

储能电容柜的轻量化设计及制造

龚家林 陈克明 刘标

(长沙市美宇电器有限公司 湖南 长沙 410000)

摘要: 本文介绍储能电容柜的设计及制造过程,对电容柜的材质进行改进(从碳钢变更为铝合金)、结构进行优化,在保证电容柜的功能和性能的前提下,提高电容柜的散热能力,利用铝合金的轻便特性实现对电容柜的轻量化设计和制造。

关键词: 铝及其合金;焊接性能;材料更改;轻量化设计

0 引言

作为近年来应用最广泛的合金之一,铝合金具有高的疲劳强度、良好的可塑性、良好的耐腐蚀性、良好的焊接性能等优点。铝合金与其他轻质材料相比较使用成本相对较低,与碳钢板材相比防腐性能比较优越,且随着其焊接及铆接工艺的成熟推广,铝合金在轨道交通行业不断地推广使用,当前铝合金结构广泛的应用于列车车体,车载设备等领域^[1]。所以在电容储能柜轻量化设计过程中,在保证功能和性能的情况下,选择铝合金材料进行该产品的结构设计。

1 使用铝合金材料的优势

(1) 铝在空气中氧化得很快,由于铝与氧之间具有很强的化学亲合性,在铝合金表面容易形成薄氧化膜。该氧化膜能防止铝合金进行深层次的氧化,从而能有效地阻隔雨水的侵蚀。

(2) 铝合金的比热容、导热系数和导热性能远高于钢^[2]。所以当电容储能柜进行工作放电时产生的热量会快速地被铝合金传导,这样就能进行高效地散热处理,从而提升电容器的使用寿命,提高设备的安全性,减缓设备的老化。

(3) 铝合金自身材质轻盈,铝($2.7\text{g}/\text{cm}^3$)与铁($7.8\text{g}/\text{cm}^3$)相比较密度只有其1/3,所以在理论上同等体积的碳钢结构比优化后的铝合金结构要重3倍,在保证产品质量的情况下使用铝合金去替代碳钢是可行的,也是符合国家碳达峰碳中和的战略目标的。

(4) 关于铝合金的焊接,在控制产品成本的同时考虑到产品结构的稳定性决定采用六系铝合金型材

进行骨架的制作,使用五系的铝合金板材进行覆盖件的制作。

2 焊接工艺

2.1 焊接前的准备

铝及其合金金属经过一段时间的放置,表面会形成一层致密的金属氧化层。这层氧化层能够防止金属进一步氧化,起到保护铝及其合金的作用。但由于氧化膜不仅会使焊缝产生熔合不良等缺陷,而且氧化膜吸附的水份会使铝合金焊接产生气孔^[3],因此在铝及其合金的焊接中其氧化膜是会影响焊缝的质量和成形效果的,所以一定要把表面的氧化膜去掉后再焊接铝合金。比较常见的处理有化学处理和物理处理两种,某公司采用的清理方式是使用直磨机等机械工具清理母材的焊接位置和两侧25mm区域的氧化膜等污渍,直至材料露出金属光泽。焊接过程中使用中央空调,保证了焊接环境温度保持在 5°C 以上,环境湿度保持在65%以下。

2.2 焊丝的选择

焊接处的耐腐蚀性以及抗裂、抗拉等性能的优劣,决定着焊丝选择的合理与否。所以在选择焊丝时,主要是考虑它的焊接性能和其焊缝强度,然后是形成的焊缝的抗拉强度和焊丝的成分是哪些元素,5083铝合金产品储能电容柜焊接选用ER5087焊丝,表1为该焊丝的成分表。

ER5087焊丝增加了Ti、Zr等合金元素,用于细化焊缝组织晶粒,减少焊接热裂纹,提升焊接接头的机械性能。

2.3 焊接工艺参数

5083铝合金和6061铝合金的化学成分如表2、

表 3 所示。

由表 2 和表 3 可见，5083 铝合金和 6061 铝合金二者成分中镁和硅的含量区别较大，不同系列的铝合金在进行焊接时，收到高温的影响易产生热裂纹，这时就需要进行焊接实验来验证焊缝接头质量，编制 WPS 焊接工艺规程文件进行焊接，见表 4。

焊后对焊接试件进行宏观和微观检测，检测结果表明焊接接头是符合要求的，见表 5。

3 产品前后更改对比

3.1 产品设计更改前

碳钢结构的电容储能柜质量为 574.9kg，如图 1 所示。

钢结构的材质为 Q235B，其力学性能见表 6。

3.2 产品设计更改后

在更改材质为铝合金产品后质量如图 2 所示，为

279kg，相对于碳钢的结构质量减轻了将近 1/2。

更改后框架所用的材质为 6061-T6，其力学性能见表 7。

对未进行更改的碳钢结构电容储能柜进行受力分析，如图 3 和图 4 所示。

由于材质的更改，导致结构的抗拉强度有所下降，根据图 3 和图 4 进行的受力分析显示的受力点，为了保证结构的强度和稳定性对柜体的结构进行了相应的局部加强和优化，如图 5 和图 6 所示。

如图 7 所示为碳钢的电容储能柜的结构设计图，图 8 所示为材质更改为铝合金后的电容储能柜的结构设计图。对比可知，为了保证该储能柜结构强度和稳定性，在两个竖立柱之间增加了两根斜的支撑立柱，目的是对局部进行刚性强化，柜底部增加一根竖梁，对整体框架进行加固处理，并且局部使用的板材厚度有所增加。

表 1 ER5087 焊丝成分组成

标准	GB/T 10858 – 2008 AWSA5.10 ER5087											
成份	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Be	Ti	Zr	其余	其余总和
含量 /%	< 0.25	< 0.40	< 0.05	0.70 ~ 1.00	4.50 ~ 5.20	0.05 ~ 0.25	< 0.25	< 0.0003	< 0.15	0.10 ~ 0.20	< 0.05	< 0.15

表 2 5083 铝合金化学成分

合金牌号	化学成分 (余量为 Al,Wt.%)							
	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti
5083	≤ 0.4	≤ 0.4	≤ 0.1	0.4 ~ 1.0	4.0 ~ 4.9	0.05 ~ 0.25	≤ 0.25	≤ 0.15

表 3 6061 铝合金化学成分

合金牌号	化学成分 (余量为 Al,Wt.%)							
	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti
6061	0.4 ~ 0.8	0.7	0.15 ~ 0.4	0.15	0.8 ~ 1.2	0.04 ~ 0.35	0.25	0.15

表 4 WPS 焊接工艺规程

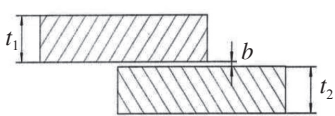
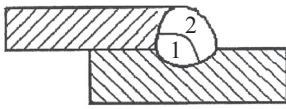
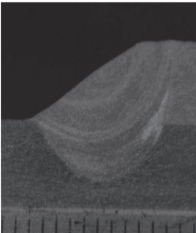
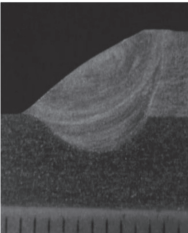
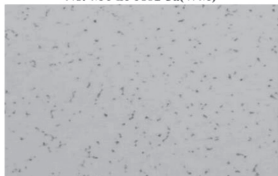
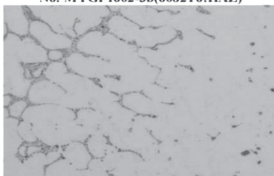
焊接接头形式					焊接顺序			
			$t_1=5\text{mm}$ $t_2=8\text{mm}$ $b=0\text{mm}$		 $a=3\text{mm}$			
焊接工艺参数								
焊道	工艺方法	焊材规格 /mm	电流强度 /A	电弧电压 /V	电流种类 / 极性	送丝速度 /(mm/s)	焊接速度 /(mm/s)	热输入 /(kJ/mm)
1	141	3.2	283	16.2	AC/	—	5.0	0.55
2	141	3.2	237	15.0	AC/	—	5.0	0.43
保护气体 / 焊剂		电弧保护	100%Ar		气体流量 /(L/min)	电弧保护	10	
		根部保护	—			根部保护	—	

表 5 焊接试件检测结果

试样编号	MYGP1602 - 1, 2, 3		仪器型号	-	试验标准	ISO 17639, ISO 10042 - B	
试验条件	ISO 17639 - A - E - PM - HAZ - WM - 6082T6+5083H111/XY				ISO 17639 - 1 - E - PM - HAZ - WM - 6082T6+5083H111/XY		
位置	项目						
	宏观				微观		
焊缝 /W.M	熔合良好				无微观裂纹		
母材 /P.M	无异常				无异常		
热影响区 /HAZ	无异常				无微观裂纹		
No: MYGP1602-1 					No: MYGP1602-2 		
					No: MYGP1602-3a(WM) 		
					No: MYGP1602-3b(6082T6:HAZ) 		
					比例/Scale:500X		

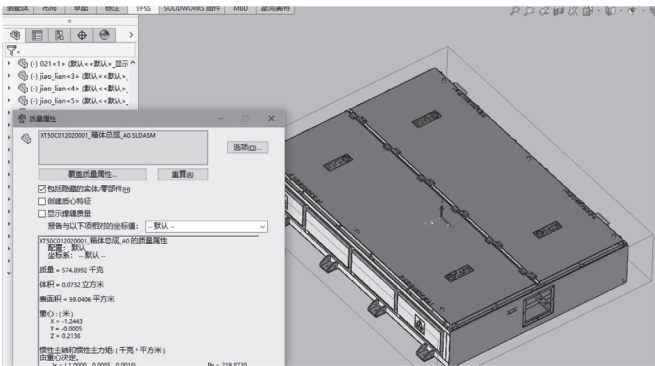


图 1 更改前柜体

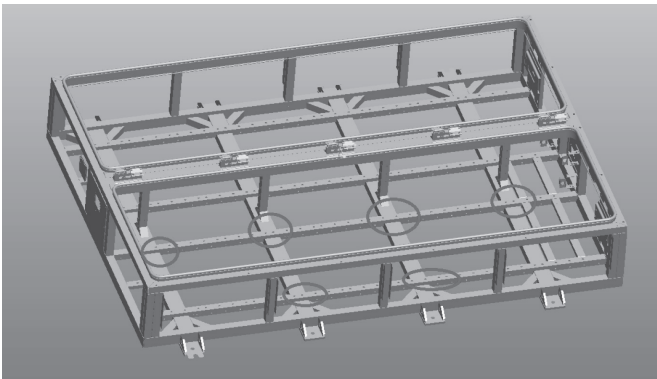


图 3 更改前柜体受力分析（一）

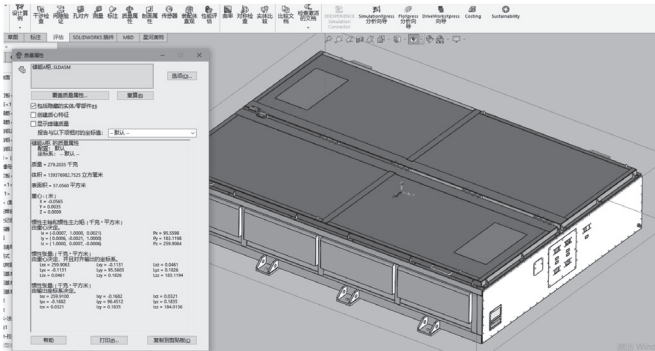


图 2 更改后柜体

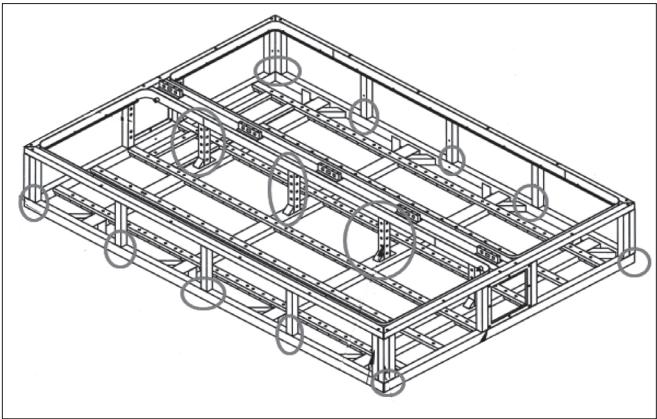


图 4 更改前柜体受力分析（二）

3.3 产品制作完成后进行实验

对更改后的产品进行振动冲击试验，试验仪器见表 8。

根据冲击试验的大纲要求对其产品进行配重，根据 GB/T 21563-2008《轨道交通机车车辆设备冲击和振动试验》，按 1 类 A 级进行试验，试验结果见表 9。

4 结语

在储能柜的轻量化研究中，材质的选择是影响轻量化程度的主要因素。由于单一的铝合金无法满足轨道交

表 6 部分钢结构材料的力学性能（摘自 GB/T 700 – 2006）

牌号	等级	屈服强度 $R_{\text{el}}/(\text{N}/\text{mm}^2)$, 不小于						抗拉强度 $R_m/(\text{N}/\text{mm}^2)$	断后伸长率 $A/\%$, 不小于					冲击试验 (V 型缺口)	
		厚度 (或直径)/mm							厚度 (或直径)/mm					温度 / ℃	冲击吸收功 (纵向)/J 不小于
		≤ 16	> 16 ~ 40	> 40 ~ 60	> 60 ~ 100	> 100 ~ 150	> 150 ~ 200		≤ 40	> 40 ~ 60	> 60 ~ 100	> 100 ~ 150	> 150 ~ 200		
Q235	A	235	225	215	215	195	185	370 ~ 500	26	25	24	22	21	—	27°
	B													+20	
	C													0	
	D													— 20	
a Q195 的屈服强度值仅供参考, 不作交货条件。 b 厚度大于 100mm 的钢材, 抗拉强度下限允许降低 20N/mm ² 。宽带钢 (包括剪切钢板) 抗拉强度上限不作交货条件。 c 厚度小于 25mm 的 Q235B 级钢材, 如供方能保证冲击吸收功值合格, 经需方同意, 可不作检验。															

表 7 材质 6061 – T6 的力学性能（摘自 GB/T 3880.2 – 2012）

牌号	包铝 分类	供应 状态	试样 状态	厚度 /mm	室温拉伸试验结果				弯曲半径	
					抗拉强度 R_m /MPa	规定非比例 延伸强度 $R_{p0.2}$ /MPa	断后伸长 率 /%			
							A50 mm	A	90°	180°
					不小于					
6061		O	O	0.40 ~ 1.50	≤ 150	≤ 85	14	—	0.5 <i>t</i>	1.0 <i>t</i>
				> 1.50 ~ 3.00			16	—	1.0 <i>t</i>	1.0 <i>t</i>
				> 3.00 ~ 6.00			19	—	1.0 <i>t</i>	—
				> 6.00 ~ 12.50			16	—	2.0 <i>t</i>	—
				> 12.50 ~ 25.00			—	16	—	—
		T4	T4	0.40 ~ ~ 1.50	205	110	12	—	1.0 <i>t</i>	1.5 <i>t</i>
				> 1.50 ~ 3.00			14	—	1.5 <i>t</i>	2.0 <i>t</i>
				> 3.00 ~ 6.00			16	—	3.0 <i>t</i>	—
				> 6.00 ~ 12.50			18	—	4.0 <i>t</i>	—
				> 12.50 ~ 40.00			—	15	—	—
				> 40.00 ~ 80.00			—	14	—	—
		T6	T6	0.40 ~ 1.50	290	240	6	—	2.5 <i>t</i>	—
				> 1.50 ~ 3.00			7	—	3.5 <i>t</i>	—
				> 3.00 ~ 6.00			10	—	4.0 <i>t</i>	—
				> 6.00 ~ 12.50			9	—	5.0 <i>t</i>	—
				> 12.50 ~ 40.00			—	8	—	—
				> 40.00 ~ 80.00			—	6	—	—
				> 80.00 ~ 100.00			—	5	—	—
				F			—	> 2.50 ~ 150.00	—	

表 8 试验仪器清单

序号	名称	性能参数	数量	备注
1	电动振动试验系统	推力: 160kN; 水平台: 2.5m×2.5m; 垂直台: 2m×2.5m, 频率: 2 ~ 2200Hz, 加速度: 0 ~ 100g	1 台	ES-160LS3-650
2	数字大气压力计	精度 0.5, 分辨率 0.1	1 台	DYM3-02
3	电子吊称	0 ~ 3t	1 只	OCS-3t

表 9 试验结果（部分）

序号	检验项目	技术要求	检测结果	结论
1	模拟长寿命振动试验	依据 GB/T 21563-2008 标准 1 类 A 级，模拟长寿命振动试验要求： 将样品模拟安装工况进行配重 705kg, 安装在振动试验工装上，并整体固定在振动台面上。 当产品质量大于 500kg 小于 1250kg 时， $f_1=2.7\text{Hz}$ ， $f_2=81.2\text{Hz}$ （此产品为 218kg，总质量为 923kg）。 常温下，在垂向、横向、纵向三个方向上分别进行试验。 样品按照垂向 5.9m/s^2 ，横向 2.9m/s^2 ，纵向 3.9m/s^2 进行振动试验，每个方向各 5h。 试验后，不应产生紧固件松动，柜体本体、焊缝处、拉铆螺母处以及其他位置的机械损坏现象	试验后，柜体本体、焊缝处、拉铆螺母处以及其他位置无机械损坏现象，无紧固件松动现象。	合格
2	冲击试验	依据 GB/T 21563-2008 标准 I 类 A 级，冲击试验要求： 环温下，在垂向、横向、纵向三个方向上分别进行正反各三次冲击试验，按照垂向 30m/s^2 ，横向 30m/s^2 ，纵向 50m/s^2 进行试验，脉宽为 30ms。 试验后，不应产生紧固件松动，柜体本体、焊缝处、拉铆螺母处以及其他位置的机械损坏现象。	试验后，柜体本体、焊缝处、拉铆螺母处以及其他位置无机械损坏现象，无紧固件松动现象。	合格

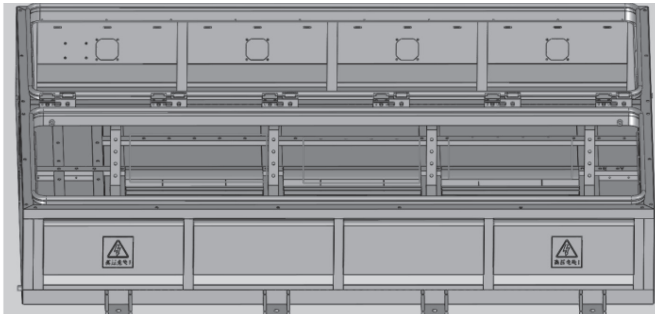


图 5 更改前结构设计图（一）

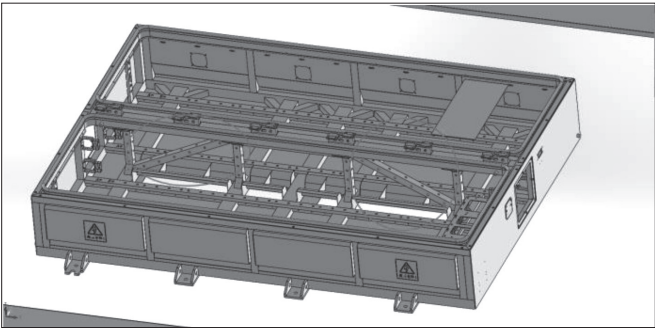


图 6 更改后结构设计图（二）

通产品轻量化发展需求，不同的铝合金的化学成分不相同，所具有的机械性能、焊接性能也会有很大区别，因此需要通过了解各种铝合金的特性将其进行混合使用来满足轨道交通产品制造要求。而多种铝合金的混合使用，对焊接技术提出了更高要求。因此，在企业的未来发展中，不仅要加强轨道交通产品轻量化材料的选择，更要提高焊接技术，以此来促进轨道交通产品轻量化发展。

参考文献：

[1] 周振丰，张文钺．焊接冶金与金属焊接性 [M]．2 版．北京：

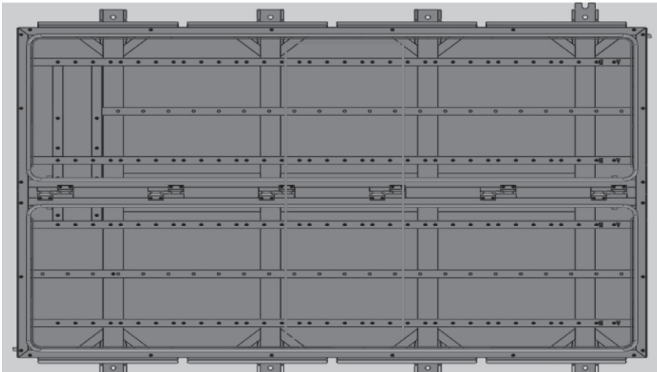


图 7 更改前结构设计图

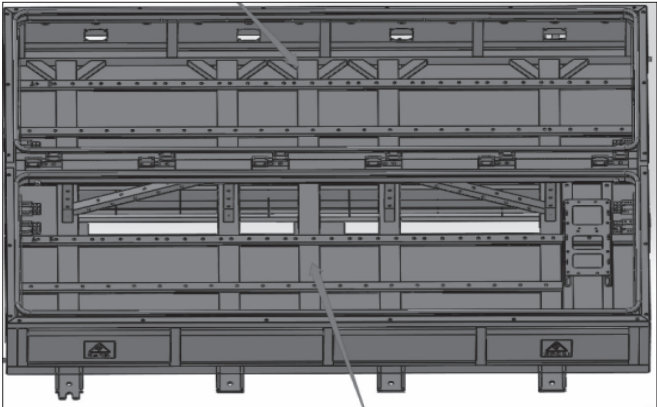


图 8 更改后结构设计图

机械工业出版社，2007:3.
[2] 胡效军，齐淑改，陈波．铝合金 5083 及 6061 的焊接 [J]．焊接技术，2019 (4) :72-73.
[3] 宫博．船用 5083 铝合金 TIG 焊工艺研究 [J]．机电技术，2012 (4) :121-123.

作者简介: 龚家林 (1984.08-)，男，汉族，安徽明光人，本科，中级工程师，研究方向：金属焊接工艺。