

# 少量雜質對鋁形變過程中 電阻率變化的影響

李修宏 王運新

(物理系)

## 摘 要

研究了范性形變對工業純鋁及含少量銅的鋁銅合金電阻率的影響。電阻率先隨形變度增加而減小，經過一極小值後隨形變度增加而增加。在超純鋁(99.996%)中沒有發現電阻率減小的現象。本文對這種過程提出了一種可能的機制。並根據這種機制對實驗現象作了定性的討論。

## 一 引 言

范性形變產生晶格缺陷。對純金屬來說，晶格缺陷的引入通常導致電阻率增加。關於晶格缺陷對電阻的影響有過不少實驗與理論研究<sup>[1-6]</sup>。某些合金特別是過渡金屬所成的合金，范性形變引起電阻率減小，這方面也有過不少工作<sup>[7]</sup>。然而對於稀合金或者不純金屬的研究較少。汪永江<sup>[8]</sup>童志深等<sup>[9]</sup>對鋁進行過拉伸，發現在形變過程中，電阻率減小。但對過程的機制沒有得到滿意的解釋。我們的工作在於對鋁在室溫進行慢速拉伸，研究少量雜質和形變速率對電阻變化的影響，並探索這一過程的機制。

## 二 實 驗 及 結 果

實驗所用樣品為工業純鋁(拔絲後經化學分析含鐵0.25%、硅0.10%、銅0.042%、鎂<0.005%)，以及用99.96%的高純鋁和電解銅配制的鋁銅合金，拔絲後經化學分析含銅0.56%。為了考慮溶質原子的影響，還對99.96%的高純鋁和

1965年3月9日收到

99.996%的超純鋁进行了測量,以資比較。所有样品冷拔为直径約0.44毫米的細絲,截成約20厘米长。預先經真空退火处理以消除冷加工效应。处理条件如表 1 所示。

表 1

試 样	处 理 条 件
超純鋁 (99.996%)	300°C 真空退火30分鐘
高純鋁 (99.96%)	300°C 真空退火30分鐘
工 业 純 鋁	400°C 真空退火30分鐘
鋁—銅 合 金	400°C 真空退火30分鐘

將退火样品小心地裝在自制小型拉伸裝置上。拉伸裝置插入恒溫油浴中,以保證在測量过程中溫度恒定。为了消除溫度起伏帶來的电阻变化,記下每次測量时的溫度(讀至0.05°C),以便必要时修正。

样品电位引綫間的长度約120毫米,工作电流为350毫安。用精密凱尔文电桥測量形变过程中的电阻值。讀数准确到四位有效数字。

假定样品形变是均匀的,同时认为样品形变后其密度变化可以忽略不計。則当样品拉伸到形变度为  $\epsilon$  时其电阻率的改变  $\Delta\rho$  如下式所示:

$$\Delta\rho = \frac{S_0}{l_0} \left[ \frac{R}{(1+\epsilon)^2} - R_0 \right] \quad (1)$$

式中,  $S_0$ ,  $l_0$  及  $R_0$  分别表示未拉伸时样品的橫截面积, 电位引綫間的长度和电阻,  $R$  表示拉伸到形变度为  $\epsilon$  时样品的电阻。所得結果如下:

1. 工业純鋁, 含少量銅的鋁銅合金, 高純鋁以及超純鋁室溫連續拉伸过程中, 电阻率的变化如图 1 所示。图 1 表明鋁銅合金及工业純鋁在形变过程中, 当形变度不大时, 电阻率减小, 并且最初减小得快, 随着形变度的增大, 曲綫逐漸变得較为平坦, 經過一极小值后电阻率随形变度的进一步增加而增加, 当形变度足够大

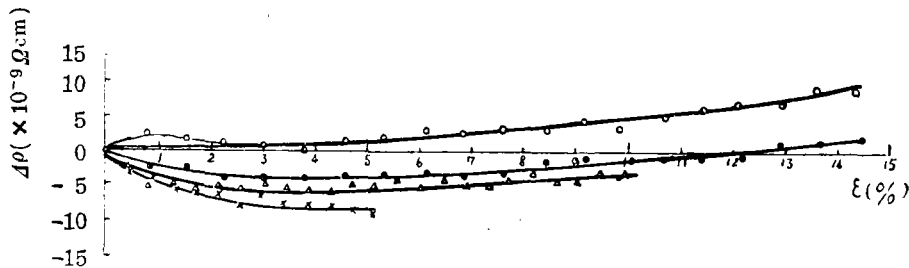


图 1 含少量杂质的鋁及純鋁室溫拉伸过程中电阻率的变化

- 超純鋁 (99.996%), 形变速度为  $9.1 \times 10^{-5}$  /秒
- 高純鋁(99.96%), 形变速度为  $11 \times 10^{-5}$  /秒
- △ 工业純鋁, 形变速度为  $10 \times 10^{-5}$  /秒
- × 含銅0.56%的鋁銅合金, 形变速度为  $8.6 \times 10^{-5}$  /秒

时电阻率比退火状态更大。然而超純鋁沒有出現這種“反常現象”。超純鋁的电阻率最初稍有增加，当形变度达到百分之一时，电阻率略有下降的迹象（但没有发现下降到比未形变时更低的值），然后随形变度增加而增加。

2. 改变拉伸速率，对鋁銅合金进行测量。其結果如图2所示。在形变速率从  $8 \times 10^{-6} \text{秒}^{-1}$  到  $1.7 \times 10^{-4} \text{秒}^{-1}$  的范围内，对六种不同形变速度进行实验，得出一組电阻率变化与形变速度的关系曲线（图2中没有示出形变速度为  $1.5 \times 10^{-4} \text{秒}^{-1}$  与  $1.7 \times 10^{-4} \text{秒}^{-1}$  的两条曲线）。

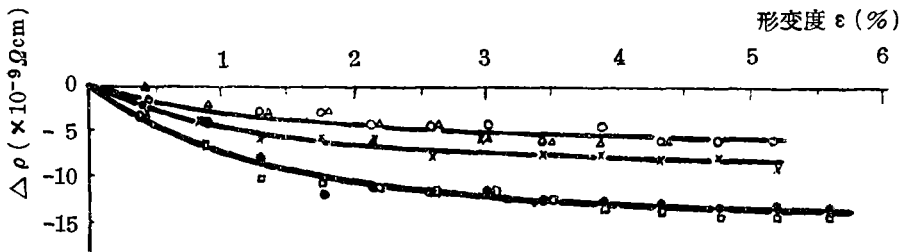


图2 鋁銅合金（含銅0.56%）在不同形变速度拉伸过程中电阻率变化与形变度的关系

- $\dot{\epsilon} = 8 \times 10^{-6} \text{秒}^{-1}$
- △  $\dot{\epsilon} = 3.8 \times 10^{-5} \text{秒}^{-1}$
- ×  $\dot{\epsilon} = 8.6 \times 10^{-5} \text{秒}^{-1}$
- $\dot{\epsilon} = 1.1 \times 10^{-4} \text{秒}^{-1}$

对应于形变度为4%时，电阻率的减小值与形变速度的关系表示于图3中。当形变速率不太大时，电阻率减小的绝对值随形变速率的增加而近乎线性增加。

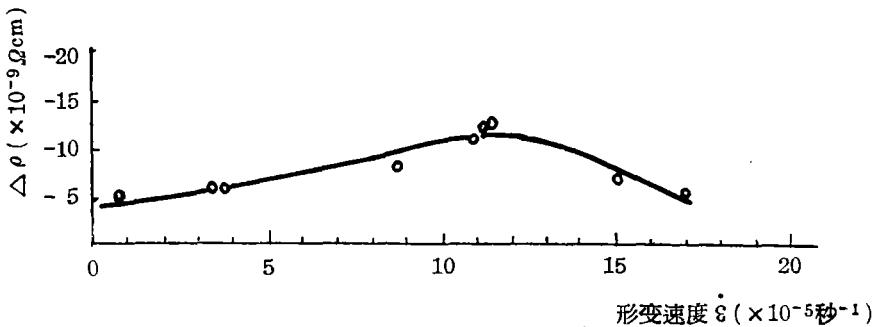


图3 鋁銅合金（含銅0.56%），当形变度为4%时电阻率减小值与形变速度的关系

3. 以不同速率对超纯铝进行拉伸, 电阻率变化没有明显的差别 (图 4)

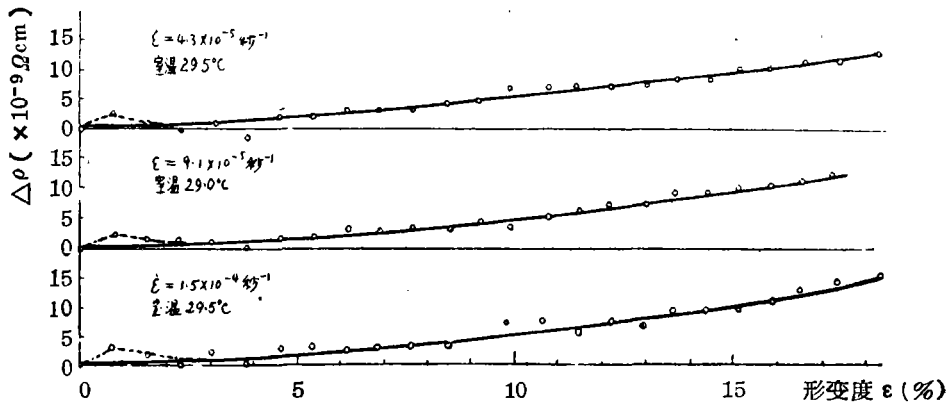


图 4 超纯铝 (99.996%) 室温拉伸过程中电阻率的变化

4. 此外, 我们还将工业纯铝 (99.6%), 每拉伸一定形变度, 立即停止拉伸, 不去除载荷, 在室温进行时效, 由检流计偏转观察电阻率随时效时间的变化。在时效过程中电阻率稍有增加 (图 5)。时效 5 分钟, 电阻率的变化与形变度的关系如图 6。图中圆圈表示同一样品拉伸 0.86% 后停止拉伸, 令其室温时效 5 分钟, 测定电阻率变化, 然后再拉伸 0.86% 重复上述测量, 直至形变度达 11% 为止, 黑点则表示每拉伸 2.6% 的实验结果。由图可见形变量间距不同, 时效过程中电阻率的增加无明显差别。这表明时效过程中电阻率变化与形变度的关系不存在叠加效应。

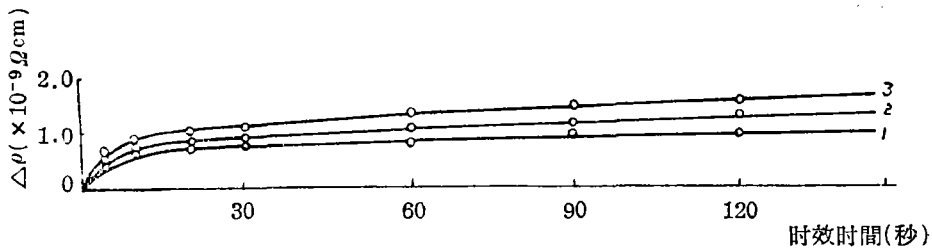


图 5 在应力作用下于室温时效, 工业纯铝 (99.6%) 电阻率随时效时间的变化  
 1 —  $\epsilon = 2.6\%$       2 —  $\epsilon = 5.2\%$       3 —  $\epsilon = 7.8\%$

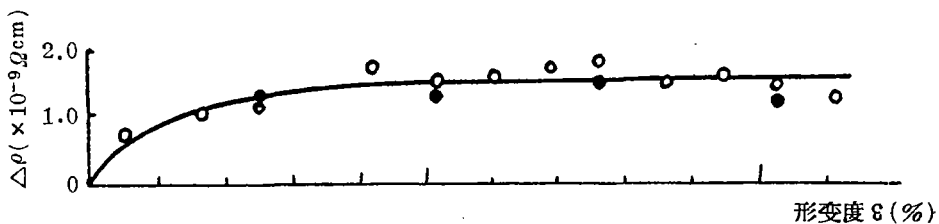


图 6 在应力作用下经室温时效 5 分钟, 工业纯铝 (99.6%) 电阻率变化与形变度的关系  
 ○ 每拉伸 0.86% 进行时效;      ● 每拉伸 2.6% 进行时效

### 三 結果分析

冷加工导致金属中晶格缺陷(点缺陷、綫缺陷和面缺陷)增加,通常都使电阻率增加。然而在鋁中却发现过“反常”变化。<sup>[8-9]</sup>这些作者所用的鋁都是工业純鋁,而沒有对高純鋁进行研究,因此不能判断电阻率减小的原因。

我們从純鋁与含少量杂质的鋁的对比实验中,首先可以看到“反常效应”必然与杂质的分布状态有关。其次由于在一定的形变速度范围内(图3,当形变速度小于 $\sim 1.2 \times 10^{-4}$ 秒<sup>-1</sup>时)电阻率的减小与形变速度的关系也是“反常”的。并且在应力作用下室温时效过程中电阻率不但不减小,反而增加,这同样是“反常”的。从已有的理論难以解释这些行为。

Bhatia<sup>[10]</sup>的计算表明鉄中碳原子分聚到位錯綫上形成碳原子列时,对电阻的贡献小于它們作弥散分布时的贡献。Cottrell和Churchman<sup>[11]</sup>从实验方面验证了这一效应。有理由认为含杂质的鋁在慢速拉伸过程中,电阻率的减小是因为杂质原子由比較弥散的分布过渡到較有規則分布的結果。Cottrell<sup>[12]</sup>用应变时效的观点首次闡明了含少量合金元素的鋁合金中的Portevin-Le Chatelier效应。认为由冷加工产生的空位大大加速了杂质原子向位錯的扩散过程,使得在室温时应变时效有可能进行,解决了在替代式稀固溶体中应用“应变时效”理論的困难。然而尝试用应变时效理論于我們的实验結果时遇到了困难。第一,如果电阻率减小是由于应变时效,杂质原子向位錯分聚的結果,那么形变速度愈小,应变时效愈能充分进行,电阻率应该减小得愈多。但是从鋁-銅合金的电阻率变化与形变速度的依賴关系来看(图2及3)在形变速度較小(約小于 $1.2 \times 10^{-4}$ 秒<sup>-1</sup>)的范围内,电阻率减小随形变速度的变化与应变时效的推論恰巧相反,第二,如果电阻率的减小是因为应变时效,杂质原子向位錯分聚的結果,那么当拉伸到一定形变度时,停止拉伸,令其时效,电阻率应该进一步减小,但是我們的結果表明电阻率并不减小,反而增加,与应变时效的推論恰巧相反。

按我們的实验結果,杂质原子过渡到有規則分布的过程,除了应变时效过程外,还存在一种与应变时效不同的动力学过程。这种过程的模型可簡述如下:形变过程中由位錯源增殖的位錯环在滑移面上扩张。当运动位錯与滑移面上弥散分布的杂质原子相遇或接近时,由于强烈的彈性交互作用,溶质原子重新分布。位錯一个又一个地扫过滑移面,結果在晶体中溶质原子沿滑移面取向形成某种較有序的层状分布,同时由于运动着的位錯激发溶质原子,使溶质原子在位錯运动方向产生一定的漂移,結果在积塞的位錯周围形成稳定的气团。位錯扫过滑移面后,溶质原子的分布示意地由图7表示。

从上述杂质原子的“扫集”模型出发分析我們的实验結果。

#### 1. 电阻率减小与形变度的关系

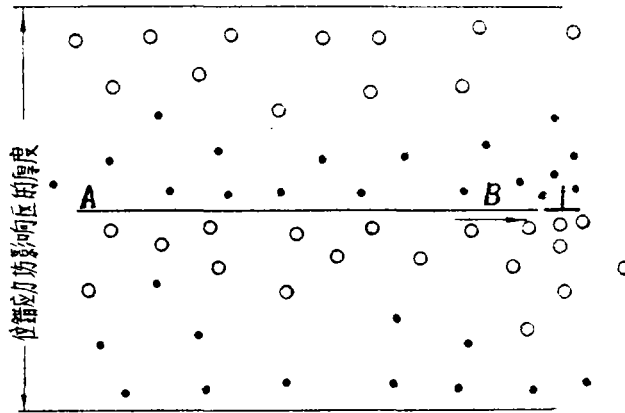


图 7 位错扫过滑移面后, 溶质原子在位错周围和在滑移面两旁的分布示意图

- ——表示比基体金属为大的溶质原子
  - ——表示比基体金属为小的溶质原子
- AB为滑移面

按上述模型由于杂质的“扫集”而引起的电阻率减小, 在一級近似情况下, 应该正比于位错扫过的面积, 因而正比于形变度, 即

$$\Delta \rho_{\text{杂质}} = -B\varepsilon \quad (2)$$

若形变产生的缺陷使电阻率的增加为  $\Delta \rho_{\text{缺陷}}$

$$\Delta \rho_{\text{缺陷}} = A\varepsilon^p \quad (3)$$

则总的电阻率变化为

$$\Delta \rho = A\varepsilon^p - B\varepsilon \quad (4)$$

式中  $A, B$  及  $p$  是正常数。式(4)可以定性说明电阻率变化与形变度的关系。

## 2. 铝—铜合金电阻率变化与形变速度的关系。

按上述模型郑庆璋与罗蔚茵<sup>[13]</sup>进行了粗略计算, 得出杂质原子规则分布引起的电阻率减小与形变速率的关系近似地表示为:

$$\Delta \rho_{\text{杂质}} = -C\dot{\varepsilon} \quad (5)$$

式中  $C$  为一正常数,  $\dot{\varepsilon}$  表示形变速率。上述估计与我们关于铝—铜合金的结果(图 3)相符合(当形变速率不太大时)。上述作者<sup>[13]</sup>对  $\alpha$ -铁的实验也得出类似的关系

## 3. 在应力作用下时效过程中电阻率的变化。

应变时效、空位回复都会使电阻率下降, 但工业纯铝形变后在应力作用下时效,

电阻率略有增加(图5)。这种增加从上述模型可以得到解释。除了在位错周围形成的稳定气团外,当停止位伸后,较有序的层状分布在热激活下很快就会变成混乱分布,导致电阻率增加。同时由于这一过程只需原子跳一两步即可完成,因而在形变过程中实际上也有这种过程发生,时效过程中电阻率的增加仅仅是位错刚扫过的区域中溶质原子变成弥散分布所引起的,这也说明了时效过程中电阻率变化与形变度的关系不存在叠加效应的原因。

#### 四 结 论

1. 含少量杂质的铝在室温慢速形变过程中,电阻率下降。超纯铝没有这种“反常现象”;

2. 含少量杂质的铝,在一定的形变速度范围内,形变速度愈大,形变过程中电阻率减小的绝对值愈大;

3. 杂质沿位错取向分聚以及沿滑移面呈层状分布导致这种反常现象。聚集的进行除应变时效过程外还存在另一种过程。这种过程很可能是动位错“扫集”杂质原子的过程。

最后应当指出,在提出“扫集”模型时没有涉及晶体的具体结构,因此如果这种机制确实存在的话,那么它应该是不纯金属或稀合金形变过程中的一种普遍现象,有待进一步研究。特别是寻求较直接的实验方法以探明这种机制是否存在。

#### 参 考 文 献

- [1] T. Broom, Adv. Phys, 3 No 9 (1954) 26—33
- [2] Van Bueren Philips. Res. Rep 12 (1957) 1, 190
- [3] D. L. Dexter Phy. Rev. 87 (1953) 768
- [4] P. Jongenburger, Appl. Sci Res B 3 (1953) 237
- [5] S. C. Hunter & F. R. N. Nabarro Proc. Roy Soc A 220 (1953) 542  
Seeges & Bross Z. Naturf. A 15 (1960) 663
- [6] M. Wintenberger Acta Met., 7 (1959) 549  
C. A. Pistorius physica 27 (1961) 149—150  
H. R. Peiffer, J. Appl. phys. 29 (1958) 1531
- [7] H. J. Logie J. Jackson, I. C. Anderson & F. R. N. Nabarro Acta Met. 9 (1961) 707
- [8] 汪永江 金属学报 3 (1958) 314
- [9] 童志深, 罗吉庭 兰州大学学报(1960)第二期
- [10] A. B. Bhatia, Proc. phys Soc., B 62 (1949) 229

- [11] A. H. Cottrell & A. T. Churchman, J. Iron and Steel Inst., 162 (1949) 271
- [12] A. H. Cottrell, phil. Mag 44 (1953) 829
- [13] 郑庆璋和罗蔚茵, 中国物理学会广东省分会1964年年会报告。

## Effect of Impurities on the Resistivity Change of Aluminum during plastic Deformation

Li Shiu—hong      Wang Yun—shin

### Abstract

The effect of plastic deformation on the resistivity of Aluminum (99.6%) and Aluminum-copper alloy was investigated. The resistivity was found to decrease with plastic strain until a minimum was reached, then to increase with increasing strain. The same phenomenon was not detected in super-purity Aluminum.

To explain the anomalous change of resistivity, a possible mechanism of the interaction exhibited between dislocations and solute atoms is proposed.