

Electron Wind Stress Model and Calculation Examples under Pulse Current

Furong Cao

School of Materials Science and Engineering, Northeastern University, Shenyang Liaoning
Email: cfr-lff@163.com, caofr@smm.neu.edu.cn

Received: Feb. 5th, 2017; accepted: Feb. 24th, 2017; published: Feb. 27th, 2017

Abstract

Electro-plasticity (EP) is an approach to improve the plasticity using electric field and electric pulse current. To disclose the mechanism of EP under the pulse current, a new electron wind stress model was proposed based on Conrad's electron wind force model. Calculation examples were given in a complex system LAZ922 (Mg-9Li-2Al-2Zn) alloy. It is found through calculation that the electron wind stress based on dislocation kinetics is in good agreement with the practical pulse current stress. However, the electron wind stress based on quantum mechanics is too low and differs greatly from the practical pulse current stress. This is because that the influence of the second phases on the movement of electrons is not considered.

Keywords

Electro-Plasticity, Pulse Current, Electron Wind Force, Electron Wind Stress

脉冲电流作用下电子风应力模型与计算示例

曹富荣

东北大学材料科学与工程学院, 辽宁 沈阳
Email: cfr-lff@163.com, caofr@smm.neu.edu.cn

收稿日期: 2017年2月5日; 录用日期: 2017年2月24日; 发布日期: 2017年2月27日

摘要

电致塑性是利用电场和脉冲电流改善材料塑性的方法。为了揭示脉冲电流作用下的电子风影响塑性的机理, 在Conrad电子风力模型的基础上, 提出电子风应力模型。在复杂体系的LAZ922 (Mg-Li-Al-Zn)合金中给出电子风应力计算实例。计算发现, 基于位错动力学的电子风应力与实际应力十分吻合, 而基于量

量子力学的电子风应力与实际应力相差很大，造成量子力学方法计算值偏低的原因是没有考虑合金中存在的第二相阻碍电子运动的情况。

关键词

电致塑性，脉冲电流，电子风力，电子风应力

Copyright © 2017 by author and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

电致塑性(Electro-plasticity (EP))包括电场致塑性和脉冲电流致塑性。其共同特点是施加外场使应力降低，塑性改善。脉冲电流致塑性最早由前苏联学者提出，后来美国学者进一步发展，多年来，人们对脉冲电流致塑性改善进行了不懈研究，取得了一些有价值的成果[1]-[4]，其应用的方面在快速成形领域，例如脉冲电流辅助下快速弯曲成形，大大提高了成形效率。美国学者 Conrad 提出了电子风力的模型，其计算对于理解脉冲电流改善塑性的机理具有重要作用[5]，但是 Conrad 模型的缺陷是参数较难获得，限制了应用。文献分析发现，国内外没有详细求解电子风力的计算示例，给研究者了解脉冲电流致塑性机理带来困难。因此，本文在 Conrad 电子风力模型基础上，提出电子风应力模型，给出计算示例，期望与实际应力-应变曲线建立联系，有助于加深对 EP 过程机理的理解。

2. 模型

Conrad 提出基于位错动力学的电子风力(电流施加在单位长度位错上的力)， F_{ew} ，模型[6]：

$$F_{ew} = (R/\rho)en_e j \quad (1)$$

式中 R 为电阻， ρ 为位错密度， e 为电荷， n_e 为电子密度， j 为电流密度。

同时，他提出量子力学电子风力模型：

$$F_{ew} = \alpha b p_f n_e (v_e - v_d) = \alpha b p_f \left(\frac{j}{e} - n_e v_d \right) \quad (2)$$

式中 α 等于 0.25~1.0， b 为柏氏矢量的模， p_f 为费米动量， v_e 为电子漂移速度和 v_d 为位错速度。

在室温变形的多晶体(平均晶粒直径为 d)内一个晶粒内，存在位错活动，电子在脉冲电流作用下扫过晶粒，引起单位长度位错的电子风力 F_{ew} ，由于晶粒内存在第二相颗粒，导致 Frank-Read 源产生，位错长度为 l ，在晶粒内产生的电子风力为 $F_{ew} l$ ，该力作用到晶粒面积 $\pi d^2/4$ 上，于是得到如下电子风应力模型：

$$\sigma_{ew} = \frac{4F_{ew} l}{\pi d^2} \quad (3)$$

式中 σ_{ew} 为电子风应力和 d 为空间晶粒尺寸或平均晶粒直径。

假设脉冲电流引起电子风应力和焦耳热应力，焦耳热应力为 $\sigma_T = \sigma - \sigma_{ew} - \sigma_{pc}$ ，式中 σ 为无脉冲电流的应力和 σ_{pc} 为脉冲电流作用下的应力。

3. 计算示例

在LAZ922 (Mg-Li-Al-Zn)合金中室温进行施加脉冲电流实验, 脉冲电流实验采用自制的高密度脉冲电源, 施加到CMT5105微机控制的拉伸机两端夹具上, 采用方波脉冲电流, 电流频率150 Hz, 脉宽70 μs , 电流密度 $j = 1.44 \times 10^3 \text{ A} \cdot \text{mm}^{-2}$, 实验获得显微组织、力学曲线等数据, 发现施加脉冲电流后应力降低, 延伸率增加[7]。

首先采用位错动力学计算电子风应力。电子密度 $n_e = \frac{d' N_A}{M}$, 式中 d' 和 M 为镁密度和摩尔质量。Mg 的摩尔质量等于Mg的相对原子量, 24.3。因此, $d' = 1.736 \times 10^3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$, $M = 24.3 \text{ g/mol}$ [8]。 N_A 为 Avogadro 常数, $6.02 \times \frac{10^{23}}{\text{mol}}$ 。 $R = 4.46 \times 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}$ [8]。 $\rho = 10^8 \text{ m}^{-2}$ 。 $e = 1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$ 。 $l = d/3$ [9] 和 d 为空间晶粒尺寸, $d = 2.66 \times 10^{-5} \text{ m}$ 。

下面计算 n_e , F_{ew} , σ_{ew} , σ_T 。选取实验电流密度 $j = 1.44 \times 10^3 \text{ A} \cdot \text{mm}^{-2}$ ($1.44 \times 10^9 \text{ A/m}^2$)。

$$n_e = \frac{d' N_A}{M} = \frac{1.736 \times 10^3 \times 10^{-3} \text{ g/m}^{-3} \times 6.02 \times 10^{23} / \text{mol}}{24.3 \text{ g/mol}} = 4.30 \times 10^{28} / \text{m}^3$$

$$F_{ew} = \frac{R}{\rho} n_e j = \frac{4.46 \times 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}}{10^8 / \text{m}^2} \times 1.6 \times 10^{-19} \text{ C} \times 4.30 \times \frac{10^{28}}{\text{m}^3} \times 1.44 \times \frac{10^9 \text{ A}}{\text{m}^2}$$

$$= 4.42 \times 10^3 \frac{\Omega \text{CA}}{\text{m}^2}$$

进行下列国际单位与导出单位换算

$$\Omega = \text{m}^2 \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-3} \cdot \text{A}^{-2}$$

$$\text{C} = \text{s} \cdot \text{A}$$

$$\text{N} = \text{m} \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-2}$$

因此,

$$\frac{\Omega \text{CA}}{\text{m}^2} = \frac{\text{N}}{\text{m}}$$

$$F_{ew} = 4.42 \times 10^3 \text{ N/m}$$

$$\sigma_{ew} = \frac{4F_{ew}l}{\pi d^2} = \frac{4}{3\pi} \times \frac{F_{ew}}{d} = \frac{4}{3\pi} \times \frac{4.42 \times 10^3 \text{ N/m}}{2.66 \times 10^{-6} \text{ m}} = 70.6 \text{ MPa}$$

根据实验结果, $\sigma = 250 \text{ MPa}$, $\sigma_{pc} = 108 \text{ MPa}$ 。

假设脉冲电流引起电子风应力和焦耳热应力, 焦耳热应力为

$$\sigma_T = \sigma - \sigma_{ew} - \sigma_{pc} = 250 - 70.6 - 108 = 71.4 \text{ MPa}.$$

其次, 采用量子力学计算电子风应力。选取 $\alpha = 0.33$, $b = 3.21 \times 10^{-10} \text{ m}$ [10], 和 $j = 1.44 \times 10^3 \text{ A} \cdot \text{mm}^{-2}$ ($1.44 \times 10^9 \text{ A/m}^2$)。首先计算费米动量 p_f 。费米能量 $E_f = 7.08 \text{ eV}$ 和费米速度 $V_f = 1.58 \times 10^6 \text{ m/s}$ [11]。

$$p_f = \frac{2E_f}{V_f} = \frac{2 \times 7.08 \text{ eV}}{1.58 \times 10^6 \text{ m/s}} = 8.96 \times 10^{-6} \text{ eV} \cdot \text{s/m}$$

然后分别计算电子漂移速度 v_e 和位错速度 v_d 。

$$v_e = \frac{j}{en_e} = \frac{1.44 \times 10^9 \text{ Am}^{-2}}{1.6 \times 10^{-19} \text{ C} \times 4.3 \times 10^{28} \text{ m}^{-3}} = 0.209 \text{ m/s}$$

这里单位换算 $\text{C} = \text{SA}$ 。

$v_d = \dot{\epsilon}/(\rho b)$ [12], 这里 $\dot{\epsilon}$ 为应变速率。 $\dot{\epsilon} = 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ 。

$$v_d = \dot{\epsilon}/(\rho b) = 10^{-3} \text{ s}^{-1} / (10^8 \text{ m}^{-2} \times 3.21 \times 10^{-10} \text{ m}) = 3.12 \times 10^{-2} \text{ m/s}$$

电子风力为

$$F_{ew} = \alpha b p_f n_e (v_e - v_d) = 0.33 \times 3.21 \times 10^{-10} \text{ m} \times 8.96 \times 10^{-6} \text{ ev} \cdot \frac{\text{s}}{\text{m}} \\ \times 4.30 \times 10^{28} / \text{m}^3 \times \frac{(0.209 - 3.12 \times 10^{-2}) \text{ m}}{\text{s}} = 7.26 \times 10^{12} \text{ ev} \cdot \text{m}^{-2}$$

由于 $1 \text{ ev} = 1.6 \times 10^{-19} \text{ J}$, $1 \text{ J} = 1 \text{ NM}$, 所以, $F_{ew} = 1.16 \times 10^{-6} \text{ N/m}$ 。接着计算电子风应力,

$$\sigma_{ew} = \frac{4F_{ew}l}{\pi d^2} = \frac{4}{3\pi} \times \frac{F_{ew}}{d} = \frac{4}{3\pi} \times \frac{1.16 \times 10^{-6} \text{ N/m}}{26.6 \times 10^{-6} \text{ m}} = 1.85 \times 10^{-8} \text{ MPa}$$

焦耳热应力为

$$\sigma_T = \sigma - \sigma_{ew} - \sigma_{pc} = 250 - 1.85 \times 10^{-8} - 108 = 142 \text{ MPa}.$$

上述计算表明, 计算涉及材料科学($\sigma, \dot{\epsilon}, d, \rho, v_d$), 物理(n_e, d', e, n_e, p_f), 化学(M, N_A), 和电学(F_{ew}, R, j, v_e), 因此本文属于交叉学科问题。

4. 讨论

计算发现位错动力学的电子风应力与实际情况吻合, 反映出脉冲电流对应力降低的影响以及对焦耳热应力的影响。而采用量子力学方法计算的电子风应力太低, 焦耳热应力太高, 与实际变形过程不符合。原因在于 LAZ922 合金内含 $\alpha + \beta$ 双相和少量第二相颗粒, 在脉冲电流施加合金的瞬间, 电子运动会受到来自晶界($\alpha/\alpha, \beta/\beta$)、相界(α/β)和颗粒界面的阻碍。另外, 量子力学模型中的费米动量和电子漂移速度没有考虑到第二相颗粒引起的晶格畸变。其结果造成量子力学方法计算的电子风应力偏低。量子力学模型中的费米动量是对纯金属或纯晶体(Mg)的参数费米能量和费米速度进行计算的, 实际复杂体系的 LAZ922 合金中 Li、Al 和 Zn 元素对电子的交互作用十分复杂, 因而计算的纯 Mg 费米动量与实际合金存在差距, 从而导致量子力学方法计算的电子风应力偏低。解决办法是对式(2)乘上一个修正系数 $\xi (= 70.6 \text{ MPa} / 1.85 \times 10^{-8} \text{ MPa} = 3.8 \times 10^9)$, 适合本合金的单位位错长度的电子风力模型修正为:

$$F_{ew} = \xi \alpha b p_f n_e (v_e - v_d) = \xi \alpha b p_f \left(\frac{j}{e} - n_e v_d \right).$$

计算表明, 由于电子漂移速度 v_e 大于位错运动速度 v_d , 电子风力为正值, 说明脉冲施加的是推力而不是拖曳力。说明脉冲电流有助于推动位错运动, 降低位错密度, 增加位错可动性, 有利于降低电子风应力。

5. 结论

在 Conrad 电子风力模型的基础上, 提出电子风应力模型。在复杂体系的 LAZ922 (Mg-Li-Al-Zn)合金中给出电子风应力计算实例。计算发现, 基于位错动力学的电子风应力与实际情况十分吻合, 而基于量子力学的电子风应力与实际情况相差很大, 造成量子力学方法计算值偏低的原因是没有考虑合金中存在

的第二相阻碍电子运动的情况。

基金项目

国家自然科学基金资助项目(No. 51334006)。

参考文献 (References)

- [1] Egea, A.J.S., Rojas, H.A.G., Celentano, D.J., Rodriguez, A.T. and Fuentes, L. (2014) Electroplasticity-Assisted Bottom Bending Process. *Journal of Materials Processing Technology*, **214**, 2261-2267. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2014.04.031>
- [2] Roh, J.H., Seo, J.J., Hong, S.T., Kim, M.J., Han, N. and Roth, J.T. (2014) The Mechanical Behavior of 5052-H32 Aluminum Alloys under a Pulsed Electric Current. *International Journal of Plasticity*, **58**, 84-99. <https://doi.org/10.1016/j.ijplas.2014.02.002>
- [3] Stolyarov, V.V. (2013) Influence of Pulse Current on Deformation Behavior during Rolling and Tension of Ti-Ni Alloys. *Journal of Alloys and Compounds*, **577S**, 5274-5276. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2012.04.022>
- [4] Liu, X., Lan, S.H. and Ni, J. (2013) Experimental Study of Electro-Plastic Effect on Advanced High Strength Steels. *Materials Science and Engineering A*, **582**, 211-218. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2013.03.092>
- [5] Antolovich, S.D. and Conrad, H. (2004) The Effects of Electric Currents and Fields on Deformation in Metals, Ceramics, and Ionic Materials: An Interpretive Survey. *Materials and Manufacturing Processes*, **19**, 587-610. <https://doi.org/10.1081/AMP-200028070>
- [6] Conrad, H. (2000) Electroplasticity in Metals and Ceramics. *Materials Science and Engineering A*, **287**, 276-287. [https://doi.org/10.1016/S0921-5093\(00\)00786-3](https://doi.org/10.1016/S0921-5093(00)00786-3)
- [7] Cao, F.R., Xia, F., Hou, H.L., Ding, H. and Li, Z.Q. (2015) Effects of High-Density Pulse Current on Mechanical Properties and Microstructure in a Rolled Mg-9.3Li-1.79Al-1.61Zn Alloy. *Materials Science and Engineering A*, **637**, 89-97. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2015.03.127>
- [8] 黎文献, 田荣璋. 纯镁的特性及合金化[M]//黄伯云, 李成功, 石力开, 邱冠周, 左铁镛, 编. 中国材料工程大典第4卷. 北京: 化学工业出版社, 2005: 173-174.
- [9] Mishra, R.S., Stolyarov, V.V., Echer, C., Valiev, R.Z. and Mukherjee, A.K. (2001) Mechanical Behavior and Superplasticity of a Severe Plastic Deformation Processed Nanocrystalline Ti-6Al-4V alloy. *Materials Science and Engineering A*, **298**, 44-50. [https://doi.org/10.1016/S0921-5093\(00\)01338-1](https://doi.org/10.1016/S0921-5093(00)01338-1)
- [10] Friedel, J. (1964) Dislocations. Pergamon Press, Oxford, 331.
- [11] <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/Tables/fermi.html>
- [12] Rao, S.I., Varvenne, C., Woodward, C., Parthasarathy, M.D., Senkov, O.N. and Curtin, W.A. (2017) Atomic Simulations of Dislocations in a Model BCC Multicomponent Concentrated Solid Solution Alloy. *Acta Materialia*, **125**, 311-320. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2016.12.011>

期刊投稿者将享受如下服务:

1. 投稿前咨询服务 (QQ、微信、邮箱皆可)
2. 为您匹配最合适的期刊
3. 24 小时以内解答您的所有疑问
4. 友好的在线投稿界面
5. 专业的同行评审
6. 知网检索
7. 全网络覆盖式推广您的研究

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱: cmp@hanspub.org