

铝合金焊接性能及焊接接头性能^①

王元良 屈金山 晏传鹏 胡久富
(西南交通大学, 成都 610031)

摘 要 根据高速列车“八五”攻关项目要求, 研究了铝合金材料的系列及焊接方法和工艺的选择, 不同焊接材料焊接不同合金的裂纹倾向、气孔倾向, 焊接接头各区性能变化, 焊接接头的强韧性。
关键词 高速列车 铝合金焊接 接头强度

针对高速列车车体轻量化选材的需要, 我们对铝合金进行了焊接性能及焊接接头性能研究。根据国外经验, 与耐候钢相比, 不锈钢车体减轻重量 19%, 铝合金车体可减轻重量 44%, 而成本与不锈钢车体相近。另外从世界发展趋势和我国资源及加工基础考虑, 选用铝合金车体方案也是合理的^[1]。设计铝合金车体关键问题之一是选用哪种合金系列的铝合金材料, 哪种结构形式的铝合金型材, 用什么焊接方法、工艺和焊接材料焊接^[2], 其关键则是焊接性能及焊接接头性能。为此, 我们初选 6000 及 7000 系列铝合金, 前者挤压性能好, 能做成客车主体结构用的复杂截面多孔中空型材; 后者挤压性能不如前者, 但强度高, 焊接加热软化后自然时效能力强。因此我们主要研究这两种系列合金与不同焊接材料匹配时的焊接性能、焊接接头微区剪切性能及焊接接头力学性能; 所选焊接方法也是根据客车焊接中长直焊缝的要求采用自动 MIG 焊。选用的国产 6000

及 7000 系列铝合金材料及焊丝材料如表 1。

1 焊接接头裂纹倾向及气孔倾向

1.1 不同焊接材料焊接不同合金的裂纹倾向

试验中采用鱼骨形变拘束裂纹试验方法, 焊接方法则和规范相同, 试验结果如表 2。由表 2 看出: 一方面 7005 合金和 6061 合金用 5356 焊丝比用 4043 焊丝焊接时裂纹倾向大; 另一方面, 用 5356 焊丝焊 6061 合金裂纹倾向比焊 7005 小得多, 而用 4043 焊丝焊接时则两者的裂纹倾向相近。

不同焊接线能量焊接 6063 合金的试验结果如图 1。由图 1 看出增加线能量可减少裂纹倾向。用 4043 焊丝以各种线能量焊接的裂纹倾向都比用 5356 焊丝焊接时低, 这再一次证明 4043 焊丝是一种高抗裂性的焊接材料。

1.2 不同焊接材料焊接不同合金的气孔倾向

采用 X 光观测较大的内部气孔, 用放大镜

表 1 铝合金材料及焊丝材料 5356 及 4043 的成分(%)

合金	Mg	Si	Zn	Cu	Cr	Ti(Zr)	Mn	Fe
6063(LD31)	0.45~ 0.9	0.20~ 0.6	< 0.10	< 0.10	< 0.10	< 0.10	< 0.35	
6005	0.40~ 0.6	0.60~ 0.9	< 0.10	< 0.10	< 0.10	< 0.10	< 0.10	< 0.35
6061(LD30)	0.80~ 1.2	0.40~ 0.8	< 0.20	0.15~ 0.4	0.04~ 0.35	< 0.15	< 0.15	< 0.70
7005(919)	1.00~ 1.8	< 0.35	4.0~ 5.0	< 0.10	0.06~ 0.2	(0.08~ 0.2)	0.05~ 0.5	< 0.4
5356(AlMg)	4.5~ 5.5	< 0.25	< 0.1	< 0.1	0.05~ 0.2	0.06~ 0.2	0.05~ 0.2	
4043(AlSi)	< 0.05	4.5~ 6.0	< 0.1	< 0.1	-	< 0.2		

① ① 国家“八五”科技攻关资助项目 收稿日期: 1996- 03- 01; 修回日期: 1996- 06- 14 王元良, 男, 61 岁, 教授

表 2 焊接的裂纹率比较

母材	6061	6061	7005	7005
焊丝	5356	4043	5356	4043
裂纹率	4.8%	0.5%	31.4%	1.4%

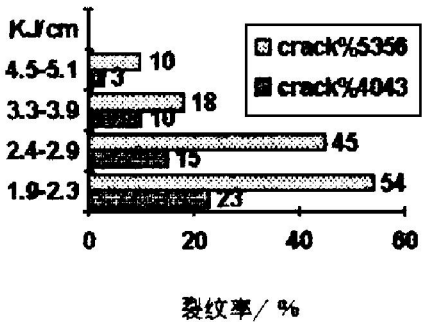


图 1 焊接规范对裂纹倾向的影响

观测切割面上分散细小的气孔，用显微镜观测微观气孔，所得结果只能作定性比较之用。观测结果表明，用 4043 焊丝焊接可减少细气孔和微观气孔，但较大的内部气孔比 5356 焊丝焊时多。焊前仔细打磨或做化学清理，焊接时增加线能量，均可减少气孔倾向^[4, 6]。

2 焊接接头的硬度分布

研究焊接接头的硬度分布是研究焊接接头性能不均匀性的通用方法，硬度用维氏硬度计测定，载荷 10 kg，测点距离 1 mm。

2.1 不同匹配焊接接头的硬度分布

不同匹配焊接接头的硬度分布如图 2。比较各种匹配焊缝(W)、熔合区(F)及热影响区(H)的硬度可以发现，919(91)合金的硬度较高，6061(61)其次，6005(65)更低，6063(63)最低。两种焊丝 4043(S)和 5356(M)焊同一母材的焊缝硬度相近，热影响区硬度也相差不大，6061(61)热影响区硬度差异主要源于焊接规范差异^[4, 5]。

2.2 用 4043 焊丝焊接 6005(65)和 919(91)合金的时效倾向

用 4043 焊丝焊接 6005(65)和 919(91)异种铝合金接头在 10、30 和 50 d 自然时效后的

焊接接头硬度分布如图 3 左和右。由图看出 919 合金自然时效倾向较大，6005 合金小。由焊接接头各区比较，热影响区自然时效倾向较大，焊缝较小。由焊接材料匹配看，6005 合金侧由于焊缝中掺入了 919 的合金成分，硬度高于热影响区而与母材相当，而且与 919 母材接近。这次所用的 919 母材硬度低，这是由于未人工时效之故，但热影响区硬度高，说明了焊接后自然时效反而提高了热影响区的硬度。因而选用人工时效的母材是十分必要的。不能因为焊接热影响区的软化而降低母材要求。

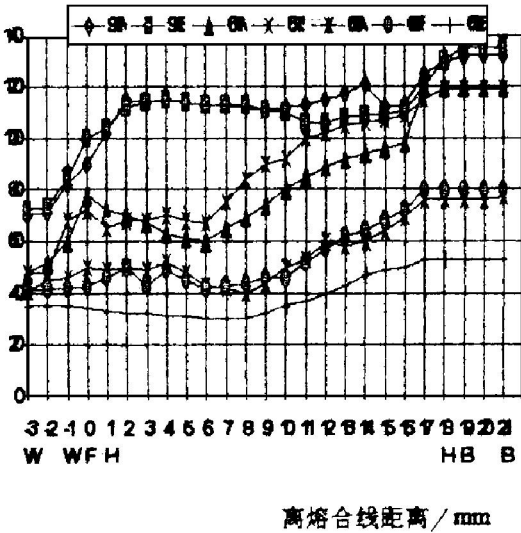


图 2 不同匹配焊接接头的硬度分布

2.3 焊接接头的微区性能分布

将 WHB 跨三区焊接接头试件用微型剪切试验方法以 1 mm 间隔用专用微型剪切试验装置逐点剪切并记录出 P-Δ 曲线，由此即可求出各点的剪切强度 SS(MPa)、剪切屈服强度 SYS(MPa)、剪切变形率 SD(%) 和剪切功 SW(N·mm/mm²)，这就可以画出焊接接头的微区性能分布图(图 4)及典型区域焊缝 W、热影响区 H 和母材 B 的各种性能指标平均值的比较图(图 5)。图中性能指标的代号和单位如上述，材料匹配用 1、2、3 代表，相应的合金及焊丝匹配为：

- 1—6005+ 5356,
- 2—6005+ 4043,
- 3—919+ 4043.

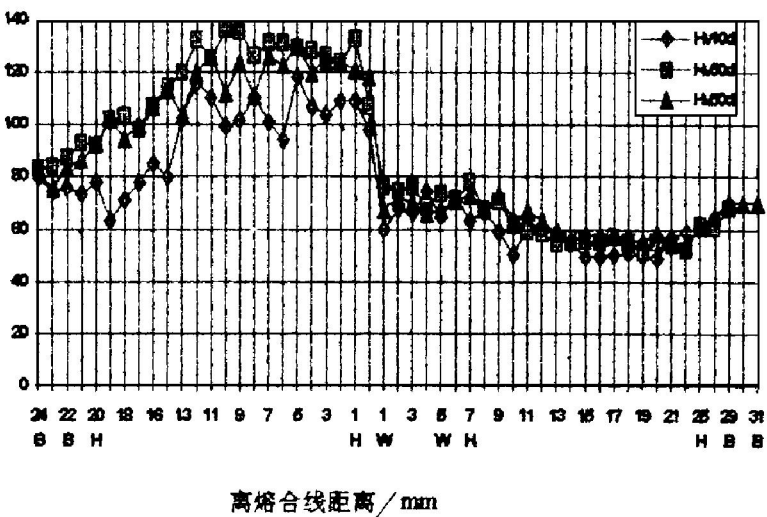


图 3 6005+ 4043+ 919 自然时效后的硬度(Hv) 分布

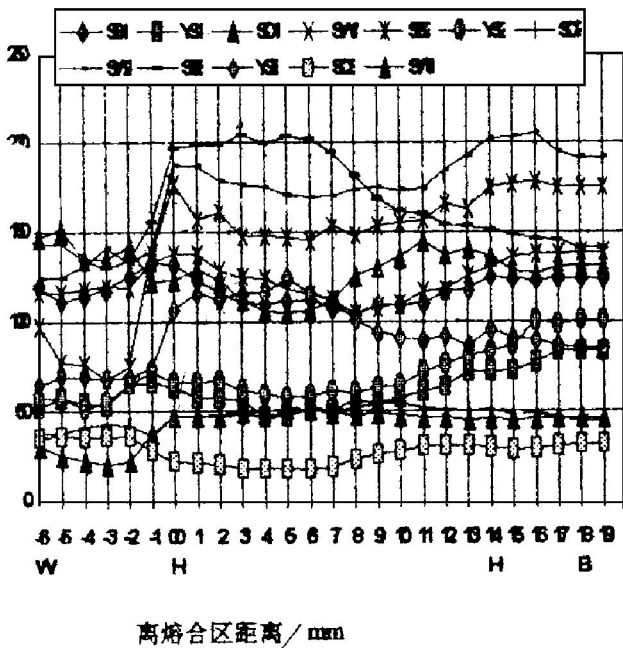


图 4 不同匹配铝合金焊接接头的性能分布

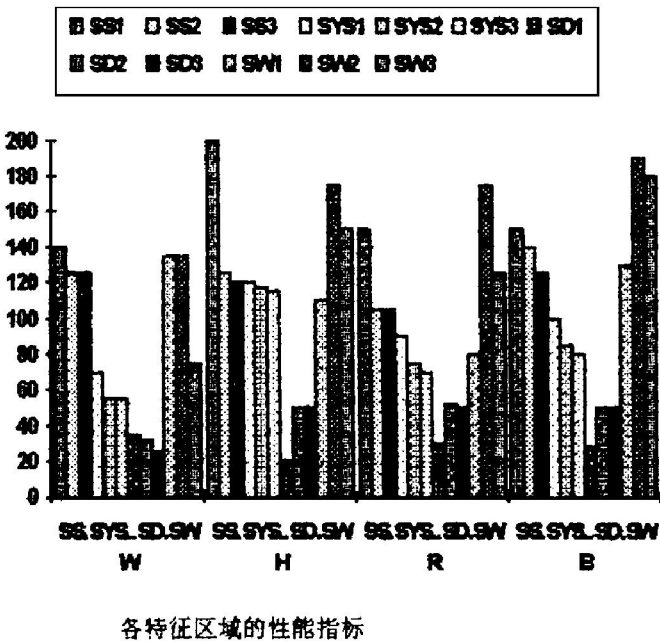


图 5 铝合金焊接接头各特征区域
的性能平均值

2. 3. 1 几种匹配焊接接头的微区性能分布及同项性能比较

几种匹配焊接接头的微区性能分布及同项性能比较如图 4。由图看出，用 5356 或 4043 焊丝焊接 6005 合金，各区强度及屈服强度相近，但 4043 焊缝的塑性及韧性低。用 5356 焊丝焊接 919 合金比焊接 6005 合金的焊缝强度及屈服强度高，焊缝的塑性及韧性相近，但热影响区的强度及屈服强度高，而塑性及韧性低。铝合金焊接接头各特征区域的性能平均值列于图 5，由图可看出各特征区性能平均值的

差异。

2. 3. 2 自然时效对焊接接头微区性能的影响

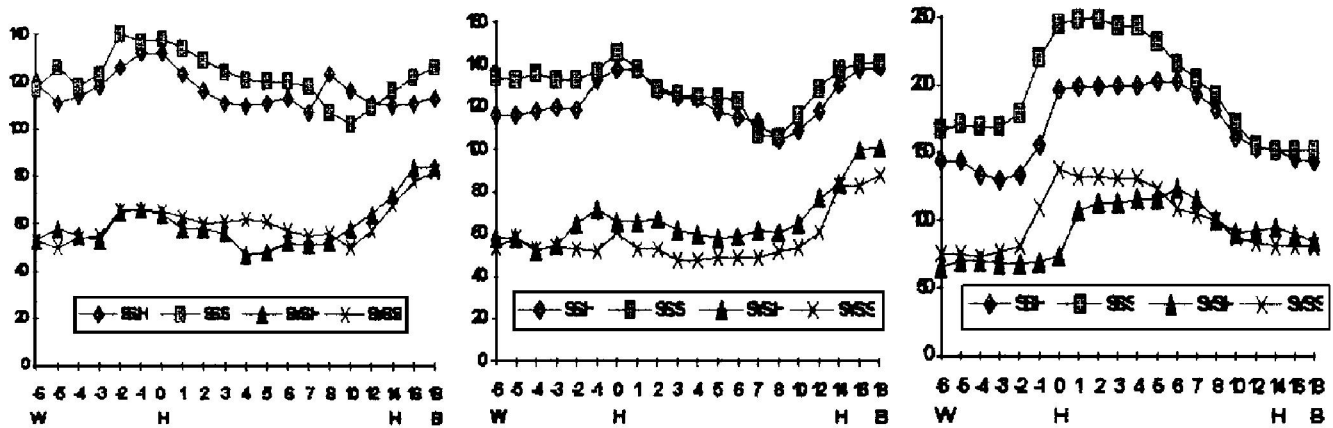
焊后(1~ 3d 用 H 表示) 和自然时效(57~ 60d 用 S 表示) 后焊接接头的强度变化如图 6。由图看出 6005 合金的两种匹配自然时效后焊缝及热影响区剪切强度提高不多，剪切屈服强度变化不大；而 919 合金焊接接头自然时效后焊缝及热影响区剪切强度提高很多，但剪切屈服强度反而有一定程度下降。图 7 为三种匹配的剪切塑性 SD 和剪切韧性 SW 分布，图 中其

它代号同前;由图看出三种匹配合金自然时效后焊缝及热影响区剪切塑性变化不大,剪切韧性下降很多,特别是919合金焊接接头下降很明显,6005合金用4043焊丝焊接的焊缝比其它区低很多,但时效后降低的幅度比其它区小得多。总的比较,919合金焊缝及热影区自然时效能力最高,但时效以后韧性降低的幅度最大,不管哪种合金用4043焊丝焊成的焊缝韧性都很低,承受冲击载荷的焊接结构采用此种焊丝焊接要慎重考虑。研究的几种匹配中6005合金用5356焊丝焊成的焊缝综合力学性能最好。用5356焊丝焊接919合金,从焊接接头在不同自然时效时间后的微区性能分布中看出:用5356焊丝焊接919合金母材性能变化甚少,

焊缝变化略大,热影响区变化最大;随时间增加而变化的趋势是强度SS及屈服强度SYS升高,韧性大大降低而塑性变化甚少。

2.3.3 焊接规范对焊接接头自然时效后力学性能的影响

以受热对性能影响最大的919合金为例,用小规范(2 kJ/cm, 用X代表)和大规范(4.5 kJ/cm, 用D代表)焊接,其自然时效后的性能分布如图8。由左图看出大规范焊接时合金焊接接头热影响区(H)的SS和SYS分布高值区域加宽而峰值略有降低,焊缝(W)的SS有较大降低而SYS降低不多;但大规范焊接时焊缝及热影响区的SD和SW比小规范时降低很多,(分布区域加宽与SS和SYS变化区相对

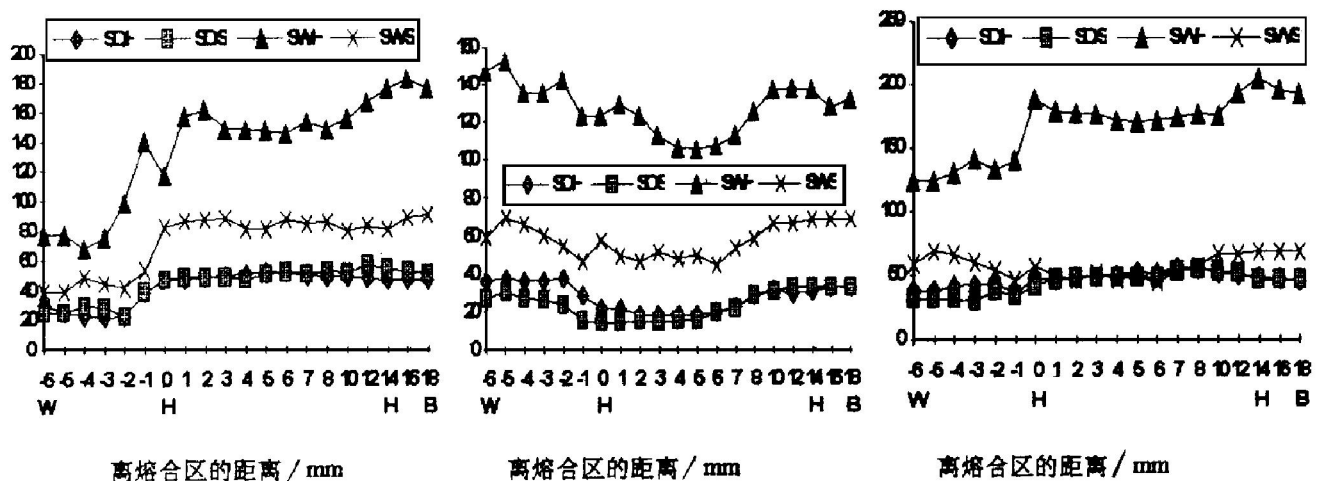


图左为6005+4043

图中为6005+5356

图右为919+5356

图6 三种匹配铝合金焊接接头自然时效前后的
剪切强度SS(MPa)和剪切屈服强度SYS(MPa)的分布



离熔合区的距离/mm

离熔合区的距离/mm

离熔合区的距离/mm

图7 三种匹配铝合金焊接接头自然时效前后的
剪切变形率(SD%)和剪切功SW(N·mm/mm²)的分布

应)。由此看出,用大规范焊接,虽能提高生产率,但从强韧性观点看并不好。

3 焊接接头的强度、塑性及韧性^[3-6]

焊接接头各区强度、塑性及韧性都不一样,现只选择了焊缝的强度(拉伸强度 TS)及塑性(延伸率 EL)的试验结果进行比较,如图 9 和图 10,图中 H、S 分别代表焊态和自然时效后的性能,B、43、56 分别代表母材和 4043 及 5356 焊缝,由图看出各种匹配焊缝的强度及塑性的比较及其变化规律,与微型剪切试验结果吻合。焊接接头各区的韧性变化如图 11。图中 99 和 65 为母材 919 和 6005 的代号,S 和

M 为 4043 和 5356 焊丝的代号,d 及其前面数字代表自然时效的天数。由图看出自然时效以后熔合区(FL)和焊缝区(WM)的韧性均比母材(BM)的韧性低,而以焊缝区最低;两种匹配比较,以 6005+ 4043 为好。各区的冲击韧性变化规律也与微型剪切试验结果吻合。

4 微型剪切性能与其常规力学性能的关系

用线性回归方法求得微型剪切试验典型区域性能平均值与其相应的常规力学性能数据的相关关系如下:

TS—SS: $TS = 2.121SS - 103.4$;
 $S = 20.8, R = 0.92, F = 21.4$

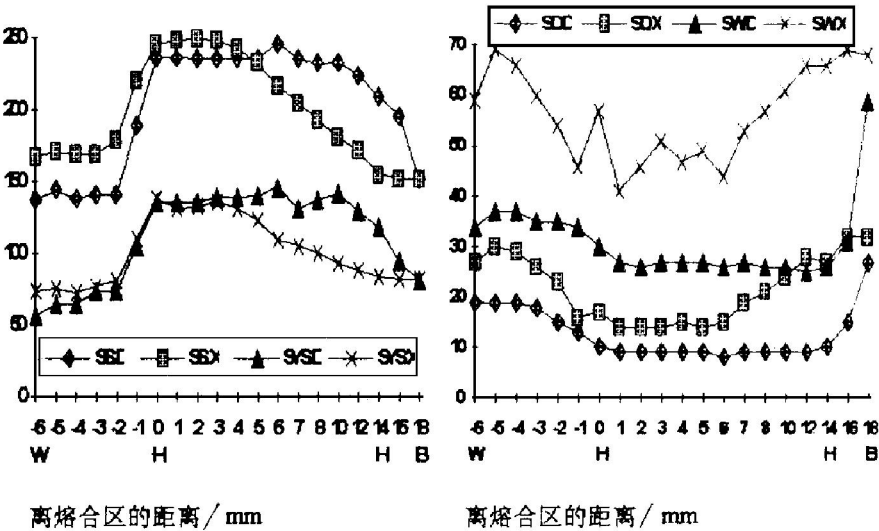


图 8 焊接规范对焊接接头自然时效后力学性能的影响

SS—剪切强度, SYS—剪切屈服强度(MPa), SD—剪切变形率(%), SW—剪切功(N·mm/mm²)

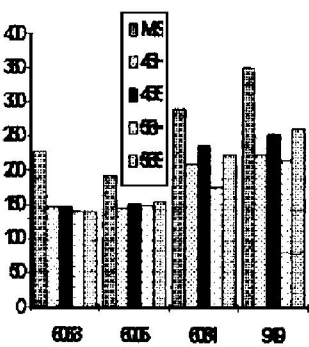


图 9 焊接接头强度比较

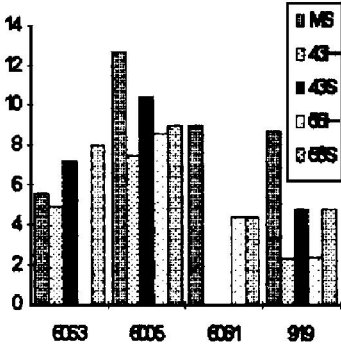


图 10 焊接接头塑性比较

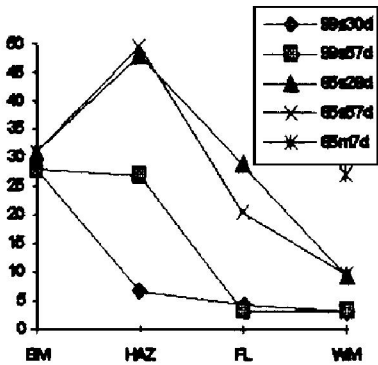


图 11 焊接接头韧性比较

$H_v - SS: H_v = 0.631SS - 22.67;$

$S = 5.68, R = 0.99, F = 202$

$EL - SD: EL = 0.343SD - 4.443;$

$S = 1.45, R = 0.90, F = 16.3$

$vE - SW: vE = 0.216SW - 3.023;$

$S = 8.45, R = 0.84, F = 33.1$

以上公式中各项性能指标的单位同本文前面所述单位。由上述方程中标准差 S 、相关系数 R 和显著性水平 F 均满足数据处理中相关性要求; 以 $H_v - SS$ 最好, $vE - SW$ 最低(由于 vE 和 SW 数值一般都比较分散, 故 R 值较低, 但由于用以回归的数据点较多, F 值反而较高)。由以上公式可将微型剪切性能转换为常规力学性能作为设计和性能比较时的参考。

5 结论

6000 系列合金综合力学性能好, 耐蚀性强, 并能作大型多孔中空型材, 为高速列车首选铝材, 最后选用 6005, 建议配用 5356 焊丝; 7000 系列有高的强度和自然时效能力但韧性、

抗裂性低, 宜谨慎选用, 目前用国产 919(相当于 7005) 试用于牵引梁, 建议配用 5356 焊丝, 并严格控制工艺(宜用小规范多层焊) 和质量。研究中采用的微型剪切试验可以很好地研究铝合金焊接接头的各种力学性能的变化规律, 同时可建立微型剪切试验典型区域性能与其相应常规力学性能的关系和回归方程, 由此可将微型剪切试验所得的性能转换为常规力学性能, 以供设计参考。

参考文献

- 1 王元良. 见: 铁路高速客运研究论文选集. 成都: 西南交通大学, 1992: 136, 140.
- 2 王元良, 刘静安. 铝加工, 1993, 16(5): 11.
- 3 屈金山, 王元良, 邓江. 机械工程材料, 1994, 18(2): 25.
- 4 王元良, 王一戎, 屈金山, 刘静安. 铝加工, 1994, 17(5): 16.
- 5 孙欣. 硕士论文, 西南交通大学, 1993: 5.
- 6 丁韦. 硕士论文, 西南交通大学, 1994: 10.

本文为“八五”国家攻关子课题之一的部分内容综合, 参加研究试验工作的还有王一戎教授、孙鸿、车小莉、陈明鸣, 方培泉工程师, 还有部分研究生和本科生, 谨此致谢。

WELDABILITY OF ALUMINIUM ALLOYS AND PROPERTIES OF WELD JOINTS

Wang Yuanliang, Qu Jinshan, Yan Chuanpeng, Hu Jiufu
South-western Jiao Tong University, Chengdu 610031

ABSTRACT According to the requirements of high speed trains in the key program of the 8th Five year plan of China, the choice of Al-alloy used for high-speed trains and its matching with welded material and welding technology were studied. In addition, its weldability, change of properties in each zone of weld joints and the strength and toughness of the welding joint were also studied.

Key words high-speed trains welding of aluminium alloy strength and toughnees weld joints

(编辑 彭超群)