

[文章编号] 1004- 0609(2001)S2- 0001- 05

运载工具的铝合金选材与焊接^①

王元良, 周有龙, 胡久富, 屈金山

(西南交通大学 焊接研究所, 成都 610031)

[摘 要] 阐述了运载工具的轻量化及采用铝合金焊接结构的效果, 焊接结构常用铝合金的选择及其焊接接头性能试验结果, 介绍了近期发展的铝合金焊接新方法、设备及工艺。

[关键词] 运载工具; 铝合金; 焊接

[中图分类号] TG 147

[文献标识码] A

运载工具轻量化是国内外运载工具设计和使用者长期追求的目标, 因为由此可节能和提高运行速度, 增加运输质量, 减少能源消耗, 减少大气污染。而铝合金化是首选方案, 如 18 M 铁路货车采用铝合金轻量化的效果见表 1。与钢车比较可节能 10%, 增效 10%, 修理费少, 废铝合金车回收价为钢车的 4 倍。客车采用铝合金轻量化效果如表 2。汽车的轻量化采用铝合金效果也十分显著, 并得到很快发展, 在 1980 年轿车用铝合金量为 4% 时, 车重 1520 kg; 1990 年用铝合金量为 5.5%, 车重 14750 kg; 2000 年用铝合金量为 12.5%。如轿车用铝材 50 kg, 就可将车重降到 1200 kg。如每车质量减少 100 kg, 每 100 km 可省汽油 0.5~ 0.8 L, CO₂ 排放量将相应减少。本文作者着重对铝合金焊接问题的研究成果加以阐述。

1 焊接结构常用铝合金的性能

焊接结构常用铝合金的性能如表 3。可看出 Al-Mg 合金系在退火状态使用有很高的延性, 但强度很低; 如采用冷加工硬化, 强度有所提高, 而延性则大大下降。Al-Mg-Si 和 Al-Zn-Mg 合金属于热处理强化合金, 其性能与处理状态有关。时效处理后有较好的综合力学性能, 但存在焊后接头处强度下降问题。

2 焊接材料及工艺匹配

2.1 焊缝强度及延性

一般铝合金焊接多采用 MIG 焊, 作者用 MIG 自动焊工艺对接铝合金板(厚 6 mm), 间隙为 1.5 mm, 干伸长为 20 mm。焊缝强度用板式试件进行测量, 焊接材料匹配和焊接规范及其焊缝拉伸性能见表 4。

2.2 焊缝冲击韧性

焊缝冲击试验仍采用 MIG 焊接 6 mm 厚对接铝合金板, 间隙为 1.5 mm; 干伸长为 20 mm。焊缝冲击试验用 5 mm × 10 mm 的却贝试件, 各种材料匹配冲击试件的焊接工艺及其焊缝冲击试验结果如表 5 所示。

2.3 焊缝强度塑性及韧性的比较

焊接拉伸及冲击试验结果如图 1 所示。由图可以看出, 6005 合金用 5183 焊丝采用 MIG 焊, 综合力学性能最好, 无论是强度、塑性和韧性均优于

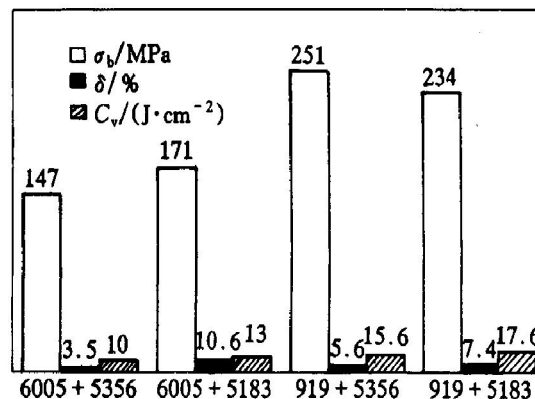


图 1 焊缝性能的比较

Fig. 1 Comparison for properties of weld seam

① [收稿日期] 2001- 07- 16; [修订日期] 2001- 09- 10

[作者简介] 王元良(1929-), 男, 教授。

表 1 铁路货车采用铝合金轻量化的效果

Table 1 Effect of light railway freight train made by aluminum alloy

Material	Mass of body/t	Ratio of mass	Ratio of Material fees	Ratio of Fabrication fees	Ratio of production costs
Steel	8	1	1	1	1
Al alloy	4. 5	0. 56	4. 51	0. 57	5. 08

表 2 客车采用铝合金轻量化的效果

Table 2 Effect of light passenger train made by aluminum alloy

Kind of train (Underground)	Mass of train/ kg		Ratio of mass/ %	Kind of railway train	Mass of train/ kg		Ratio of mass/ %
	Steel	Al alloy			Steel	Al alloy	
M L	6 700	3 000	55	Passenger train	9 350	3 950	57
Germany	9 500	4 670	51	Higher-passenger train	11 800	6 200	48

表 3 焊接结构常用铝合金的性能

Table 3 Properties of Al alloys for welding construction

Kind of Al alloys	Code	Treatment	Mechanical properties			Other properties			
			σ_b / MPa	σ_s / MPa	δ / %	Form	Press	Weld	Anti corrosion
Al-Mg	5053	Cold work Anneal	> 180 110~ 150	> 35 > 35	> 3 > 21	Good	Good	Good	Good
	5083	Cold work Anneal	> 280 280~ 360	> 35 > 35	> 2 > 16	Good	Bad	Good	Good
Al-Mg-Si	6061	Quenching+ manual aging	> 300	> 250	> 10	Good	Good	Better	Good
	6065	Hot work+ manual aging	> 250	> 210	> 8	Better	Good	Good	Good
	6063	Anneal	> 150	> 110	> 8	Good	Good	Good	Good
Al-Zn-Mg	7005	Hot work+ manual aging	> 280	> 250	> 10	Good	Good	Good	Good

表 4 铝合金焊接条件和接头的焊缝机械性能

Table 4 Weld conditions and mechanical properties of weld seams for Al alloy

Base metal+ Weld metal	Weld conditions					Mechanical properties of weld seam	
	Current/ A	Voltage/ V	Velocity/(m·h ⁻¹)	Energy /(kJ·cm ⁻¹)	Quantity of gas /(L·min ⁻¹)	σ_b / MPa	δ / %
6005+ 5356	21	120~ 160	16. 8	6	21	(145, 149) / 147	(4. 5, 2. 5) / 3. 5
6005+ 5183	21	110~ 160	16. 8	6	21	(169, 157, 187) / 171	(13. 0, 12. 0, 6. 8) / 10. 6
6061+ 5183	21	120~ 130	10. 0	3	14	(241, 220, 211) / 224	
6061+ 4043	21	120~ 130	10. 0	3	14	(237, 223, 223) / 237	
919+ 5356	21	130~ 170	17. 0	6	21	(280, 240, 232) / 251	(6. 0, 6. 0, 4. 3) / 5. 6
919+ 5183	21	140~ 180	22. 0	6	22	(225, 219, 259) / 234	(9. 2, 4. 5, 8. 5) / 7. 4

6005+ 5356 匹配的焊缝。919+ 5356 匹配的焊缝强度要比 919+ 5183 的高，而塑性和韧性要低，两者的综合力学性能均比 6005 焊缝的高。由此可见，5356 和 5183 焊丝均可适用于 919 合金的焊接，但 919+ 5356 较好。如用 919 合金和 6005 两种材料焊接，以选用 5183 焊丝为好。

3 焊接接头的不均质性

3.1 焊接接头的不均质性

焊接接头的不均质性可用接头的硬度分布来评定，因为强度与硬度基本上呈线性关系。几种匹配

表 5 铝合金焊接条件和焊缝冲击试验结果

Table 5 Weld conditions and toughness of weld seams for Al alloy

Base metal+ Weld metal	Current/ A	Voltage/ V	Velocity / (m·h ⁻¹)	Energy / (kJ·cm ⁻¹)	Quantity of gas / (L·min ⁻¹)	Toughness of weld seam / (J·cm ⁻²)
6005+ 5356	21	120~ 160	16. 8	1. 5~ 2. 0	21	(8. 1, 14. 7, 7. 3) / 10. 0
6005+ 5183	21	150~ 190	30. 6	1. 0~ 1. 3	22	(12. 4, 14. 1, 12. 4) / 13. 0
919+ 5356	21	140~ 180	17. 0	1. 5~ 2. 2	21	(6. 7, 19. 0, 21. 0) / 15. 6
919+ 5183	21	150~ 190	30. 6	1. 0~ 1. 3	22	(12. 7, 19. 7, 20. 3) / 17. 6

配的焊接接头各区的硬度分布如图 2 所示。对焊 919 来说, 两种焊丝焊接 919 的焊缝硬度均达到母材水平, 焊接 6005 的焊缝硬度还高于母材水平。所有试验值均为经过一个月自然时效后测得。由于 6005 合金自然时效能力弱, 热影响区有一软化区间; 而 919 合金自然时效能力强, 软化区性能已得到很大的恢复, 硬度已接近母材水平。

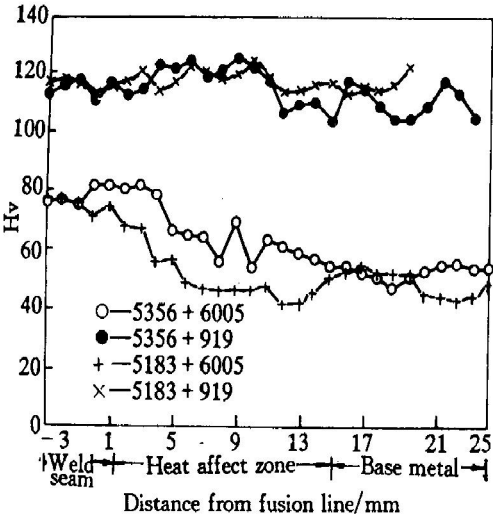


图 2 焊接接头各区的硬度分布

Fig. 2 Distribution of hardness in every zone

3. 2 焊接接头各区硬度平均值比较及分析

将焊接接头各区硬度平均值列于表 6。表 6 中 W 代表焊缝区硬度平均值, F 代表熔合区硬度值, HG_{max}代表热影响区高区硬度最高值, HG 代表热影响区高区硬度平均值, HD 代表热影响区低区硬度平均值, HD_{min}代表热影响区低区硬度最低值, M 代表母材区硬度平均值。919 铝合金无论用 5356 或 5183 焊丝焊接的平均硬度比较, W, F, HD 及 M 均相近, 说明材料及工艺匹配均好, 母材的自然时效能力强。而 6005 铝合金 M 很低, 除 HD 外, 各区值均高于母材, 说明母材的自然时效能力弱。

4 焊接接头其它工艺问题

4. 1 焊接裂纹问题

高强铝合金一般焊接裂纹倾向大, 用 4143(Al-

表 6 焊接接头各区硬度平均值

Table 6 Hardness in every zone of weld joints

Hv zone	Alloy			
	6005+ 5356	919+ 6005	6005+ 5183	919+ 5183
W	76	114	74	117
F	74	110	71	113
HG _{max}	91	126	76	122
HG	81	120	74	118
HD	50	110	46	106
HD _{min}	47	105	44	104
M	55	115	50	115

Si) 焊丝焊接可大大减少裂纹倾向, 但焊缝强度较低(焊 6061 合金例外)。作者曾试用含微量 Ti 和 Re 的 Al-Mg 或 Al-Zn-Mg 焊丝焊接高强铝合金, 既提高了焊缝强度又大大减少了裂纹倾向。

4. 2 焊接接头软化区问题

由前所述, 由于 6005 自然时效能力弱, 所以软化区硬度值很低, 因此最薄弱的环节在软化区; 而 919 合金由于自然时效能力相当强, 因此最薄弱环节在软化区恢复较多, 只比焊缝及母材略低, 不至于影响接头强度。总的来说热处理强化合金焊后都会有软化区, 对于焊后不进行热处理的结构要考虑选用自然时效能力强的铝合金。另外要选用热影响区窄的焊接方法和工艺, 只要软化区宽厚比小, 在各区共同受力情况下(包括焊缝平行和垂直受力方向)就可能不至于影响接头强度。

4. 3 焊接气孔问题

焊接气孔问题是铝合金焊接中比较难以解决的问题, 主要途径是加强焊前的清理工作和保持工件及焊接料的干燥; 从工艺上延缓熔池结晶时间也是减少焊接气孔量的方法。

4. 4 焊缝塌陷

如果是对接焊, 背面不加衬垫, 很容易形成焊缝塌陷, 所以在无法加衬垫的情况下就只有采取搭对接形式, 但这样就将减弱焊缝或浪费母材。

5 解决铝合金工艺问题的新工艺——双丝焊

5.1 单弧填丝双丝焊

国外近期发展了填丝双丝焊(如图3(a)所示),填丝与工件相接形成分路电流,通过填丝电阻加热及电弧余热熔化填丝,可比单一MIG焊提高效率1.5~2倍(如图3(b)所示)。

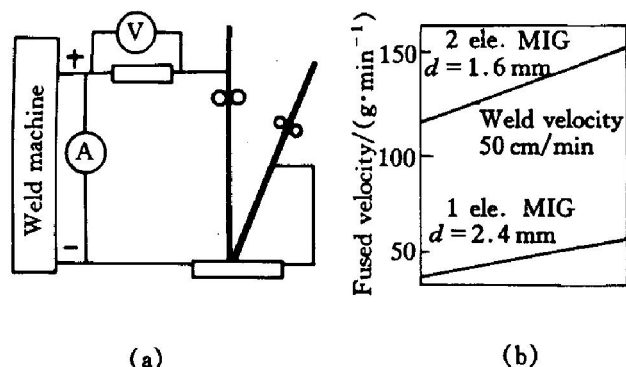


图3 填丝双丝焊及与常规MIG焊的比较

Fig. 3 Comparison in two weld methods

如果焊同截面焊缝,焊接速度可提高一倍或更多。同时形成了窄长温度场,并降低了熔池温度和减少高温停留时间,这就有利于减少裂纹倾向、气孔倾向和避免塌陷;还可使热量分散,减小热影响区宽度,改善焊缝及热影响区的性能;还可大大减少变形和提高生产率。

5.2 双丝双弧焊

与前法类似,同样送丝机和焊枪也可用双电源作双丝共熔池或不共熔池的双弧焊(如图4所示)。另外前丝电弧可用小电流打底和预热,后丝电弧可用大电流填充焊接,使狭长温度场和双峰热循环可调范围更大。如采用单焊枪送焊丝共熔池焊接,则两个导电嘴间必需绝缘,最好用有一定延迟的同步双电流焊接。国外不少发达国家均有这种双丝焊设备,德国已将双丝焊用于铝合金容器焊接;另外还用于铝合金汽车轮缘高速焊接,焊接速度达1.3 m/min。澳大利亚发展了双弧双丝共熔池焊接,采用两台450 A 逆变电源和水冷双丝焊枪,两电源间有同步单元保证在熔滴过渡时电弧脉冲的相互协调以防止干搅。德国海尔工厂设计制造了一套由计算机控制的双头双丝全机械化的设备用于高速列车车体焊接,该装置具有激光自动跟踪系统、摄像系统、焊接烟雾抽吸装置、水冷系统的焊枪和送丝系统;由彩色屏幕可以看到摄像系统摄下的焊接过程

和焊缝形状并记录于录像带,焊接参数也由计算机记录储存,这样既可以在焊接过程中加以修正和调整,又可以在日后作检查、评定及分析,保证了铝合金高速列车车体焊接质量。

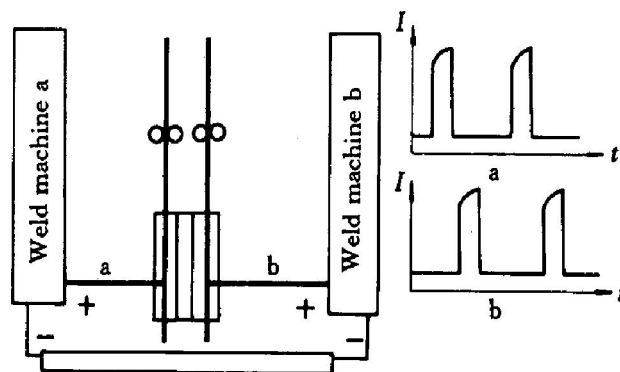


图4 双丝双弧焊

Fig. 4 Two electrodes and two arc welding

5.3 搅拌摩擦焊

摩擦焊是靠工件自身的相对运动摩擦产生热量加热软化后加压来完成焊接,以前此法只实用于杆件对接。搅拌摩擦焊则是用一高温硬质合金旋转头与工件连接处的相对运动摩擦产生热量加热软化后,由旋转头平台相继加压并沿连接处移动来完成焊接(如图5所示),因此可焊各种板材的焊接接头。此法属固相焊,焊接温度低,材料组织变化小,因而焊接质量高、焊接变形小、节约能源、无污染、减少清理及准备工作量。此法主要适用于铝合金焊接,能很好地焊接熔焊困难的2000和7000系列超高强铝合金及铝锂合金,特别适用于各种有色金属或异种金属的焊接。在美国波音公司有搅拌摩擦焊专用车间生产大型焊接结构,如发射导弹、火箭、飞船用的运载工具,除此而外,还用于船舶、汽车、压力容器和高速列车。

5.4 作者的工作

作者曾对多种双丝埋弧焊(三弧双丝焊,双弧

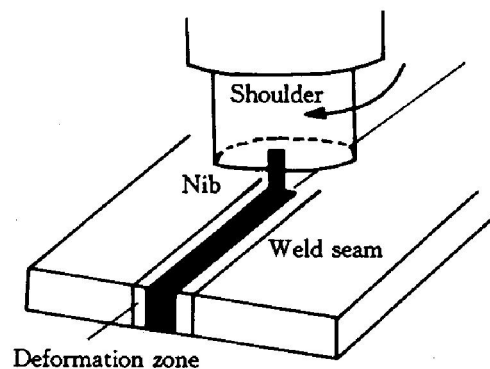


图5 搅拌摩擦焊

Fig. 5 Friction stir welding

双丝焊, 单弧填丝双丝焊, 并列双丝焊) 进行过研究, 证明这是一种高效、优质、节能的新工艺。同时研制成功一台自动小型容器自动焊机, 该机可进行单丝或并列双丝埋弧焊和气体保护焊, 只需换焊枪或焊嘴即可。送丝机可送实心焊丝或药芯焊丝。焊机采用微机(PLC)控制, 上料、夹紧、焊接、下料均自动进行。可进行接触光电跟踪, 有焊接规范设置、显示和储存功能。可焊接直径200~ 400 mm容器的纵缝和环缝, 可焊接钢和铝合金容器。焊接设备及控制部分改配相适应的夹具和导向机构完全可以焊接铝合金车体。

6 结论

1) 对运载工具, 用铝合金结构是减轻运载质量的有效途径。

2) 铝合金选材要考虑母材的焊接性能和焊接材料匹配, 综合比较, 以 7005 配 5356 焊丝为好。

3) 双丝焊铝合金有其突出的优点, 是解决工艺难题、保证质量的重要方法。

4) 搅拌摩擦焊在焊接铝合金和有色金属及异种金属焊接有其独特的优点, 应研究推广。

[REFERENCES]

[1] WANG Yuan-liang(王元良). 铁路高速客运研究论文

选集[M]. South West Jiaotong University Press(西南交通大学出版), 1992.

[2] WANG Yuan-liang(王元良), QU Jir-shang(屈金山), YAN Chuang-pen(晏传鹏), et al. 铝合金焊接性能及焊接接头性能[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals (中国有色金属学报), 1997. 7(1): 69- 74.

[3] WANG Yuan-liang(王元良), WANG Yr-jie(王一戎), QU Jir-shang(屈金山), et al. 高速列车用铝合金焊接[J]. Aluminum Working(铝加工), 1994, 5.

[4] ZENG Le(曾乐). 现代焊接技术手册[M]. Shanghai Science and Technology Press(上海科学技术出版社), 1993.

[5] WANG Yuan-liang(王元良). 关于天然气汽车压力容器成套焊接技术的探讨[J]. Equipment(机械), 1999, 26(4): 36- 39.

[6] 哈克勒, 威尔士. 快速双丝焊接-铝材的熔化极气体保护焊[J], 国际焊接工程与设备, DES, 1998(2): 17- 19.

[7] WANG Yuan-liang(王元良), QU Jir-shang(屈金山), HU Jir-fu(胡久富), et al. 高效节能的细双丝自动焊的研究[J]. Welding Technology(焊接技术), 2000, 29(Suppl): 39- 42.

[8] WANG Yuan-liang(王元良), QU Jir-shang(屈金山), HU Jir-fu(胡久富), et al. 高效节能的细双丝自动焊设备的研究[J]. Welding Technology(焊接技术), 2000, 29(Suppl): 44- 45.

[9] WANG Yuan-liang(王元良), ZHOU Yir-lou(周友龙), HU Jir-fu(胡久富). 双丝单弧预热填丝焊研究[J]. Welding Tube(焊管), 2001, 24(4): 23- 27.

Selection and welding of aluminum alloy in vehicle

WANG Yuan-liang, ZHOU Your-long, HU Jir-fu, QU Jir-shan
(Welding Research Institute, South West Jiaotong University,
Chengdu 610031, P. R. China)

[Abstract] The effects of light vehicle made by aluminum alloy was discussed. The selection of aluminum alloy for welding construction and mechanical properties of weld seam were surveyed. The new welding technique and equipment for aluminum alloys were introduced.

[Key words] vehicle; aluminum alloy; welding

(编辑 杨兵)