

·轻金属材料·

# 铝合金的力学性能及其电导率

宁爱林, 蒋寿生, 彭北山

(邵阳学院激光技术与材料研究所, 湖南 邵阳 422004;)

**摘要:** 评述了影响铝合金力学性能和电导率的主要因素, 说明铝合金的力学性能与其电导率有一定的关联。介绍了电导率在铝合金热处理工艺制定和力学性能检测中的应用, 指出借助于电导率的测定, 可以初步推测铝合金的某些力学性能和初步优化铝合金的某些热处理工参数, 达到测试快速、无损和简便的目的。

**关键词:** 铝合金; 力学性能; 电导率

**中图分类号:** TG146.2<sup>+1</sup> **文献标识码:** A **文章编号:** 1002-1752(2005)06-0034-03

## Mechanical properties and electrical conductivity of aluminum alloys

NING Ai—lin, JIANG Shou—sheng, PENG Bei—shan

(*Institute of Laser Technology and Materials, Shaoyang University, Shaoyang, Hunan, China. 422000*)

**Abstract:** The major facts of influence on mechanical properties and electrical conductivity of aluminum alloys are discussed. The results indicate that the mechanical properties and electrical conductivity of aluminum alloys have certain relationship. The application of electrical conductivity in heat—treatment institution formulated and examining mechanical properties are appraised, some mechanical properties and heat—treatment institution of aluminum alloys can be primarily conjectured by means of examining the electrical conductivity.

**Key words:** aluminum alloy; mechanical properties; electrical conductivity

随着国防和民用工业的发展, 对铝合金的综合性能提出了更高的要求。一直用于检验铝合金性能的强度、硬度和塑性等指标已不能全面地反映其综合性能。金属材料的电学性能作为反映其综合性能的指标之一, 愈来愈受到人们的重视。特别是作为金属材料电学性能指标之一的电导率, 不仅反映了材料的导电能力, 而且也与材料的成分和内部组织有关, 而材料的内部组织又与其热处理状态有关。所以, 材料的电导率与其热处理状态和力学性能必然有一定的关联(因为材料的力学性能也决定于材料的成分和内部组织)。近年来, 国内外已有采用测电导率的方法来决定铝合金的热处理工艺和某些力学性能的报道<sup>[1~4]</sup>。本文将根据有关资料及课题组的实验情况, 在这方面作一简要介绍。

## 1 影响铝合金的力学性能和电导率的主要因素

### 1.1 合金的成分与组织

一般情况下, 合金的合金化程度愈高, 合金的强度也愈高, 塑性则相反。电导率与合金的塑性变化趋势相似, 即合金化程度愈高, 电导率愈低。这是因

为元素之间形成合金后, 作为溶质元素的异类原子会引起作为溶剂元素的晶格点阵畸变, 增加了电子的散射, 使电阻率增大。此外, 合金组元间的相互作用引起有效电子数减少, 也会使电阻率增大。高强铝合金的组织一般为固溶体的基体上分布着第二相粒子。研究表明: 无论是高强铝合金的力学性能还是电导率都主要取决于它们的基体组织。对于固溶体基体组织来讲, 固溶程度越高, 其强度越高。但电导率却相反, 因为固溶程度越高, 表示溶质原子溶入溶剂晶格的数量越多, 引起溶剂晶格的畸变越大, 电子的散射越大, 电阻率也越大。固溶体的电阻率  $\rho_s$  可用马基申定律表示:

$$\rho_s = \rho_{s1} + \rho_{s2} \quad (1)$$

式中:  $\rho_{s1}$  —— 溶剂的电阻率;

$\rho_{s2}$  —— 溶质引起的电阻率, 它等于  $\gamma \cdot \xi$ ,  $\gamma$  为溶质的量比,  $\xi$  为百分之一溶质量比的附加电阻率。

由(1)式可知: 固溶体的电阻由溶剂的电阻和溶质的电阻两部分组成, 并与溶质原子的浓度有关; 即使溶质元素的电导率比溶剂元素的电导率大, 形成

固溶体后, 电阻率也要增大。

合金的均质程度和组织形态对合金的力学性能有影响, 同样对电学性能也有影响。如不均匀固溶体(溶质原子产生偏聚)的电阻率大于均匀固溶体的电阻率; 多相合金的电阻率不仅与组成相的电阻率及相对量有关, 而且与合金的组织形态有关。

### 1.2 冷塑性变形

冷塑性变形使铝合金的晶体缺陷增多、晶格畸变加剧, 引起材料的强度、硬度升高, 塑性、韧性降低。这种晶格畸变和晶体缺陷增加, 特别是空位浓度的增加, 会造成点阵电场的不均匀而加剧电子波的散射, 结果引起材料的电阻率增大。所以说冷塑性变形对铝合金的力学性能和电导率均有影响, 但影响趋势相反。即冷塑性变形使铝合金的力学性能产生强化(加工硬化), 电学性能产生弱化(电导率降低)。

### 1.3 回复与再结晶

回复可以减少材料的晶体缺陷, 特别是点缺陷浓度, 使点阵电场的均匀程度降低, 结果使铝合金的电阻率降低。再结晶可以消除铝合金冷塑性变形时形成的晶体缺陷和晶格畸变, 使铝合金的组织恢复到冷塑性变形前的状态, 此时, 电阻率也恢复到冷塑性变形前的状态。对铝合金的力学性能而言, 回复可以消除材料的内应力, 再结晶可以使其力学性能恢复到冷塑性变形前的状态。所以说回复与再结晶对铝合金的力学性能和电导率的影响趋势相同。

### 1.4 温度

以自由电子为导电机理的金属材料, 尽管温度对有效电子数和电子平均速度几乎没有影响, 但由于温度升高而引起离子振动加剧, 原子无序度增加, 会使电子运动的自由程减小, 散射几率增加, 结果导致材料的电导率降低(电阻率增大)。纯金属的电阻率与温度的关系见式 2:

$$\rho_t = \rho_0(1 + \alpha \Delta T) \quad (2)$$

式中:  $\rho_t$  —— 电阻率;

$\rho_0$  —— 标准态(通常为 20 °C)的电阻率;

$\alpha$  —— 电阻温度系数;

$\Delta T$  —— 温差(环境温度 - 标准温度)。

金属材料的强度、硬度一般随温度的升高而降低, 铝合金也是如此。即温度对铝合金强度、硬度等力学性能的影响与温度对铝合金电导率的影响有相似的趋势。

### 1.5 热处理工艺

当铝合金的成分一定时, 其力学性能和电导率

的高低就取决于该材料的内部组织, 而材料的内部组织又受其热处理工艺的影响。所以, 研究热处理工艺对铝合金力学性能和电导率的影响有十分重要的意义。铝合金的热处理工艺, 主要是固溶和时效处理, 其次均匀化和再结晶退火。这些工艺主要是影响合金的均匀性、第二相分布和组织形态, 并以此来影响合金的力学性能和电导率。固溶处理的一般情况是: 固溶程度越高, 合金的力学性能越高, 电导率越低(因为合金的固溶程度越高, 晶格畸变程度越大, 电子散射越严重)。时效处理的一般情况是: 时效初期合金的强度和电导率变化趋势相同, 时效后期二者的变化趋势相反, 这主要取决于强化相的析出程度。此外, 时效方式对合金的力学性能和电导率也有影响, 如文献<sup>[5]</sup>对 7075 铝合金的研究表明: 双级时效的电导率高于单级时效的电导率; 文献<sup>[2]</sup>对 919 铝合金的研究表明: 二级时效对合金电导率和强度的影响比一级时效大, 且合金电导率和强度在一级时效时变化趋势相同, 在二级时效时变化趋势相反。

## 2 电导率在铝合金热处理工艺中的应用

美国等先进工业国家, 普遍采用测量铝合金的电导率来检验合金的热处理状态。在我国, 也有部分科研单位和工厂企业, 通过测量铝合金的电导率来检验合金的热处理状态。如文献<sup>[1]</sup>根据铝合金强化处理时沉淀相的长大增加材料的强度, 而这些沉淀强化相也会影响电子的移动并降低材料的电导率, 用电导率来进行铝合金热处理工艺质量的控制和过热检查, 以解决在飞机制造和维修过程中蒙皮、结构件出现的过热问题。目前, 电导率在铝合金热处理中的主要应用有:

(1) 用电导率来判断固溶处理时铝合金固溶体的过饱和程度。根据复相导电理论, 合金的电导率主要取决于电导率较高的物相, 在铝合金中则主要取决于基体固溶体。因此, 可以用电导率的变化来判断铝合金固溶处理时固溶体的过饱和程度, 并以此为参考初步制定和优化铝合金的固溶处理制度。如当铝合金的固溶温度持续升高时, 电导率如果持续呈下降趋势, 说明该铝合金固溶体的过饱和程度在持续提高; 如果电导率维持不变, 则说明该铝合金固溶体的过饱和程度已经达到极限, 继续升温意义不大; 如果电导率维持不变后又略有上升, 则说明该铝合金固溶体的均匀性在提高。同理, 也可以用电导率来判断固溶时间对铝合金固溶体过饱和程度的

影响。

(2) 用电导率来优化铝合金均匀化处理时的工艺参数。由于铝合金均匀化时, 伴随着显微组织的变化和局部成分的改变。而这种变化和改变也反映在铝合金的电导率上, 所以, 可以借助电导率的变化来推测铝合金均匀化处理时内部组织的变化, 并以此来优化其均匀化参数。如文献<sup>[6]</sup>, 通过研究耐热铝合金均匀化处理时电导率的变化, 确定 560 °C/16h 是该合金的最佳均匀化制度。在此制度下, 该合金具有较好的强度、耐热性和较高的电导率。

(3) 用电导率来判断铝合金时效处理时强化相的析出程度。由于铝合金的时效处理将改变其内部的组织状态, 所以, 合金的强度和电导率与合金的时效制度有一定的对应关系。随着时效过程的进行(温度升高或时间延长), 淬火得到的过饱和固溶体将逐步析出溶质原子(形成 G. P 区、过渡相和稳定相等强化相), 使合金的晶格畸变程度减少, 内应力降低, 从而使电子运动变得容易, 此时, 合金的强度和电导率均逐步增大。时效温度越高或时效时间越长, 强化相析出越充分, 合金的电导率越高(但强度则不一定, 时效到一定程度后, 合金的强度将呈下降趋势。也就是说时效的初期合金的强度和电导率变化趋势相似, 时效的后期二者的变化趋势相反)。反过来说, 对于同一种时效处理的铝合金, 在其他条件相同的情况下, 电导率越高, 则其强化相的析出程度越高。

### 3 电导率在铝合金力学性能检测中的应用

由于电导率具有测试快速、无损和简便的优点, 所以, 人们试图通过电导率来推测合金的某些力学性能。国内外学者已经在这方面做了大量的工作, 取得了一定的进展。目前的主要应用有:

(1) 用电导率作为铝合金产品验收的判据。尽管铝合金的电导率与其力学性能的内在联系还不十分清楚, 但由于某些铝合金的电导率与其力学性能

有着很好的相关性, 故采用测量电导率来判断和检验其力学性能是简便而可行的方法。如文献<sup>[2]</sup>通过实验研究确定: 电导率 38%IACS 作为 919 铝合金产品验收的重要判据是适宜的。

(2) 用电导率来评价铝合金的抗应力腐蚀开裂性能。应力腐蚀开裂(SCC, stress corrosion cracking)是应力和化学介质共同作用的结果, 破坏性很大, 常常发生在敏感电位区, 如活化——钝化电位过渡区等。因此, 它与合金的电学性能有一定关联, 近四十年来人们对它进行了大量的研究, 取得了较大的进展。如文献<sup>[7]</sup>在对 7××× 铝合金研究的基础指出: 电导率越高, SCC 敏感性越大。

## 4 结语

(1) 虽然人们已经发现了铝合金的电导率与其某些力学性能有关联, 但还不十分清楚这种关联的内在联系。因此, 用铝合金的电导率来推测或判断其力学性能的可靠性尚有待进一步研究。

(2) 充分利用电导率测试快速、无损和简便的优点, 来初步推测铝合金的某些力学性能和初步优化铝合金的某些热处理工艺参数在工程上是可行的。

参考文献:

- [1] 王宁, 石峰. 电导率用于铝合金热处理工艺控制和过程检查[J]. 材料工程. 1994(6): 37—39.
- [2] 何和种. 热处理对 919 铝合金电导率和力学性能的影响[J]. 材料开发与应用. 1997, 12(3): 6—9.
- [3] 于洪伟. 热处理制度对 6082 铝合金电导率的影响[J]. 轻合金加工技术. 2002(9): 12—14.
- [4] J. S. Robinson, R. L. Cudd. Electrical conductivity variations in X2096, 8090, 7010 and experimental aluminum lithium alloy [A]. Mater. Sci. Forum [C], 2000, 331—337, 971—976.
- [5] 王学军, 聂波, 谢延翠. 热处理制度对 7075 铝合金电导率的影响[J]. 轻合金加工技术. 2001(7): 40—43.
- [6] 孙海安, 杨金魁, 李晖. 均匀化制度对导线用耐热铝合金电导率的影响[J]. 轻金属. 2002(9): 58—61.
- [7] Xiao-meí Li, M. J. Starink. Analysis of precipitation and dissolution in overaged aluminum alloys using DSC [A]. Mater. Sci. Forum [C]. 2000, 331—337, 1071—1076.

(责任编辑 郝文儒)

