doi:10.3969/j.issn.1673-9833.2016.05.018

5356铝合金焊丝组织与性能的试验对比研究

罗 健[1]，蹇海根[1]，丁智辉[1,2]，唐娴敏[1]

（1. 湖南工业大学 冶金与材料工程学院，湖南 株洲 412007；2. 湖南德润有色焊材科技有限公司，湖南 株洲 412000）

摘 要：通过金相、扫描、硬度及拉伸试验等测试分析手段，对自制焊丝(1#)、国产焊丝(2#)和进口焊丝(3#)3种5356铝合金焊丝的表面质量、显微组织以及力学性能进行了对比分析研究。试验结果表明：由于成分配比、杂质含量、加工方法等原因，3#焊丝表面均匀光滑，无裂纹、划痕等显著缺陷，表面质量和力学性能最优；1#焊丝表面存在细微裂纹，晶粒细小均匀分布，表面质量和力学性能次之；2#焊丝表面粗糙，有凹坑及麻点等缺陷，表面质量和力学性能最差。

关键词：5356铝合金焊丝；连续挤压；微观组织；力学性能

中图分类号：TG422.3 **文献标志码**：A **文章编号**：1673-9833(2016)05-0092-05

An Experimental Comparative Study on the Microstructure and Properties of 5356 Aluminum Alloy Welding Wires

LUO Jian[1], JIAN Haigen[1], DING Zhihui[1,2], TANG Xianmin[1]

（1. School of Metallurgical and Materials Engineering, Hunan University of Technology, Zhuzhou Hunan 412007, China;
2. Hunan Derun Nonferrous Welding Technology Co., Ltd., Zhuzhou Hunan 412000, China）

Abstract: An experimental comparative investigation has been made of the surface quality, microstructure and mechanical properties of three different types of aluminum alloy welding wires, namely, self-made wires (1#), domestic wires (2#) and imported wires (3#) by using such testing methods as microscopy, scanning, hardness test and tensile test, etc. The experimental results show that, due to their different component ratios, impurity contents, and processing methods, 3# welding wires exhibit such excellent properties as optimum surface quality and mechanical properties, lacking of such obvious defects as cracks and scratches. Fine cracks can be found on the surface of 1# wire with fine grains uniformly distributed, thus making its surface quality and mechanical properties slightly inferior; 2# wire is characterized with such defects as pits and pittings on a rough surface, thus making it the most inferior as regard to its surface quality and mechanical properties.

Keywords: 5356 aluminum alloy welding wires; continuous extrusion; micro-structure; mechanical properties

0 引言

铝镁合金为非热处理强化铝合金，具有质轻、强度高、抗腐蚀及易加工等优点，由其形成的焊接结构在轨道交通、船舶、航空及化工等行业得到了广泛的应用[1-2]。在铝合金焊接基材一定的情况下，焊接工艺和焊丝质量对结构材料的焊接性能起着决定性作用[3]。焊丝是影响焊缝金属成分、组织、缝区母材裂纹倾向性、焊缝耐蚀性及力学性能的关键因素[4]，且需与基材进行合理匹配。

收稿日期：2016-08-21

作者简介：罗 健（1991-），男，湖南湘西人，湖南工业大学硕士生，主要研究方向为新型铝合金焊丝的研发，E-mail：2209737785@qq.com

通信作者：蹇海根（1980-），男，湖南衡阳人，湖南工业大学副教授，博士，硕士生导师，主要研究方向为铝合金焊丝研发及其微合金化，E-mail：jianhaigen2001@163.com

目前，国内外发展快速的地铁列车、高速列车和轻轨列车车厢多以铝合金型材作为焊接骨架，通过焊接可减少40%车辆制造工作量，焊丝性能的好坏将直接影响车辆的运行性能、速度、运载能力和效率[5]。5356铝合金焊丝作为一种在铝合金焊接结构运用非常广泛的通用型焊材，需求量也逐年增加，在国内外的市场潜力巨大。国内轨道交通用5356铝合金焊丝90%以上依靠进口，主要以美国Alcoa、法国SAF等公司生产为主，而国产焊丝在焊丝表面外观和内在冶金质量等均存在一定的差距，导致国内车辆用大型铝合金型材配用焊丝始终无法实现批量生产和供应[6]。国外企业对高端铝合金焊丝实行技术封锁和市场垄断，为打破这种尴尬局面，开发和生产我国高质量、高性能的5356铝合金焊丝刻不容缓[7-10]。

课题组采用连续挤压工艺生产出一种新型5356铝合金焊丝[11]，文中分别从表面质量、显微组织及力学性能等方面将该焊丝与另一国产焊丝和进口焊丝进行对比性试验研究。通过焊丝冶金质量及性能的综合评估，课题组对导致差异的原因进行系统分析，旨在为国产焊丝生产工艺的改进和焊丝质量的改善提供技术支撑。

1　试验材料、仪器与方法

1.1　试验材料

本试验的3种5356铝合金焊丝规格均为Φ1.2 mm，分别标记为1#、2#、3#。其中，1#焊丝属于自制产品，使用10 mm坯杆料通过连续挤压法一次挤压成型，然后再进行表面处理；2#焊丝为国内企业采用传统方法生产的一种同类型产品；3#焊丝为从国外进口产品，其通过挤压后多道次拉拔退火工艺生产。

3种焊丝化学成分如表1所示。其中，Al和Mg为主要合金元素，Mn、Cr等微量元素以适当的比例添加。

表1　焊丝成分列表

Table 1　Wires composition list　　%

Wires	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti
1#	0.076	0.121		0.112	4.970	0.082		0.074
2#	0.098	0.179	0.021	0.071	4.874	0.075		0.062
3#	0.047	0.077	0.017	0.056	5.201	0.083	0.041	

1.2　试验仪器

扫描电镜，JSM-5600LV，日本JEOL公司生产；

金相显微镜，POLYVER-MET，德国卡尔蔡司公司生产；

维氏显微硬度计，HVA-10A，济南恒思盛大仪器公司生产；

万能测量试验机，CSS-44100，长春试验机研究所生产。

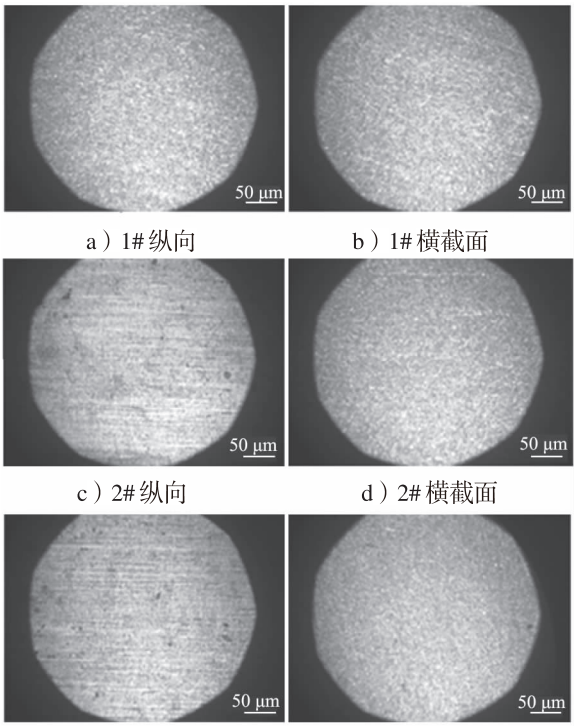
1.3　试验方法

在不同品牌的焊丝盘上截取一定长度焊丝试样，使用酒精擦拭除去表面油迹及其它杂质，然后采用扫描电镜进行表面形貌观察；经机械预磨、抛光腐蚀后，在金相显微镜上对每种焊丝的横截面、纵面进行金相显微组织观察，腐蚀液为自配混合酸，其配方为：2 mL HF, 3 mL HCl, 5 mL HNO_3, 190 mL H_2O。采用HVA-10A型维氏显微硬度计进行显微硬度测定，在试样上等间距0.2 mm打5个点测量，然后计算硬度的平均值；在室温下使用万能测量试验机进行拉伸力学性能试验，每种焊丝拉伸结果测量3次取均值。

2　试验结果及分析

2.1　金相显微分析

3种焊丝的金相显微组织形貌如图1所示。由图可知，各种焊丝的金相显微组织基本相同，由于挤压拉拔加工纵向呈明显被拉长状态，横截面则表现为典型的密集形貌。



a）1#纵向　　b）1#横截面

c）2#纵向　　d）2#横截面

e）3#纵向　　f）3#横截面

图1　焊丝金相组织

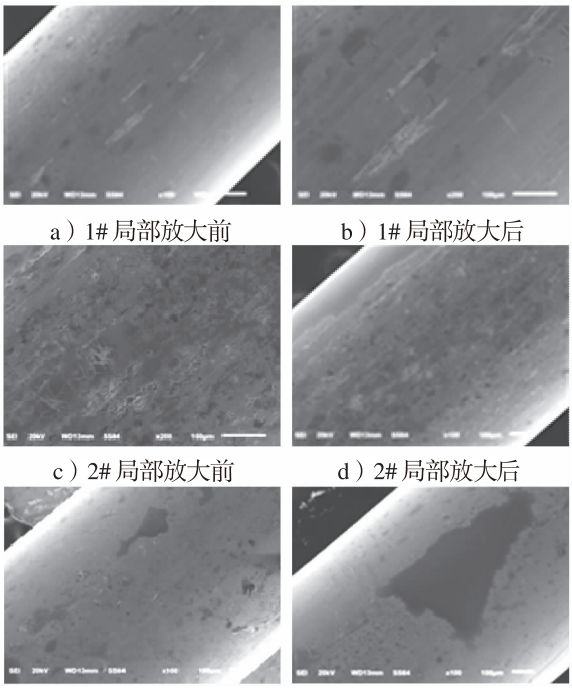
Fig. 1　Micro-structure of welding wires

在图中，白色部分主要为不显相界的α(Al)基体，大部分的Mg元素固溶到α(Al)基体中，挤压拉拔冷却过程中析出$\beta(Al_3Mg_2)$强化相，即图中纵向细小灰黑色颗粒相。1#焊丝生产采用连续挤压工艺，相比2#、3#焊丝采用多道次拉拔工艺，灰色颗粒$\beta(Al_3Mg_2)$相显现程度较低，这主要是由于第二相在连续挤压过

程中发生较大变形、破碎所致。观察分析可知，自制1#焊丝的纵向晶粒更为细小，均匀分布，这主要跟加工方法有关，连续挤压法变形率大，晶粒破碎程度更大，晶粒被拉长以至断裂成微小颗粒，晶粒之间的相互摩擦加速了破碎过程，同时弥散分布的第二相质点阻碍晶粒的长大，从而获得细小的再结晶颗粒[12]。2#和3#焊丝经历多道次拉拔，在拉拔力及拉拔模具摩擦力的作用下，晶粒由等轴晶逐渐演变为沿拉拔方向的细长纤维状组织，如图1c、图1e所示，拉拔道次逐渐增加，晶粒沿拉拔方向越发明显。而由图观察可知二者纵向晶粒尺寸较大，因为多道次拉拔过程中经过中间以及后期退火处理，会出现晶粒长大现象。Ti是很好的晶粒细化剂，自制1#焊丝适当添加微量元素Ti对细化晶粒起到影响作用，同时也能细化铸态焊缝晶粒组织[13]。

2.2 表面形貌观察

焊丝表面缺陷将会导致焊接过程送丝不连续、甚至断丝等问题，影响焊接的稳定性和焊接结构质量。提高焊丝表面质量，可有效减少送丝时焊丝表面与导丝管的摩擦阻力，提高自动送丝的稳定性和电弧稳定性。图2为试样的扫描电镜下的表面形貌，如图所示，国产自制1#焊丝表面横向有微裂纹，沿着挤压方向有明显的划痕；国产2#焊丝表面粗糙，杂质、凹坑及麻点较多；进口3#焊丝表面质量最好，均匀光滑，无裂纹、凹坑、划痕等显著缺陷。



a）1#局部放大前　b）1#局部放大后

c）2#局部放大前　d）2#局部放大后

e）3#局部放大前　f）3#局部放大后

图2 焊丝表面形貌

Fig. 2 Surface topography of welding wires

焊丝的表面质量与化学成分、冶炼质量、加工方法等有很大的关系[14-17]。1#焊丝出现微裂纹，可能与其加工生产方法有关。由于连续挤压一次成形法不需要加热保温坯杆料，主要通过摩擦热和变形热使杆坯软化从而发生塑性变形。由于加工变形率很大，如果速率和温度控制不适当，就会产生微裂纹等加工缺陷。当挤压温度较低时，合金塑性流动性较差，在模具型口不光滑处受较大摩擦；其次，挤压润滑剂加入量少，坯料与模具润滑不够，增大了合金表面与模具接触面积，导致焊丝表面出现裂纹。2#焊丝表面粗糙，存在不同程度的凹坑和麻点等，这可能与前期熔炼有关，如果熔体洁净度不够，存在不同程度的气体和各种夹杂物，就会导致杆料在后续挤压变形过程中出现毛刺、凹坑等缺陷。同时，2#焊丝多道次拉拔之后，拉拔模具磨损或者碎屑粘入也有可能会导致毛刺等缺陷。焊丝缺陷焊接后就会成为焊接气孔等缺陷的重要原因，对焊接生产非常不利。进口3#焊丝采用多道次拉拔退火工艺，加工变形率小，表面质量控制较好，但这种方法耗时耗能，加工效率受到一定程度的限制。

Fe、Si元素属于焊丝中的有害杂质，其含量的高低对5356铝合金焊丝表面质量起着重要的影响作用。Fe的质量分数一般应限制在0.4%以下，Si的质量分数一般应控制在0.25%以下[18]。由焊丝成分表1可知，3#焊丝Fe的质量分数为0.077%，较1#焊丝少0.044%，2#焊丝少0.102%；Si的质量分数仅为0.047%，较1#焊丝少0.029%，2#焊丝少0.051%，3#焊丝有害杂质元素含量控制得更好。由图2分析可知3#焊丝表面质量更好，而其余2种焊丝可能由于杂质元素含量较高都呈现出划痕、微裂纹等缺陷。

2.3 显微硬度分析

表2为3种焊丝显微维氏硬度测试结果。由表中数据可知，国产2#焊丝硬度最高，自制1#焊丝次之，进口焊丝硬度相比较低。

表2 焊丝显微硬度

Table 2 Micro-hardness of welding wires

Wires	1#	2#	3#
HV	106.8	107.9	103.7

由于2#焊丝采用传统方法所制，熔炼过程中难免残留较多的Fe, Si等杂质元素，导致后续加工过程中焊丝过多的存在黑色相β (Al_3Mg_2)以及硬的杂质相（Fe, Mn）Al_6和$FeAl_3$，维氏硬度测量过程中压痕打到硬的第二相的几率要大，因此焊丝的硬度大。自制1#焊丝连续挤压，晶粒拉长破碎变为加工织构，焊丝内部组织紧密，晶粒间格空隙逐渐变小，晶粒

间的结合力增强，没有发生明显的动态再结晶，动态回复不足以软化循环水冷却之后焊丝产生的加工硬化，导致焊丝硬度较大[19]。进口焊丝挤压产生加工硬化之后，由于多道次拉拔经历中间退火以及拉拔后期退火，消除了加工硬化，其硬度变低。试验证明，焊丝的硬度要适中，焊丝硬度值过大或过小都会导致焊丝自动送丝的稳定性变差。

2.4　拉伸力学性能分析

3种不同5356焊丝的力学性能如表3所示。由表可知，自制1#焊丝与进口3#焊丝屈服强度相差不大，国产2#焊丝屈服强度略低。进口3#焊丝抗拉强度最大，自制1#焊丝次之，国产2#焊丝最小。延伸率三者相差不大。

表3　焊丝拉伸力学性能

Table 3　Tensile mechanical properties of welding wires

Wires	σ_b/MPa	$\sigma_{0.2}$/MPa	δ/%
1#	419.1	365.5	7.1
2#	394.7	337.5	6.9
3#	425.7	366.4	7.3

焊丝力学性能与加工方法以及原材料成分密切相关。1#焊丝连续挤压使得晶粒破碎细化程度较深，细化晶粒能提高强度。同时，挤压变形程度大，近乎球形的晶粒由于变形而被拉长，导致晶粒表面积增大，相对地增加了难变形区面积，变形抗力随之提高，使得力学性能提高。由于5356铝合金属于不可热处理强化铝合金，当挤压温度过高时，其强度下降，塑形增加，因此要合理控制挤压温度上限。进口焊丝除采用挤压法细化晶粒提高强度的同时，多道次拉拔过程中退火处理会消除加工硬化以增加强度，提高塑性。国产焊丝2#强度、塑形都较低可能是由于熔炼过程易于吸气和氧化，因此在熔体中不同程度地存在气体和各种非金属夹杂物，使铸锭产生疏松、气孔、夹杂等缺陷，显著降低后续加工焊丝的力学性能。

同时，合金中适当比例的元素Mg在Al中形成$\beta(Al_3Mg_2)$强化相，起到弥散强化作用，Mg的添加既能提高合金的强度又不会使塑形过于降低[20]。由焊丝成分表可知，进口焊丝Mg含量最高，强化效果显著。而Fe和Si有害杂质元素，与合金中的Mn和Cr形成难溶解的金属间化合物，与Mg形成Mg_2Si可溶相，这不仅会使Mg的强化效果降低，也将降低材料的塑形。

3　结论

1）对比试验分析表明，3#焊丝的表面质量与力学性能等均为最优，自制1#焊丝次之，2#焊丝最差。这跟焊丝的成分配比、杂质含量、冶金质量以及焊丝制备工艺方法等均有很大的关系。

2）课题组采用连续挤压法制备出的5356铝合金焊丝在焊接试验过程中表现良好，强硬度、塑性及送丝稳定和连续性均符合实际焊接要求，焊接效果接近进口3#焊丝。但由于连续挤压加工一次成型，焊丝的表面质量还存在一定缺陷，后续需在挤压温度、挤压速度、模具以及后续表面微处理方面加以改进优化，以期生产出更高质量的铝合金焊丝。

参考文献：

[1] 肖亚庆，谢水生，刘静安，等. 铝加工技术实用手册[M]. 北京：冶金工业出版社，2005：639-642.
XIAO Yaqing，XIE Shuisheng，LIU Jing'an，et al. A Practical Handbook of Aluminum Processing Technology [M]. Beijing：Metallurgical Industry Press，2005：639-642.

[2] 蹇海根，谢幸儿，尹志民，等. 铝镁合金板材MIG焊接接头组织与性能研究[J]. 湖南工业大学学报，2013，27(3)：79-83.
JIAN Haigen，XIE Xing'er，YIN Zhimin，et al. Aluminum Magnesium Alloy MIG Welding Joint of Microstructure and Properties of[J]. Hunan University of Technology，2013，27(3)：79-83.

[3] 卫晏华，尹志民. 铁路列车车辆用大型铝合金型材焊丝的选用与生产[J]. 有色金属加工，2005，34(4)：21-24.
WEI Yanhua，YIN Zhimin. Selection and Production of Large Scale Aluminum Alloy Profiles for Railway Vehicles [J]. Nonferrous Metal Processing，2005，34(4)：21-24.

[4] 黄　敏，刘　铭，张　坤，等. 铝及铝合金焊丝的研究及发展现状[J]. 有色金属加工，2008，37(2)：9-12.
HUANG Min，LIU Ming，ZHANG Kun，et al. Research and Development of Aluminum and Aluminum Alloy Welding Wire[J]. Nonferrous Metal Processing，2008，37(2)：9-12.

[5] HEINZ A，HASZLER A，KEIDEL C. Recent Development in Aluminum Alloys for Aerospace Applications[J]. Material Science & Engineering A，2000，280(1)：102-107.

[6] 李连胜，栾敬岳，孙晓红，等. 我国焊接材料发展状况浅析(下)[J]. 电器工业，2010(2)：10-14.
LI Liansheng，LUAN Jingyue，SUN Xiaohong，et al. Analysis of the Development of Welding Materials in China (Under)[J]. Electrical Industry，2010(2)：10-14.

[7] 邱桂杰，杨洪忠，高国强，等. 高速列车用复合材料国内外现状与趋势[J]. 高科技纤维与应用，2005，30(6)：26-30.

QIU Guijie，YANG Hongzhong，GAO Guoqiang，et al. Current Situation and Trend of High Speed Train Composite Materials at Home and Abroad[J]. Hi-Tech Fiber and Application，2005，30(6)：26-30.

[8] 杨向明. 国外高速列车相关技术的研究动态简介[J]. 轨道交通装备与技术，2006(11)：1-6.
YANG Xiangming. Research on High Speed Train Related Technologies on Abroad[J]. Rail Transit Equipment and Technology，2006(11)：1-6.

[9] 吴礼本. 铝材在车辆制造业中的应用[J]. 国外铁道车辆，1999(5)：29-30.
WU Liben. Application of Aluminum in the Vehicle Manufacturing Industry[J]. Foreign Railway Vehicles，1999(5)：29-30.

[10] 陶 勇. 国外高速列车的材料与工艺进展(下)[J]. 国外机车车辆工艺，1993(2)：1-10.
TAO Yong. The Material and Technological Progress of High-Speed Train Abroad(Under)[J]. Foreign Locomotive & Rolling Stock Technology，1993(2)：1-10.

[11] 温景林，丁 桦，曹富荣，等. 有色金属挤压与拉拔技术[M]. 北京：化学工业出版社，2007：13-14.
WEN Jinglin，DING Hua，CAO Furong，et al. Non Ferrous Metal Extrusion and Drawing Technology[M]. Beijing：Chemical Industry Press，2007：13-14.

[12] MUKAI T，WATANABR H，HIGASHI K. Grain Refinement of Commercial Magnesium Alloys for High-Strain Rate Superlastic Forming[J]. Material Science Forum，2000，35(1)：159-170.

[13] 马慎伟. 进口与国产5356和5183焊丝及焊接接头组织与性能的研究[D]. 沈阳：东北大学，2011.
MA Shenwei. Research on Microstructure and Properties of Imported and Domestically Produced 5356 and 5183 Welding Wire and Welded Joint[D]. Shengyang：Northeastern University，2011.

[14] 刘红伟，王法科，马 冰，等. 铝合金焊丝拉拔及刮削工艺研究[J]. 有色金属加工，2011，40(1)：36-39.
LIU Hongwei，WANG Fake，MA Bing，et al. Study on the Process of Drawing and Shaving on Aluminum Alloy Wire[J]. Nonferrous Metal Processing，2011，40(1)：36-39.

[15] 余忠土，张 梅，张保良，等. 常用铝合金及其热处理工艺[J]. 热处理，2006，21(3)：44-47.
YU Zhongtu，ZHANG Mei，ZHANG Baoliang，et al. Commonly Used Aluminum Alloy and Its Heat Treatment Process[J]. Heat Treatment，2006，21(3)：44-47.

[16] 钱昌黔，潘武生. 铝及铝合金焊丝的长效表面处理[J]. 材料保护，1995(7)：19-20.
QIAN Changqian，PAN Wusheng. Long Term Surface Treatment of Aluminum and Aluminum Alloy Welding Wire [J]. Materials Protection，1995(7)：19-20.

[17] 国家机械工业局. 铝及铝合金焊丝产品质量分等（内部使用）：JB/T 56098—1999[S]. 北京：机械工业出版社，1999：6.
National Bureau of Machinery Industry. Aluminum and Aluminum Alloy Welding Wire Grading of Product Quality (Internal Use)：JB/T 56098—1999[S]. Beijing：China Standard Press，1999：6.

[18] 中国标准化管理委员会. 铝及铝合金焊丝：GB/T10858—2008[S]. 北京：中国标准出版社，2008：7.
The Standardization Administration of China. Aluminum and Aluminum Alloy Welding Wire：GB/T 10858—2008[S]. Beijing：China Standard Press，2008：7.

[19] 孙 健，刘 平，刘新宽，等. Cu-Ni-Si合金连续挤压过程中的组织演变[J]. 中国有色金属学报，2014(4)：944-949.
SUN Jian，LIU Ping，LIU Xinkuan，et al. Microstructure Evolution of Cu-Ni-Si Alloy During Continuous Extrusion [J]. Chinese Journal of Nonferrous Metals，2014(4)：944-949.

[20] 周庆波，张宏伟，冷金凤，等. 化学成分对5083铝合金性能的影响[J]. 轻合金加工技术，2007，35(10)：33-34.
ZHOU Qingbo，ZHANG Hongwei，LENG Jinfeng，et al. Effect of Chemical Composition on the Performance of 5083 Aluminum Alloy[J]. Light Alloy Fabrication Technology，2007，35(10)：33-34.

（责任编辑：申 剑）