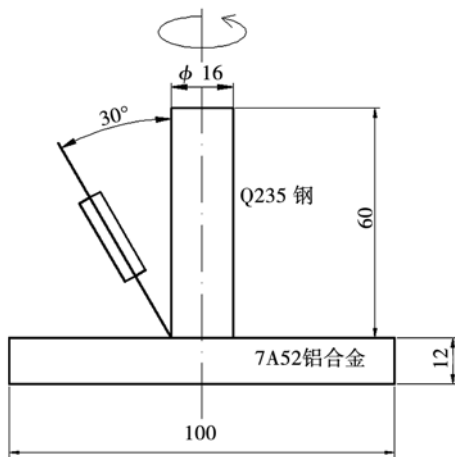


图 1 钢螺柱铝板 CMT 焊接示意图 (mm)

Fig. 1 Schematic drawing of CMT welding

表 2 焊接工艺参数
Table 2 Welding parameters

试验编号	焊接电流 I/A	电弧电压 U/V	焊接速度 $v/(m \cdot min^{-1})$
1	109	14.3	0.3
2	121	15.1	0.3
3	133	16.9	0.3
4	141	17.1	0.3

焊接前用不锈钢钢丝刷清理铝合金表面的氧化膜,并用丙酮擦拭钢螺柱和铝合金表面,去除油污. 焊接完成后,沿焊缝纵向切割制备金相试样,铝合金母材及焊缝处用 Keller 腐蚀剂 (1 mL 氢氟酸 + 1.5 mL 盐酸 + 2.5 mL 硝酸 + 95 mL 水) 腐蚀 3 ~ 5 s, 钢螺柱一侧用 4% 的硝酸酒精腐蚀 3 s. 使用 OLYMPUS (BX60M) 金相显微镜进行接头内部组织的观察, Hitachi X-650 扫描电子显微镜、EX-250 能谱仪进行微观组织观察和元素分析.

2 试验结果与分析

2.1 接头宏观形貌

图 2 为焊接电流 133 A 条件下,钢螺柱与铝板焊缝的宏观形貌,从图 2 中看出填充金属量足够,在两种母材上铺展均匀,焊缝成形饱满. 焊接电流低于 115 A 时由于电流过小,焊丝填充量不足,钢螺柱底部未完全被焊缝金属覆盖,焊缝存在咬边缺陷,成形普遍较差;电流高于 135 A 时,过大金属填充量导致焊缝金属过多,且热输入量过高使焊缝及铝母材氧化严重,焊接结束焊缝冷却过程中产生脆性断裂.

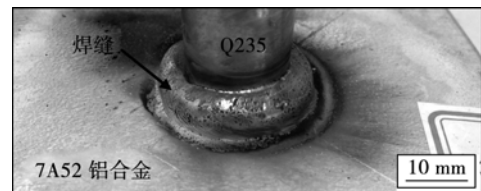


图 2 焊缝的宏观形貌

Fig. 2 Macrophotography of welded joints

2.2 铝钢异种结构接头的显微组织特征

采用光学显微镜和扫描电镜对镀镍层钢螺柱与铝板接头焊缝的显微组织进行观察. 图 3 为试样焊缝的截面形貌,由于铝的熔点为 660°C ,而钢熔点在 1500°C 以上,所以在电弧作用下,铝合金表面一部分熔化与填充金属形成熔焊界面,而钢不熔化,填充金属在钢表面铺展,形成钎焊界面,因此该焊接方法也称为铝钢异种结构的 CMT 熔钎焊.

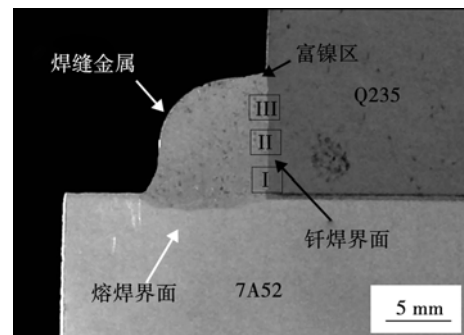


图 3 接头截面形貌

Fig. 3 Macrophotography of cross section

2.2.1 钎焊界面的组织分析

为了进一步分析钎焊界面的微观组织,分别对图 3 中方框 I、II 和 III 区域的微观组织进行观察,其组织形貌如图 4 所示. 可以看出,焊接结束后整个

钎焊界面均形成了灰色的致密新相. 图 4a 为图 3 中 I 区域的界面微观组织, 反应层靠近钢母材一侧的边缘较为平直整齐, 而靠近焊缝金属一侧则参差不齐, 呈粗颗粒状向其中生长, 反应层厚度为 $17 \sim 20 \mu\text{m}$; 图 4b 为图 3 中 II 区域的界面微观组织, 该区域反应层厚度为 $12 \sim 15 \mu\text{m}$, 反应层呈针片状向焊缝金属方向生长, 焊缝金属内部生成少量弥散分

布的细针状组织; 图 4c 为图 3 中 III 区域界面微观组织形貌, 该区域反应层厚度均匀, 约为 $8 \sim 10 \mu\text{m}$, 反应层两侧生长平整, 无针状组织. 分析该原因, 焊接过程中焊枪对准靠近焊缝根趾的铝母材表面, 处于电弧正下方的该区域温度最高, 向焊趾方向温度逐渐降低, 界面原子扩散程度变小, 因此钎焊界面的反应层厚度由下往上逐渐变小.

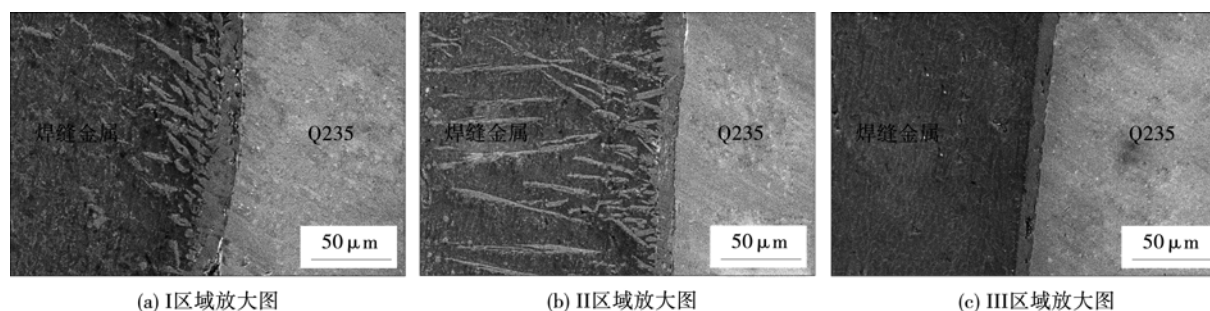


图 4 钎焊界面组织 SEM 形貌

Fig. 4 Electron microscope photographs of brazing interface

为进一步确定界面微观组织物相, 对图 3 中方框 I 区域处反应层进行线扫描分析, 线扫描位置如图 5a 所示. 扫描结果如图 5b, Al 元素曲线在焊缝金属内波动较大, 这是因为扫描线经过了分布在焊缝金属中的颗粒状和针状组织. 扫描线从焊缝金属进入反应层时 Al 元素含量迅速减少, 而 Fe 元素含

量则开始上升, 且两条曲线出现平台, 宽度约为 $14 \mu\text{m}$, 说明该区域为单一稳定的 Al-Fe 金属间化合物层 II. 随后 Al 元素含量继续减少, Fe 元素含量上升, 形成厚度约为 $3 \mu\text{m}$ 的另一种 Al-Fe 化合物层 I. 由于厚度比较薄, 两种元素曲线在该区域的平台不明显. 为了更清楚了解反应层及颗粒状组织的成分, 对图 5 中各点进行能谱分析. 十字 A 处铝含量为 74.11% (原子分数), 铁含量为 23.86%, 硅含量为 2.03%, 结合相图理论可知, 焊缝内部的针片状组织应为 FeAl_3 和少量的 Al-Si 固溶体组成, 此处 Si 元素来源于焊丝中所含的硅; 化合物层 II 中的十字 B 处铝含量为 71.75% (原子分数), 铁含量为 23.87%, 硅含量为 4.38%, 三种元素含量与十字 A 处变化不大, 成分也应为 FeAl_3 和少量的 Al-Si 固溶体; 化合物层 I 中的十字 C 处铝含量降低为 67.17% (原子分数), 铁含量上升为 29.25%, 硅含量为 3.57%, 该处主要由 Fe_2Al_5 组成.

2.2.2 富镍区的组织分析

在图 3 中, 角焊缝焊趾部位发现了一个组织特征与钎焊界面其它部位显著不同的楔形区域, 主要由灰色树枝状及颗粒状晶体和灰白相间的反应层组成, 树枝状晶体之间存在深灰色无析出区, 如图 6 所示. 经过元素线扫描检测, 发现该区域含有较多 Al 和 Ni 元素, 而 Si 元素的含量较少, 几乎不含有 Fe 元素, 因此将这一区域称为富镍区. 为进一步分析富镍区组织成分, 对图 6 中各特征点进行能谱分析, 结果见表 3. 由能谱分析发现, 灰白相间的反应层 (方框 D) 和颗粒状晶体 (十字 E) 的组成成分相差

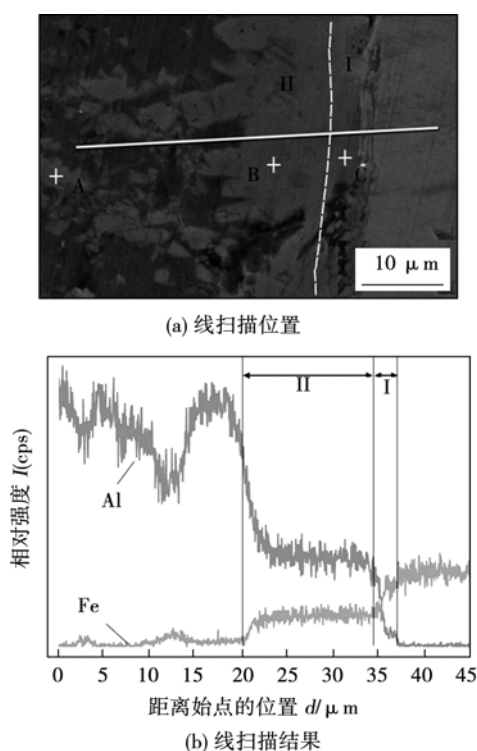


图 5 线扫描位置与结果曲线图

Fig. 5 Line scanning location and results

不大, Ni 元素所占的原子分数均在 20% 左右, 根据铝镍二元相图可推断反应层和颗粒状晶体由 Al_3Ni , 少量 Al 固溶体和 Al_3Ni_2 组成, 灰白树枝晶为 Al 元素和 Al_3Ni 的共晶组织, 枝晶间的无析出区中含有 Si 和极少量的 Ni, Fe 元素, 为铝固溶体。焊接过程中, 富镍区范围内的铝和镍均处于液态, 在冷却过程中由相图可知, 先析出 Al_3Ni_2 相, 随后在 854 °C 时先析出的 Al_3Ni_2 相与液态金属中的铝发生包晶转变成 Al_3Ni , 故生成的反应层为灰白混杂, 多余的液相则在 640 °C 左右共晶转变, 生成铝和 Al_3Ni 的共晶组织, 从而形成了富镍的组织区域。

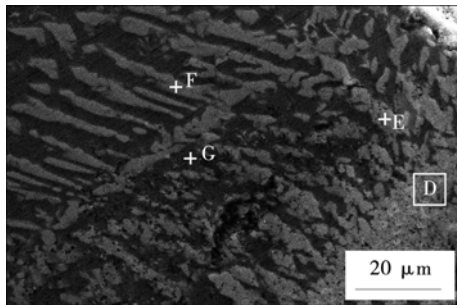


图6 富镍区组织

Fig. 6 Microstructure of Ni-rich zone

表3 富镍区能谱分析结果(原子分数, %)

Table 3 EDS testing result of Ni-rich zone

所含元素	Al	Fe	Ni	Si
方框 D	73.63	1.67	21.58	-
十字 E	77.07	2.17	20.76	-
十字 F	83.75	4.4	9.76	2.09
十字 G	94.3	0.26	0.54	4.9

2.3 镀镍层在焊接过程中的行为

通过对接头微观组织的分析发现, 钎焊界面上不存在 Ni 元素, Ni 元素聚集到焊缝的焊趾部位形成富镍区, 该现象表明镍层在电弧作用下一部分熔化, 在电弧吹力的影响下与熔池金属一起流动至温度较低的焊趾处。当熔池金属温度降低至液相线后, 富集在焊趾处的镍与铝发生反应生成 Al_3Ni 树枝晶和铝固溶体的共晶组织。

2.4 镀镍层对钎焊界面反应层的影响

对比无镀镍层钢螺柱接头的钎焊界面微观组织, 如图 7 所示, 界面反应层成分基本相同, 均为 Fe_2Al_5 层与 FeAl_3 层组成, 反应层厚度约为 30 ~ 40 μm, 厚度大于钢螺柱表面有镀镍层的情况。反应层两侧均比较平整, 少量细树枝状组织生长至焊缝内部。这表明, 镀镍层钢螺柱在焊接过程中, 表面的镀

镍层虽然部分熔化, 混入焊缝, 没能起到隔离铝与铁的效果, 使得钎焊界面仍然生成 Fe-Al 金属间化合物, 但在熔化过程中, 吸收了一部分电弧热量, 降低了钎焊界面的温度, 减少了 Al 原子扩散程度, 从而减小了反应层厚度。

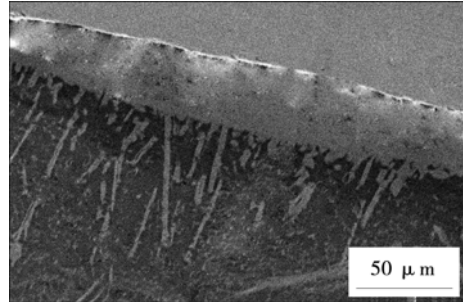


图7 无镀镍层 CMT 熔钎焊的钎焊界面

Fig. 7 Brazing interface made by CMT welding without Ni layer

2.5 镀镍层对接头力学性能的影响

采用 SANS CMT5105 电子万能试验机对接头进行力学性能测试, 将铝合金板固定后对钢螺柱进行拉拔, 测试接头的最大拉应力 N 。由于接头断裂位置在钎焊界面上, 因此测得的拉应力实际为钢螺柱与焊缝金属的剪切应力。根据角焊缝在轴心拉力作用下抗剪强度 (R_τ) 的计算公式^[7], 即

$$R_\tau = \frac{N}{h_e l_e} \quad (1)$$

式中: h_e 为角焊缝的有效厚度 (mm), 对直角角焊缝取 0.7 倍的较小焊脚尺寸; l_e 为角焊缝的计算长度 (mm), 焊缝取实际长度减去 2 倍的较小焊脚尺寸。

对各参数下得到的试样接头经拉伸测试得到最大应力达到 20.7 kN, 较小焊脚尺寸经测量为 5 mm, 代入上式中计算可得

$$R_\tau = \frac{N}{h_e l_e} = \frac{20\,700}{0.7 \times 5 \times (16\pi - 2 \times 5)} = 146.9 \text{ MPa} \quad (2)$$

即钢螺柱与焊缝金属最大抗剪强度可达 146.9 MPa。

图 8 为镀镍层钢螺柱/铝板的 CMT 熔钎焊与无镀镍层的情况在相同焊接参数条件下得到的接头抗剪强度对比曲线。焊接电流保持在 109 ~ 133 A 范围内时, 钢螺柱表面镀有镍层的情况比无镀镍层时得到的接头抗剪强度要高 15% ~ 19%。分析认为, 抗剪强度的提高是因为, 一方面镀镍层在焊接过程的行为减小了界面反应层的厚度, 降低接头的脆性, 另一方面, Ni 元素在焊趾部位聚集, 生成 Al_3Ni 树枝晶与铝固溶体组成的共晶组织, 阻止了铝铁金属间

化合物在该区域的生成,有利于提高焊接接头质量.当焊接电流达到 141 A 时,由于热输入量过大,钎焊界面生成大量金属间化合物,且产生热裂纹,在这种焊接参数过大的情况,镍的存在与否对接头强度影响不大.

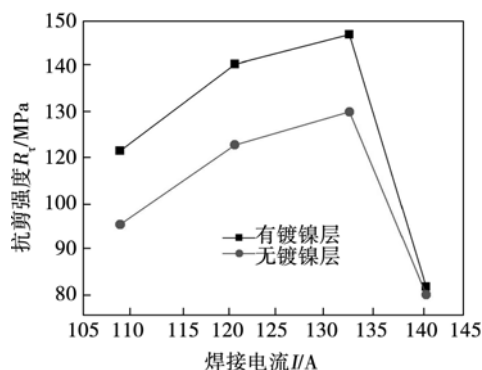


图 8 钢螺柱表面有镀镍层与无镀镍层情况接头抗剪切强度对比曲线

Fig. 8 Contrast curve of shearing strength

3 结 论

(1) 采用 ER4043 作为填充焊丝的 CMT 冷金属过渡焊方法可成功连接镀镍的 Q235 钢螺柱与 7A52 铝合金板材. 当焊接参数为焊接电流 115 ~ 135 A, 电弧电压 14.5 ~ 16.5 V, 焊接速度 0.3 m/min 时, 可获得良好接头, 接头分为钎焊界面区、熔焊界面区和熔化区, 在焊趾部位存在富镍区.

(2) 钎焊界面反应层越靠近焊趾部位厚度逐渐变小, 且在焊缝金属中的析出相逐渐消失. 反应层分为两层, 其中靠近钢螺柱一侧的 Fe_2Al_5 相最大厚度为 3 μm , 靠近焊缝金属一侧的 FeAl_3 相最大厚度为 14 μm 左右, 富镍区主要由铝固溶体和 Al_3Ni 的共晶组织组成.

(3) 镀镍层在焊接过程的行为降低了界面反应层厚度, 且通过形成富镍区, 降低了接头的脆性, 提

高了接头的抗剪强度, 达到 146.9 MPa, 提高了 15% ~ 19%, 满足了高强铝合金螺柱焊接的质量要求.

参考文献:

- [1] 吴圣川, 周鑫淼, 张卫华, 等. 激光-电弧复合焊接 7075-T6 铝合金裂纹扩展分析[J]. 焊接学报, 2013, 34(2): 5-8.
Wu Shengchuan, Zhou Xinmiao, Zhang Weihua, et al. Fatigue life prediction of laser-MIG hybrid welded 7075-T6 Al alloy joints [J]. Transactions of the China Welding Institution, 2013, 34(2): 5-8.
- [2] Deschamps A, Ringeval S, Texier G, et al. Quantitative characterization of the microstructure of an electron-beam welded medium strength Al-Zn-Mg alloy [J]. Materials Science and Engineering A, 2009, 517: 361-368.
- [3] 余进, 王克鸿, 徐越兰. 7A52 铝合金双丝焊接头的组织与性能[J]. 焊接学报, 2005, 26(10): 87-89.
Yu Jin, Wang Kehong, Xu Yuelan. Microstructures and properties of 7A52 aluminum alloy welded joint by twin wire welding [J]. Transactions of the China Welding Institution, 2005, 26(10): 87-89.
- [4] 梅丛富. 附座复合热源焊接方法与原理试验样机的研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2007.
- [5] 薛鹏飞. 螺柱与中厚高强钢复合热源螺柱焊试验研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2008.
- [6] 路浩. 铝合金厚板 CMT 补焊工艺试验[J]. 焊接学报, 2015, 36(5): 81-84.
Lu Hao. Repair welding experiment by CMT welding technology for thick aluminum alloy plate [J]. Transactions of the China Welding Institution, 2015, 36(5): 81-84.
- [7] 李茂华, 侯建国. 国内外钢结构设计规范关于角焊缝的限值及计算方法比较[J]. 钢结构, 2005, 20(77): 65-67.
Li Maohua, Hou Jianguo. Comparatively study on limitations and calculating methods of fillet welds in the criteria of steel structure design both at home and abroad [J]. Steel Construction, 2005, 20(77): 65-67.

作者简介: 葛佳棋, 男, 1986 年出生, 博士研究生. 主要从事铝钢异种结构的焊接. 发表论文 8 篇. Email: messiah35@sina.com

通讯作者: 王克鸿, 男, 教授, 博士研究生导师. Email: khwang1602@163.com