

ZnO+Al 粉末铝热剂对 2024 铝合金 电阻点焊熔核质量的影响

罗 怡^{1,2}, 李京龙²

(1. 重庆理工大学, 重庆 400054)

(2. 西北工业大学 凝固技术国家重点实验室, 陕西 西安 710072)

摘 要: 提出具有节能高效特征的粉末铝热剂介入型电阻点焊新技术, 通过添加 ZnO+Al 粉末铝热剂介入 2024 铝合金电阻点焊, 研究了铝热剂介入对电阻点焊熔核成形、显微组织、力学性能等质量因素的影响。结果表明, 在 ZnO+Al 粉末铝热剂冶金反应热的辅助作用下, 可以有效增大 2024 铝合金的电阻点焊熔核尺寸以及熔核内部树枝晶区尺寸。粉末铝热剂的添加, 使熔核中心区域拥有更多的异质形核晶核, 促使凝固进程中的固-液界面前沿出现大范围成分过冷, 更有利于等轴晶的形核, 使等轴晶的分布更为均匀, 细化熔核中心等轴树枝晶束。同时, 也强化熔核胞状晶区, 使熔核强韧性得到提高。最终在试验焊接电流范围内提高焊点强度 28%~200%。

关键词: 铝合金; 电阻点焊; 熔核; 铝热剂

中图分类号: TG451

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2014)02-0485-05

在诸多的焊接方法中, 电阻点焊被视为最重要的连接方法而被应用于车身结构及其零部件的制造中。包括不锈钢^[1]、镀锌钢^[2]、钛合金^[3]、铝合金^[4]、镁合金^[5-8]在内的多种金属结构材料均可以采用这种方法进行板材的焊接组装。但是, 与其它焊接方法相比, 电阻点焊能耗相对较高。以电阻点焊、搅拌摩擦点焊和超声波点焊这 3 种点焊方法为例进行比较^[9]: 在焊接同为 1 mm 厚铝合金薄板材料时, 电阻点焊每个焊点所需要的能量大致为 50~100 kJ, 焊接周期为 0.15~0.3 s; 搅拌摩擦点焊每个焊点所需要的能量大致为 3~6 kJ, 焊接周期为 1~5 s; 超声波点焊每个焊点所需要的能量大致为 0.6~1.5 kJ, 焊接周期为 0.25~0.6 s。可见, 电阻点焊虽然焊接周期短, 生产效率高, 但是所需要消耗的能量却最高, 远超过其它两种焊接方法。

铝合金等轻合金材料具有较高的导热、导电性。因此, 同样条件下产生电阻热相对较少, 且大量的焊接热量被迅速传导到金属基体及周围环境中而损失掉, 焊接时需要相对更高的焊接能量作用才能实现这类材料的高质量焊接。在实际焊接生产中, 为了提供足够的电阻热量, 铝合金等轻合金薄板结构的电阻点焊焊接电流通常为相同板厚低碳钢的 3~5 倍。因此, 为了实现铝合金等轻合金薄板材料的高质量焊接, 需

要功率强大的电阻点焊机。这无疑增大了能源消耗, 增加了生产中的能源成本。因此, 研究高效节能的铝合金电阻点焊新技术有利于促进铝合金等轻合金材料在新型汽车制造中的推广应用, 推动轻合金材料应用在轿车轻量化和环保化等绿色理念中发挥出巨大潜力。

本研究提出具有节能高效特征的粉末铝热剂介入型电阻点焊新技术, 探索 ZnO+Al 粉末铝热剂添加对 2024 铝合金电阻点焊质量的影响。国内也有采用点焊介质介入铝合金电阻点焊工艺过程的研究报道, 但主要是基于提高焊点质量。例如, 赵熹华等人对电阻点焊可焊性较差的难焊金属材料, 如铝合金等, 采用孕育处理技术提高了点焊接头力学性能, 改善了焊点质量, 为电阻点焊质量控制开辟了一条新的技术途径^[10]。郑振太等人基于改变工件待焊表面接触状态和电极间电阻分布的考虑, 提出了一种大电阻介质材料介入的电阻点焊方法, 虽然熔核中出现个别小气孔, 但在一定程度上也起到了稳定焊接质量、降低焊接电流、提高电极寿命的作用^[11]。本研究提出的粉末铝热剂介入型电阻点焊新技术, 对于降低铝合金电阻点焊生产过程的能量消耗, 提高铝合金等轻合金材料的电阻点焊工艺性和焊接质量, 具有重要的理论意义和工程实际应用价值。

收稿日期: 2013-01-15

基金项目: 重庆市科委自然科学基金计划资助项目 (cstcjjA50013); 西北工业大学凝固技术国家重点实验室开放课题 (SKLSP201204)

作者简介: 罗 怡, 男, 1979 年生, 博士, 副教授, 重庆理工大学材料科学与工程学院, 重庆 400054, 电话: 023-62563178, E-mail: luoyi@cqu.edu.cn

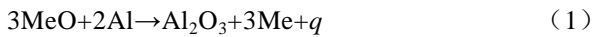
1 实验

试验中所采用的材料为 2 mm 厚 2024 铝合金，试样的规格均为 25 mm×100 mm，焊接时叠加重合 25 mm，焊前在试样重合处涂敷粉末铝热剂，如图 1 所示。采用的焊接设备为 YR-A05CM2 型交流电阻点焊机，电极材料选用铬锆铜合金 (CuCrZr)，电极尺寸为直径 8 mm 的圆锥台型电极。

试验中所采用的粉末铝热剂以 Al 粉为基，并添加 20% (质量分数) 的 ZnO 粉末，将粉末铝热剂用丙酮混合均匀，再涂敷到试样重合处，涂覆量为 60~100 mg/cm²，待丙酮挥发后，进行焊接。焊接所采用的工艺参数如表 1 所示，其中，焊接电流由 18 000 到 26 000 A 递增，从而获得不同的焊接效果。

2 结果与讨论

粉末铝热剂中包括金属氧化物粉末 ZnO 和铝粉末，当焊接电流通过粉末铝热剂时，电阻热将使粉末铝热剂发生铝热冶金反应，并释放出反应热，其反应式为



其中，*q* 为冶金反应热。显然，冶金反应热作为辅助热源，与电阻热源一起提供实现焊接所需要的能量。在一定程度上，冶金反应热的存在提高了焊接区产热的热效率，因而降低了对焊接电流的要求，即在电阻热和冶金反应热的共同作用下，焊接电源供给较小的

电流也可以为焊点的焊合、熔核的形核提供所需要的足够能量，从而减少了轻合金材料焊接过程中的电能消耗，在一定程度上实现生产制造环节的能源节约。以下将分别讨论 ZnO+Al 粉末铝热剂介入电阻点焊对 2024 铝合金熔核成形、组织、力学性能的影响。

对于铝合金材料电阻点焊获得的典型熔核，按照其组织特征差异，通常可以将熔核分成 3 个区域，如图 2 所示，为 2024 铝合金电阻点焊接头的分区，即塑性环区，胞状晶区和树枝晶区。在液态熔核周围的高温固体金属，受到电极压力作用产生塑性变形和再结晶，从而形成塑性环，其组织如图 3a 所示。由于过冷条件不同，在温度梯度较小而成分过冷度较大的熔核中心区形成树枝晶区 (图 3c)，其中分布柱状树枝晶以及等轴树枝晶。在塑性环和树枝晶区之间由于较大的温度梯度，从而形成胞状晶区 (图 3b)，其中分布胞状晶以及胞状树枝晶。

2.1 熔核尺寸

为了比较添加粉末铝热剂焊接对熔核成形的影响，图 4 对焊接电流为 18000 和 26000 A 时获得的熔核形貌进行了对比。可以看出，在焊接电流为较小的 18000 A 时，添加 ZnO+Al 粉末铝热剂进行电阻点焊使熔核尺寸得到较为显著的增大 (图 4a, 4c)。可以推测，粉末铝热剂在电阻热作用下产生冶金反应释放出的冶金反应热对熔核形核产生了较大的作用，有利于增大熔核。在焊接电流为较大的 26000 A 时，由于电阻热提供了较大的形核能量，这种冶金反应热对熔核成形的增大效果并不明显 (图 4b, 4d)。

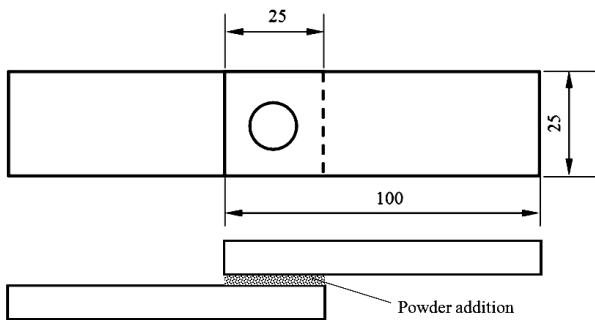


图 1 焊接试样说明

Fig.1 Specifications of specimen

表 1 焊接工艺参数

Table 1 Welding parameters

No.	Welding current, I/A	Duration of welding current, T/s	Electrode force, P/MPa
1	18000	0.16	0.1
2	20000	0.16	0.1
3	22000	0.16	0.1
4	24000	0.16	0.1
5	26000	0.16	0.1

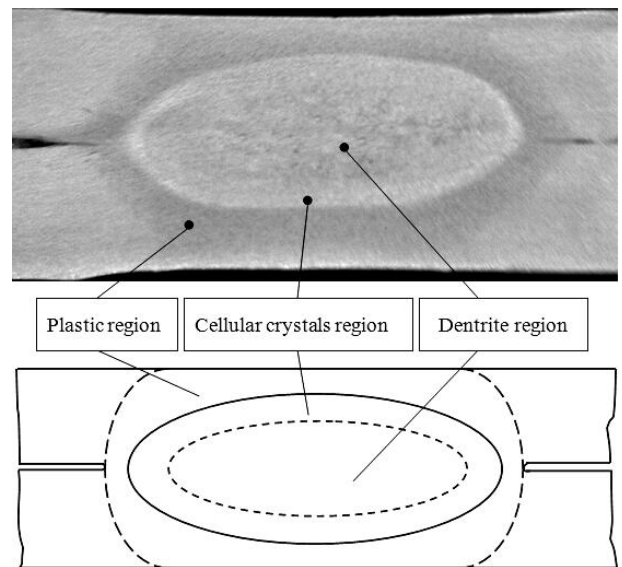


图 2 2024 铝合金电阻点焊熔核分区示意图

Fig.2 Nugget region of resistance spot welding on 2024 aluminum alloy

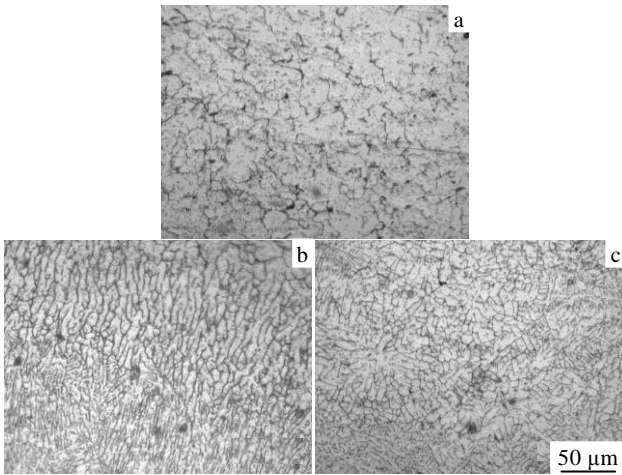


图 3 2024 铝合金电阻点焊熔核分区微观组织

Fig.3 Microstructures in plastic region (a), cellular crystals region (b) and dendrite region (c) of nugget in resistance spot welding on 2024 aluminum alloy

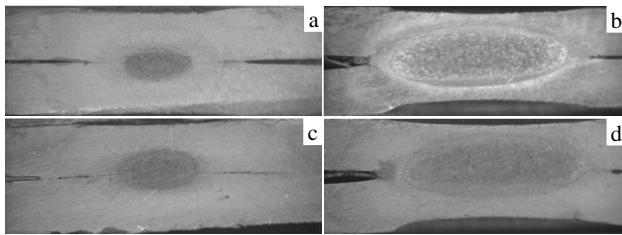


图 4 2024 铝合金熔核宏观成形

Fig.4 Macro-appearance of nugget of 2024 aluminum alloy as (a, c) $I=18000$ A and (b, d) $I=26000$ A: (a, b) No powder addition; (c, d) ZnO+Al powder addition

图 5 表现了在采用相同的焊接工艺参数进行焊接的前提下,添加 ZnO+Al 粉末铝热剂对 2024 铝合金电阻点焊熔核形状尺寸的影响,包括粉末铝热剂对熔核直径的影响(图 5a)以及对熔核高度的影响(图 5b)。从熔核成形角度分析,在各焊接电流下添加 ZnO+Al 粉末铝热剂均实现了 2024 铝合金材料焊接区的可靠形核。由于电阻热作用下合金粉末铝热剂产生冶金反应热释放,与未添加合金粉末铝热剂的熔核形核相比较,较小电流施焊时,ZnO+Al 粉末铝热剂的添加增加了形成熔核的直径,同时显著增大了熔核高度。显然,这种形状尺寸的变化将增大焊点的有效承载面积,有利于焊点承载能力的提高。

熔核中的有等轴树枝晶分布的树枝晶区的范围扩大分布有利于形成力学性能更加均匀的优质焊点。图 6 表现了在同样焊接工艺条件下,添加 ZnO+Al 粉末铝热剂对熔核树枝晶区的直径(图 6a)和高度(图 6b)

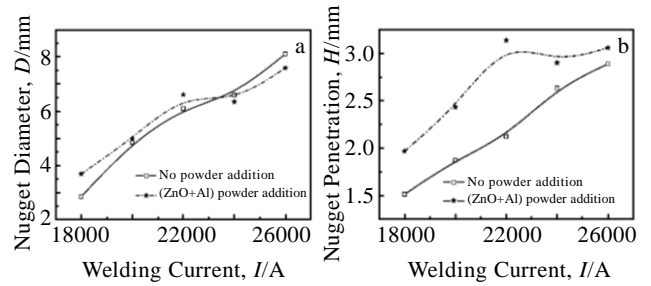


图 5 2024 铝合金电阻点焊熔核形状尺寸

Fig.5 Nugget size of 2024 aluminum alloy: (a) diameter and (b) penetration

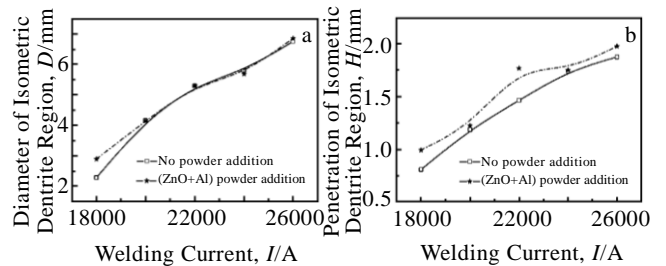


图 6 2024 铝合金电阻点焊熔核树枝晶区尺寸

Fig.6 Size of dendrite region in nugget of 2024 aluminum alloy: (a) diameter and (b) penetration

的影响。可以看出,相对于无添加的 2024 铝合金电阻点焊形成的熔核, ZnO+Al 粉末铝热剂的添加,使熔核中的树枝晶区直径的增大并不显著,而树枝晶区的高度有所增加。这样,除树枝晶区以外的胞状晶区,即承力致密区的尺寸有明显增加。因此,总体来看,有利于获得具有更大承载强度的焊点。

2.2 显微组织

由于熔核中最后凝固的中心区域温度梯度较小,溶质浓度不断提高,使等轴晶核在熔核中心区域增殖,从而以等轴树枝晶形态生长。当等轴树枝晶迅速长大并与柱状晶的枝晶束彼此相遇后,枝晶束出现相互阻碍。当凝固结束时,剩余的液态金属不足以完全填充枝晶间的间隙,便形成缩松缺陷。显然,熔核中的等轴树枝晶越多,缩松缺陷的分布空间越少,越有利于优质焊点的形成。

当焊接电流为较小的 18 000 A 时,得到的熔核中心等轴树枝晶形态如图 7 所示。可以清楚地看出,未添加粉末铝热剂获得的熔核中心处分布的等轴树枝晶相对较少(图 7a),而添加 ZnO+Al 粉末铝热剂的熔核中心均分布有数量更多的等轴树枝晶(图 7b)。由于添加的粉末铝热剂中的 Zn 元素被 Al 元素还原,这一反应释放出大量反应热,显然,相对于未添加粉末铝

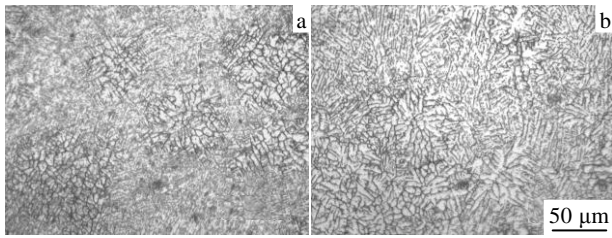


图 7 $I=18\ 000\ A$ 时熔核内等轴树枝晶比较

Fig.7 Isometric dendrite in nugget with no powder addition (a) and ZnO+Al powder addition as $I=18000\ A$ (b)

热剂的熔核，反应热的释放使熔核中心周围区域处于更高温度区间，使较小焊接电流下的熔核中心周围区域温度梯度更为均匀，更有利于等轴树枝晶的形核。另外，最后凝固的熔核中心区域，由于粉末铝热剂的添加，使其拥有了更多的异质形核晶核，在凝固进程的固-液界面前沿的液体中也出现了大范围的成分过冷，从而更有利于等轴树枝晶的形核。这些因素使熔核中心出现图 7b 中的大量等轴树枝晶的分布。

当焊接电流为较大的 26000 A 时，由于较大的焊接电流产生更高的焊接电阻热量，使熔核中心区域的温度梯度较低，这是促使成分过冷的有效条件。因此，未添加粉末铝热剂的熔核内部同样有大量等轴树枝晶的分布，如图 8a 所示。此时，在已经有大量焊接电阻热产生的前提下，添加 ZnO+Al 粉末铝热剂产生的热量增殖效应并不显著。因此，等轴树枝晶形态差异并不大，如图 8b 所示。当然，由于添加 ZnO+Al 粉末铝热剂形成了更多的异质形核晶核，熔核中心等轴晶的分布更为均匀，枝晶更为细小，如图 8b 所示添加 ZnO+Al 粉末铝热剂的焊接效果。

2.3 力学性能

图 9 为添加 ZnO+Al 粉末铝热剂焊接形成的焊点的显微硬度分布。可以看出，当焊接电流为较小的 18 000 A 时（图 9a），熔核内显微硬度分布存在一定的不均匀性，但添加粉末铝热剂与未添加粉末铝热剂

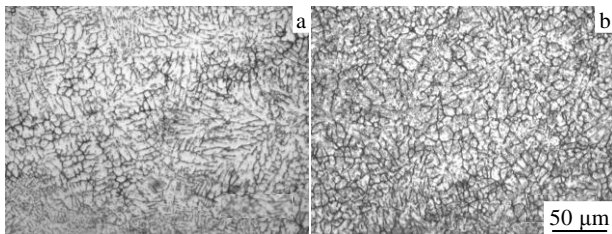


图 8 $I=26\ 000\ A$ 时熔核内等轴树枝晶比较

Fig.8 Isometric dendrite in nugget with no powder addition: (a) and ZnO+Al powder addition as $I=26\ 000\ A$ (b)

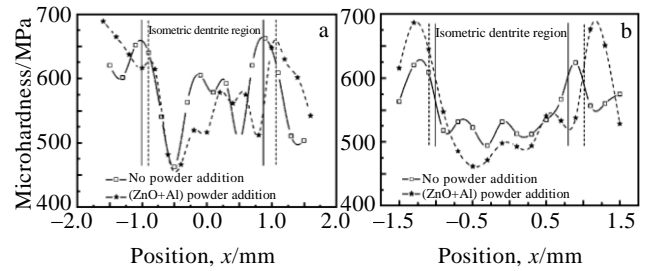


图 9 添加 ZnO+Al 混合粉末的焊点显微硬度分布比较

Fig.9 Microhardness in nugget with ZnO+Al powder addition: (a) $I=18\ 000\ A$ and (b) $I=26\ 000\ A$

形成的焊点的显微硬度分布差别并不大。当焊接电流为较大的 26 000 A 时（图 9b），由于熔核内等轴树枝晶分布不均匀，造成熔核内部的显微硬度分布同样存在不均匀性。与未添加粉末铝热剂形成的熔核相比，添加粉末铝热剂形成的熔核内部等轴晶区存在一定的软化现象，而柱状晶区则得到一定强化，这种硬度分布可以使焊点获得更均匀的强韧性分配。

图 10 为同种焊接参数下，不添加粉末铝热剂的常规电阻点焊焊点和添加 ZnO+Al 粉末铝热剂的电阻点焊焊点拉剪强度对比。可以看出，ZnO+Al 粉末铝热剂介入形成的焊点具有明显更高的强度。可以据此推测，在这一焊接电流区间之内，焊接电源提供的焊接能量得到了更有效的利用，获得了该工艺条件下优于常规电阻点焊工艺下的焊点。这意味着在粉末铝热剂辅助作用下，采用相对较小的焊接电流即可实现常规焊点的连接强度。

熔核中心等轴树枝晶束的细化，以及熔核柱状晶的强化，使焊点强韧性得到提高，熔核尺寸的增加以及等轴树枝晶区范围的增大，增大了焊点的有效承载面积，提高了焊点的承载强度，从而使添加 ZnO+Al 粉末铝热剂的焊点力学性能相对于未添加粉末铝热剂的焊点得到改善。

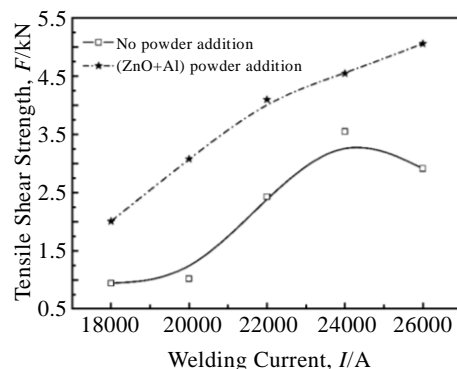


图 10 焊点拉剪强度比较

Fig.10 Contrast of tensile-shear strength of spot weld

3 结 论

1) 由于粉末铝热剂在电阻热作用下产生冶金反应释放出的冶金反应热效应, 使添加 ZnO+Al 粉末铝热剂介入 2024 铝合金电阻点焊获得的熔核直径、熔核高度得以增大, 而熔核内部等轴树枝晶分布的树枝晶区尺寸也得到一定增大, 这些因素均有利于获得更加优质的焊点。

2) 添加 ZnO+Al 粉末铝热剂介入 2024 铝合金电阻点焊过程反应热的释放使熔核中心周围区域温度梯度降低, 更有利于等轴树枝晶的形核。粉末铝热剂的添加, 使熔核中心区域拥有了更多的异质形核晶核, 并促使凝固进程中的固-液界面前沿出现大范围成分过冷, 从而更有利于等轴晶的形核, 使熔核中心等轴晶的分布更为均匀, 枝晶更为细小。

3) 由于熔核尺寸的增大增加了焊点的有效承载面积, 熔核中心等轴树枝晶束的细化, 以及熔核柱状晶区的强化, 使焊点强韧性得到提高, 从而使添加 ZnO+Al 粉末铝热剂介入 2024 铝合金电阻点焊获得了更高的焊点强度。

4) 在电阻热和粉末铝热剂冶金反应热的共同作用下, 较小焊接电流的施加即可以获得相对更大的焊点强度, 从而可以减小 2024 铝合金电阻点焊的能量消耗。

参考文献 References

- [1] Ozyurek D. *Materials and Design*[J], 2008, 29 (3): 597
- [2] Luo Y, Liu J H, Xu H B *et al. Materials and Design*[J], 2009, 30(7): 2547
- [3] Kahraman N. *Materials and Design*[J], 2007, 28(2): 420
- [4] Bakavos D, Prangnell P B. *Materials Science and Engineering* [J], 2010, 527A(23): 6320
- [5] Sun D Q, Lang B, Sun D X *et al. Materials Science and Engineering A*[J], 2007, 460-461(7): 494
- [6] Qiu R F, Satonaka S, Lwamoto C. *Science and Technology of Welding and Joining*[J], 2009, 14(8): 691
- [7] Wang Y R, Feng J C, Zhang Z D. *Science and Technology of Welding and Joining*[J], 2006, 11(5): 555
- [8] Wang Y R, Mo Z H, Feng J C *et al. Science and Technology of Welding and Joining*[J], 2007, 12(8): 641
- [9] Bakavos D, Prangnell P B. *Materials Science and Engineering* [J], 2010, 527A: 6320
- [10] Zhao Xihua(赵熹华), Xu Guocheng(徐国程), Zhao Lei(赵蕾) *et al. Journal of Jilin University of Technology (Natural Science)*(吉林工业大学自然科学学报)[J], 2001, 31(4): 17
- [11] Zheng Zhen tai(郑振太), Shan Ping(单平), Hu Shengsun(胡绳荪) *et al. Transactions of the China Welding Institution*(焊接学报)[J], 2006, 27(7): 5

Influence of Powder Thermite of ZnO+Al upon Nugget Quality on Resistance Spot Welding of 2024 Aluminum Alloy

Luo Yi^{1,2}, Li Jinglong¹

(1. Chongqing University of Technology, Chongqing 400054, China)

(2. State Key Laboratory of Solidification Processing, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: A novel technology for resistance spot welding with interventional powder thermite was proposed, which is characterized with energy saving and high efficiency. The influences of the interventional powder thermite ZnO+Al upon the nugget formation, the microstructure and the mechanical property were studied in the resistance spot welding of 2024 aluminum alloy. The results indicate that the powder thermite ZnO+Al can effectively increase the dimension of the nugget and the dentrite region with the extra help of the heat of the metallurgical reaction from the powder thermite ZnO+Al. The ZnO+Al addition increases the heterogeneous nucleation in the nugget and prompts the appearing of a large scale constituent supercooling in the solid-liquid interface front during the process of solidification, which makes the distribution of equiaxed grains more uniform and refines the dendritic bundles of the equiaxed grains in the nugget. According to the aforementioned facts, the tensile-shear strength of the nugget is improved. The experimental results show that the spot strength can increase by over 28%~200% in the range of experiments with the help of the ZnO+Al addition.

Key words: aluminum alloy; resistance spot welding; nugget; powder thermite

Corresponding author: Luo Yi, Ph. D., Associate Professor, School of Materials Science and Engineering, Chongqing University of Technology, Chongqing 400054, P. R. China, Tel: 0086-23-62563178, E-mail: luoyi@cqut.edu.cn