合金元素对 Al-Fe-Cu-RE-Zr 合金力学和电学性能的影响

刘蒙恩[1]，于 群[2]

(1. 南阳理工学院机械与汽车工程学院，河南南阳 473004；2. 郑州大学材料科学与工程学院，河南郑州 450001)

摘要：采用正交试验方法，调整Al-Fe-Cu系合金中Fe、Cu元素的含量，并添加RE和Zr元素，研究Fe、Cu、RE和Zr元素对合金抗拉强度、伸长率和导电率的影响。通过极差和方差分析法评价出最佳成分配比，并利用XRD、SEM和EDS等对最佳成分合金的组织和性能进行分析。结果表明：合金元素对抗拉强度、伸长率和导电率的影响程度分别是：Fe>RE>Cu>Zr，RE>Cu>Zr>Fe，Zr>RE>Fe>Cu，其中Fe对合金抗拉强度有非常显著的影响，RE对合金的伸长率和导电率有显著影响，Zr对合金的导电率有非常显著的影响。综合评价性能指标，优选出最佳成分配比为Al-0.5Fe-0.25Cu-0.3RE-0.05Zr，其抗拉强度为99.0 MPa，伸长率为24.6%，导电率为61.8%IACS。

关键词：Al-Fe-Cu-RE-Zr合金；合金元素；力学性能；电学性能

Al-Fe-Cu合金是以Fe、Cu为主要合金元素的铝合金，相比于纯铝有更高的强度、抗蠕变性、耐热性、抗氧化性、耐腐蚀性，同时具有良好的延展性和导电性[1]，已广泛应用于电缆用导体材料。但由于我国铝资源含硅量较高，Al-Fe-Cu合金中的硅杂质会损害合金的导电性能，增加电力传输过程中的能量损耗，不利于节能减排，同时也会降低合金的力学性能。研究表明，RE元素会与Fe、Si形成金属间化合物，降低杂质元素的固溶量，改变杂质相的形态和分布，从而提高合金的导电性能[2]；另外RE也可以起到精炼净化、变质等作用，改进铝合金的力学性能[3]。铝合金中添加适量Zr元素可以析出强化相Al_3Zr，细化晶粒，提高铝合金的强度、硬度和抗蠕变性[4-5]。本文通过调整Al-Fe-Cu合金中Fe、Cu元素的含量，以及额外添加RE和Zr元素，采用正交试验手段，研究四种元素含量对Al-Fe-Cu-RE-Zr合金组织和性能的影响，从而评价出中强高导Al-Fe-Cu-RE-Zr合金的最佳成分配比。

作者简介：
刘蒙恩（1982–），男，讲师，博士，主要研究方向为金属材料。E-mail: cqhnjs@163.com

中图分类号：TG172
文献标识码：A
文章编号：1001-4977（2019）08-0880-05

基金项目：
河南省 2018 年度科技攻关项目（182102210463）。
收稿日期：
2019–03–18 收到初稿，
2019–04–24 收到修订稿。

1 试验材料与方法

1.1 试样制备

采用井式电阻炉熔炼Al-Fe-Cu-RE-Zr合金，将纯铝及石墨坩埚放入电阻炉中，加热至760 ℃，待纯铝全部熔化，加入预热好的铁剂（75%Fe）以及Al-50Cu、Al-9.8RE（70%La和30%Ce）、Al-4Zr中间合金。熔化过程中加覆盖剂，除去表面炉渣，搅拌均匀后保温20 min，在金属型模具中浇注出Φ27 mm × 100 mm的棒状试样。铸棒依次经515 ℃ × 13 h均匀化退火、挤压、拉拔以及300 ℃ × 2 h再结晶退火，制备成Φ2.5 mm的铝合金单线。

1.2 正交试验设计

通过正交试验手段，考察Fe、Cu、Zr和RE元素对Al-Fe-Cu-RE-Zr合金组织与性能的影响，选用$L_9(3^4)$试验表，具体各因素水平的确定依据参考文献[6]以及前期单因素试验的基础。正交试验方案见表1。

本文采用极差分析和方差分析法进行正交试验。极差分析法是通过计算出极差R，反映各因素对性能指标的影响大小。但考虑到极差分析不能排除试验误差，且该正交试验表处于饱和状态，无空列误差，故本文在极差分析的基础上，采取重复取样的方差分析方法，即通过计算F统计量，判断各因素对性能影响的显著性。对退火态合金的抗拉强度、伸长率和导电率三项性能指标分别进行正交试验评价，在保证高导电率的前提下，选取具有较高力学性能的合金成分，最终优选出具有最佳导线性能的合金成分配比。

1.3 样品的性能及表征

采用岛津SHIMADZU/50KN电子万能拉伸试验机进行拉伸试验；使用QJ-57精密型直流双臂电桥进行电阻率的测量；金相试样经过机械抛光、电解抛光（电解液：10%HClO4+90%C2H5OH），采用莱卡DM4000M金相显微镜观察合金显微组织；利用FEI-Quanta-200扫描电镜观察第二相，并利用EDS对第二相进行成分分析；使用日本理学Ultima IV型X射线衍射仪分析合金物相。

2 试验结果与分析

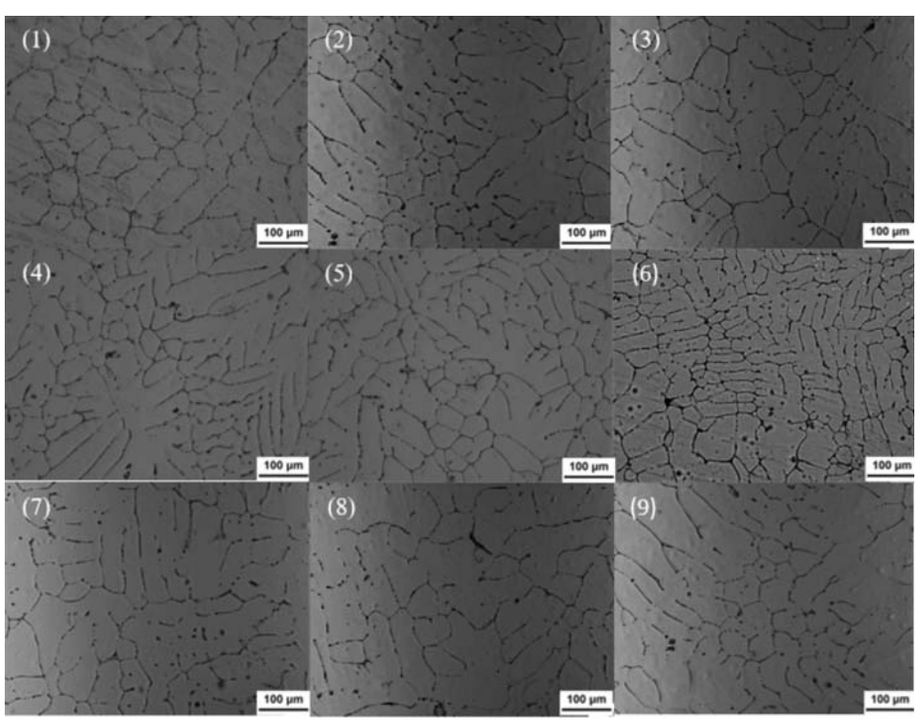
2.1 铸态显微组织分析

图1为9组正交试验铸态Al-Fe-Cu-RE-Zr合金的显微组织。铸态合金组织都以等轴晶为主，但不同成分合金的晶粒尺寸有一定的差别。采用截点法，选取每种成分合金显微组织的任意3个视场进行晶粒尺寸的测量，根据测量结果，九组合金的平均晶粒尺寸在35.05~62.99 μm之间，其中1、3、7、8、9号合金的晶粒尺寸较大，均在50 μm以上，1、3、4、6号的合金晶粒尺寸分布不均匀，综合九组合金的晶粒尺寸大小和分布情况，2、5号合金的晶粒分布均匀且细小。合金的组成相主要由位于晶界附近的针状相和晶内的球状相组成。

表1 正交试验方案

Table 1 The scheme of orthogonal test w_B/%

因素试验号	A Fe	B Cu	C RE	D Zr
1	0.3	0.15	0.1	0.05
2	0.3	0.20	0.2	0.10
3	0.3	0.25	0.3	0.15
4	0.5	0.15	0.2	0.15
5	0.5	0.20	0.3	0.05
6	0.5	0.25	0.1	0.10
7	0.7	0.15	0.3	0.10
8	0.7	0.20	0.1	0.15
9	0.7	0.25	0.2	0.05



（1）1号；（2）2号；（3）3号；（4）4号；（5）5号；（6）6号；（7）7号；（8）8号；（9）9号

图1 不同成分合金铸态显微组织

Fig. 1 Microstructure of as-cast alloys with different compositions

2.2 正交试验结果

极差和方差分析结果见表2。由表2可知，合金元素对抗拉强度的影响程度：A>C>B>D，对应最佳方案为A_2-C_2-B_3-D_2。其中A（Fe）对抗拉强度的影响非常显著，其余元素对合金抗拉强度无显著影响。考虑到Fe在Al基体中主要以θ相（Al_3Fe初晶或共晶相）的形式存在，θ相中较强结合力的Al-Fe键很难被位错等缺陷切割，以及θ相对晶界的强烈钉扎作用，可有效提高合金的强度。但较高的Fe含量会产生粗大的Al_3Fe脆性相，导致力学性能的下降[7]。

合金元素对合金伸长率的影响程度：C>B>D>A，对应最佳方案为C_3-B_1-D_3/D_1-A_3。其中C（RE）对伸长率的影响显著，其余元素对合金塑性无显著影响。RE的加入会使原先针状Al_3Fe相发生球化或粒子化[3]，同时RE可与Al形成化合物作为晶核核心，细化晶粒，利于合金塑性的改善。

合金元素对合金导电率的影响程度：D>C>A>B，对应最佳方案为D_1-C_3-A_1-B_2/B_3。其中D（Zr）对导电率的影响有非常显著，C（RE）对导电率的影响显著，Fe和Cu元素对合金导电率无显著影响。Zr在凝固过程中与Al发生包晶反应，其溶质夹在α相中，使电子波受到散射，会损害铝合金的导电率[8]。RE元素可以净化熔体，减少熔炼中产生的气孔等缺陷，同时会与Si等杂质形成金属间化合物，减少Si对合金导电率的不利影响，促进合金导电性能的提升。

优先考虑对性能有显著影响的合金元素，综合评价抗拉强度、伸长率和导电率，选取合金成分配比的较好方案有A_2-B_3-C_3-D_1和A_2-B_1-C_3-D_1。同时作为电缆用铝合金导体材料，其导电性能为第一性能指标，在其他性能相同的条件下，优先考虑导电率。因此，最终选择最佳方案为A_2-B_3-C_3-D_1，其对应的合金具体成分为Al-0.5Fe-0.25Cu-0.3RE-0.05Zr。

2.3 验证试验

由表2可知，九组正交合金成分中综合性能最优的是5号合金，表3为最佳方案与5号合金的性能对比验证。相比于5号合金，最佳方案合金的抗拉强度提高了10.4%，达到99.0 MPa，且伸长率和导电率无明显下降，综合性能最优。合金的性能对比结果验证了正交评价出的最优合金成分的合理性和有效性。

表2 正交试验结果

Table 2 The results of orthogonal test

实验组		试验因子				抗拉强度	伸长率	导电率
		A（Fe）	B（Cu）	C（RE）	D（Zr）	/MPa	/%	/%IACS
1		0.3	0.15	0.1	0.05	89.13	23.60	61.5
2		0.3	0.20	0.2	0.10	91.25	12.67	59.9
3		0.3	0.25	0.3	0.15	87.33	24.13	61.9
4		0.5	0.15	0.2	0.15	99.42	24.53	59.4
5		0.5	0.20	0.3	0.05	94.86	24.93	62.2
6		0.5	0.25	0.1	0.10	103.13	15.70	59.3
7		0.7	0.15	0.3	0.10	90.83	28.40	60.7
8		0.7	0.20	0.1	0.15	91.14	22.53	60.7
9		0.7	0.25	0.2	0.05	90.91	21.90	61.4
抗拉强度	k_1	89.240	93.127	94.467	94.967			
	k_2	99.137	92.417	97.193	95.070			
	k_3	90.960	97.123	91.007	92.630			
	R	9.897	4.706	6.186	2.440			
	F	8.68**	2.27	3.42	0.67			
伸长率	k_1	20.133	25.543	20.610	23.477			
	k_2	21.720	20.043	19.700	18.923			
	k_3	24.277	20.577	25.820	23.730			
	R	4.144	5.5	6.12	4.807			
	F	1.56	3.27	3.93*	2.62			

	A（Fe）	B（Cu）	C（RE）	D（Zr）
导电率				
k_1	61.100	60.533	60.500	61.700
k_2	60.300	60.933	60.233	59.967
k_3	60.933	60.867	61.600	60.667
R	0.800	0.400	1.367	1.733
F	1.699	0.408	4.610*	6.580**

注：$F_{0.05}$（2，18）=3.55，$F_{0.01}$（2，18）=6.01，*表示影响显著，**表示影响非常显著。

2.4 XRD 和 EDS 分析

为了解最佳成分合金的相组成，对合金进行XRD、SEM和EDS分析。图2为最佳方案A_2-B_3-C_3-D_1（Al-0.5Fe-0.25Cu-0.3RE-0.05Zr）合金的XRD表征结果。由图可知，合金检测出Al、Al_6Fe、Al_7Cu_2Fe和Al_3Zr等物相峰。

图3为最佳方案铸态合金的SEM和EDS图。从图中可以看到晶界处的针状相和晶内分布的球状相。为确定第二相成分，对球状和针状相进行EDS分析，见图3。A、B点主要为Al、Fe元素，质量比接近6：1，结合XRD分析，该针状相为Al6Fe相；C、D点主要为Al、RE和Cu元素，可知球状相为稀土相。

3 结论

（1）通过正交试验，分析得出合金元素对抗拉强度的影响程度为Fe>RE>Cu>Zr，Fe对抗拉强度的影响非常显著；合金元素对合金伸长率的影响程度为RE>Cu>Zr>Fe，RE对伸长率的影响显著；合金元素对

表3 性能验证试验

Table 3 Performance verification test

试样序号	合金成分	导电率/%IACS	抗拉强度/MPa	伸长率/%
最佳方案	A_2-B_3-C_3-D_1	61.8	99	24.6
5号	A_2-B_2-C_3-D_1	62.2	94.9	24.9

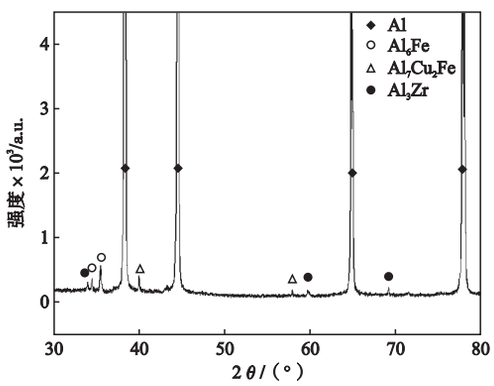
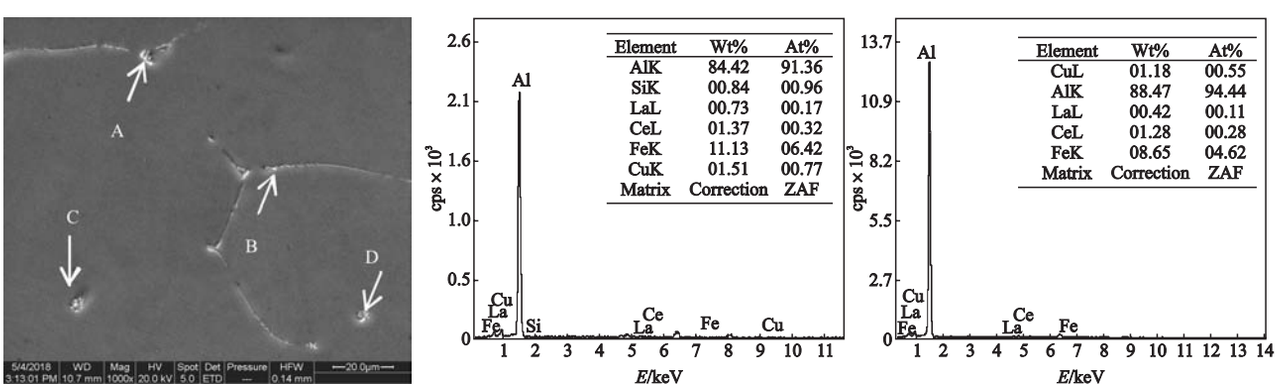
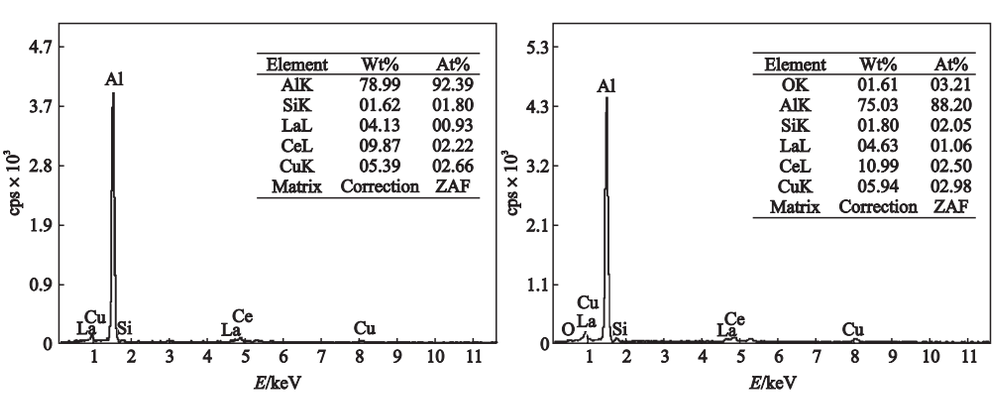


图2 Al-0.5Fe-0.25Cu-0.3RE-0.05Zr合金XRD图谱

Fig. 2 XRD pattern of Al-0.5Fe-0.25Cu-0.3RE-0.05Zr alloy



（a）SEM照片 （b）A点 （c）B点



（d）C点 （e）D点

图3 Al-0.5Fe-0.25Cu-0.3RE-0.05Zr合金SEM照片和EDS分析结果

Fig. 3 SEM image and EDS results of Al-0.5Fe-0.25Cu-0.3RE-0.05Zr alloy

合金导电率的影响程度为Zr>RE>Fe>Cu，Zr对导电率的影响非常显著，RE对导电率的影响显著。

（2）综合评价退火态合金的抗拉强度、伸长率和导电率，优选出最佳合金成分配比为Al-0.5Fe-0.25Cu-0.3RE-0.05Zr，其抗拉强度为99.0 MPa，伸长率为24.6%，导电率为61.8%IACS。

参考文献：

[1] ZHANG X Y，ZHANG H，KONG X X，et al. Microstructure and properties of Al-0.70Fe-0.24Cu alloy conductor prepared by horizontal continuous casting and subsequent continuous extrusion forming [J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China，2015，25（6）：1763–1769.

[2] 李红英，孙远，宾杰，等. Ce对耐热铝导体材料铸态组织和性能的影响 [J]. 中南大学学报（自然科学版），2011，42（10）：3026–3032.

[3] 范应光，张修海，汤宏群，等. RE对改良铸造铝硅合金力学性能的影响 [J]. 热加工工艺，2012，41（5）.

[4] 余爱武，杨成刚，刘奋成，等. Ti、Zr对纯铝微观组织和力学性能的影响 [J]. 稀有金属材料与工程，2015，44（8）：1964–1969.

[5] DOBES F，KRATOCHVÍL P. The effect of Zr addition on creep of Fe-30at.% Al alloys [J]. Intermetallics，2013，43：142–146.

[6] 朱庆丰，朱成，陈庆强，等. Zr含量对工业纯铝组织及性能的影响 [J]. 材料科学与工艺，2017（1）：36–40.

[7] 陈超，刘伟东，王鑫鑫. Al_3Fe价电子结构及其对Al-Fe合金性能的影响 [J]. 有色金属工程，2011，63（1）：1–4.

[8] BELOV N A，ALABIN A N，MATVEEVA I A，et al. Effect of Zr additions and annealing temperature on electrical conductivity and hardness of hot rolled Al sheets [J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China，2015，25（9）：2817–2826.

Effects of Alloying Elements on Mechanical and Electrical Properties of Al-Fe-Cu-RE-Zr Alloy

LIU Meng-en[1], YU Qun[2]

(1. School of Mechanical and Automotive Engineering, Nanyang Institute of Technology, Nanyang 473004,Henan, China; 2. School of Materials Science and Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, Henan, China)

Abstract:

The effects of Fe, Cu, RE and Zr on the tensile strength, elongation and conductivity of Al-Fe-Cu alloy were studied by means of orthogonal test. The optimum composition ratio was evaluated by range and variance analysis. The microstructure and properties of the alloy were analyzed by XRD, SEM and EDS. The results show that the effects of four elements on the tensile strength, elongation and conductivity of the alloy are: Fe > RE > Cu > Zr, RE > Cu > Zr > Fe, Zr > RE > Fe > Cu, among which Fe has a very significant effect on the tensile strength, RE has a significant effect on the elongation and conductivity of the alloy, Zr has a very significant effect on the conductivity of the alloy. Through comprehensive evaluation of the performance index, it is concluded that the best composition ratio is Al-0.5Fe-0.25Cu-0.3RE-0.05Zr. Its tensile strength, elongation and conductivity are 99.0 MPa, 24.6%, 61.8% IACS, respectively.

Key words:

Al-Fe-Cu -RE-Zr alloy; alloying element; mechanical properties; electrical properties

（编辑：张允华，zyh@foundryworld.com）