

异种不等厚铝合金电阻点焊分流的数值模拟

张 禹¹, 毕 敬², 罗 震^{1,3}, 李 洋¹

(1. 天津大学 材料科学与工程学院,天津 300072; 2. 天津航天长征火箭制造有限公司,天津 300462;
3. 哈尔滨工业大学 先进焊接与连接国家重点实验室,哈尔滨 150001)

摘 要:采用 ANSYS 软件建立了异种不等厚铝合金 2219/5052 电阻点焊分流模型,研究了两焊点间不同焊点间距对分流大小和熔核直径的影响,分析了电阻点焊分流现象的机理,并提出改善分流现象的工艺措施. 计算结果表明,焊点间距越小,分流程度越大,12 mm 间距时无熔核. 提高焊接电流,可抑制分流,改善分流现象. 经试验验证,数值计算得到的熔核直径与试验测得结果吻合良好,验证了模型的正确性,为研究电阻点焊分流现象提供理论了依据.

关键词: 2219/5052 异种焊接; 不等厚铝合金; 电阻点焊分流; 数值模拟

中图分类号: TG 455 **文献标识码:** A **doi:**10. 12073/j. hjxb. 20151107001

0 序 言

铝合金由于具有良好的综合力学性能、优良的导电性和导热性,质轻价廉,广泛应用于汽车、船舶及航空航天等重要领域. 2219 和 5052 异种不等厚铝合金的电阻点焊在航空航天领域的实践中得到了广泛的应用^[1].

在实际电阻点焊工业应用中,由于考虑到强度设计等因素,在同一工件上通常需要多个焊点,从而达到产品的强度和设计要求. 但是在焊接第二个焊点时,部分焊接电流会流经上一个焊点,这种现象称为分流^[2]. 电阻点焊分流现象的存在可能会导致产热不足,使得新的焊点达不到设计尺寸要求,最终导致焊接质量下降. 所以在实际焊接过程中,必须要考虑分流对焊接质量的影响^[3]. 电阻点焊分流现象受很多因素影响,Blair^[4]指出分流受焊机阻抗、焊点间距、板厚和板温等因素影响. Nippes 等人^[5]研究了分流的测量,及焊点间距、电极压力和焊接材料表面状态对分流的影响. 但是由于电阻点焊工艺热行为的复杂性,很难用试验的方法测量分流和试件的温度分布,因此分析分流现象的机理比较困难.

随着电子计算机技术的迅速发展,数值模拟的方法已经广泛应用于焊接学科各个领域^[6]. 由于数值模拟可以计算得到分流的大小及工件的温度场分布,所以可以通过数值模拟的方法分析分流现象

的机理. Chang 等人^[7]利用有限差分法建立点焊模型,研究了分流对焊接质量的影响. 但目前很少有用有限单元法建模分析异种不等厚铝合金电阻点焊分流的报道.

文中利用大型有限元分析软件 ANSYS,通过建立异种不等厚铝合金 2219/5052 的点焊模型,研究了两个焊点之间不同焊点间距对分流大小及焊接质量的影响,分析了电阻点焊分流现象的机理,并提出改善分流造成的焊接质量下降现象的措施,对改善实际焊接异种不等厚铝合金脱焊现象具有一定的指导意义.

1 工艺试验和有限元建模

电阻点焊试验材料为 6 mm 厚的 2219 和 2 mm 厚的 5052 铝合金. 采用搭接形式,其中 2219 在上,5052 在下. 焊接电流为 40 kA,焊接时间为 200 ms,共焊接两个焊点,5 种不同的焊点间距,分别为 12, 16, 20, 24 和 28 mm. 采用铬钨铜球形电极,电极直径 16 mm,球面半径 150 mm,电极压力 10 000 N.

文中对合格焊点的尺寸要求为

$$D \geq 5\sqrt{t}$$

式中: D 为熔核直径 (mm); t 为薄板的厚度 (mm). 试验中为 2 mm,则熔核直径应至少达到 7 mm.

在上述试验的基础上建立电阻点焊分流过程的三维有限元模型. 为了模拟第一个焊点的分流效果,采用一个直径与第一个焊点直径相同的圆柱来代表第一个焊点. 图 1 为焊点间距为 16 mm 的有限元模

型,其它间距的模型与其类似. 模拟采用的单元类型为 SOLID69,并采用接触分析处理接触电阻,其中目标面单元为 TARGE 170,接触面单元为 CONTA 173.

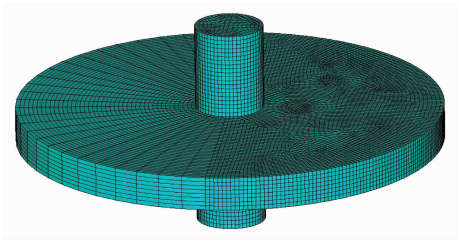


图 1 2219/5052 电阻点焊分流模型网格划分
Fig. 1 Meshes of model of shunting in resistance spot welding for 2219/5052

模型施加的电场边界条件为:上电极上端面电压耦合并施加焊接电流,下电极下端面电势为零. 热

场边界条件为电极和工件外表面与空气进行热交换,施加的对流换热系数为 $30\text{ W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$.

2 不同焊点间距数值模拟结果分析

焊点间距不同,分流大小不同,不同间距的电流密度分布($t = 200\text{ ms}$)如图 2 所示. 由于分流大小不同,必将导致试件最终的温度场不同($t = 200\text{ ms}$),如图 3 所示.

连续电阻点焊的分流现象与工件中电流密度的分布密切相关,若已有焊点与后焊点距离过近,则大部分电流将从先前焊点处通过. 这是因为铝合金材料的体电阻远小于接触电阻,焊点间距过近时,电流将从电阻更小的第一个焊点内部通过,导致大部分电流将被分走,造成虚焊.

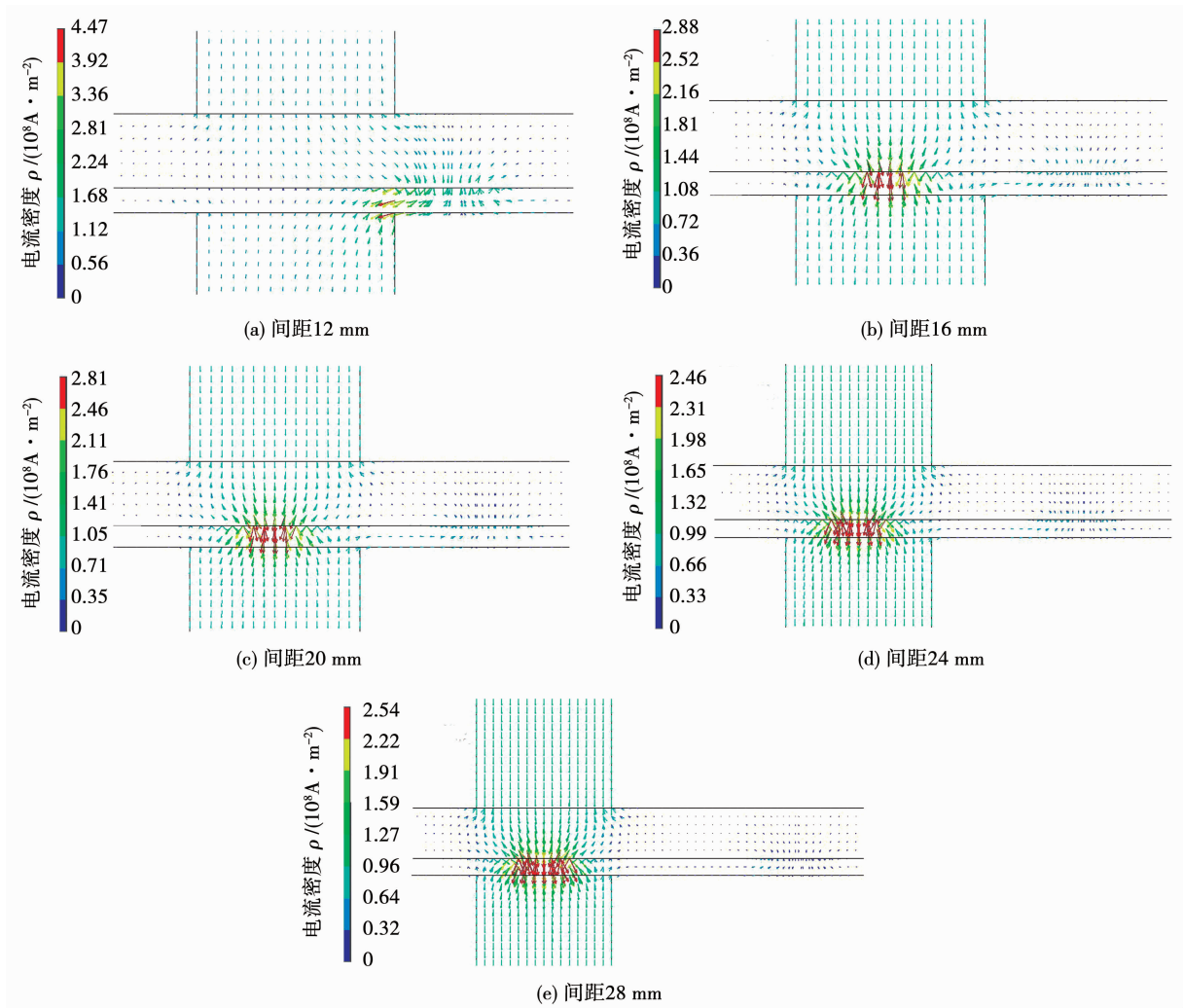


图 2 不同焊点间距电流密度分布
Fig. 2 Current density distribution of different weld spacing

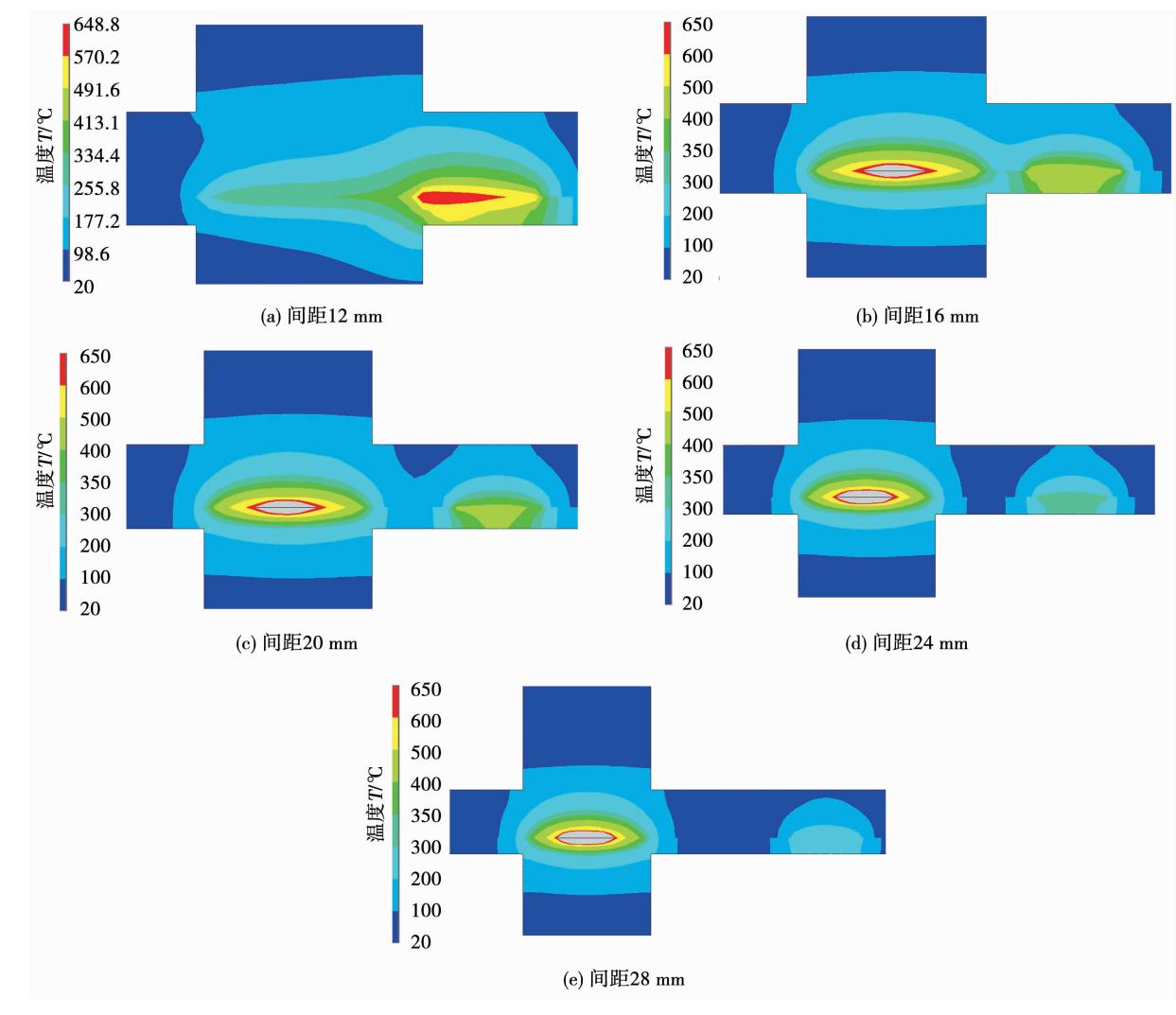


图 3 不同焊点间距的温度场

Fig. 3 Temperature field of different weld spacing

从图 2a 和图 3a 中可以看出,焊点间距为 12 mm 时大部分电流从有分流焊点(第一个焊点)中通过,图 3a 中可见最高温度出现在第一个焊点处,而待焊焊点的最高温度仅在 450 ℃ 左右,难以形核(熔点为 650 ℃),最终形成虚焊。

从图 2b ~ 图 2e 和图 3b ~ 图 3e 中可看出,随着焊点间距增大,分流电流减少,从而增加了焊接区域的电流密度,可以形成一定尺寸的熔核。

从图 2e 可以看出在焊点间距足够大的前提下(28 mm),分流是可以被充分抑制的。从图 3e 可以看出在 28 mm 焊点间距的情况下,熔核的生长几乎不受分流的影响。经过熔核充分生长阶段后,模拟计算得到最终形成的熔核直径达到 7.18 mm,尺寸满足设计要求,焊接质量不会下降。

纵观五种间距模拟结果,可以发现焊点间距越大,分流处的电流密度越小,即分流程度越小,焊点尺寸越大,当焊点间距达到 28 mm 时可达到规定的

焊接质量要求。

3 分流改进措施模拟计算分析

从上述模拟分析可知,只有当间距达到 28 mm 时才能达到设计质量要求。但是在实际应用中必须要满足不同设计间距的焊接质量要求,即在不同间距下焊点熔核直径应大于 7 mm。因此提出增加焊接电流的措施,从而改善分流造成的焊接质量下降的现象。对焊点间距为 16 mm 的点焊试件将电流增加到 44 kA,模拟计算结果如图 4 所示。由图 4 可以看出,提高焊接电流后,在设计的焊点间距下,先前的工艺参数会因为分流而造成虚焊,而改进工艺后的最终熔核直径为 7.73 mm,可以满足焊接质量要求。同时,提高焊接电流,有利于实现工件/工件贴合面的初期熔化,这将有利于熔核生长至合格的尺寸。

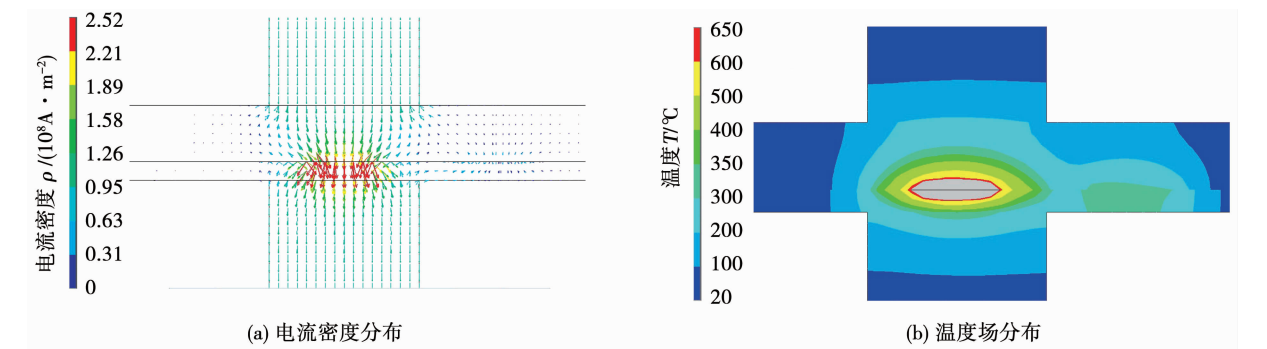


图 4 改进工艺的温度场与电流密度分布

Fig. 4 Current density distribution and temperature field of improved processing

4 电阻点焊分流试验验证

4.1 不同焊点间距分流试验与模拟对比

在五种不同的焊点间距条件下点焊两次,分别测量其熔核直径,结果如图 5 所示.

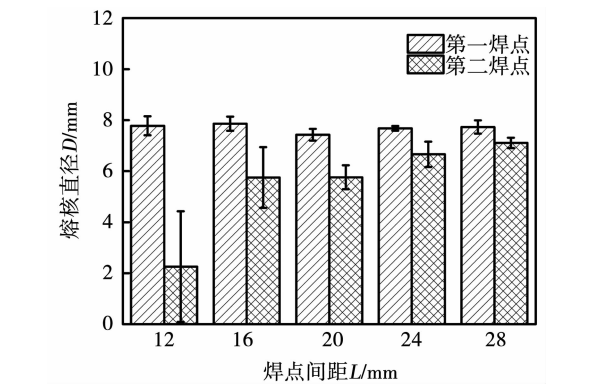


图 5 不同间距下两连续焊点的熔核直径

Fig. 5 Nugget diameter of two continuous welds under different weld spacing

表 1 对比了图 3 和图 5 得到的试验所测结果与模拟计算的熔核直径,可以看出模拟计算与试验所测的熔核直径基本一致,验证了所建模型的正确性.

表 1 模拟计算和试验所测熔核直径

Table 1 Nugget diameter experimentally measured and simulated

焊点间距 L/mm	试验熔核直径 D_1/mm	模拟熔核直径 D_2/mm
12	0	0
16	4.44	4.95
20	5.44	5.99
24	6.55	6.74
28	6.88	7.18

4.2 分流改进试验与模拟对比

增加焊接电流焊接后得到的焊点熔核横截面形貌如图 6 所示,熔核直径为 7.62 mm,与模拟结果(图 4)7.73 mm 基本一致,证明了模型的正确性.

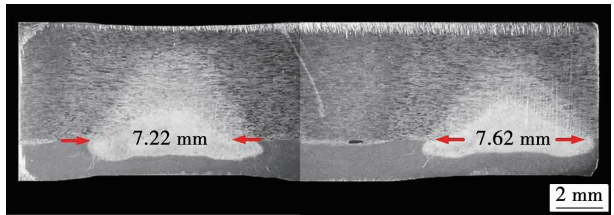


图 6 改进工艺后的熔核形貌

Fig. 6 Profile of the nuggets of improved processing

5 结 论

- (1) 焊点间距越小,分流程度越大,导致熔核直径变小,焊接质量下降.
- (2) 提高焊接电流可改善分流现象,抑制分流,使得熔核尺寸达到设计要求,解决实际生产中的虚焊问题.
- (3) 数值模拟计算得到的熔核尺寸与实测结果吻合良好,验证了模型的正确性,从而为研究电阻点焊分流现象提供理论依据.

参考文献:

[1] 王春炎,曲文卿,姚君山,等. 2219-T87 铝合金搅拌摩擦焊接头组织与力学性能[J]. 焊接学报, 2010, 31(10): 77-80.
Wang Chunyan, Qu Wenqing, Yao Junshan, et al. Microstructures and mechanical properties of friction stir welded 2219-T87 aluminum alloy joints[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2010, 31(10): 77-80.

[2] Wang B, Lou M, Shen Q, et al. Shunting effect in resistance spot welding steels-part 1: experimental study[J]. Welding Journal, 2013, 92(6): 182-189.

[3] Li Y B, Wang B, Shen Q, *et al.* Shunting effect in resistance spot welding steels-part 2: theoretical analysis[J]. Welding Journal, 2013, 92(8): 231 – 238.

[4] Blair A R. Preliminary test of spot weld shunting in 24st Alcaid [J]. Welding Journal, 1948, 27(6): 491 – 495.

[5] Nippes E F, Savage W F, Robelotto S M. Measurement of shunting currents in series spot welding 0.036-in steel [J]. Welding Journal, 1955, 34(6): 618 – 624.

[6] 吴志生, 杨新华, 单 平, 等. 铝合金点焊电极端面温度数值模拟[J]. 焊接学报, 2004, 25(6): 15 – 18.

Wu Zhisheng, Yang Xinhua, Shan Ping, *et al.* Numerical simula-

tion of electrode tip temperature for spot welding aluminum alloy [J]. Transactions of the China Welding Institution, 2004, 25(6): 15 – 18.

[7] Chang H S, Cho H S. A study on the shunt effect in resistance spot welding[J]. Welding Journal, 1990, 69(8): 308 – 317.

作者简介: 张 禹,男,1989 年出生,博士研究生. 主要研究方向为车身轻量化连接工艺. Email: zhangyumse@163.com

通讯作者: 罗 震,教授,博士研究生导师. Email: lz@tju.edu.cn

[上接第 24 页]

[4] 卞宏友, 杨 光, 李 英, 等. 金属激光沉积成形分组平行扫描路径生成算法[J]. 机械工程学报, 2013, 49(11): 171 – 175.

Bian Hongyou, Yang Guang, Li Ying, *et al.* Grouping parallel scan path generating method of metal laser deposition shaping[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2013, 49(11): 171 – 175.

[5] 胡榕华, 张 华, 徐建宁, 等. 焊接成形中堆积轨迹对温度场影响的数值模拟[J]. 焊接学报, 2005, 26(11): 75 – 78.

Hu Ronghua, Zhang Hua, Xu Jianning, *et al.* Simulation of the influence of scan path on temperature field in the welding rapid prototyping[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2005, 26(11): 75 – 78.

[6] 李玉龙, 张 华, 张光云, 等. 基于 TIG 堆焊技术的低碳钢零件精密快速成形[J]. 焊接学报, 2009, 30(9): 37 – 40.

Li Yulong, Zhang Hua, Zhang Guangyun, *et al.* Precision rapid prototyping of steel parts using TIG deposition technology[J]. Transac-

tions of the China Welding Institution, 2009, 30(9): 37 – 40.

[7] Atieg A, Watson G A. A class methods for fitting a curve or surface to data by minimizing the sum of squares of orthogonal distances[J]. Journal of Computational and Applied Mathematics, 2003, 158(2): 277 – 296.

[8] 向 巍, 郭际明, 傅 露. 基于垂直距离最小二乘拟合的双曲线沉降模型[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2013, 28(5): 571 – 573.

Xiang Wei, Guo Jiming, Fu Lu. Hyperbolic settlement model based on least – squares orthogonal distances fitting[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2013, 28(5): 571 – 573.

作者简介: 孙清洁,男,1980 年出生,博士,副教授. 主要从事厚板窄间隙、复合电弧及自动化焊接方面的研究工作. 发表论文 20 余篇. Email: qjsun@hit.edu.cn