不同压铸铝及焊丝对冷金属过渡电弧焊接头性能的影响研究

刘博洋 张林阳 张华 齐丹 赵心桥 杨清竹

（高端汽车集成与控制全国重点实验室，长春 130013）

摘要：为研究采用不同牌号焊丝的压铸铝合金冷金属过渡（CMT）电弧焊焊缝力学性能和断裂行为，基于对接、搭接2种接头形式，进行了拉伸力学性能试验。结果表明：不同牌号焊丝对对接焊缝最大拉力、断裂位移以及断裂吸收功的影响较大，整体趋势表现为5356焊丝和4047焊丝优于4043焊丝；搭接焊缝最大拉力受焊丝牌号影响较小，且其断裂位移及最大断裂吸收功的波动较大。

关键词：压铸铝合金 冷金属过渡电弧焊 焊丝 力学性能

中图分类号：U465.2+2 **文献标志码：**B **DOI:** 10.19710/J.cnki.1003-8817.20260134

Study on the Effect of Different Cast Aluminum Alloys and Filler Wires on the Properties of Cold Metal Transfer Arc Welded Joints

Liu Boyang, Zhang Linyang, Zhang Hua, Qi Dan, Zhao Xinqiao, Yang Qingzhu

(National Key Laboratory of Advanced Vehicle Integration and Control, Changchun 130013)

Abstract: To investigate the mechanical properties and fracture behavior of Cold Metal Transfer (CMT) welded joints of die-cast aluminum alloys with different types of welding wires, tensile tests are carried out on two joint configurations, namely butt joint and lap joint. The results show that the wire grade exerts a significant effect on the ultimate tensile force, fracture displacement and fracture absorbed energy of butt welds. Overall, the joints fabricated with ER5356 and ER4047 wires exhibit better performance than those using ER4043 wire. For lap welds, the ultimate tensile force is less sensitive to wire types, while their fracture displacement and maximum fracture absorbed energy present considerable fluctuations.

Key words: Die-cast aluminum alloys, Cold Metal Transfer(CMT) arc welding, Filler wire, Mechanical property

1 前言

在新能源汽车电耗法规日趋严格的趋势下，汽车轻量化已成为实现节能降耗、提升续驶里程的关键路径之一，车身材料正向着轻质化、高强化方向演进[1]。压铸铝合金凭借其密度小、比强度高以及良好的复杂结构铸造成形性，常用于中、大尺寸车身压铸件的制造，已成为实现车身轻量化的核心材料之一[2]。但由于压铸铝材料的热导率高、线膨胀系数大，且试件中的微气孔、缩松等缺陷不可避免，采用传统熔化极惰性气体保护电弧焊（Melt Inert Gas Welding，MIG）工艺进行连接时，飞溅大、焊缝成型性能差且易产生裂纹与密集性气孔，焊缝质量难以满足关键部件的使用要求[3]。冷

作者简介：刘博洋（1997—），男，工程师，硕士学位，研究方向为先进多材料连接技术的创新开发、应用及推广。

基金项目：吉林省、长春市重大科技专项（超大型压铸结构件连接、防腐等量产技术研究20210301025GX）。

参考文献引用格式：

刘博洋，张林阳，张华，等. 不同压铸铝及焊丝对冷金属过渡电弧焊接头性能的影响研究[J]. 汽车工艺与材料，2026(8): 1-7.

LIU B Y, ZHANG L Y, ZHANG H, et al. Study on the Effect of Different Cast Aluminum Alloys and Filler Wires on the Properties of Cold Metal Transfer Arc Welded Joints[J]. Automobile Technology & Material, 2026(8): 1-7.

金属过渡(Cold Metal Transfer,CMT)电弧焊作为一种低热量输入的先进焊接技术,借助电弧的循环性引燃与熄灭,可实现焊丝熔滴的短路过渡,飞溅可控且热输入量低,焊缝成型美观,可较好适配压铸铝合金的焊接需求[4]。

不同工艺制备的压铸铝在焊接时对气孔的敏感性差异较大,可通过调整焊丝种类和保护气体流量实现一定程度的改善[5]。虽然 Al-Si 系压铸铝的铸造性能优异,但由于普遍含有或者添加了 Cu、Zn、Mg、Fe 等元素,焊接成形过程中在晶界处易形成大量熔点远低于 Al-Si 二元共晶的多元低熔点相,从而产生热裂纹。大型压铸结构件通常焊缝布置多变、结构复杂并且焊接环境受限,因此对 CMT 焊接的焊缝成形、抗拘束裂纹能力以及质量稳定性的要求更高[6]。

综上所述,在相同质量要求的前提下,本文研究了在采用 CMT 焊接工艺的情况下,不同焊丝对不同牌号压铸铝焊缝力学性能与断裂行为的影响,通过分析自主开发的新型压铸铝与行业主流压铸铝的焊接性差异,为汽车用压铸铝结构件的材料优选、焊缝质量控制与性能提升提供参考。

2 试验方法

2.1 试验材料

选取 3 种 Al-Si 系压铸铝材料作为研究对象,测得的化学成分和力学性能如表 1、表 2 所示。

表 1 化学成分(质量分数) %

铸铝牌号	Si	V	Mn	Cu	Mg	Fe	Zn	Al
自研 THAS	10.24	0.130	0.50	0.011	0.01	0.120	0.014	余量
国产 C611	6.13	0.015	0.52	0.020	0.17	0.100	0.010	余量
进口 C611	5.55	0.011	0.49	0.018	0.17	0.083	0.010	余量

表 2 力学性能

铸铝牌号	屈服强度/MPa	抗拉强度/MPa	延伸率/%	硬度/(HBW5/125)
自研 THAS	130.41	278.32	11.0	95.3
国产 C611	125.00	274.00	11.3	87.6
进口 C611	122.00	260.00	13.2	85.0

试验用 3 种商品化铝合金焊丝分别为 Al-Si 系的 4043 焊丝、4047 焊丝和 Al-Mg 系的 5356 焊丝,其力学性能如表 3 所示。

表 3 铝合金焊丝力学性能

焊丝牌号	屈服强度/MPa	抗拉强度/MPa	延伸率/%
4043	100	190	10
4047	95	170	12
5356	130	240	17

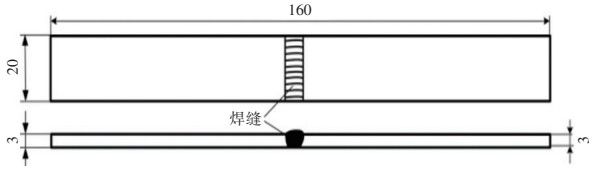
2.2 试验方案

基于对接、搭接 2 种常见 CMT 焊接接头形式,固定单一变量,设计了同焊丝牌号不同铸铝牌号、同铸铝牌号不同焊丝牌号 2 类交叉对比试验,如表 4 所示。

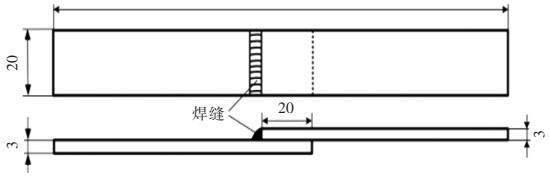
表 4 试验方案

接头形式	样品编号	铸铝牌号	焊丝牌号
对接	S1	自研 THAS	4043
	S2	国产 C611	4043
	S3	国产 C611	4047
	S4	国产 C611	5356
	S5	进口 C611	5356
搭接	L1	自研 THAS	4043
	L2	国产 C611	4043
	L3	国产 C611	4047
	L4	国产 C611	5356
	L5	进口 C611	5356

CMT 焊接样品尺寸如图 1 所示。



(a)对接焊缝



(b)搭接焊缝

图 1 焊接样品尺寸

2.3 试验设备

焊接样品制备采用Fronius品牌弧焊系统,包含专用送丝机、智能焊枪以及TPS型焊接电源,匹配ABB六轴机器人。焊缝质量检测采用Axio Imager M1m型金相显微镜及德国依科视朗YXLON断层工业计算机断层扫描(Computed Tomography,CT)系统完成。焊缝力学性能检测采用Instron 5969型万能拉伸试验机完成。

3 结果和讨论

3.1 焊接工艺匹配

焊接前需要对样品待焊接区域进行清洗,以降低表面油污、杂质等对焊接质量的影响。试验时,首先采用4043焊丝进行CMT焊接,获取其在自研THAS铸铝样品上较佳的工艺参数,然后以此参数为基准,通过多轮工艺试验确定适配不同焊丝和不同压铸铝合金样品的较佳工艺参数范围,如表5所示。在该参数范围内对工艺参数进行二轮优化,在铸铝搭接、对接结构上均获得了较好的焊缝外观质量,如图2所示。

表5 铸铝CMT焊接较佳工艺参数范围

焊接参数	数值	焊接参数	数值
焊接电流/A	118~127	焊接电压/V	17.5~18.3
焊接速度/mm·s^{-1}	15~18	保护气种类	99.9%高纯Ar
气体流速/L·min^{-1}	20~30	送丝速度/mm·s^{-1}	4~6
送丝方式	推丝	焊丝直径/mm	1.2
干伸长/mm	10~13	送丝角度/(°)	45~60
对接间隙/mm	1.0	搭接间隙/mm	0



(a)对接焊缝



(b)搭接焊缝

图2 焊接接头外观质量

3.2 焊接质量检验

铸铝对接及搭接焊缝的内部质量要求如表6所示,主要包括熔深、有效厚度以及断面气孔率3个方面。

表6 焊缝内部质量要求

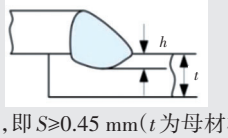
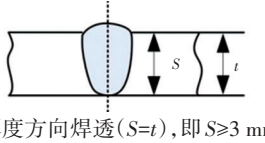
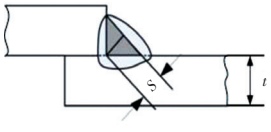
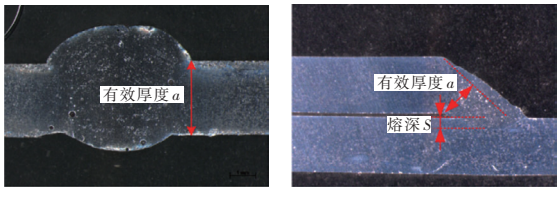
焊缝参数	对接焊缝	搭接焊缝
熔深h	不允许存在未熔合缺欠 (两侧母材熔深h>0)	 2 h≥0.15 t,即S≥0.45 mm(t为母材板厚度)
有效厚度S	 厚度方向焊透(S=t),即S≥3 mm	 S≥0.6 t,即S≥1.8 mm
断面气孔率f	≤15%	≤15%

图3所示为基于4043焊丝获得的自研THAS铸铝CMT对接及搭接焊缝的低倍金相照片,由图可知:对接焊缝在厚度方向已全部焊透,搭接焊缝上层铸铝样板端面已全部形成焊缝并与下层样板上表面有效冶金结合。表7所示为试验方案中各焊接样品获得的实际熔深及有效厚度的测量值。与表6中要求对比可知,熔深及有效厚度实测值均达到了试验设计要求。此外,搭接接头的焊丝及铸铝变化时,焊缝熔深及有效厚度会产生小幅波动,但仍符合焊缝质量设计要求。



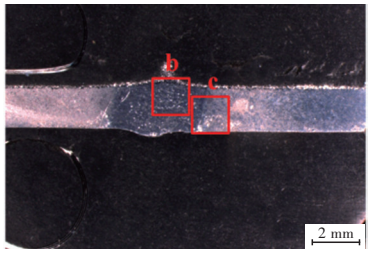
(a)对接焊缝　　(b)搭接焊缝

图3 THAS铸铝CMT焊缝低倍金相照片

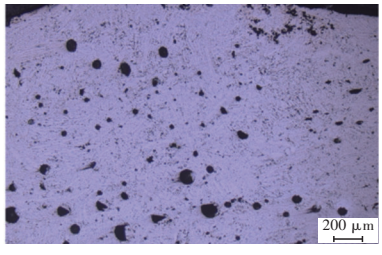
表 7 焊接样品熔深及有效厚度实测值 mm

接头形式	样品编号	熔深	有效厚度	是否满足要求
对接	S1	>0	3	是
	S2	>0	3	是
	S3	>0	3	是
	S4	>0	3	是
	S5	>0	3	是
搭接	L1	0.73	1.82	是
	L2	0.78	2.03	是
	L3	0.95	2.39	是
	L4	0.83	2.26	是
	L5	0.82	2.28	是

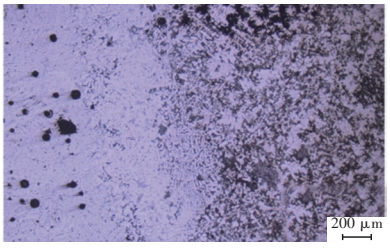
图 4 所示为基于 5356 焊丝获得的进口 C611 铸铝 CMT 对接及搭接焊缝的低倍金相照片以及焊缝区、熔合区及热影响区的局部放大照片，由图 4 可知：在整个焊缝区、熔合区均分布有大量密集性圆形微气孔。焊缝气孔会一定程度降低焊缝的承载能力。图 5 所示为焊缝截面气孔率检测获得的工业 CT 扫描照片。表 8 所示为试验方案中各焊接样品焊缝断面气孔率测量数值，该数值为整个焊缝方向上的单次连续捕捉的、随机 10 处断面位置处的气孔率中的最大值。与表 6 对比可知，断面气孔率实测值均达到了试验设计要求。结合焊接样品截面气孔率变化可知：相较于 4047 焊丝及 5356 焊丝，应用 4043 焊丝不利于压铸铝焊缝中微气孔的消除。



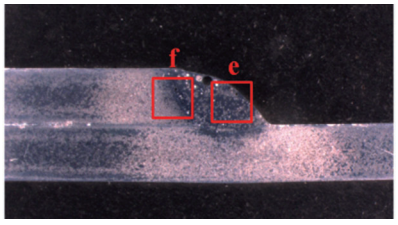
(a)对接焊缝



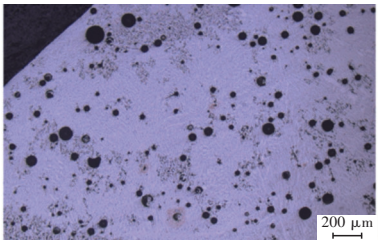
(b)对接焊缝熔合区



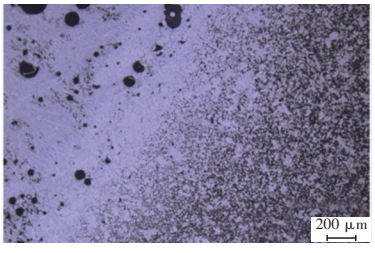
(c)对接焊缝热影响区



(d)搭接焊缝低倍

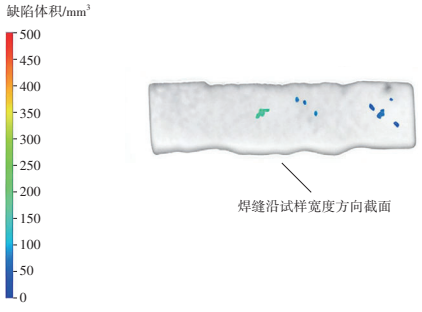


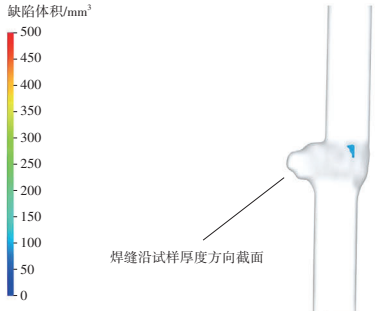
(e)搭接焊缝熔合区

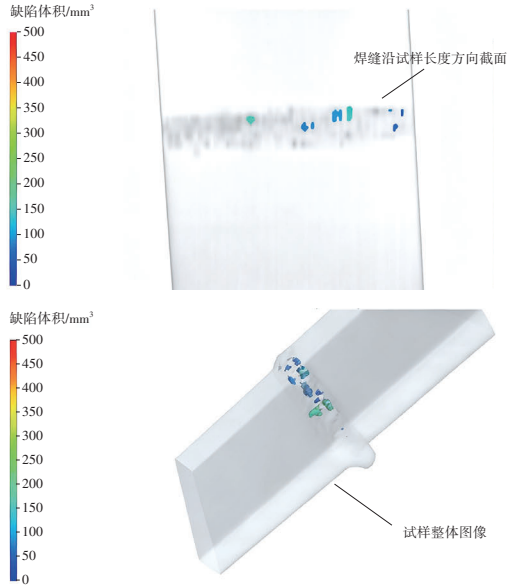


(f)搭接焊缝热影响区

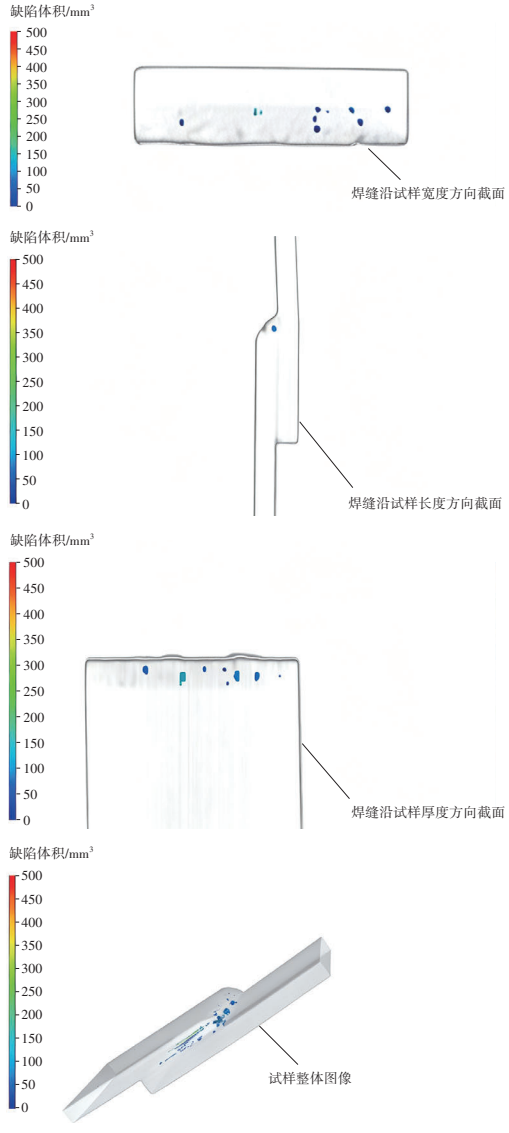
图 4 C611 铸铝 CMT 焊缝低倍金相及局部放大照片







(a)对接焊缝



(b)搭接焊缝

图5　C611铸铝CMT焊缝气孔率检测工业CT扫描照片

表8　焊接样品断面气孔率实测数值　%

接头形式	样品编号	气孔率	是否满足要求
对接	S1	12.3	是
	S2	11.2	是
	S3	7.9	是
	S4	7.5	是
	S5	7.3	是
搭接	L1	13.6	是
	L2	11.8	是
	L3	8.1	是
	L4	8.7	是
	L5	8.4	是

3.3　对接焊缝力学性能检测与失效形式分析

对编号为S1~S5的焊接样品进行静态拉伸测试,获得的拉力-位移曲线如图6所示。为保证性能测试数据的准确性,编号为S1~S5的焊接样品分别进行3次重复试验,获得的焊缝最大拉力、断裂位移以及断裂吸收功,如表9所示。

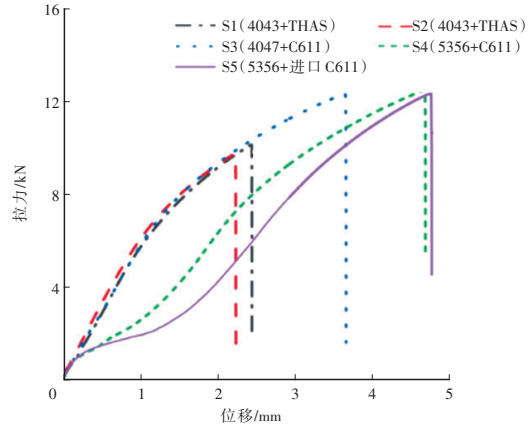


图6　S1~S5焊接样品的典型拉伸曲

图7所示为焊接样品最大拉力与断裂吸收功,结合图7可知:不同牌号焊丝对铸铝对接焊缝的最大拉力及断裂位移的影响较大。采用4043焊丝获得的焊缝最大拉力约为10 kN,断裂位移为2.16~2.74 mm;而使用4047焊丝和5356焊丝的焊缝强度可达12 kN以上,断裂位移范围提升至3.59~4.96 mm。推测原因为:与4043焊丝相比,4047焊丝的流动性更好且热裂纹敏感性低,可有效规避、减少焊缝中微孔洞、微裂纹;而5356焊丝自身强度较高,且具有较好的抗裂纹能力,因此,4047焊丝和5356焊丝获得的焊缝最大拉力高于4043焊丝。相同焊丝对不同牌号铸铝对接焊缝的拉伸性能影响相对较小。

表 9 S1~S5 焊接样品拉伸性能测试结果

样品编号		焊缝最大拉力/kN	断裂位移/mm	断裂吸收功/J
S1	S1-1	10.9	2.43	10.29
	S1-2	10.55	2.54	11.72
	S1-3	8.75	2.21	9.05
S2	S2-1	9.75	2.23	10.49
	S2-2	10.88	2.14	9.55
	S2-3	11.16	2.76	12.17
S3	S3-1	12.32	3.63	29.62
	S3-2	12.27	3.75	29.53
	S3-3	12.35	3.59	29.78
S4	S4-1	12.51	4.67	35.19
	S4-2	12.24	4.65	32.75
	S4-3	12.91	4.88	37.42
S5	S5-1	12.36	4.76	24.51
	S5-2	12.45	4.96	28.86
	S5-3	12.31	4.21	22.75

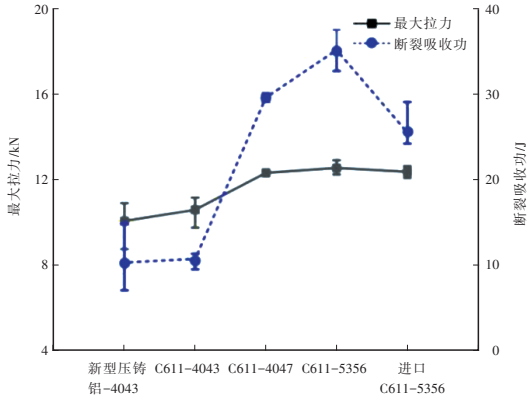


图 7 S1~S5 焊接样品最大拉力与断裂吸收功

与焊缝拉伸性能变化趋势相似，采用 4043 焊丝获得的对接焊缝断裂吸收功均在 10 J 左右，而采用 4047 焊丝和 5356 焊丝获得的国产 C611 铸铝合金焊缝断裂吸收功可达 30 J 左右。但采用 5356 焊丝获得的国产 C611 铸铝合金的焊缝断裂吸收功比同条件下进口 C611 铸铝合金更大，原因推测为国产与进口 C611 铸铝合金的性能差异。

S1~S5 焊接样品经拉伸后，其断裂位置均在对接焊缝的中心处，图 8 所示为 S4 样品的断裂形貌。焊缝断裂在中心处表明焊缝的强度在整个接头区中最低。

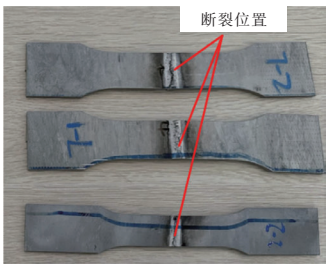


图 8 S4 样品拉伸测试后的断裂形貌

3.4 搭接焊缝力学性能检测与失效形式分析

对编号为 L1~L5 的焊接样品进行静态拉伸测试，获得的拉力-位移曲线如图 9 所示。为保证性能数据的准确性，编号为 L1~L5 的焊接样品同样进行了 3 次重复试验，获得的焊缝最大拉力、断裂位移以及断裂吸收功如表 10 所示。

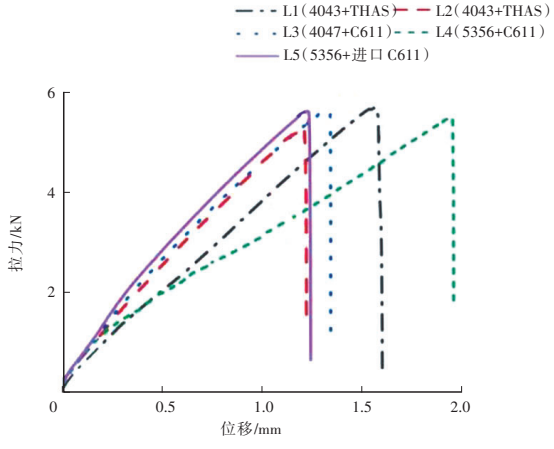


图 9 L1~L5 焊接样品的典型拉伸曲线

表 10 L1~L5 焊接样品的拉伸性能测试结果

样品编号		焊缝最大拉力/kN	断裂位移/mm	断裂吸收功/J
L1	L1-1	5.68	1.57	4.41
	L1-2	5.83	1.62	4.87
	L1-3	5.34	1.32	3.91
L2	L2-1	4.99	1.19	3.24
	L2-2	5.37	1.24	3.37
	L2-3	5.14	1.32	3.08
L3	L3-1	5.63	1.34	4.16
	L3-2	5.76	1.58	4.23
	L3-3	5.56	1.63	4.11
L4	L4-1	5.08	1.96	4.05
	L4-2	5.12	1.83	5.32
	L4-3	4.98	1.78	3.84
L5	L5-1	5.59	1.23	4.96
	L5-2	5.64	1.66	5.39
	L5-3	5.32	1.38	4.74

图10所示为L1~L5焊接样品最大拉力与断裂吸收功,结合图10可知:采用不同牌号焊丝时,铸铝搭接焊缝的最大拉力相当,均在5 kN左右;断裂位移存在较大波动,为1.19~1.96 mm,继而导致其断裂吸收功存在差异。原因推测为焊缝的断面气孔率波动大、焊缝拉伸过程中无法完全避免偏心距的影响以及铸铝不同区域的力学性能存在差异等多重原因共同作用。

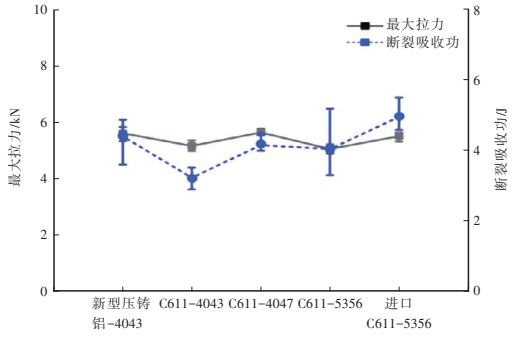


图10　L1~L5焊接样品最大拉力与断裂吸收功

与搭接焊缝强度曲线变化趋势相比,搭接焊缝断裂吸收功曲线变化趋势相似,整体数值约为4 J,远低于对接焊缝,说明该种焊缝形式的接头抵抗断裂能力较差。

L1~L5焊接样品经拉伸后,其断裂位置均位于焊缝截面的45°方向,说明焊缝的破坏主要受该方向的剪应力影响。图11所示为L4样品的断裂形貌。

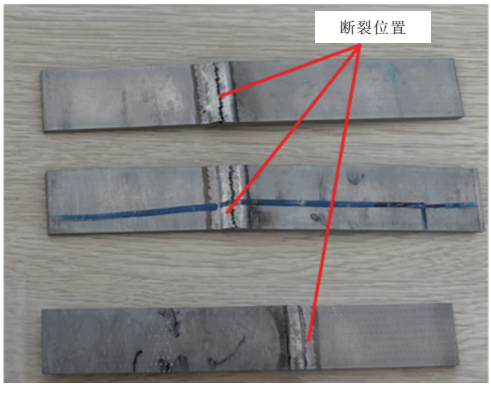


图11　L4样品拉伸测试后的断裂形貌

4　结论

a. 通过工艺调试与匹配,可获得采用CMT焊接时,不同焊丝在不同铸铝上的较佳工艺参数,且制备出的样品满足焊缝质量要求。

b. 对于铸铝对接焊缝,不同牌号焊丝对其最大拉力及断裂位移的影响较大,变化趋势表现为5356焊丝和4047焊丝优于4043焊丝,其对焊缝断裂吸收功的影响表现出相似趋势。

c. 对于铸铝搭接焊缝,其最大拉力受不同焊丝牌号的影响较小,差异不明显,但其断裂位移及最大断裂吸收功的波动较大,主要受焊缝质量、铸铝自身稳定性以及拉伸测试时装夹偏心距等多因素影响。

参考文献:

[1] 邓运来, 张新明. 铝及铝合金材料进展[J]. 中国有色金属学报, 2019, 29(9): 2115-2141.

[2] 张华, 刘博洋, 张林阳, 等. 乘用车车身压铸铝结构件应用现状及连接技术开发应对[J]. 汽车工艺与材料, 2024(7): 9-13.

[3] 郑敬明, 潘帅, 王玉, 等. 免热处理铝合金大型结构件一体压铸研究进展[J]. 中国有色金属学报, 2025, 35(6): 1869-1894.

[4] 周星宇, 刘红伟, 田甜. 冷金属过渡(CMT)技术综述[J]. 材料导报, 2024, 38(1): 430-438.

[5] VIBHU S, MAHENDRA S N, QASIM M. Effect of Al-Si and Al-Mg Filler Wires on Microstructure and Mechanical Properties of Bead-on-Plate Weld on AA6061-T6 Using CMT welding[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering, 2026, 240(1): 660-675.

[6] WANG Y C, LI M N, YANG X Y. Effect of P-MIG and CMT on Microstructure and Properties of 6082-T6 Joints[J]. Materials Science and Technology, 2023, 39(15): 2074-2089.