

直流磁场辅助铜-钢 TIG 焊接头组织和性能

戎 易¹, 王 德¹, 陈益平¹, 熊震宇^{1,✉}, 程东海¹, 胡德安¹, 邹鹏远², 李文杰¹

1 南昌航空大学航空制造工程学院, 南昌 330036

2 南昌大学机电学院, 南昌 330031

采用直流磁场辅助 TIG 焊进行铜-钢异种材料对接试验, 分析了直流磁场对 TIG 焊接头微观组织及力学性能的影响。结果表明: 当磁场强度 $B=10$ mT 时, 接头外观形貌良好且焊缝无气孔等缺陷。随着磁场强度的增大, 接头的抗拉强度呈先上升后下降的趋势。当 $B=10$ mT 时, 接头抗拉强度最高, 达到 194.6 MPa, 相比无磁场时增加了 25.79%, 接头熔合区的显微维氏硬度提升了 8.8%。接头由钢母材、铜侧热影响区、铜侧熔合区、焊缝区、铜侧热影响区和铜母材组成。其中熔合区组织由球状大颗粒 (I 层) 与带状小颗粒 (II 层) 的铜-钢固溶体组成。当 $B=10$ mT 时, I 层球状富铁相出现明显团聚现象且其中包含的铜颗粒增多, 旋涡状的 $(\alpha+\epsilon)$ 双相组织变多且旋度增加, 铁基体由网状变为小条状; II 层富铁相消失且 $(\alpha+\epsilon)$ 双相组织的厚度变薄。熔合区 $(\alpha+\epsilon)$ 双相组织旋度增加与富铁相的团聚起到机械咬合和增强第二相强化的效果, 这是接头强度与硬度提升的原因。

关键词 直流磁场 双相组织 机械咬合 第二相强化 富铁相

中图分类号: TG442 文献标识码: A

Microstructure and Properties of Copper-Steel TIG Welding Joint Assisted by DC Magnetic Field

RONG Yi¹, WANG De¹, CHEN Yiping¹, XIONG Zhenyu^{1,✉}, CHENG Donghai¹, HU De'an¹, ZOU Pengyuan², LI Wenjie¹

1 School of Aeronautical Manufacturing Engineering, Nanchang Hangkong University, Nanchang 330036, China

2 School of Mechanical and Electrical Engineering, Nanchang University, Nanchang 330031, China

The butt joint test of different materials of copper and steel was conducted by using DC magnetic field assisted TIG welding. The influence of DC magnetic field on the microstructure and mechanical properties of TIG welding joint was analyzed. The results show that when the magnetic field intensity $B=10$ mT, the appearance of the joint is good and the weld has no porosity and other defects. With the increase of magnetic field strength, the tensile strength of the joint first increases and then decreases. When $B=10$ mT, the tensile strength of the joint reached the highest (194.6 MPa), which increased by 25.79% compared with no magnetic field. The micro-vickers hardness of the joint fusion zone increased by 8.8%. The joint was composed of steel base material, steel side heat affected zone, steel side fusion zone, weld zone, copper side heat affected zone and copper base material. The fusion zone tissue from a large globular particles (I layer) and strip granules (II layer) of copper steel solid solution. When $B=10$ mT, I layer spherical iron-rich phase appeared obvious reunion phenomenon and containing copper particles increased, gyrate $(\alpha+\epsilon)$ bipolar tissue increasing much and curl, iron substrate from mesh into small strips; II layer iron-rich phase disappeared and $(\alpha+\epsilon)$ bipolar thickness of the organization thinned. The increase of the curl and the aggregation of Fe rich phase in the fusion zone enhanced the mechanical bite and the second phase strengthening. It is the reason that the strength and hardness of the joint improve.

Key words DC magnetic field, bipolar organization, mechanical interlocking, second phase reinforcement, Fe rich phase

0 引言

异种材料焊接复合结构不仅可以节省材料, 还能够发挥各自的性能优势^[1]。铜和钢在工业中应用广泛, 在制冷装置、机械制造及汽车工业等领域具有广阔的应用前景^[2]。然而, 铜与钢的物化性能和冶金特性存在较大差异, 将两者焊接到一起十分困难, 特别是两者导热性相差过大, 导致异种金属难以达到冶金结合, 使得焊接接头性能降低。

近年来, 铜/钢异种金属焊接所涉及的熔焊方法主要包括电弧焊、爆炸焊、电子束焊和激光焊等^[3-12]。其中, TIG 焊具有优良的经济性和操作灵活性, 得到了人们的认可。但是由于其较高的电弧温度和高温停留时间, 使得铜/钢异种金属 TIG 焊接头性能较差, 从而限制了其实际应用。外加磁场具有价格低廉、操作简单并能有效提高接头力学性能等优点, 受到国内外学者的广泛关注。Chen 等^[13]采用磁场、MIG、激光相结合的方法焊接 304 不锈钢, 结果表明, 在适当的磁

场强度下, 拉伸强度提高, 拉伸残余应力减小; 同时分析了磁场对晶粒细化和相变的促进作用。李军兆^[14]对铝钛异种金属进行磁场辅助 MIG 熔钎焊研究, 结果表明, 外加纵向磁场后, 焊接电弧发生旋转, 并存在扩张现象, 同时, 焊缝成形和接头的拉伸强度均得到显著改善。

外加纵向直流磁场, 磁场状态相对稳定。刘政军等^[15]通过外加纵向磁场控制铁基合金等离子弧, 得到堆焊时堆焊层硬质相的形态及分布。结果表明, 外加纵向磁场后堆焊层硬度和耐磨性得到提升。

外加直流磁场能够对焊接 TIG 电弧能量分布进行优化调控, 促进相变, 改善接头宏观形貌和显微组织, 并有望提高接头力学性能^[13-17]。因此, 本文通过外加纵向直流磁场对铜-钢进行 TIG 对接试验, 研究纵向直流磁场对焊接头的焊缝形貌、显微组织及力学性能的影响, 为外加纵向直流磁场铜-钢异种材料 TIG 焊的实际应用提供理论基础与工艺参考。

基金项目: 国家自然科学基金 (51965045)

This work was financially supported by the National Natural Science Foundation of China (51965045).

1 实验

试验材料选择 2 mm 厚的 T2 紫铜和 Q235 低碳钢, 尺寸规格为 120 mm×60 mm; 焊丝选用 $\Phi 2.5$ mm 的 HS201 纯铜焊丝; 试验设备采用型号为 WSM-315B 型直流氩弧焊机; 采用自制的磁场装置, 通过调节磁场发生装置的磁控电源和滑动变阻器来调节磁场电流, 进而控制磁场强度的变化, 磁控焊接装置如图 1 所示。为了补偿因铜的高导热性而产生的热损失, 将焊枪偏向铜侧 0.2 mm, 填丝方法为固定送丝, 送丝量为 120 mm, 铜板与钢板间的间隙为 0.2 mm。试验中保持焊接电流为 95 A, 焊接速度为 95 mm/min, 磁场强度范围为 0~20 mT, 研究直流磁场对焊接头的焊缝成形、显微组织及力学性能的影响。采用型号为 WDW-200D 微机控制电子万能试验机, 以 0.5 mm/min 的拉伸速率检测接头抗拉强度, 拉伸试样尺寸如图 2 所示, 采用型号为 DureScan 维氏显微硬度计测试接头显微硬度。采用光学显微镜 (Optical microscope, OM)、场发射扫描电子显微镜 (Scanning electron microscope, SEM) 对熔合区 (Fusion zone) 进行观察, 在扫描电镜上观察反应相的形貌及分布, 并用能谱仪 (Energy dispersive spectrometer, EDS) 测定各反应相成分。

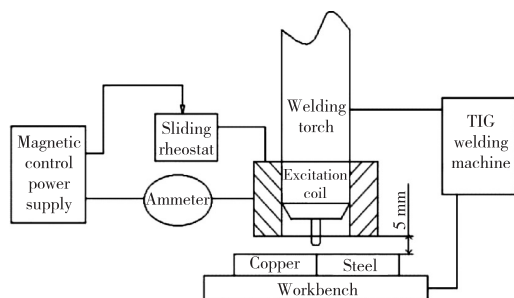


图1 磁控焊接装置示意图

Fig.1 Schematic diagram of welding device

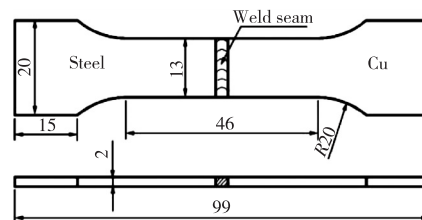


图2 拉伸试样尺寸图

Fig.2 Drawing of tensile specimen dimensions

2 结果与分析

2.1 接头表面成形与横截面

图 3a、b 分别是无磁场时接头正反面外观形貌, 观察可知, 在无磁场作用下, 焊缝正反面凹凸不平。这是由于铜、钢熔点及热导率差异较大, 它们凝固结晶的过程不同步, 在凝固过程中易出现熔池运动受阻, 造成焊缝表面凹凸不平。图 3c、d 分别是直流磁场 $B=10$ mT 下的接头正、反面外观形貌, 观察可知, 焊缝形貌良好, 焊缝正反面较为平直光滑。这是由于在外加直流磁场作用下, 电弧的形态由原来的圆锥形变为钟罩形, 焊接热流密度变小, 铜钢母材受热面积增大; 纵向直流磁场使得电弧产生单方向旋转运动, 带动熔池液态金属进行旋转运动, 使得熔池中两母材液态金属混合均匀, 改善了焊接接头的外观形貌, 并使之较为平直光滑。图 3e、f 分别是无磁场与外加 $B=10$ mT 磁场后接头的横截面, 观察可知, 在无磁场作用下, 横截面内有较多的气孔, 同时钢侧熔化或溶解较少; 在磁场作用下, 焊缝内无气孔, 钢侧熔化或溶解较多, 焊缝区颜色较深。这是由于在直流磁场作用下, 熔池内流体的旋转运动加剧, 大多数的气泡从熔池内向外出排出, 同时电弧的扩张使更多的 Fe 元素进入熔池, 从而使焊缝颜色加深。

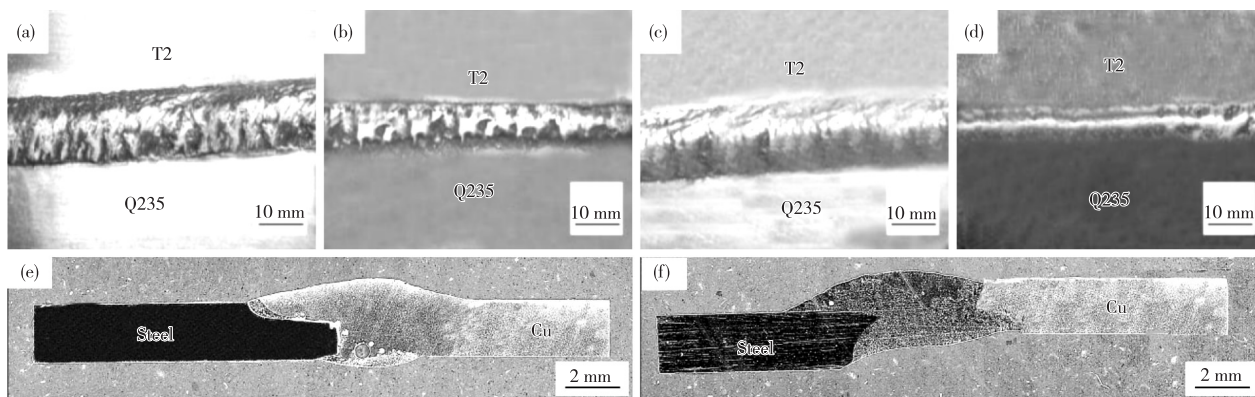


图3 无磁场与外加直流磁场后接头外观形貌: (a) 无磁场接头正面形貌; (b) 无磁场接头反面形貌; (c) $B=10$ mT 下正面形貌; (d) $B=10$ mT 下接头反面形貌; (e) 无磁场接头横截面; (f) $B=10$ mT 下接头横截面

Fig.3 Appearance morphology of joint without and with external DC magnetic field: (a) front morphology of magnetic field-free joint, (b) reverse morphology of magnetic field-free joint, (c) front morphology of joint at $B=10$ mT, (d) reverse morphology of joint at $B=10$ mT, (e) cross section of magnetic field-free joint, (f) cross section of joint at $B=10$ mT

2.2 微观组织分析

接头由钢母材、钢侧热影响区、钢侧熔合区、焊缝区、铜侧热影响区和铜母材组成。钢侧熔合区是接头的薄弱区域。运用 SEM 与 EDS 观察无磁场与磁场强度 $B=10$ mT 下的钢侧熔合区。如图 4a、b 分别是有、无磁场作用下接头熔合区

微观组织。分别对有、无磁场作用下接头熔合区的平均厚度 d 进行测量, 明显可知, 在外加磁场作用下, 接头平均厚度由 $117\ \mu\text{m}$ 降至 $90\ \mu\text{m}$, 这是由于直流磁场中旋转的电弧带动熔池表面液态金属做定向回转运动, 增加了液态金属对钢侧母材的冲刷面积, 接头平均厚度明显减小, 在一定程度上提升

了接头的力学性能。不论有无磁场作用,熔合区均有两部分(用 I 层和 II 层表示),其中 I 层靠近钢材,主要由球状的大颗粒铜钢固溶体组织组成,而 I 层外侧存在一条带状的小颗粒铜钢固溶体组织(II 层)。这是由于铜与钢热导率的差异,使两者在冷却和凝固过程中保持独立的液相,铜首先发生凝固,在高强度的紊流及表面张力的作用下,在 I 层形成铜钢球状固溶体,而在 II 层形成了富铁的组织。结合 Fe-Cu 二元合金相图分析可知,铁与铜不产生金属间化合物,当铜含量小于 0.3% 时,其组织为铜在铁中的固溶体 α 相;当铁含量小于 0.2% 时,形成铁在铜中的固溶体 ε 相;当铜、铁含量在其它情况下时,则形成 $(\alpha+\varepsilon)$ 双相组织,故熔合区组织以 $(\alpha+\varepsilon)$ 双相固溶体形式存在。表 1 为图 4a、b 各点的能谱数据,分析可知,在未加磁场的情况下,熔合区 I 层主要由四部分组成,分别为球状富铁相包裹着小尺寸铜颗粒、球状富铜相包裹着小尺寸铁颗粒、网状分布的旋涡状 $(\alpha+\varepsilon)$ 双相组织以及网状铁基体上弥散分布的铜与铁颗粒。熔合区 II 层主要由层状的 $(\alpha+\varepsilon)$ 双相组织组成,其中夹杂着少许球状富铁相。

表 1 图 4 中熔合区各点 EDS 分析结果(原子分数,%)
Table 1 EDS results (at%) of various points in the fusion zone in Fig. 4

	Point	Fe	Cu	C
$B=0$	A	86.51	6.68	6.81
	B	26.10	67.50	6.40
	C	8.23	86.05	5.72
	D	90.02	5.11	4.87
	E	85.66	6.61	7.73
	F	80.55	13.48	5.97
$B=10\text{ mT}$	A	86.01	6.68	7.31
	B	26.02	67.48	6.49
	C	10.18	82.68	7.14
	D	91.22	4.53	4.25
	E	86.68	6.57	6.76
	F	67.54	26.54	5.92

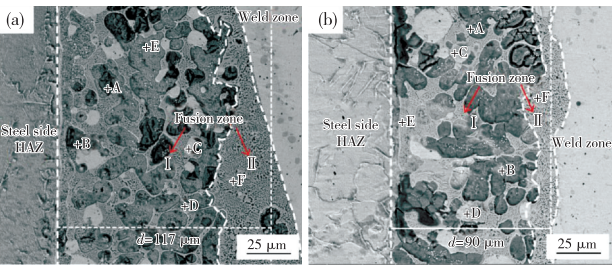


图 4 有无磁场下熔合区 SEM 对比:(a)无磁场;(b) $B=10\text{ mT}$
Fig.4 SEM comparison of fusion zone with or without magnetic field: (a) no magnetic field, (b) $B=10\text{ mT}$

当外加 $B=10\text{ mT}$ 的直流磁场时,熔合区的组织形态出现了以下四处较为明显的变化: I 层球状富铁相出现明显团聚现象且其中包裹的铜颗粒增多; I 层呈旋涡状 $(\alpha+\varepsilon)$ 双相组织变多且旋度增加; I 层中的铁基体由网状变为小条状; II 层中层状的 $(\alpha+\varepsilon)$ 双相组织变薄且其中的富铁相消失。

这些变化是因为直流磁场的加入导致电弧的扩张及磁场对熔池的电磁搅拌作用。电弧的扩张使钢材相比于无

磁场时熔化量增大,导致更多的 Fe 元素进入到熔池中。当铜固溶铁的能力远远不足时,根据凝固界面形态稳定性原理,过量的铁元素会保持球状稳定生长,且出现明显团聚现象。同时磁场的电磁搅拌作用使熔池的旋转运动加剧, I 层的 Fe 基体被冲散,由网状变为小条状,而 II 层中层状的 $(\alpha+\varepsilon)$ 双相组织变薄且其中的富铁相消失。同时,电磁搅拌使更多的 Cu 元素进入熔池,熔池扩散速率加快,加速了其液相分离,待冷却凝聚时, Cu 颗粒析出量增加。另外,磁场加剧了熔池紊流的产生,使双相组织凝固后呈旋涡状且旋度增加。

2.3 力学性能分析

图 5 为磁场强度 B 对焊接接头抗拉强度的影响,由图 5 可以看出,随着磁场强度的增大,焊接接头的抗拉强度呈先上升后下降的趋势。在 $B=10\text{ mT}$ 时,焊接接头的抗拉强度达到最大值,为 194.6 MPa,比无磁场时接头的抗拉强度值提升了 25.79%。通过拉伸试验发现,在未加磁场的情况下,接头拉伸后的断裂发生在熔合区;当外加直流磁场辅助时,接头断裂发生在铜侧热影响区。这说明熔合区不再是接头的薄弱区,接头的抗拉强度提升。而这主要是因为电弧的扩张和磁场的电磁搅拌作用使平均厚度变薄,熔合区 I 层球状富铁相出现明显团聚现象,旋涡状 $(\alpha+\varepsilon)$ 双相组织变多且旋度增加,这些组织形貌的变化起到了一定机械咬合的作用并达到了提高第二相强化的效果,提高了元素间的紧密程度,从而使焊接接头的力学性能提高。

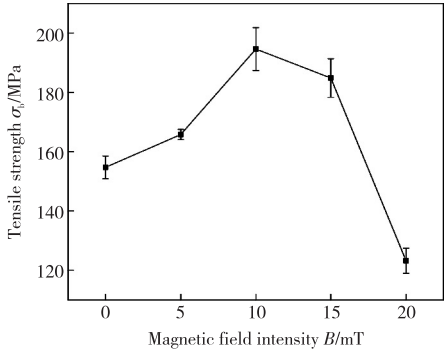


图 5 磁场强度 B 对焊接接头抗拉强度的影响曲线
Fig.5 Effect of magnetic field strength B on tensile strength of joint

图 6 为无磁场与磁场强度 $B=10\text{ mT}$ 下各区域的维氏硬度值,外加直流磁场后,铜侧热影响区、熔合区、焊缝区、铜侧热影响区的硬度都有所提升。其中,铜侧热影响区和钢侧热

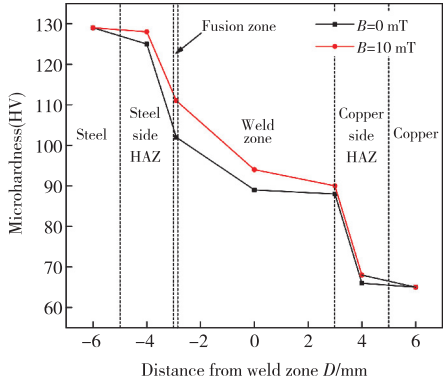


图 6 无磁场与 $B=10\text{ mT}$ 下各区域的维氏硬度值(电子版为彩图)
Fig.6 Vickers hardness values in each region with no magnetic field and $B=10\text{ mT}$

影响区的硬度值变化较小;而熔合区硬度提升最为明显,其显微维氏硬度提升了 8.8%。这是因为在磁场的搅拌作用下,熔池中的 Cu 和 Fe 元素间的扩散更为剧烈,熔合区富铁相的团聚与($\alpha+\varepsilon$)双相组织的第二相强化使其硬度值提高。

3 结论

(1) 无磁场时,焊缝正反表面凹凸不平,焊缝中出现较多气孔。在直流磁场作用下,接头外观形貌良好且焊缝无气孔等缺陷。

(2) 接头由钢母材、钢侧热影响区、钢侧熔合区、焊缝区、铜侧热影响区和铜母材组成。其中熔合区组织由球状大颗粒(I层)与带状小颗粒(II层)的铜钢固溶体组成。当 $B=10\text{ mT}$ 时, I 层球状富铁相出现明显团聚现象且其中包含的铜颗粒增多,旋涡状的($\alpha+\varepsilon$)双相组织变多且旋度增加,铁基体由网状变为小条状; II 层富铁相消失且($\alpha+\varepsilon$)双相组织的厚度变薄。熔合区($\alpha+\varepsilon$)双相组织旋度增加与富铁相的团聚起到机械咬合作用并提高第二相的强化效果,提升了接头的硬度与强度。

(3) 随着磁场强度 B 的增大,接头的抗拉强度呈先上升后下降的趋势。当 $B=10\text{ mT}$ 时,接头抗拉强度最高,达到 194.6 MPa,相比无磁场时增加了 25.79%。同时,接头熔合区的显微维氏硬度提升了 8.8%。

参考文献

- Shi Y, Gao H M, Li G, et al. *Materials Reports B: Research Papers*, 2018, 32(6), 909(in Chinese).
石珩, 高海铭, 李广, 等. *材料导报: 研究篇*, 2018, 32(6), 909.
- Hou L T, Chen W G, Liu Y B, et al. *Chinese Journal of Materials Research*, 2015, 29(09), 693(in Chinese).
侯林涛, 陈文革, 刘盈斌, 等. *材料研究学报*, 2015, 29(09), 693.
- Poo-arporn Y, Duangnil S, Bamrungkoh D, et al. *Journal of Materials Processing Technology*, 2020, 277.
- Cheng Z, Huang J, Ye Z, et al. *Journal of Materials Processing Technology*, 2019, 265, 87.
- Joshi G R, Badheka V J. *Metallography Microstructure and Analysis*, 2017, 6(6), 470.
- Joshi G R, Badheka V J. *Materials and Manufacturing Processes*, 2019, 34(11), 1232.
- Zhang Y, Huang J, Chi H, et al. *Materials Letters*, 2015, 156, 7.
- Zhang H, Jiao K X, Zhang J L, et al. *Materials Science and Engineering: A*, 2018, 731, 278.
- Magnabosco I, Ferro P, Bonollo F, et al. *Materials Science and Engineering: A*, 2006, 424(1).
- Mannucci A, Tomashchuk I, Vignal V, et al. *Procedia CIRP*, 2018, 74, 450.
- Chen S, Huang J, Xia J, et al. *Metallurgical and Materials Transactions: A*, 2013, 44(8), 3690.
- Miao Y G, Li C W, Zhao H H, et al. *Transactions of the China Welding Institution*, 2019, 40(5), 95(in Chinese).
苗玉刚, 李春旺, 赵慧慧, 等. *焊接学报*, 2019, 40(5), 95.
- Chen R, Jiang P, Shao X, et al. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2017, 91(9-12), 3437.
- Li J Z. Research on process and mechanism of magnetic field assisted MIG welding-brazing for Ti/Al dissimilar alloys. Master's Thesis, Harbin Institute of Technology, China, 2017(in Chinese).
李军兆. 磁场辅助钛/铝异种金属 MIG 熔-钎焊工艺及机理研究. 硕士学位论文, 哈尔滨工业大学, 2017.
- Liu Z J, Song X K, Shao D W, et al. *Transactions of the China Welding Institution*, 2010, 31(1), 71(in Chinese).
刘政军, 宋兴奎, 邵大伟, 等. *焊接学报*, 2010, 31(1), 71.
- Chen R, Jiang P, Shao X, et al. *Journal of Materials Processing Technology*, 2017, 247, 306.
- Jian L, Zongxiang Y, Keliang X. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2016, 84(1-4), 647.

(责任编辑 汪芸竹)



Yi Rong is a postgraduate student in the department of Welding Engineering at Nanchang Hangkong University, and her main research direction is dissimilar metal materials welding.

戎易, 南昌航空大学航空制造工程学院, 硕士研究生。主要研究方向为异种金属材料焊接。



Zhenyu Xiong born in November, 1968, member of the Communist Party of China, master degree, professor, doctor, master supervisor, young backbone teacher of Jiangxi Province, vice president of Jiangxi Mechanical Engineering Society, vice president of Jiangxi Welding Society. He mainly engaged in welding robot and automation, and welding quality control research. He has hosted or participated in 2 National "863" projects, 2 National Natural Science Foundation projects, and many provincial and ministerial projects. He is now the vice president of Nanchang Hangkong University.

熊震宇, 1968 年 11 月出生, 中共党员, 研究生学历, 教授、博士、硕士生导师、江西省中青年骨干教师, 江西省机械工程学会副理事长, 江西省焊接学会副理事长。主要从事焊接机器人与自动化、焊接质量控制的研究工作。主持或参与国家“863”计划项目 2 项, 国家自然科学基金项目 2 项, 省部级项目多项。现任南昌航空大学副校长。