恒定热输入下焊接参数对镁/钢电阻单元焊接头组织与性能的影响

秦晓旭 赵振洲 刘俊伟 李赫 林洪涛 周林柱

（中国第一汽车股份有限公司工程技术部，长春 232000）

摘要：为提高车身轻量化水平，采用钢制铆钉对压铸镁合金和钢板进行了电阻单元焊。在恒定热输入下，通过调节焊接电流和焊接时间形成了不同的镁/钢异种合金电阻单元焊接头，观察分析了接头的宏观形貌、显微组织、力学性能和断口形貌。结果表明：在恒定热输入下，热量由电极帽表面向内部传递，随着焊接时间的缩短，熔核由贯穿式的整体熔核转变为上、下2个扇形熔核。钢钉与下层钢板熔核边缘处沿界面延展的缝隙和共晶相分布长度随焊接电流的增大而减小。在恒定热输入下，随着焊接电流的增大，焊接时间的缩短，抗剪力先减小后增加，最大抗剪力为6.37 kN，有效抗剪切位移随焊接电流的增大而增大，最大有效抗剪切位移为4.56 mm。

关键词：镁/钢连接 接头性能 电阻单元焊 热输入 汽车制造

中图分类号：TG457.19 **文献标志码：**B **DOI:** 10.19710/J.cnki.1003-8817.20260247

Effect of Welding Parameters on the Microstructure and Properties of Mg/Steel Resistance Element Welded Joints under Constant Heat Input

Qin Xiaoxu, Zhao Zhenzhou, Liu Junwei, Li He, Lin Hongtao, Zhou Linzhu

(China FAW Corporation Limited, Engineering & Technology Department, Changchun 232000)

Abstract: To meet the requirements for vehicle lightweighting, resistance element welding (REW) is performed on a die-cast magnesium alloy and a steel plate using steel rivets. Under constant heat input, different magnesium/steel REW joints are produced by adjusting the welding current and welding time. The macrostructure, microstructure, mechanical properties, and fracture morphologies of the joints are observed and analyzed. The results show that, under constant heat input, heat is transferred from the surface of the electrode cap toward its interior; as the welding time decreases, the through-thickness integral nugget transforms into two fan-shaped nuggets in the upper and lower regions. With increasing welding current, the length of the gap extending along the interface and the distribution length of the eutectic phase at the nugget edge between the steel rivet and the lower steel sheet decrease. Under constant heat input, as the welding current increases and the welding time decreases, the shear resistance initially decreases and then increases, reaching a maximum shear resistance of 6.37 kN; the effective shear displacement increases with increasing welding current, reaching a maximum effective shear displacement of 4.56 mm.

Key words: Mg/steel joints, Joint performance, Resistance element welding, Heat input, Automobile manufacturing

1 前言

在全球节能减排和双碳目标的大趋势下，车身轻量化逐渐成为车身设计中的重要目标之一[1-3]。以一体化压铸镁合金车身为主要框架，关键部位引入一定量的结构钢形成镁/钢复合结

作者简介：秦晓旭（1983—），男，硕士学位，高级工程师，研究方向为汽车制造焊装规划、异种金属连接。

参考文献引用格式：

秦晓旭，赵振洲，刘俊伟，等. 恒定热输入下焊接参数对镁/钢电阻单元焊接头组织与性能的影响[J]. 汽车工艺与材料，2026(10)：33-41.

QIN X X, ZHAO Z Z, LIU J W, et al. Effect of Welding Parameters on the Microstructure and Properties of Mg/Steel Resistance Element Welded Joints under Constant Heat Input[J]. Automobile Technology & Material, 2026(10): 33-41.

构可有效实现车身轻量化[4-5]。但是由于镁和钢之间的冶金相容性较差，无法形成固溶体或化合物，使用传统的熔焊技术难以有效连接镁/钢异种材料。

电阻单元焊技术（Resistance Element Welding，REW）[6-8]在上层板待焊位置引入辅助单元，通过电阻点焊将辅助单元与下层板连接，并机械固定上层板，从而实现异种材料的有效连接。该技术将异种材料的连接问题转变为同种材料的焊接问题，综合了熔化焊和机械连接的优势，为异种金属连接提供了新思路。凌展翔等[9]研究了硼钢与铝合金的电阻单元焊技术，结果表明，传统电阻电焊几乎无法连接的硼钢与铝合金，使用电阻单元焊技术能够可靠连接。王义金等[10]研究了焊接电流对铝/钢异种金属电阻单元焊接头力学性能与失效模式的影响，研究发现，焊接电流显著影响了接头的熔核尺寸和显微硬度，在优化焊接参数后，铝-钢异种金属接头的抗剪力可达到5.71 kN，且失效模式为熔核拔出失效。王楠楠等[11]使用电阻单元焊技术对纯钛和低碳钢进行连接，且钛-低碳钢电阻单元焊接头抗剪载荷随焊接电流、焊接时间的增大而先增加后下降，接头最大抗剪载荷约为11.9 kN。赵培峰等[12]使用镁质铆钉对铝合金和镁合金进行电阻单元焊接，随焊接电流、焊接时间的增大，A6061-AZ61B电阻单元焊接头熔核直径增大，抗剪载荷呈先增大后降低的变化趋势，最大抗剪载荷约为5.19 kN。王烨成等[13]利用电阻单元焊实现了热塑性复合材料与高强钢的高强度连接，通过调节焊接电流与焊接时间，在获得较高强度接头的同时，缓解了热塑性复合材料的分解，确定了焊接工艺窗口。综上所述，电阻单元焊技术在异种材料焊接领域的应用已较为成熟，其可行性与可靠性已得到了验证。随着车身轻量化需求的日益增长，关于镁/钢异种金属电阻单元焊接的研究是有意义的，但是关于镁/钢异种金属的电阻单元焊接的研究较少。此外，关于电阻单元焊的相关研究主要聚焦于材料种类的不同组合以及不同热输入对焊接接头显微组织与力学性能的影响。

本研究聚焦于汽车制造领域的车身轻量化问题，以一体化压铸镁合金和结构钢为研究对象，探索恒定热输入下不同焊接参数对电阻单元焊镁/钢焊接接头组织与性能的影响。以期为一体化压铸镁合金和结构钢复合结构的进一步应用提供技术支持。

2 试验材料与方法

本文试验材料为自研压铸镁合金板材和ST280冷连轧碳素结构钢板材，铆钉材料为镀锌钢。其中，镁板厚度为3 mm，钢板厚度为0.8 mm。电阻单元焊的工艺流程如图1所示。首先，使用冲压装置在上层镁板待焊区中心位置冲入钢制铆钉；然后将电极帽、钢钉和下层钢板待焊区中心对齐；最后在压力和电流的作用下，铆钉与钢板之间形成可靠焊接，得到电阻单元焊接头。

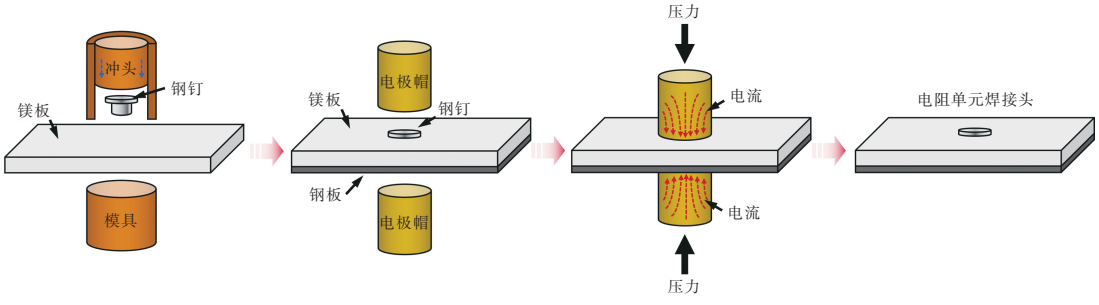


图1 电阻单元焊工艺流程示意

在电阻单元焊焊接过程中，热输入是决定焊接质量的重要参数。但通过调节热输入来调节焊接质量的方式，能够获得的工艺窗口较为狭窄。根据焊接过程中的热输入Q计算表达式可知，在获得合适热输入的前提下，工艺参数可进一步优化：

$$Q = I^2Rt\cdot\eta \quad (1)$$

式中：I为焊接电流，R为电阻，t为焊接时间，η为热效率系数。

当试样材料尺寸、铆钉材料尺寸、焊接压力等参数恒定时，电阻R保持恒定，热效率系数η恒

定。因此,热输入Q取决于焊接电流I和焊接时间t,本试验中恒定热输入为9 800Rt。在恒定热输入的基础上,通过调节焊接电流和焊接时间,探索不同焊接参数对焊接质量的影响。在恒定热输入下,各试样的焊接参数如表1所示。

表1　电阻单元焊不同工艺参数组合

试样	焊接电流/kA	焊接时间/ms	压力/kN
A	6.0	272.3	2
B	6.5	232.0	
C	7.0	200.0	
D	7.5	174.3	
E	8.0	153.2	

完成电阻单元焊后,沿铆钉中心位置进行线切割,以获取金相试样。金相试样在打磨抛光处理后,在体积分数为4%的硝酸酒精溶液中腐蚀20 s。随后通过体视显微镜和金相显微镜对各试样的宏观和微观组织进行观测。各试样的显微硬度通过维氏硬度仪进行表征,试验载荷为500 N,保荷时间为15 s。使用万能试验机测试各试样在室温下的抗剪力,拉伸速率为2 mm/min,拉伸试样的形状及尺寸如图2所示。断裂后的拉伸断口形貌通过体视显微镜进行观察。

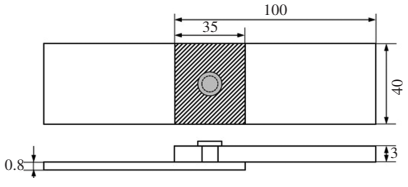


图2　拉伸试样示意

3　试验结果与分析

3.1　接头组织特征

图3所示为不同参数下电阻单元焊接头的宏观形貌。当焊接电流较小、焊接时间较长时,熔核区域贯穿整个钢钉。随着焊接电流增加,焊接时间缩短,熔核区域由贯穿整个钢钉的葫芦状整体熔核转变为上、下2个扇形熔核。此外,由图3可知,上、下2端熔核直径较宽中间位置熔核直径较窄(或无熔核)。该现象表明,在电阻单元焊过程中,熔核中间位置受热量影响小于熔核上、下两端。在恒定热输入下,各试样的焊接时间逐渐减小,导致热量向内部传导的时间逐渐减小,铆钉内部受到热量影响逐步减小,因此表现出的熔核形貌有所差异。此外,铆钉与钢板连接处的熔核直径通常认为对焊接接头的力学性能有较大影响。如图3所示,恒定热输入下,随着焊接电流的增加,焊接时间的减小,底部熔核直径呈现出先减小后增大的趋势。各试样的熔核直径分别为4.62 mm、4.35 mm、2.45 mm、3.80 mm、4.35 mm。对于A、B、C试样,焊接电流增加、焊接时间减小使热传导时间与距离受限,外围材料未能充分受热,致使熔核直径逐渐减小。对于D试样和E试样,当焊接电流继续增大,熔核中心区域瞬时热功率密度跃升,金属快速熔化形成液态熔核,在电极压力作用下液态金属沿径向挤压铺展,强制扩大固/液界面,突破热传导的局限,使熔核直径逐渐增大。综上所述,虽然焊接热输入相同,但不同焊接电流和焊接时间对焊接质量的影响有所差异。

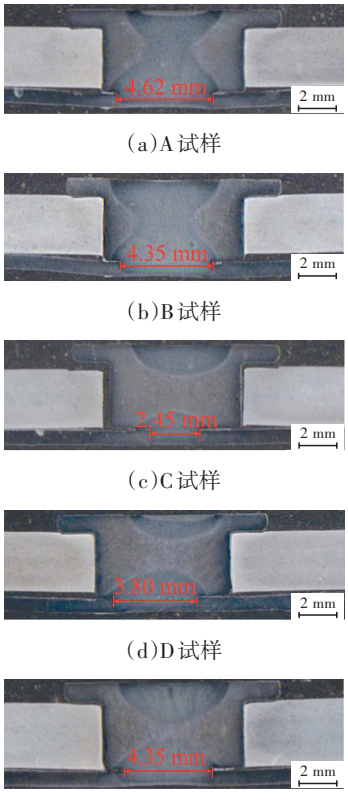
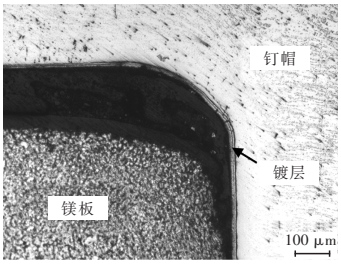


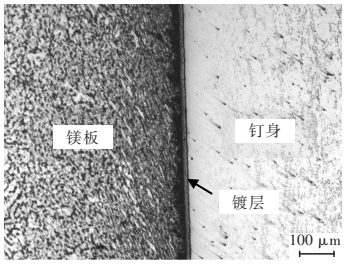
图3　不同参数下电阻单元焊接头宏观形貌

图4显示了镁/钢电阻单元焊接头各界面处形貌。图4a为钉帽与镁板界面处的光镜图片,镁板与钉帽之间存在较小缝隙,且铆钉表面镀层完整,因此两者在焊接过程中未发生冶金反

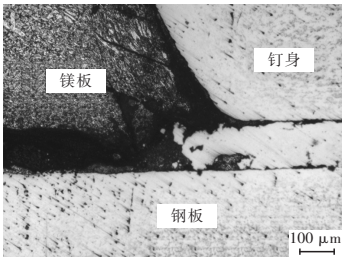
应。图4b可观测到钉身与镁板界面处结合较为紧密，但由于焊接过程中的热输入较低且焊接时间较短，因此两者之间未形成可靠的冶金结合。图4c展示了钉身、镁板与钢板之间的界面，在镁板与钉身、镁板与钢板的界面处，均未观测到冶金结合。在钉身与钢板之间，存在热力综合作用下挤出的部分材料。不同于其他报道[11,14]，在镁/钢电阻单元焊接头中，镁/钢之间的连接方式主要为机械连接，镁板与钢钉和下层钢板之间均未发生冶金结合。因此，接头的力学性能主要取决于钢钉与钢板之间的焊接质量。



(a)钉帽与镁板



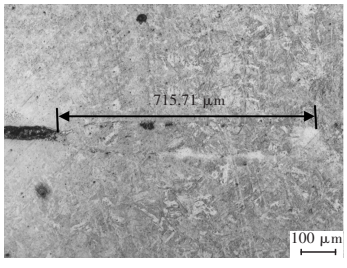
(b)钉身与镁板



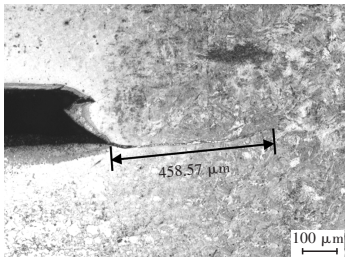
(c)钉身、镁板和钢板

图4 电阻单元焊接头各界面处形貌

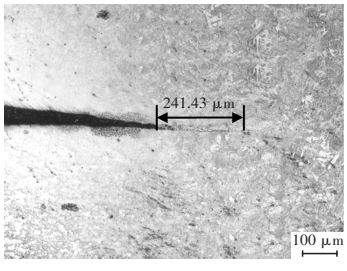
图5为不同参数下，电阻单元焊接头熔核边缘处共晶相分布长度。如前所述，电阻单元焊接头的焊接质量主要取决于钢钉与钢板的连接可靠性。在光镜下观测发现，在熔核边缘处存在沿界面延展的缝隙和共晶相。当拉剪力作用时，这些缝隙和共晶相往往作为裂纹萌生位置，影响整个接头的力学性能。值得注意的是，虽然各试样在焊接过程中的热输入相同，但在不同焊接电流和焊接时间的影响下，熔核边缘处的缝隙和共晶相分布长度存在差异。A试样共晶相分布长度约为715.71 μm，且有2条类似的缺陷。B、C、D、E试样的共晶相分布长度分别约为458.57 μm、241.43 μm、270 μm、158.57 μm。随着焊接电流的增加，共晶相分布长度呈减小趋势。在相同热输入下，由于铆钉和下层板的界面距离电极帽较近，该区域产热主要受焊接电流的影响。因此，相同热输入下，随着焊接电流的增加，更多的共晶相熔化并熔融进熔核组织内部，导致残余共晶相分布长度随焊接电流的增加而减小。



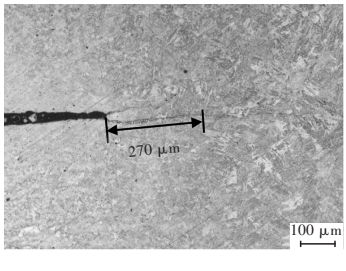
(a)A试样



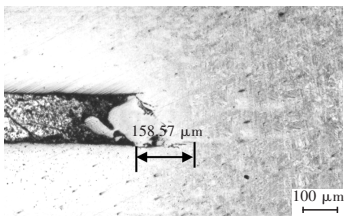
(b)B试样



(c)C试样



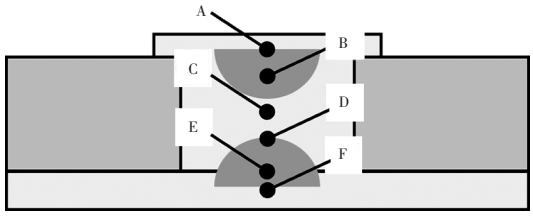
(d)D试样



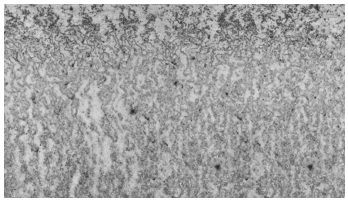
(e)E试样

图5　熔核边缘处共晶相分布长度

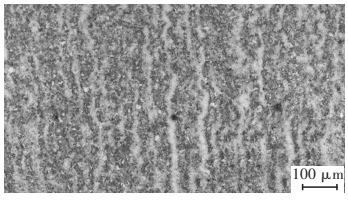
图6为熔核各区域的显微组织形貌。由于C试样包含熔核各区域,因此以C试样为代表性试样。观测区域位置示意如图6a所示。电极影响区域内的部分铆钉和下层板组织在电阻热的作用下发生了变化。图6b可以看到钉帽与顶部熔核区域界面处的A区域的显微组织表现出2种不同的组织结构。A区域的顶部组织为细小的马氏体,这是由于该区域距离电极帽较近,散热条件较好,焊接过程中产生的热量能够快速逸散。而A区域下部区域的显微组织由细小的条状马氏体和黑色贝氏体组成。当逐渐远离电极帽表面时,散热条件变差,热量无法及时散失。B区域观查到的条状马氏体尺寸明显增大,如图6c所示。C区域为铆钉本身具有的铁素体组织,如图6d所示,值得注意的是,该区域仅在焊接时间较短的C试样、D试样和E试样中观测到。而A试样和B试样由于焊接时间较长,原有显微组织在电流和热的作用下充分的转变为条状马氏体和贝氏体,具体表现为整体贯穿式的熔核。D区域为底部熔核的边缘处,能够明显观测到马氏体在靠近熔核边缘处的尺寸较小,如图6e所示。这也表明,虽然各试样的热输入相同,但焊接热量是从试样表面向试样内部传导的,在焊接时间较短时,传导至铆钉中心位置的热量有限,中心位置的显微组织转变温度保持时间有限,因此仍有部分区域保持原有显微组织。E区域(图6f)为下层板与铆钉结合位置的熔核显微组织。该区域显微组织中分布有杂乱的较短的板条状马氏体,且越靠近下电极帽,板条状马氏体的尺寸越大。同样的,位于下层板的F区域,由于靠近下电极帽,散热条件较好,仍有部分显微组织保持着下层板原有的轧制态组织,如图6g所示。观察各区域显微组织可知,在电阻单元焊过程中,热量的分布并不均匀,因此导致各区域显微组织呈现出明显的差异性。



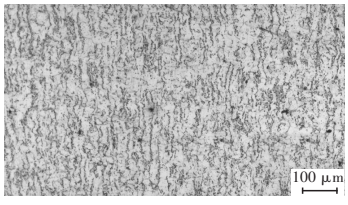
(a)观测位置



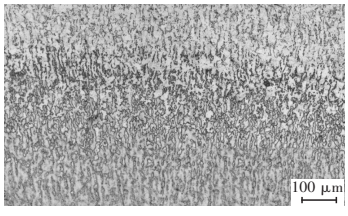
(b)A区域



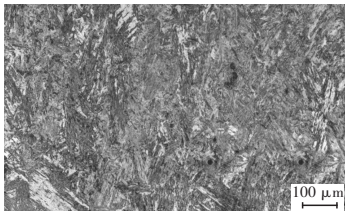
(c)B区域



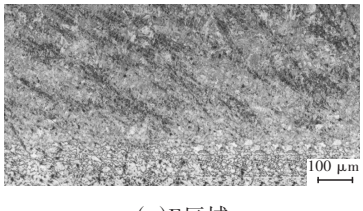
(d)C区域



(e)D区域



(f)E区域

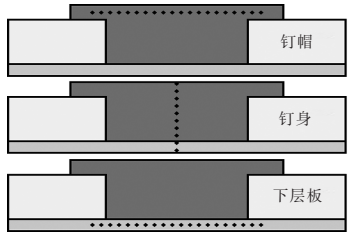


(g)F区域

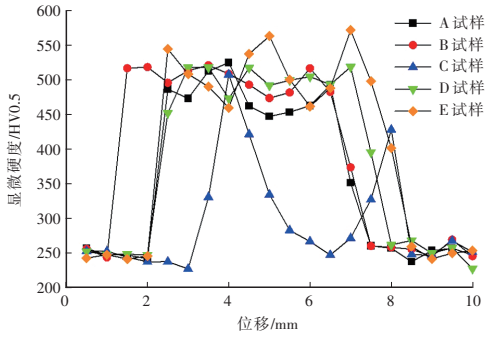
图6　熔核各区域显微组织形貌

3.2 接头力学性能

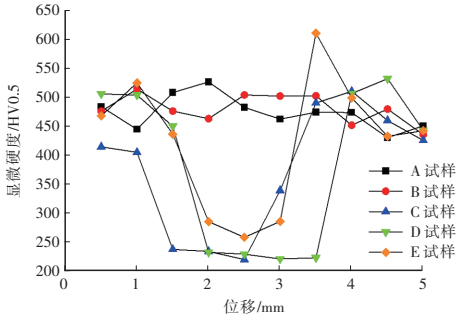
图 7 所示为不同参数下电阻单元焊接头显微硬度。分别对电阻单元焊接头的钉帽、钉身和下层板的显微硬度进行测量，检测位置如图 7a 所示。由钉帽处显微硬度分布可知，钉帽中心熔核位置的显微硬度高于钉帽边缘区域。A 试样和 B 试样钉身的显微硬度处于较高水平，而 C 试样、D 试样和 E 试样的钉身两端显微硬度较高，中间位置显微硬度较低。结合图 3 所示的各试样宏观形貌可知，熔核位置的显微硬度高于铆钉基材位置。下层板的显微硬度分布也表现出熔核区域较高。由图 6 可知，在 REW 快速加热和冷却过程中，熔核区域显微组织发生转变，主要由高硬度的板条状马氏体组成，因此熔核区域的显微硬度通常高于母材。恒定热输入下，不同参数热历史存在差异，热历史通过差异化相变行为导致熔核范围及显微组织差异，进而决定显微硬度差异，高显微硬度区域与熔核区域重合。



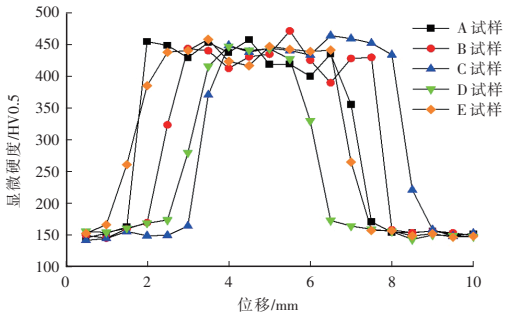
(a)测试位置示意



(b)钉帽



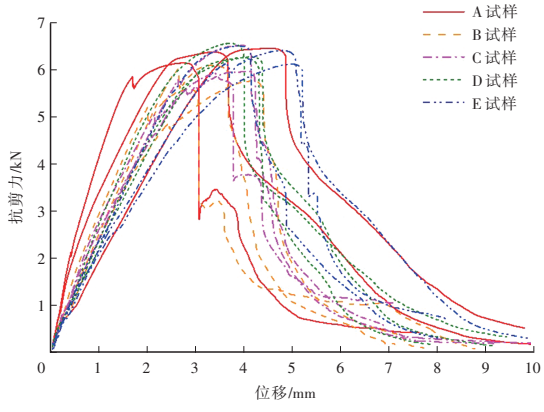
(c)钉身



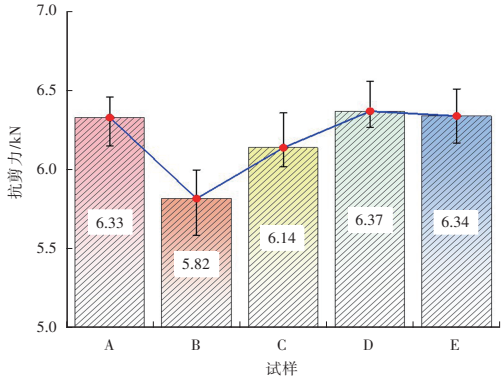
(e)下层板

图 7 不同参数下电阻单元焊接头显微硬度

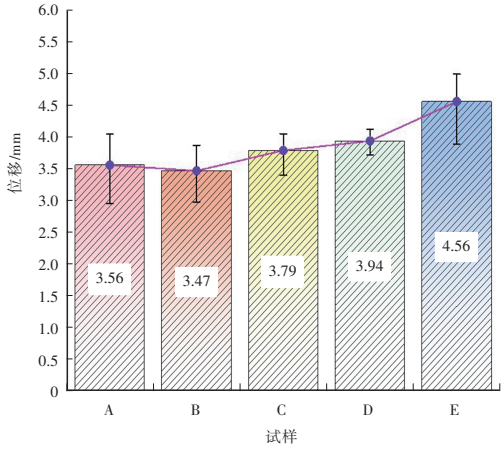
图 8 所示为不同参数下电阻单元焊接头的抗剪切性能。由图 8 可知，虽然各试样的热输入相同，但焊接电流和焊接时间对镁/钢电阻单元焊接头的拉伸性能仍有较大影响。各试样对应的力-位移曲线如图 8a 所示。图 8b 为各试样在室温下的抗剪力，B 试样表现出最低的抗剪力，为 5.82 kN，D 试样具有最高的抗剪力，为 6.37 kN。随着焊接电流的减小和焊接时间的增加，镁/钢电阻单元焊接头的抗剪力先减小后增加大。结合图 3 观测到的熔核形貌可知，随着焊接电流的减小和焊接时间的增加，铆钉边缘与高硬度熔核之间距离呈现先减小后增加的趋势，B 试样对应最小值。在外力作用下，当铆钉边缘与熔核之间距离过小时，该位置易萌生裂纹，导致机械连接失效，大幅降低性能。随焊接电流增加焊接时间减小，镁/钢电阻单元焊接头的有效抗剪切位移呈现出逐渐上升的趋势，如图 8c 所示。有效抗剪切位移由 A 试样的 3.56 mm 逐渐上升至 E 试样的 4.56 mm。结合图 5 所示的熔核边缘处共晶相分布长度推测，E 试样较小的共晶相分布长度有利于其较优秀的有效抗剪切位移。



(a)力-位移曲线



(b)抗剪力

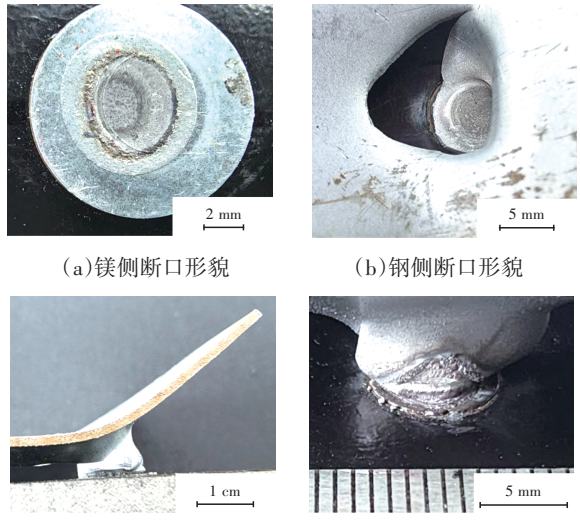


(c)有效抗剪切位移

图8　不同参数下电阻单元焊接头抗剪切性能

3.3　接头断口形貌

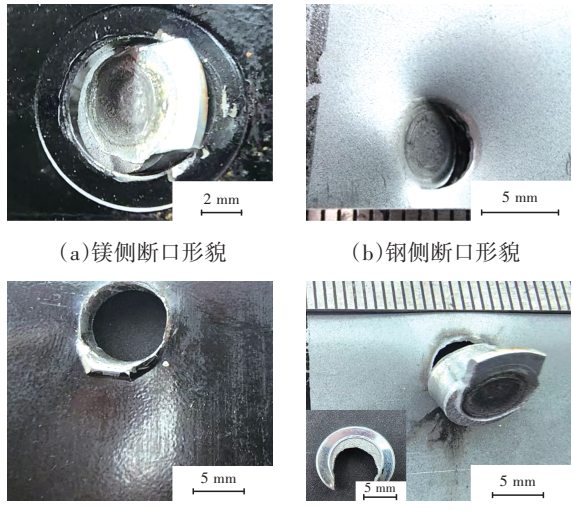
图9~图13为不同参数下电阻单元焊接头断口形貌。图9为A试样接头断口形貌,观测到断裂后的A试样铆钉仍保持较好的完整性,未发生明显的变形,如图9a所示。A试样在拉伸过程中的裂纹萌生位置位于铆钉与下层板的结合处,如图9b所示。结合图7所示的显微硬度可知,A试样下层板基材的显微硬度小于熔核处的显微硬度,导致拉伸过程中裂纹萌生并向下层板基材区域扩展,如图9c和图9d所示。B试样在拉伸过程中,铆钉钉帽与下层板均断裂,如图10所示。由图10a和图10b可知,裂纹萌生位置分别位于上下熔核的边缘处。B试样在拉伸过程中,钉帽的损坏使上层板与下层板之间的机械连接失效,上层镁板在力的作用下有部分镁合金被挤出,大幅度削减了力学性能,如图10c和图10d所示。由图11可知,裂纹位置仍位于上下熔核附近,C试样的失效主要原因是铆钉钉帽处的变形及上层镁板的镁合金挤出。结合图8所示的B试样和C试样的室温抗剪切性能以及图10和图11所示的B试样和C试样的断口形貌可知,当铆钉发生断裂时,其力学性能通常被大幅削弱。图12和图13分别为D试样和E试样的断口形貌,两者的断裂特征较为相似。两者的铆钉在拉伸过程中均保持了较高的完整度,且裂纹均在底部熔核与下层板的交界处萌生并向下层板扩展。综上所述,当铆钉在拉伸过程中未失效时,试样通常表现出较高的抗剪力与有效抗剪切位移。



(a)镁侧断口形貌　(b)钢侧断口形貌

(c)侧面断口形貌　(d)铆钉断口形貌

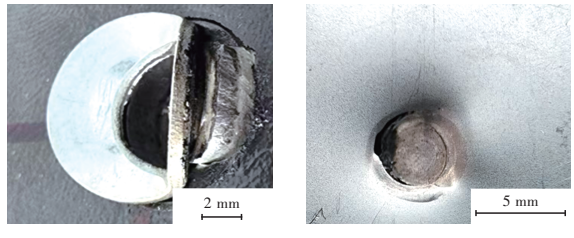
图9　A试样接头断口形貌



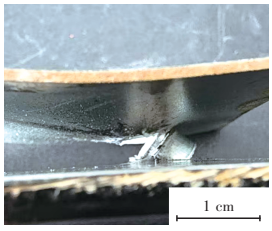
(a)镁侧断口形貌　(b)钢侧断口形貌

(c)侧面断口形貌　(d)铆钉断口形貌

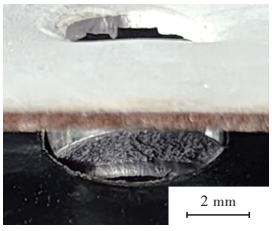
图10　B试样接头断口形貌



(a)镁侧断口形貌　(b)钢侧断口形貌

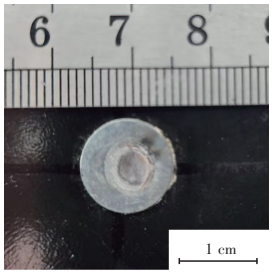


(c)侧面断口形貌

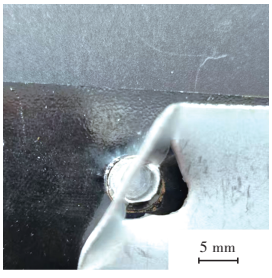


(d)铆钉断口形貌

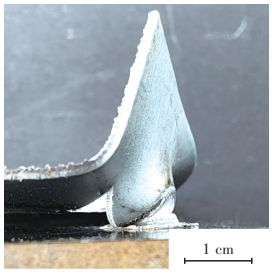
图11 C试样接头断口形貌



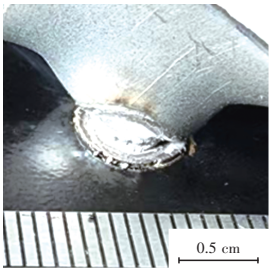
(a)镁侧断口形貌



(b)钢侧断口形貌

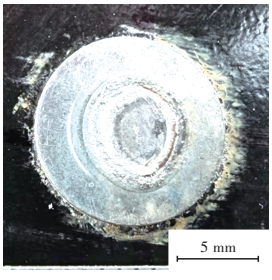


(c)侧面断口形貌

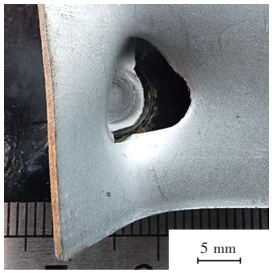


(d)铆钉断口形貌

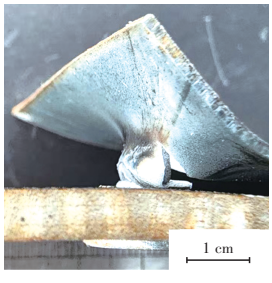
图12 D试样接头断口形貌



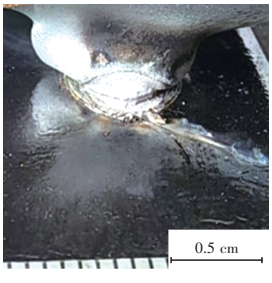
(a)钢侧断口形貌



(b)镁侧断口形貌



(c)侧面断口形貌



(d)铆钉断口形貌

图13 E试样接头断口形貌

4 结束语

在恒定热输入的前提下，本研究通过调节镁/钢异种材料电阻单元焊过程中的焊接电流和焊接时间，对其工艺参数进一步优化。研究发现，即便在相同热输入下，焊接电流与焊接时间对镁/钢异种材料电阻单元焊接头的焊接质量、显微组织与力学性能仍有较大影响。

a. 在镁/钢异种材料电阻单元焊过程中，热量从电极帽表面向内部传导，因此即便热输入相同，焊接电流与焊接时间仍对熔核形貌有较大影响。随着焊接时间的减小，热量由表层向内部传递的时间有限，熔核形貌由贯穿式的整体熔核转变为上、下2个扇形熔核。

b. 随着焊接电流的增大与焊接时间的减小，镁/钢异种材料电阻单元焊接头的抗剪力先减小后增加，当焊接电流为7.5 kA，焊接时间为174 ms时，接头的抗剪力最大，为6.37 kN。有效抗剪切位移则随着焊接电流的增加而增加，当焊接电流为8 kA，焊接时间为153 ms时，接头的有效抗剪切位移最大，为4.56 kN。

c. 镁/钢异种材料电阻单元焊接头处，镁合金与钢钉和钢板均未发生冶金结合。接头的力学性能主要取决于钢钉与下层钢板的焊接质量。焊接电流越大，钢钉与下层钢板熔核边缘处沿界面延展的缝隙和共晶相分布长度越小。由于接头熔核处的显微硬度均高于基材，因此熔核边缘处为裂纹萌生位置。通过研究各试样的断口形貌可知，铆钉保持较高完整性的试样通常具有较优的力学性能。

参考文献：

[1] 李永兵, 马运五, 楼铭, 等. 轻量化多材料汽车车身连接技术进展[J]. 机械工程学报, 2016, 52(24): 1-23.

[2] 谢朝辉. 轿车车身轻量化及其对连接技术的挑战[J]. 南方农机, 2021, 52(2): 126-127.

[3] 宛铜. 新能源汽车轻量化材料应用及车身结构优化研究[J]. 汽车维修技师, 2025 (14): 116-117.

[4] 姚宗湘, 邹雨宏, 蒋德平, 等. 镁/钢异种金属焊接研究现状与发展[J/OL]. 热加工工艺, 2026 (8): 50-58+69 [2026-04-26]. https://doi. org/10.14158/j. cnki. 1001-3814.25090021.

[5] 谢吉林, 李诗梦, 王亚平, 等. 镁/钢异种金属磁脉冲焊接接头组织和性能[J]. 稀有金属材料与工程, 2026, 55 (1): 67-77.

[6] MESCHUT G, HAHN O, JANZEN V, et al. Innovative Joining Technologies for Multi-Material Structures[J]. Welding in the World, 2014, 58(1): 65-75.

[7] MESCHUT G, JANZEN V, OLFERMANN T. Innovative and Highly Productive Joining Technologies for Multi-material Lightweight Car Body Structures[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2014, 23(5): 1515-1523.

[8] MESCHUT G, SCHMAL C, OLFERMANN T. Process Characteristics and Load-bearing Capacities of Joints Welded with Elements for the Application in Multi-material Design[J]. Welding in the World, 2017, 61(3): 435-442.

[9] 凌展翔, 罗震, 冯悦峤, 等. 硼钢与铝合金的新型电阻单元焊技术[J]. 焊接学报, 2016, 37(7): 109-113.

[10] 王义金, 王超, 董仕节, 等. 铝/钢异种金属的沉头铆钉电阻单元焊工艺研究[J]. 特种铸造及有色合金, 2020, 40(4): 426-430.

[11] 王楠楠, 张家宁, 赵培峰, 等. 钛/钢电阻单元焊接头的组织与性能研究[J]. 热加工工艺, 2025, 54(5): 62-65+72.

[12] 赵培峰, 顾伟文, 王楠楠, 等. 基于镁质铆钉的铝合金/镁合金电阻单元焊接接头的组织与性能[J]. 材料热处理学报, 2023, 44(9): 195-204.

[13] 王烨成, 李洋, 张迪, 等. 碳纤维增强热塑性复合材料与高强钢的电阻单元焊[J]. 上海交通大学学报, 2022, 56(10): 1349-1358.

[14] 朱少航, 王楠楠, 田浩楠, 等. 基于钢质铆钉的钛与低碳钢电阻单元焊接接头的组织与性能[J]. 材料热处理学报, 2024, 45(12): 219-228.

AT&M