

镁合金/镀锌钢板电阻点焊接头拉剪断裂分析

郑森, 程东海, 陈益平, 胡德安
(南昌航空大学 航空制造工程学院, 南昌 330063)

摘要: 针对 2.0 mm 厚的 AZ31B 镁合金以及 1.0 mm 厚的 SPHC 镀锌钢板, 采用 kDWJ-17 型三相次级整流电阻焊机进行焊接试验, 通过对接头的金相观察、扫描电镜分析, 结合原子结合能研究点焊接头拉剪断裂特征。结果表明, 点焊接头断裂的形式呈现结合面断裂和纽扣断裂两种方式, 纽扣断裂抗拉剪力学性能优于结合面断裂, 纽扣断裂断口是以韧性断口为主, 脆性断裂为辅的混合断口。熔核区以 Fe-Al 化合物为主时发生纽扣断裂, 熔合线边缘晶粒尺寸粗大以及熔核区 Fe-Al 化合物结合能大, 使其断裂位置在熔合线边缘。熔核区以 Mg-Zn 化合物为主时发生结合面断裂, 其 Mg-Zn 化合物结合能偏小, 容易被拉断。

关键词: 镁合金; 镀锌钢; 电阻点焊; 接头断裂

中图分类号: TG 442 文献标识码: A 文章编号: 0253-360X(2017)05-0104-04

0 序言

随着能源紧缺和环境污染问题日益严重, 人们越来越重视构件的轻量化设计。镁合金具有材料结构轻、特有的拉伸强度和减振能力等优点, 而钢一直在制造业中占主导地位。实现镁/钢异种材料的有效连接能充分发挥两种材料的固有性能, 实现构件的轻量化设计, 对汽车、航空航天等现代工业的节能减排有着重要的积极意义^[1,2]。

镁合金与镀锌钢板的电阻点焊中, 接头形成过程由于加热时间短, 冷却速度快, 母材与熔核在化学成分和组织性能上存在着较大的区别, 造成接头在载荷作用下断裂特征存在差异^[3]。因此, 文中拟以镁合金和镀锌钢板为研究对象, 对其点焊接头的拉剪断裂特征进行分析, 为进一步探讨镁合金与镀锌钢板的拉剪性能提供一定的理论依据。

1 试验方法

试验采用 2.0 mm 厚的 AZ31B 镁合金以及 1.0 mm 厚的 SPHC 镀锌钢板(镀锌层厚度 0.02 mm)作为电阻点焊的焊接材料, 材料成分如表 1 所示。将母材加工成尺寸为 100 mm × 25 mm(长 × 宽), 长度方向上搭接为 25 mm, 如图 1 所示。采用 kDWJ-17 型三相次级整流电阻焊机进行焊接试验, 选用电极

头端面为直径 20 mm 的铬锆铜电极, 镁侧为半径 150 mm 的球面电极, 钢侧为平面电极。板材焊接前, 用砂纸将表面的氧化物处理干净。

表 1 AZ31B 镁合金化学成分(质量分数, %)

Table 1 Chemical compositions of AZ31B magnesium alloy

Al	Zn	Mn	Si	Cu	Ni	Mg	余量
3.18	0.96	0.32	0.025	0.0035	0.00085		

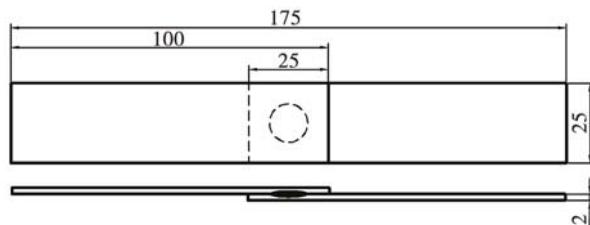


图 1 焊件试样尺寸(mm)

Fig. 1 Dimensions of weldment

采用 WDW-100 型电子万能拉伸机对在相同参数下的镁/钢异种材料点焊接头进行拉伸试验, 拉伸机的拉伸速度设定为 1 mm/min, 试验中每一组参数条件下焊三个试样, 拉剪力取三个试样的平均值作为该参数条件下点焊接头的拉剪力大小。然后对母材和接头熔核拉剪断裂断口处进行 SEM 分析比较, 截取试样, 利用光学显微镜对接头熔核及熔核边缘进行金相观察。

2 试验结果及分析

2.1 拉剪断裂宏观特征分析

在对 AZ31B 镁合金/SPHC 镀锌钢异种金属电阻点焊中, 当工艺参数为 T (焊接时间) = 8 周波、 I (焊接电流) = 32 kA、 P (电极压力) = 7 kN, 得到最大拉剪力为 6.97 kN, 为 AZ31B 镁合金/SPHC 镀锌钢异种金属电阻点焊的最佳工艺参数。在对该条件下焊出的焊接接头进行拉伸试验, 会出现一种纽扣断裂模式, 如图 2 所示。焊点被从镁合金侧完整拉出, 在镁合金板上留下一个圆形孔洞, 在镀锌钢侧留下貌似纽扣状的熔核。当在非最佳工艺参数下, 热输入较小的时候, 其焊接接头在拉剪力下呈现结合面断裂, 在镁合金和镀锌钢板上只呈现一个圆形切面, 如图 3 可以看出在其它条件不变时, $I = 26$ kA 时断口表面较粗糙。在拉剪力的作用下, 从熔核边缘断裂发展到熔核中心断裂而来, 相比纽扣断裂接头抗拉剪强度更小。



图 2 纽扣断裂

Fig. 2 Button fracture



图 3 结合面断裂

Fig. 3 Junction surface fracture

熔核边缘是镁合金与镀锌钢板电阻点焊中的薄弱区域, 是熔核区与热影响区的交界处。在最佳工艺参数作用下, 热影响区与熔核区在化学成分和组织上均存在比较大的差异。图 4 为接头熔核区与热影响区的显微组织形貌, 可以看出, 熔核区晶粒偏细小, 而热影响区晶粒偏大, 熔合线边缘晶粒比热影响区晶粒还要偏大。熔核区与熔合线边缘晶粒尺寸的过渡较快, 使得应力集中容易出现, 当在拉剪力作用下, 此处会优先开始出现裂纹并扩展, 裂纹将沿两交接处发展并又向熔核边缘处扩展至母材表面, 因而形成纽扣断裂。当在非最佳工艺参数下时, 由于热输入量少, 使得焊接接头处金属的熔化量偏少, 接头的熔核直径会较小, 熔核中心等轴晶区域偏小, 在拉剪力作用下, 等轴晶抵抗拉剪力发挥的作用偏小, 因而裂纹从熔合线边缘开始生成, 并将沿着拉剪力的方向穿晶而过, 致使熔核出现结合面断裂形式。

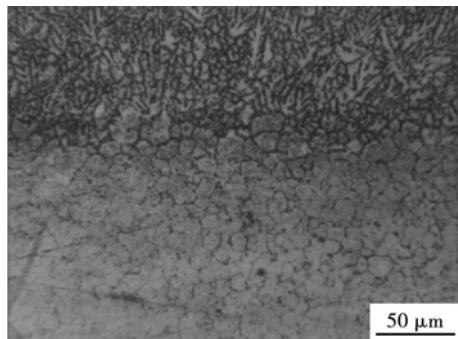


图 4 熔合线边缘组织

Fig. 4 Organization of nugget line

2.2 拉剪断裂断口 SEM 分析

为研究接头的拉剪断裂机理, 对接头断裂处进行 SEM 扫描, 扫描结果如图 5 所示。

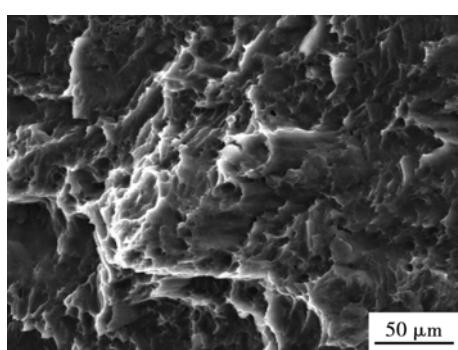


图 5 最佳工艺参数下熔核断口

Fig. 5 Fracture of nugget under optimum parameters

图5为在最佳工艺参数下熔核处断口SEM形貌,该断裂起始于接头边缘的镁合金区,熔核断口表面分布着大量的撕裂棱,均匀细致,且方向一致,在撕裂棱边缘分布着一些大小不一的韧窝。撕裂棱具有明显的塑性变形特征,且韧窝上存在着大量准解理面。准解理断裂是介于解理断裂和韧窝断裂之间的一种形式,它在不同部位产生解理裂纹核,扩展成解理刻面,最后以塑性方式撕裂。拉剪形成的破坏轮廓是由解理产生的呈短而弯曲河流花样,这些河流花样支流少,准解理面小。纽扣断裂的接头在断裂的过程中,主要是韧性断裂,而当裂纹扩展到缺陷处就会发生脆性断裂,一旦裂纹经过缺陷后,又将恢复韧性断裂。所以在最佳工艺参数下镁合金与镀锌钢点焊接头断口是以韧性断口为主,脆性断裂为辅的混合断口。

图6为图3中熔核处断口的SEM形貌,解理断裂区面积较大,撕裂棱含量非常少,几乎没有韧窝,呈现出脆性为主,韧性为辅的断裂特征。当接头抗拉剪力较小时,接头通常呈现这种断裂特征。

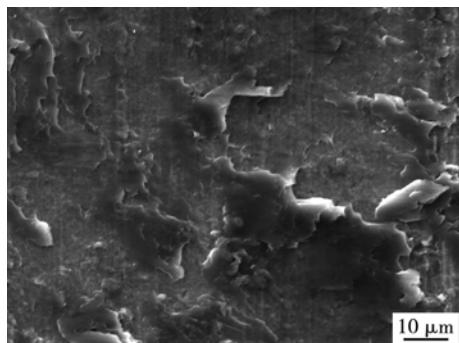


图6 非最佳工艺参数下熔核断口

Fig. 6 Fracture of nugget under non-optimum parameters

2.3 接头化合物对拉剪力影响分析

为进一步研究接头的断裂原因,对结合面断裂的镁合金侧断口进行EDS能谱分析,表2为图7中对应的A,B,C三点分析结果,由表2可知,镁合金侧断口表面没有Fe元素的存在,绝大部分都是Mg元素。分析认为,在点焊过程中,镀锌钢侧的钢板没有熔化,致使在镁合金表面没能发现Fe元素的存在,只是表面镀锌层熔化了,并且与镁合金生成了Mg-Zn化合物。

对在最佳工艺参数下接头中心化合物进行能谱分析,如图8所示,得出A点的Al元素的含量为64.41%(原子分数),46.65%(质量分数),Fe元素的含量为29.27%(原子分数),43.97%(质量分

数),其它元素为6.27%(原子分数),推出接头中心处金属间化合物为 Fe_2Al_5 。

表2 镁侧表面EDS化学成分分析结果

Table 2 Chemical analysis of magnesium side surface by EDS

	Mg		Al		Zn	
	质量分数 w(%)	原子分数 a(%)	质量分数 w(%)	原子分数 a(%)	质量分数 w(%)	原子分数 a(%)
A区	95.44	96.96	2.46	2.25	2.10	0.79
B区	100.0	100.0	-	-	-	-
C区	94.59	93.41	2.50	2.22	-	-

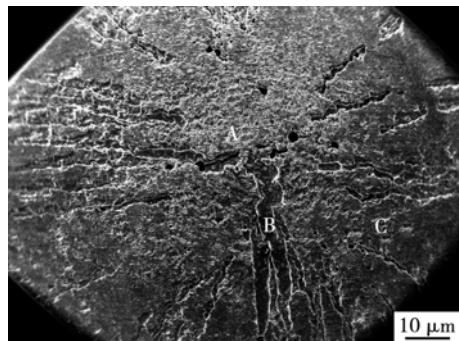


图7 镁侧结合面断裂形貌

Fig. 7 Fracture appearance of junction surface in magnesium side

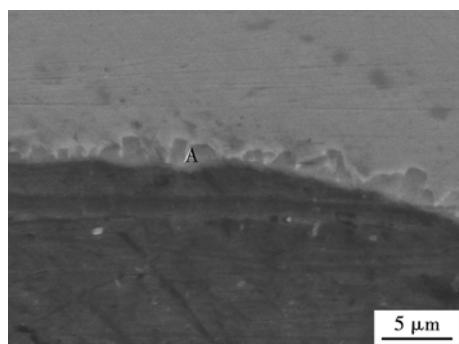


图8 接头中心化合物形貌

Fig. 8 Morphology of compound of joint center

金属熔点越高,通常对应的原子间结合能越大,变形和断裂都意味着晶体结构的破坏,而晶体中原子间的键结合越强,晶体结构越不容易被破坏。铁的熔点为1535℃,铝的熔点为660℃,锌的熔点为419℃,镁的熔点为649℃,当这些金属形成金属间化合物时,Fe-Al系的结合能比Mg-Zn系和Mg-Al系化合物更大。因此当在最佳工艺参数下,接头中的化合物Fe-Al系化合物使得接头熔核区抗拉剪能力

很强,又因为熔合线边缘为镁合金母材,其原子间的结合能要偏小,因而接头趋向从热影响区处出现裂纹,拉剪断裂不会呈现出结合面断裂的方式。而对于焊接接头热输入量不够的情况下,熔核区 Fe 原子与 Al 原子参与发生反应的数量相对最佳工艺参数下少很多,甚至没有,此时,熔核区主要以 Mg-Zn 化合物为主,Mg-Zn 化合物皆为低熔点化合物,熔点比镁合金小,其结合能比镁合金中原子之间的结合能更小,因而在拉剪力作用下会呈现结合面断裂。

3 结 论

(1) 镁合金和镀锌钢的电阻点焊接头力学性能良好,接头拉剪断裂呈结合面断裂和纽扣断裂两种方式,最佳工艺参数下为纽扣断裂,其断口是以韧性断口为主,脆性断裂为辅的混合断口。

(2) 熔核区以 Fe-Al 系化合物为主时发生纽扣断裂,其断裂位置在熔合线边缘,与熔合线边缘晶粒尺寸粗大和 Fe-Al 系化合物键能大有关。熔核区以 Mg-Zn 系化合物为主时发生结合面断裂,与 Mg-Zn 键能偏小有关。

[上接第 95 页]

- [9] Bahrani A S, Crossland T J B. The mechanics of wave formation in explosive welding [J]. Proceedings of the Royal Society A Mathematical Physical & Engineering Sciences, 1967, 296 (1445): 123-136.
- [10] Mousavi S A A A, Al-Hassani S T S. Numerical and experimental studies of the mechanism of the wavy interface formations in

参考文献:

- [1] 张高会,张平则,潘俊德. 镁及镁合金的研究现状与进展[J]. 世界科技研究与发展,2003, 25(1): 72-78.
Zhang Gaohui, Zhang Pingze, Pan Junde. Research and developments of magnesium and magnesium alloys [J]. Scientific and Technological Research and development In the World, 2003, 25 (1): 72-78.
- [2] 余琨,黎文献,王日初,等. 变形镁合金的研究、开发及应用[J]. 中国有色金属学报,2003, 13(2): 277-288.
Yu kun, Li Wenxian, Wang Richu, et al. Research, development and application of wrought magnesium alloys [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2003, 13(2): 277-287.
- [3] 王亚荣,张忠典. 镁合金电阻点焊接头中的缺陷[J]. 焊接学报,2006, 27(7): 9-12.
Wang Yarong, Zhang Zhongdian. Defects in joint for resistance spot welding of magnesium alloy [J]. Transactions of the China Welding Institution, 2006, 27(7): 9-12.

作者简介: 郑森,男,1989 年出生,硕士研究生。研究方向:异种材料焊接。Email: zhengsen2012@yeah.net

通讯作者: 程东海,男,副教授。Email: 70269@nchu.edu.cn

explosive/impact welding [J]. Journal of the Mechanics & Physics of Solids, 2005, 53(11): 2501-2528.

作者简介: 李蕊宇,男,1991 年出生,博士研究生。主要从事光滑粒子流体动力学方法研究。发表论文 2 篇。Email: liruiyu1990@163.com

通讯作者: 孙宇新,男,教授。Email: yxsun01@163.com