

铁道车辆用铝材的焊接特性^①

刘静安

(西南铝加工厂, 重庆 631326)

王元良 屈金山

(西南交通大学, 成都 610031)

摘要 对高速列车用6063、6061、919(相当于7005)铝合金母材及与之相匹配的焊丝(4043、5183、5356铝合金丝)施以MIG焊接之后的焊区强度、硬度以及焊接接头的腐蚀倾向、残余应力水平和常见的焊接裂纹与气孔等缺陷进行了分析和研究。结果表明,由于产生了软化,焊缝及热影响区的强度和硬度均低于母材;从综合效果来看,以母材6061合金匹配4043焊丝为佳;从焊后强度和刚度看,中空型材的截面以斜筋截面为优;从焊接接头的可靠性看,以纵向MIG自动焊接对接为最好。

关键词 车辆铝材 焊接特性 强度 硬度

铁道车辆的轻量化,特别是高速列车、地铁列车和双层客车的轻量化是铁道运输现代化的中心议题之一。大量的对比研究和反复实践证明,采用铝合金材料是实现车辆轻量化的最有效的途径。为此,世界各国集中人力、物力和财力对铝结构车辆的材料及其制造工艺和接合技术的改进进行了大量的研究,并取得了突破性进展。特别是近20年来,由于挤压技术的发展,各种扁宽薄壁大断面、大长度的复杂实心 and 空心铝合金型材的研制成功和铝型材自动焊接技术的进步,全铝车辆的组装方法已由过去的骨架上敷以外板的传统工艺,改为用骨架外板一体化的大型整体挤压型材拼装的新方法^[1, 2]。

尽管铝及铝合金的焊接技术有了迅猛的发展,但由于其自身特点,与低碳钢、低合金钢相比,铝合金的焊接仍然要困难得多。铝合金的导热系数比低碳钢大得多,在焊接热循环作用下,焊接热影响区(HAZ)会产生“过时效”软化^[3, 4],强度和硬度下降。因此,不仅要选用合适的铝合金材料及与之匹配的焊丝,而且应选用合适的焊接工艺方法与参数。本文对高速列车用6063、6061和919(相当于7005)合金材料的焊接接头(焊缝及热影响区)的强度和硬度的

变化及其原因进行了分析和探讨,并对各种铝材及与之相匹配的焊丝的综合焊接效果进行了评价。

1 试验材料及焊接方法

1.1 试验材料

1.1.1 焊接母材

(1) 西南铝加工厂2800mm轧机上生产的厚度为2.5mm的919RS板材,在剪切机上切割成2.5mm×60mm×200mm的试片。

(2) 西南铝加工厂125MN卧式挤压机上生产的宽度为340mm、厚度为3.5mm、高度为38mm的6061七孔空心跑道板型材,切成2000mm试件。

(3) 西南铝加工厂125MN卧式挤压机上生产的宽度为300mm、厚度为3mm、高度为25mm的6063六孔冷冻型材,切成2000mm的试件。

(4) 西南铝加工厂125MN卧式挤压机上生产的厚度为4mm、宽度为115mm、高度为110mm的919单孔空心型材,切成2000mm的试件。

1.1.2 填充材料(焊丝)

① 收稿日期: 1995-04-05; 修回日期: 1995-09-10 刘静安, 男, 56岁, 教授级高工

采用西南交通大学研制的直径为1.2 mm 的 Al-Mg5(5356)、Al-Mg4.5(5183)和 Al-Si(4043)合金焊丝。

焊接母材与焊丝的主要化学成分见表1。

1.2 焊接方法

本试验采用 MIG 焊接法, NB-500型氩弧焊机, Ar 气体纯度99.99%, 试验条件见表2。

1.3 焊接区性能检测方法

按有关标准将试样加工好后, 在5t 材料试验机上和维氏硬度计上分别测量强度和硬度, 一般取三个试样的平均值; 用金相法和目测法观察气孔与裂纹的数目与大小, 用四点弯曲加载法测量应力腐蚀倾向, 用小孔释放法测量残余应力。

2 结果与讨论

2.1 国产铝材的焊接性能

铝合金车体是由不同的空心型材和实心型材焊接而成的, 因此, 整个车体的承载能力不仅取决于母材的性能, 更重要的是焊接以后的性能。因为经焊接热循环作用后, 材料的组织和性能会发生很大变化, 焊接接头处甚至可能出现气孔、夹渣、裂纹等缺陷。

2.1.1 焊接接头的不均匀性

各种国产铝合金材料用 MIG 法焊接后测出了焊接接头硬度分布。焊缝区的硬度较母材基体区有较大的降低, 特别是919合金材料形成相差甚大的低匹配, 因此必须考虑选用或研

制新焊丝。6063合金材料的硬度最低, 但热影响区失强程度最少; 919合金材料热影响失强程度也不大, 6061合金材料热影响区失强程度则较大。

焊接接头强度和塑性也有相当差异, 表3比较了不同母材焊接接头的强度与塑性。焊接后经过一段时间(即自然时效)后强度和塑性均有相应变化, 自然时效后919合金材料的强度最高, 6061合金次之, 6063合金最低。各区自然时效恢复强度的能力也有一定差异。

2.1.2 不同材料的焊接强度及时效恢复能力

分别选用5183或4043合金焊丝焊接6061、919和6061+ 919合金材料等几种匹配, 其强度及焊接接头效率的对比见表4。从断裂位置看, 去余高时均断于焊缝, 不去余高时919合金断于熔合区, 其余合金断于软化区。可见不同材料之间的焊接会产生不同的效果, 因此合理选择焊丝材料与母线匹配十分重要。

2.1.3 焊接裂纹倾向性

铝合金焊接的主要技术难点之一是焊接裂纹问题, 选择不同的焊丝材料与母材匹配会产生不同的焊接裂纹倾向。试验结果和肉眼观察表明, 4043焊丝焊接6061合金(0.5%)及919合金(2.4%)的裂纹倾向最小。在同等条件下, 919合金材料的焊接裂纹倾向性比6061合金的大。用5183合金焊丝焊接上述材料的裂纹倾向性要大得多。

2.1.4 焊接气孔倾向性

焊接气孔也是铝合金材料焊接时最易发生

表1 试验用焊接母材与焊丝的主要化学成分(%)

材料名称	合金牌号	Mg	Mn	Zn	Zr	V	Cu	Si	Fe	Ti	Cr	AL
板材(母材)	919	1.3~1.9	0.3~0.5	4.5~5.3	0.1~0.25	-	0.15~0.3	≤0.3	≤0.50	-	0.1~0.2	余量
空心型材(母材)	6061	0.8~1.2	≤0.15	≤0.25	-	-	0.15~0.40	0.4~0.8	≤0.7	≤0.15	0.04~0.35	余量
空心型材(母材)	6063	0.45~0.9	≤0.1	≤0.1	-	-	≤0.1	0.2~0.6	≤0.35	≤0.10	≤0.10	余量
焊丝	Al-Mg5(5356)	4.5~5.5	0.05~0.2	≤0.1	-	-	≤0.1	≤0.25	≤0.40	0.06~0.20	0.05~0.20	余量
焊丝	Al-Mg4.5(5183)	4.3~5.2	0.5~1.0	≤0.25	-	-	≤0.1	≤0.4	≤0.4	≤0.15	0.05~0.25	余量
焊丝	Al-Si(4043)	≤0.2	≤0.15	≤0.20	-	-	≤0.3	4.5~6.0	≤0.6	≤0.20	-	余量

的突出问题。对用4043合金焊丝 MIG 焊接法焊接6061、919及6061+ 919合金材料进行了比较,用160倍实体显微镜观察各种情况下气孔平均数,发现用该焊丝焊接919合金材料的气孔倾向性最小(22个),6061合金较大(52个),6061+ 919合金最大(63个)。如以不同焊丝焊接6061合金材料,用相当于2.5 mm× 3.2 mm视场的显微镜观察表明,4043合金焊丝的气孔倾向性(119个)比5183合金焊丝的气孔倾向性(160个)小。

2.2 铝合金中空型材的焊缝工作性能

2.2.1 6061合金中空型材焊接接头性能的不均匀性

车体结构遇到最多的是纵向焊缝,焊接后硬度变化如图1所示。由图1看出,焊缝处硬度最低。由于焊接工艺的影响,先焊面与后焊面

的端部与中部硬度均有一定差异,其软化区大约离焊缝中心10 mm左右,到18~ 20 mm以后硬度已增至母材水平。一般来说,低强区大约为型材宽度的1/30,如用500 mm以上的中空型材组焊,软化区的强度和刚度的影响都相当小。

2.2.2 6063合金中空型材横向焊缝工作性能

如中空型材长度短于车身长度,则需要进行横向对接。由于中间筋条焊接不上,将大大影响型材的强度和刚度。为此,对6063合金中空型材横向对接的抗弯性能与母材进行了对比

表2 铝材 MIG 焊接试验条件

参数名称	焊接电流 I/A	焊接电压 V/V	焊接速度 V_n /mm·s ⁻¹	送丝速度 V_t /mm·s ⁻¹	氩气流 量 Q/L ·min ⁻¹	焊矩 高矩 H/mm
指标	125	21	10	70	14	15

表3 不同母材焊接接头的强度与塑性的比较

母材(焊丝)	6063(5183)				6061(5183)					919(5183)						
	状态	人工时效	焊后5d	自然时效32d	人工时效	焊态	自然时效90d	人工时效	焊态	自然时效90d	人工时效	焊态	自然时效90d	人工时效	焊态	自然时效90d
位置	母材	焊缝	软区	接头	母材	焊缝	软区	焊缝	软区	母材	焊缝	软区	熔区	焊缝	软区	熔区
σ_b /MPa	226	147	137	149	290	183	285	229	217	352	165	260	228	229	278	263
$\sigma_{0.2}$ /MPa	208	129	119	137												
δ /%	5.7	4.9	5.4	7.2	9.0	4.4	4.4	4.4	4.4		2.4	3.4	4.8	4.8	11.2	4.8
Hv	58	36	32	软区50	68	64				146	75.4					

表4 不同焊丝与母材匹配对焊接效率的影响的对比

项目	母材	余高处理	断裂位置	焊态		自然时效	
				σ_b (单个值)/平均值	效率/%	σ_b (单个值)/平均值	效率/%
焊丝 (5183) MIG 焊	6061+ 6061	保留 加工掉	软化区 焊缝	(196; 193; 189;) / 193 (178; 173; 175) / 175	66 68	(185; 219; 220) / 208 (241; 220; 211) / 224	71 76
	919	保留 加工掉	软化区 焊缝	(253; 253; 255) / 251 (214; 217; 194) / 216	71 61	(319; 282; 336) / 312 (278; 277; 230) / 262	89 74
	6061 + 919	保留 加工掉	软化区 焊缝	(286; 197; 195) / 199 (179; 185; 182) / 182	68 62	(225; 217; 218) / 220 (228; 224; 229) / 227	75 77
焊丝 (4043) MIG 焊	6061+ 6061	保留 加工掉	软化区 焊缝	(199; 284; 266) / 283 (226; 195) / 211	71 67	(135; 224; 221) / 222 (237; 223; 243) / 237	
	919+ 919	保留 加工掉	软化区 焊缝	(236; 232; 241) / 237 (227; 227; 218) / 224	67 64	(234; 211; 231) / 225 (258; 256) / 254	
母材 (6061 T6)		σ_b /MPa	纵向 横向	(97; 236; 249) / 194 (293; 383) / 298	δ_s /%	(12; 16; 12) / 14 (8; 18) / 9	

图1 中空型材纵向焊接接头
各区硬度的变化

试验。结果表明，母材的弯曲屈服应变 $\epsilon_{P0.2}$ 为 0.45%，相应承载能力为 60kN；而横向对接的中空型材的 $\epsilon_{P0.2} = 0.31\%$ ，相应的承载能力为 20kN，即其承载能力较母材降低了 2/3，在同样的加载条件下的挠度增加 1 倍。因此，中空型材的横向对接是不可取的，如果不可避免，则需消除或减轻这种不良影响，如采用带斜筋的空心断面型材等。

2.3 919合金板材的焊接性能

2.3.1 919合金板材焊缝及热影响区的强度和硬度

(1) 焊缝及热影响区的强度

为了解焊接加工对 919 合金焊缝及热影响区强度的影响，将 2.5 mm × 60 mm × 200 mm 的试板对接装配，按表 2 规范采用单面焊双面成型工艺施焊(焊件背面加铜垫板，通自来水冷却)。在焊完的试板上沿焊缝横向切取截面尺寸为 2.5 mm × 10 mm × 100 mm 的试件，锉削、平磨后，用细砂纸打磨到所需尺寸(2.5 mm × 8 mm × 100 mm) (试件焊后不经任何处理)，在材料试验机上进行拉伸试验，实验结果见表 5。

从实验结果看出：焊缝及热影响区的抗张强度比原母材低 33%，说明在电弧热作用下，919 合金的力学性能发生了较大变化，在焊接的 HAZ 区，因过时效产生了软化。拉伸试验中，试件多数断在距焊缝中心 10~ 15 mm 的

HAZ 区，表明该区域为焊接接头的薄弱部位。919 合金的强度主要通过固溶处理获得过饱和固溶体、使第二相从过饱和固溶体中缓缓析出的时效过程来强化的。在表 1 所列的母材成分条件下，主要强化相为 η 相 ($MgZn_2$) 及 T 相 ($Al_2Mg_3Zn_3$)，合金的强度与强化相的析出条件有关。过饱和固溶体的沉淀析出时效强化过程是一种固态相变过程，即形核与长大的过程，这种形核与长大和系统自由能的变化有关，只有在系统自由能降低的前提下才能形成新相。

表5 919RS 合金板焊缝拉伸试样的 σ_b 值(MPa)

	组号				总平均值
	A	B	C	D	
235. 1, 269. 2,	236. 3, 234,	224, 246,	217, 233,		
267	225. 7	232	227		
平均值	257. 2	232	234	225. 7	237. 2

铝合金的导热系数大，焊接中电弧移过后，金属冷却速度快，获得过饱和固溶体，经过一段孕育后，Mg、Zn 原子在铝基固溶体的一定晶面上偏聚，形成 GP 区，使得系统的自由能减少。919 合金的 GP 区呈球形。由此可知，要从过饱和固溶体中形成新相，只有尽可能增大自由能差，尽可能减少界面能和弹性应变能，使临界晶核半径和成核功减小，才能有利于相变的进行。固溶时效后铝合金的强度与从 GP 区相变的快慢有关，若这过程进行得缓慢，合金具有比较高的强度，否则较低。从 GP 区向 η' 相的转变受温度影响很大，时效温度越高，GP 区向 η' 相的转变越快，合金的强度越低。在不同温度下时效时，析出相的临界晶核大小、数量、成分及聚集长大速度不同，故呈现出不同的强化曲线^[5]。焊接时，焊接区的不同位置经历焊接循环的峰值温度不同。上述 GP 区 $\rightarrow \eta'$ 相变温度不同，从而导致焊缝及热影响区的强度不同。当时效过程再进一步发展，从不稳定 η' 相转变为稳定的 η 相时，其与基体的共格关系开始破坏，当 η' 相从固溶体中完全脱溶时，则形成稳定的 η 相 ($MgZn_2$)， η 相与基体的共格关系随之消失。伴随着 η 相质点

聚集长大, 合金强度开始降低, $Al_2Mg_3Zn_3$ 相也有与 η 相相似的时效强化过程。

(2) 焊缝及影响区的硬度

焊接热循环导致接头不同位置具有不同的强度, 焊接接头的硬度分布也不均匀, 为此对施焊后的接头(未经时效)进行了硬度测试(试件取自强度试验的同一块板上)。从焊缝中心开始向母材侧逐点测试硬度, 其结果如图2所示。从硬度分布曲线看出, 焊缝中心的硬度最低, 随距焊缝中心的距离的增大, 硬度增高, 在 HAZ 中距焊缝中心 15 mm 处硬度又降低, 以后硬度逐渐增高, 达到原始母材的硬度。919合金焊缝(WM)及影响区(HAZ)的硬度均比原始母材的硬度低。焊接时, 在电弧热的直接作用下焊缝中心处温度很高, 构成强化相的元素 Mg、Zn 及 Cu 均具有较大的活度。焊缝金属冷却过程中, 从 α 基体中析出的 η 相、 T 相质点以较快的速度聚集长大, 它们同基体保持较少的共格关系, 共格畸变减弱, 对位错运动的阻碍也减弱, 导致硬度降低, 随着焊缝距离增大, 金属受电弧热的作用减弱, 比焊缝中心的散热条件好, 而且填充金属中的 Cu 原子不断从焊缝中心向母材扩散, 形成强化相 S (Al_2CuMg), 因冷却速度快, 比焊缝中心的晶粒尺寸小, 所以硬度逐渐增高。离焊缝中心 15 mm 处, 受电弧幅射的影响减弱, Mg、Zn 原子的活性也相应降低, 而且 Cu 原子长距离扩散, 其浓度急剧下降。强化相 η 、 S 及 T 沉淀析出的数量减少, 使晶粒畸变程度减弱, 强化相的密度小, 各强化相具有较大的聚集长大空间, 使之有一定程度的长大, 导致硬度降低, 这就是距焊缝中心约 15 mm 处硬度曲线出现低谷的原因。该硬度低的区域为接头上的最薄弱的软化区, 拉伸试验多数断在该部位。

值得指出的是, 在不同工艺参数下, 919合金焊接接头硬度分布规律基本上与图2相似, 只是当焊接能量增大时, 软化区距焊缝中心的位置更远, 软化区的宽度更大。

2.3.2 919合金板材焊接接头的残余应力

919合金板材用 MIG 焊对接后, 用小孔释

放量测量残余应力的分布, 结果如图3所示。

图2 919合金板材焊缝、热影响区及母材硬度分布图

(母材为919合金板, 焊丝为5356合金丝)

图3 919合金板材焊接区残余应力的分布曲线

(4043焊丝, MIG 自动焊)

由图3可以看出, 919合金板材焊缝的残余应力分布规律与钢的相似^[5], 不同之处是焊缝区的残余应力很低, 这与焊缝金属材质成分有关, 并与低硬度相对应。对退火试件进行残余应力测试表明, 退火可降低焊缝区的拉应力及远离焊缝的压应力, 对热影响区的峰值残余应力可降低20%左右。

3 结论

(1) 从高速列车选用铝材的综合效果来看, 以母材6061合金匹配4043焊丝合金为佳; 从焊接后的强度和刚度来看, 中空型材的截面以斜筋截面为优; 从焊接接头的可靠性来看, 以纵向 MIG 自动焊接对接为好。

(2) 中空铝合金型材横向对接会大大降低构件的强度和刚度, 在实际应用中应尽量避免采用。如很难避免, 则应从车体结构设计、型材设计和提高焊缝性能等方面来解决才有实际意义。

(3) 各种铝合金焊接接头的残余应力水平较低, 这与焊缝金属材质成分、状态以及焊缝区的低硬度值有关。

(4) 919合金板材焊接接头(未经任何热处理条件下) 的强度低于母材强度, 在焊接热循环作用下, 铝合金的组织性能发生了变化, 强度损失最大达33%, 焊缝及热影响区的硬度均

低于母材的硬度, 说明热影响区发生了明显的软化。

参考文献

- 1 刘静安. 铝合金. 1995, (1, 2): 18- 28.
- 2 代静敏. 轻合金加工技术, 1995, (5): 22- 28.
- 3 美国焊接学会编, 黄静文等译. 焊选手册 IV. 北京: 机械工业出版社, 1991: 428- 432.
- 4 水野政夫等著, 许瑟姿译. 铝及其合金的焊接. 北京: 冶金工业出版社, 1985: 38- 50.
- 5 崔 昆主编. 钢铁材料及有色金属材料. 北京: 机械工业出版社, 1981: 353- 367.

WELDING CHARACTERISTICS OF ALUMINIUM ALLOYS FOR RAILWAY VEHICLES

Liu Jingan

The Southwest Aluminium Works, Chongqing 631326

Wang Yuanliang, Qu Jinshan

The Southwest Jiao Tong University, Chengdu 610031

ABSTRACT After MIG welding was carried out on the aluminium alloys materials 6063, 6061 and 919 using matched aluminium solder wires 4043, 5183 and 5356 respectively, the strength and the hardness of the soldered joint, the corrosion tendency and the residual stress of the heat affected zone, and the weld cracks and other weld defects were analyzed and studied. The results showed that due to softening, the strength and the hardness of the weld seam and the heat affected zone were all lower. In light of the comprehensive effect, the 6061 aluminium alloy matched with 4043 aluminium solder wire is the best; in light of the strength and the hardness after welding, the hollow figured with diagonal-bar section is the best; in light of the reliability of the soldered joint, the longitudinal MIG automatic welding is the best for connecting.

Key words aluminium materials for vehicles welding characteristics strength hardness

(编辑 彭超群)