

Study of High-Temperature Deformation Behavior of Al-4.5Mg-0.6Mn Aluminum Alloy

Xu Liu¹, Yanfa Li¹, Jiangyu Li¹, Qingsong Dai^{1,2}, Yunlai Deng²

¹Guangxi Liuzhou Yinhai Aluminum Co., Ltd., Liuzhou Guangxi

²School of Materials Science and Engineering, Central South University, Changsha Hunan

Email: liuxu88818@163.com

Received: Jan. 5th, 2016; accepted: Jan. 19th, 2016; published: Jan. 22nd, 2016

Copyright © 2016 by authors 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

Abstract

The flow stress features of Al-4.5Mg-0.6Mn aluminum alloy were studied by the isothermal compression of cylindrical specimen in the temperature range of 300°C - 500°C and strain rate range of 0.01 - 10 s⁻¹ with Gleeble-3800 simulated machine. The results show that flow stress is apparently influenced by both deformation temperature and strain rate, as the flow stress decreases with the increased temperature, while increases with the raise of strain rate. The constitutive equations were presented by Zener-Hollomon parameter, and using the Zener-Hollomon parameter constitutive equation presented, the prediction of the peak flow stress in Al-4.5Mg-0.6Mn aluminum alloy as function of strain rate, temperature and strain shows to be in good agreement with the measured flow stresses.

Keywords

Al-4.5Mg-0.6Mn Aluminum Alloy, Hot Compression Deformation, High-Temperature Flow Stress, Constitutive Equations

Al-4.5Mg-0.6Mn 铝合金高温变形行为研究

刘 栩¹, 李严法¹, 李江宇¹, 戴青松^{1,2}, 邓运来²

¹广西柳州银海铝业股份有限公司, 广西 柳州

²中南大学材料科学与工程学院, 湖南 长沙

Email: liuxu88818@163.com

收稿日期：2016年1月5日；录用日期：2016年1月19日；发布日期：2016年1月22日

摘要

在Gleeble-3800热模拟试验机上对Al-4.5Mg-0.6Mn铝合金进行热压缩实验，研究该合金在变形温度为300℃~500℃、应变速率为0.01~10 s⁻¹条件下的热变形行为。分析了Al-4.5Mg-0.6Mn铝合金的高温流变行为。结果表明：变形温度和应变速率对Al-4.5Mg-0.6Mn铝合金流变应力影响显著，流变应力随变形温度的升高而降低，随应变速率的增加而增大。建立了Zener-Hollomon参数的本构方程，可对Al-4.5Mg-0.6Mn铝合金在不同应变速率和变形温度下的峰值流变应力进行预测，发现本构方程预测值与流变应力实测值吻合较好。

关键词

Al-4.5Mg-0.6Mn铝合金，热压缩变形，高温流变应力，本构方程

1. 引言

Al-Mg 系具有中等强度，加工性能和焊接性能好，耐腐蚀性能良好，广泛应用于交通运输、建筑装饰、瓶罐制造等领域[1]-[3]。金属塑性变形过程中的流变应力值决定了加工时设备所需施加的载荷值及能耗，金属高温变形行为受合金化学成分、变形温度、变形程度和应变速率的影响，是变形体内部显微组织演变的综合反映[4]-[6]。近年来物理模拟和数值模拟技术在金属热加工领域获得了越来越广泛的应用，为了提高金属热加工数值模拟精度，合理制定材料热加工工艺，必须了解合金高温变形时的流变行为及精确的流变应力值[7]-[10]。为此，本文作者以热粗轧态 Al-4.5Mg-0.6Mn 铝合金为研究对象，采用高温圆柱体等温压缩法研究其流变行为，建立该合金的高温流变应力本构方程，为 Al-Mg 系合金热加工工艺的制定提供参考。

2. 实验材料与方法

实验用材料为已完全再结晶的 Al-4.5Mg-0.6Mn 合金热粗轧板材，板材经机加工成 $\Phi 10 \times 15$ mm 的圆柱体试样。在 Gleeble-3800 热模拟机上进行等温压缩实验，压缩温度分别为 300℃、400℃、500℃，应变速率分别为 0.01、0.1、1、10 s⁻¹，变形量为 50%，压缩时试样两端添加石墨片并均匀涂上润滑剂(75% 石墨 + 20% 机油 + 5% 硝酸三甲苯脂)以减小摩擦的影响。加热温度为 5℃/s，保温 2 min，变形后立即水淬，以保留其高温变形组织。

3. 实验结果与分析

3.1. 流变应力曲线特征

Al-4.5Mg-0.6Mn 铝合金在不同变形条件下的流变应力曲线如图 1 所示。从图 1 可以看出，峰值流变应力随着应变速率的增加而增大，随着变形温度的升高而降低。在一定变形条件下，Al-4.5Mg-0.6Mn 铝合金热压缩真应力随着应变的增加而迅速增大，当应变量超过一定数值时，流变应力随应变的增大变化非常小，应力值趋于稳定，甚至在一些变形条件下，随着应变量继续增大流变应力出现降低现象。总体上来说，图 1 所示的真应力 - 应变曲线可以划分为加工硬化阶段、过渡阶段和稳态阶段 3 个部分。在开始变形阶段，位错不断增殖，并且相互之间交错，随着位错密度的增加，回复的驱动力增大，使得动态

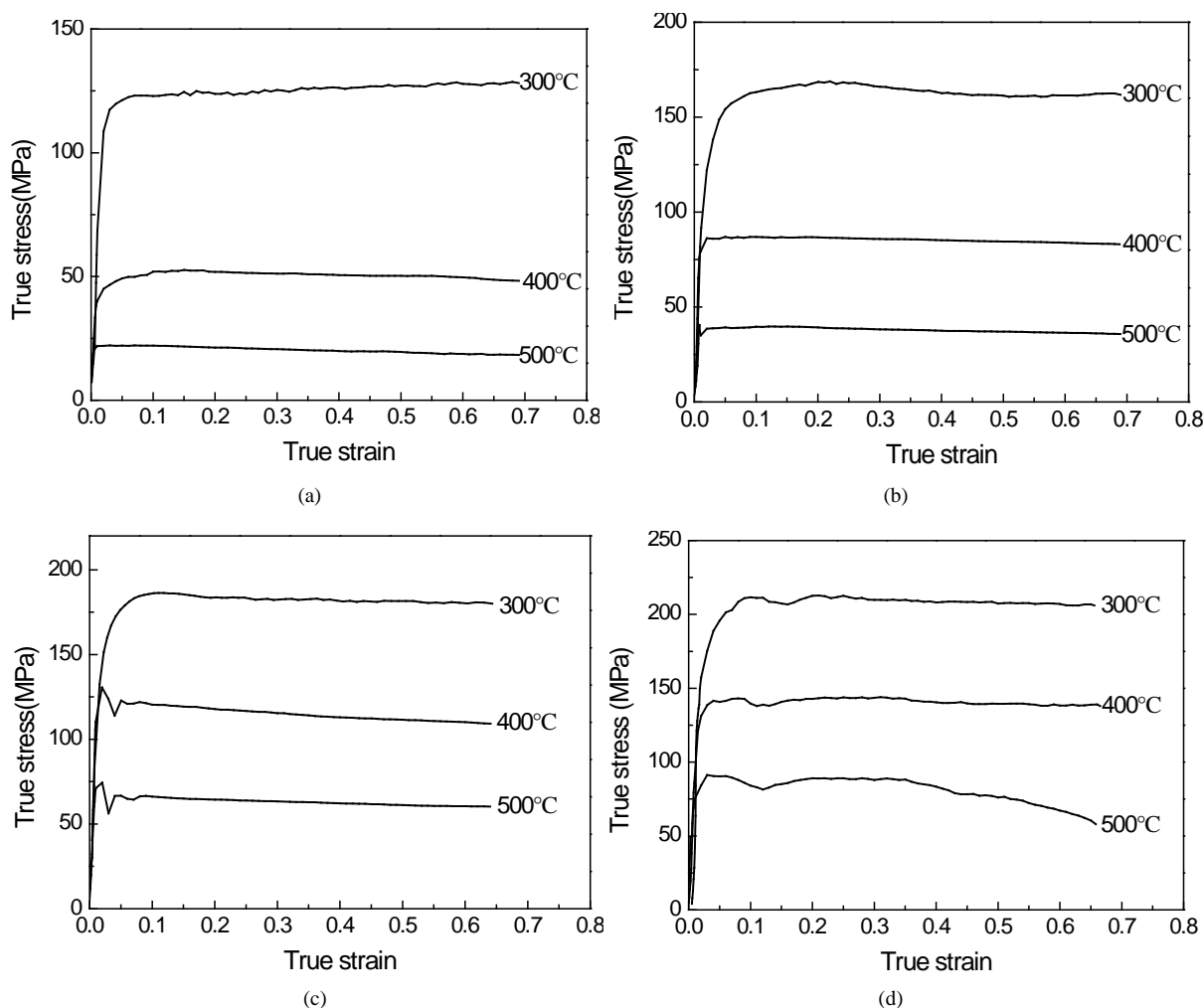


Figure 1. True stress-true curves of Al-4.5Mg-0.6Mn aluminum alloy under different deformation conditions: (a) $\dot{\epsilon} = 0.01 \text{ s}^{-1}$; (b) $\dot{\epsilon} = 0.1 \text{ s}^{-1}$; (c) $\dot{\epsilon} = 1 \text{ s}^{-1}$; (d) $\dot{\epsilon} = 10 \text{ s}^{-1}$
图 1. Al-4.5Mg-0.6Mn 铝合金不同变形条件下的真应力 - 真应变曲线: (a) $\dot{\epsilon} = 0.01 \text{ s}^{-1}$; (b) $\dot{\epsilon} = 0.1 \text{ s}^{-1}$; (c) $\dot{\epsilon} = 1 \text{ s}^{-1}$; (d) $\dot{\epsilon} = 10 \text{ s}^{-1}$

回复的速率也相应增大。当应变量增加到某一个值时，加工硬化和回复软化达到动态平衡，此后的位错密度将保持稳定，这时流变应力也保持不变。值得注意的是，当变形条件为 500°C ，变形速率为 10 s^{-1} 时，应力达到峰值后出现明显下降现象，这是发生了动态再结晶的表现。由图 1 还可知，在同一应变速率下，随变形温度的增大，真应力水平明显下降；在同一变形温度下，随应变速率增加，真应力水平升高，说明 Al-4.5Mg-0.6Mn 铝合金在该试验条件下具有正的应变速率敏感性。

3.2. 本构方程模型

材料高温变形过程中流变应力、变形速率、变形温度间的关系可用如下关系式进行描述[11] [12]:

$$\dot{\epsilon} = Af(\sigma)\exp[-Q/(RT)] \quad (1)$$

其中： A 为与温度无关的常数； Q 为热变形激活能； R 为摩尔气体常数； T 为变形温度； $f(\sigma)$ 与应力水平有关的函数。

在低水平应力($\alpha\sigma < 0.8$)下,

$$f(\sigma) = \sigma^n \quad (2)$$

在高水平应力($\alpha\sigma > 1.2$)下,

$$f(\sigma) = \exp(\beta\sigma) \quad (3)$$

整个应力范围内:

$$f(\sigma) = [\sinh(\alpha\sigma)]^n \quad (4)$$

式(2)~(4)中, α 、 β 、 n 均为与温度无关的常数, 且 $\alpha = \beta/n$ 。

在所有应力状态下, 式(1)可表示为:

$$\dot{\epsilon} = A [\sinh(\alpha\sigma)]^n \exp[-Q/(RT)] \quad (5)$$

应变速率和变形温度关系可用 Z 参数表示[9] [10]:

$$Z = \dot{\epsilon} \exp[Q/(RT)] = A [\sinh(\alpha\sigma)]^n \quad (6)$$

当变形温度 T 或应变速率 $\dot{\epsilon}$ 不变时, 流变应力 σ 及其对数与应变速率 $\dot{\epsilon}$ 的对数($\ln\sigma - \ln\dot{\epsilon}$, $\sigma - \ln\dot{\epsilon}$, $\ln[\sinh(\alpha\sigma)] - \ln\dot{\epsilon}$), 流变应力 σ 的对数与温度 T 的倒数($\ln[\sinh(\alpha\sigma)] - 1/T$), 流变应力 σ 的对数与 Z 的对数($\ln[\sinh(\alpha\sigma)] - \ln Z$)之间均满足线性关系。图 2~5 所示为实验合金在不同变形条件下各关系的线性回归图, 由各图中直线斜率的平均值可求得本构方程所需常数, 计算得到 $A = 1.1336 \times 10^{13} \text{ s}^{-1}$, $\alpha = 0.0102 \text{ MPa}^{-1}$, $n = 6.1407$, $Q = 178.962 \text{ KJ/mol}$ 。

将求得的 A 、 α 、 n 、 Q 等参数代入式(5), 可得 Al-4.5Mg-0.6Mn 铝合金的流变应力本构方程为:

$$\dot{\epsilon} = 1.1336 \times 10^{13} [\sinh(0.0102\sigma)]^{6.1407} \exp[-178962/(RT)] \quad (7)$$

为了检测上述本构方程的准确性, 根据求得的 Al-4.5Mg-0.6Mn 铝合金峰值流变应力本构方程, 将不同变形条件下的材料参数代入式(7)中计算出不同变形条件下的流变应力。

图 6 所示为实测流变应力曲线和本构方程计算值的对比。可以看出实测曲线与本构方程预测曲线吻合较好。为了更清晰的评价实测值与计算值之间的误差情况, 可引入以下误差分析表达式:

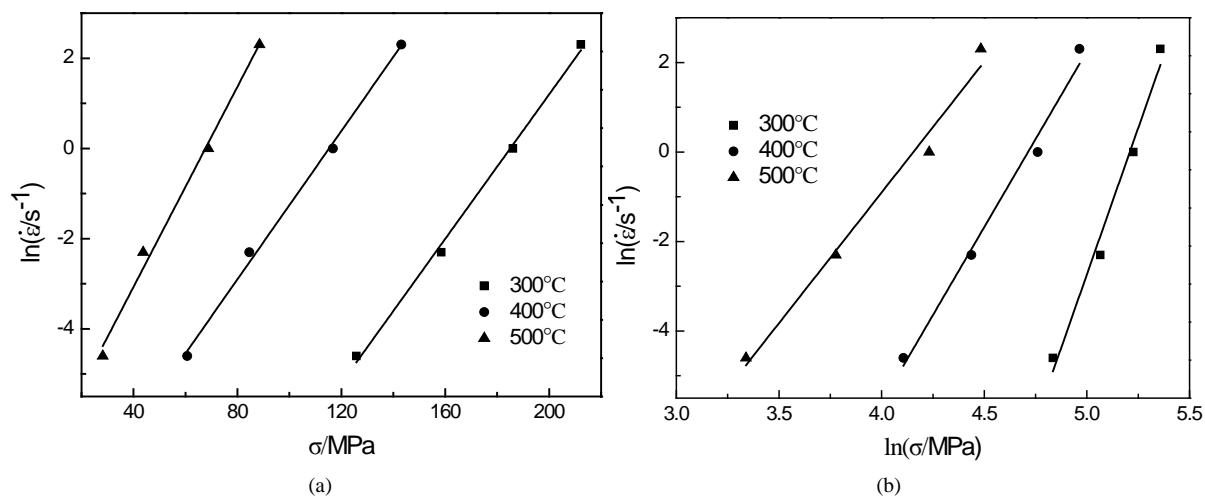


Figure 2. Relationship between strain rate and flow stress for Al-4.5Mg-0.6Mn alloy: (a) $\ln\dot{\epsilon}-\sigma$; (b) $\ln\dot{\epsilon}-\ln\sigma$
图 2. Al-4.5Mg-0.6Mn 铝合金的应变速率与流变应力的关系: (a) $\ln\dot{\epsilon}-\sigma$; (b) $\ln\dot{\epsilon}-\ln\sigma$

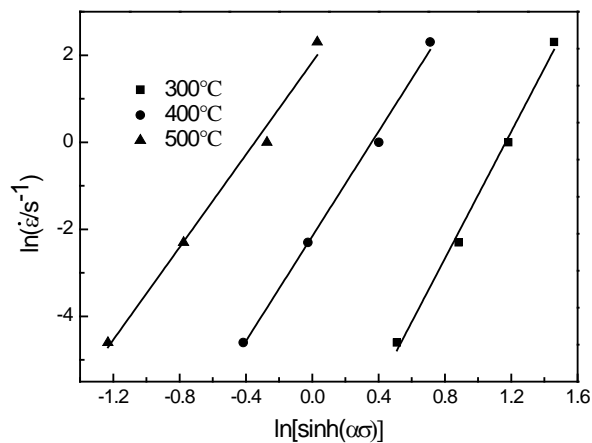


Figure 3. Relationships between flow stress and rate of Al-4.5Mg-0.6Mn alloy

图 3. Al-4.5Mg-0.6Mn 铝合金流变应力与应变速率的关系

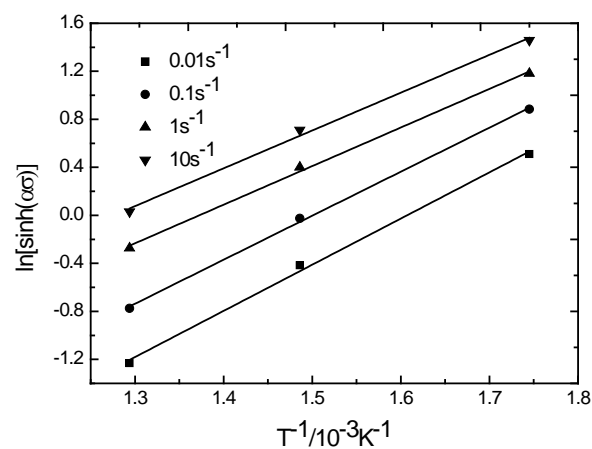


Figure 4. Relationships between flow stress and deformation temperature of Al-4.5Mg-0.6Mn alloy

图 4. Al-4.5Mg-0.6Mn 铝合金流变应力与变形温度的关系

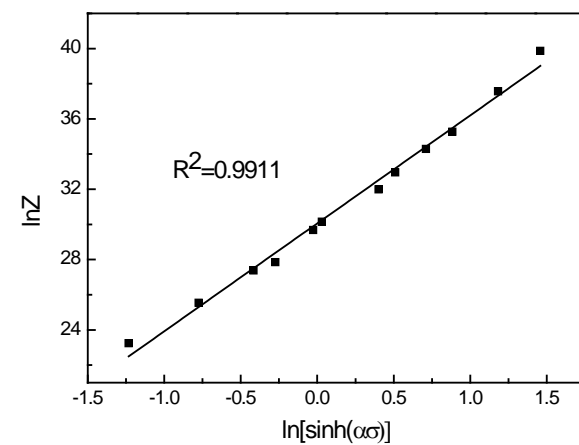


Figure 5. Relationship between flow stress and Zener-Hollomon parameter

图 5. Al-4.5Mg-0.6Mn 铝合金流变应力与 Z 参数的关系

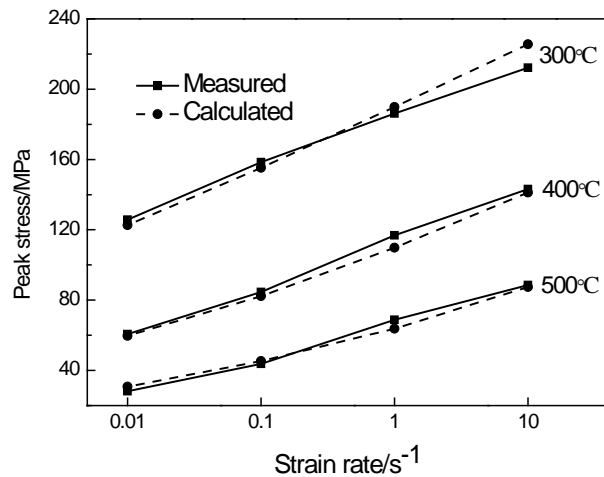


Figure 6. Comparison between measured and calculated value of Al-4.5Mg-0.6Mn aluminum alloy at train rate of 1 s^{-1}

图 6. Al-4.5Mg-0.6Mn 铝合金在应变速率为 1 s^{-1} 时实测应力与计算应力值的对比

$$R_{err} = (\sigma_E - \sigma_C) / \sigma_E \times 100\% \quad (8)$$

$$R_{ave} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left| \frac{\sigma_{Ei} - \sigma_{Ci}}{\sigma_{Ei}} \right| \times 100\% \quad (9)$$

式中： σ_E 为流变应力实测值； σ_C 为本构方程计算值； R_{err} 为相对误差值； R_{ave} 为平均相对误差值。

根据式(11)和(12)的计算可得，本构方程的计算值与实测流变应力值的平均相对误差仅为 3.85%，且误差值都在 10% 以下。

4. 结论

1) Al-4.5Mg-0.6Mn 铝合金峰值应力随应变速率的增大而增加，随着变形温度的升高而降低；真应力-应变曲线可以划分为加工硬化阶段、过渡阶段和稳态阶段 3 个部分；当变形温度为 500°C ，变形速率为 10 s^{-1} 时，合金发生了动态再结晶。

2) 可以用包含 Z 参数的双曲正弦函数关系来描述 Al-4.5Mg-0.6Mn 铝合金高温变形时的流变应力行为，其材料常数 A、 α 、n 和 Q 分别为 1.1336×10^{13} 、 0.0102 MPa^{-1} 、6.1407 和 178.962 KJ/mol 。

基金项目

广西科技计划项目(编号：桂科重 14122001-5、1598001-2)。

参考文献 (References)

- [1] 齐国栋, 杨鑫, 师雪飞, 左德运. 退火制度对冷轧和温轧的 5083 铝合金组织性能的影响[J]. 轻合金, 2010(9): 70-72.
- [2] Lin, S.P., Nie, Z.R., Huang, H. and Li, B.L. (2010) Annealing Behavior of a Modified 5083 Aluminum Alloy. *Materials and Design*, **31**, 1607-1612. <http://dx.doi.org/10.1016/j.matdes.2009.09.004>
- [3] Lee, Y.B., Dong, H.S., Park, K.-T. and Nam, W.J. (2004) Effect of Annealing Temperature on Microstructures and Mechanical Properties of a 5083 Al Alloy Deformed at Cryogenic Temperature. *Scripta Materialia*, **51**, 355-359. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scriptamat.2004.02.037>
- [4] 徐清波, 陶友瑞, 米芳. 5083 铝合金高温流变本构关系研究[J]. 矿冶工程, 2013, 33(5): 124-126.

-
- [5] Raghunathan, N. and Sheppard, T. (1989) Microstructural Development during Annealing of Hot Rolled Al-Mg Alloys. *Materials Science and Technology*, **5**, 542-547. <http://dx.doi.org/10.1179/mst.1989.5.6.542>
- [6] Jonas, J.J. and Shllars, C.M.T. (1969) Strength and Structure under Hot Working Conditions. *International Metallurgical Reviews*, **15**, 22-32.
- [7] 吴文祥, 孙德勤, 曹春艳, 等. 5083 铝合金热压缩变形流变应力行为[J]. 中国有色金属学报, 2007, 17(10): 1667-1671.
- [8] Carmon, R., Zhu, Q., Sellars, C.M. and Beynon, J.H. (2005) Controlling Mechanisms of Deformation of AA5052 Aluminum Alloy at Small Strains under Hot Working Conditions. *Materials Science and Engineering: A*, **393**, 157-163. <http://dx.doi.org/10.1016/j.msea.2004.11.010>
- [9] McQueen, H.J. and Belling, J. (2000) Alloy 5005: Hot Workability in Relation to Other Al-Mg Alloys. *Materials Science Forum*, **331**, 539-544. <http://dx.doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.331-337.539>
- [10] Zhang, H., Peng, D.-S., Yang, L.-B. and Meng, L.-P. (2001) Flow Stress Equation for Multipass Hot-Rolling of Aluminum Alloys. *Journal of Central South University of Technology*, **8**, 13-17. <http://dx.doi.org/10.1007/s11771-001-0017-4>
- [11] Li, Y.Y., Wei, D.D., Hu, J.D., Li, Y.H. and Chen, S.L. (2012) Constitutive Modeling for Hot Deformation Behavior of T24 Ferritic Steel. *Computational Materials Science*, **53**, 425-430. <http://dx.doi.org/10.1016/j.commatsci.2011.08.031>
- [12] Wu, B., Li, M.Q. and Ma, D.W. (2012) The Flow Behavior and Constitutive Equations in Isothermal Compression of 7050 Aluminum Alloy. *Materials Science and Engineering: A*, **542**, 79-87. <http://dx.doi.org/10.1016/j.msea.2012.02.035>