

铝锂合金管材热挤压变形特性^①

章四琪 沈 键* 张新民 尹志明 卢 斌

(中南工业大学材料科学与工程系, 长沙 410083)

(* 北京有色金属研究总院, 北京 100088)

周文标 王学书

(东北轻合金加工厂, 哈尔滨 150060)

摘 要 研究了 2091 铝锂合金的管材热挤压变形时的动态回复与再结晶, 挤压变形参数与挤压后亚晶尺寸间的关系。结果表明, 铝锂合金热挤压时的主要恢复机制为动态回复和动态再结晶, 但动态再结晶需在一定条件下才能被激活。温度是决定亚晶大小的最敏感参数。线性回归表明, 温度补偿应变速率 Z 和亚晶尺寸 d 之间满足 Hall-Petch 关系。

关键词 铝锂合金 热挤压 回复 再结晶

2091 铝锂合金的密度和弹性模量分别比常规铝合金的低 8% 和高 15%。该合金经 T6 和 T651 处理析出 S' (Al_2CuMg) 相和 δ' (Al_3Li) 相, 因而均具有相当高的强度和韧性^[1]。该合金的板材、型材已用于飞行器的构件, 挤压管作为飞行器舱段的研究也越来越受到重视^[2, 3]。

铝合金热挤压和其他热变形过程, 如热压缩, 热扭转和高温蠕变等, 均属于热激活过程, 这一点已被众多研究者所证实。激活速率控制机制主要为刃型位错的攀移和/或割阶化螺型位错的运动, 应力-应变速率-温度三者之间的关系和高温蠕变时非常相似, 即满足 Arrhenius 方程^[4-6]。此外, 由于铝合金热变形时主要发生动态回复, 而动态再结晶只在某些条件下才发生^[7-11], 因此热变形后其组织(如亚晶大小)与稳态流变时的流变应力相对应, 即相同的变形条件下决定了材料在变形后具有相同的组织^[7, 8, 10]。由此可根据变形条件和组织之间的关系对组织和力学性能进行预测, 或根据所需组织或性能设计变形条件。

本文旨在研究 2091 铝锂合金在热挤压时

的回复与再结晶情况以及变形条件和亚晶尺寸之间的关系, 以期为该合金变形组织和力学性能的预测研究提供参考。

1 材料与试验方法

实验用 2091 铝锂合金的成分为 Al-2.04 Li-1.84 Cu-1.79 Mg-0.14 Zr。合金在石墨坩埚中进行熔炼, 氩气保护下浇注成 d 100 mm $\times$ 220 mm 铸锭。铸锭均匀化后加工成 d 95 mm $\times$ 100 mm 空心锭坯, 在 6.3 MN 立式挤压机上挤成不同规格的管材, 挤压条件和再结晶情况列如表 1。挤压时平均等效应变速率按下式计算:

$$\dot{\epsilon} = \frac{6V(D_C^2 - D_M^2) \tan \Phi}{D_C^3 - 3D_M^2(D_C - D_T) - D_T^3} \cdot \ln R \quad (1)$$

式中 V 为挤压柱塞速度, D_C 挤压筒直径, D_M 为挤压针直径(管内径), D_T 为管外径, R 为挤压比, Φ 为挤压模模角。再结晶情况用光学显微镜观察热挤压管材横断面来判别。用 H-800TEM 观察横截面的亚晶形貌, 用计数

① 收稿日期: 1996-01-25; 修回日期: 1996-06-28 章四琪, 男, 51 岁, 教授

法^[10]计算亚晶平均直径 d , 亚晶计数不少于 100 个。根据方程:

$$\dot{\varepsilon} = A [\sinh(\alpha\sigma)]^n \exp\left(-\frac{\Delta H}{RT}\right) \quad (2)$$

$$Z = \dot{\varepsilon} \exp\left(\frac{\Delta H}{RT}\right) = A [\sinh(\alpha\sigma)]^n \quad (3)$$

利用线性回归求解 d^{-1} 与 $\ln Z$ 之间的关系。二式中, Z 为温度补偿应变速率, σ 为流变应力, R 为气体常数, ΔH 、 α 、 A 和 n 为与材料有关的材料常数^[4~6]。这里取这些常数的值分别为:

$$\Delta H = 168.141 \text{ kJ/mol}$$

$$\alpha = 0.022960 \text{ mm}^2/\text{N}$$

$$n = 3.245710$$

$$A = 2.259705 \times 10^{10} \text{ s}^{-1}$$

2 结果与讨论

2.1 动态回复与动态再结晶

图 1 为管材热挤压态组织, 表明 2091 铝锂合金在高 $\ln Z$ 值条件下未发生再结晶, 而在低 $\ln Z$ 值条件下则几乎全部发生了再结晶。

高 $\ln Z$ 挤压后动态回复的亚晶呈竹节状, 其内位错密度较高(图 1(c)), 而低 $\ln Z$ 挤压后亚晶几乎呈等轴状, 且亚晶粒更为完整, 大小相差较大, 其内还有少量蜷线位错(图 1(d))。

铝锂合金象常规铝合金一样, 在热变形时同时存在加工硬化和回复软化两个相矛盾的过程, 硬化是由应变引入位错产生的, 软化则主要来自动态回复。热挤压加工时, 变形优先在易滑移方向的一个滑移系开始, 该滑移系的滑移带阻碍第二个滑移系的位错运动, 使其重新排列成墙, 从而产生拉长的亚晶粒带。若应力和温度足够高, 位错大量攀移, 导致多个滑移系被激活, 此时滑移面难以确定, 则得到等轴亚晶粒。这一过程即动态回复过程^[12]。同时, 由于热激活, 扩展位错之间相互反应, 螺型位错发生交滑移, 刃型位错攀移, 位错网络反复

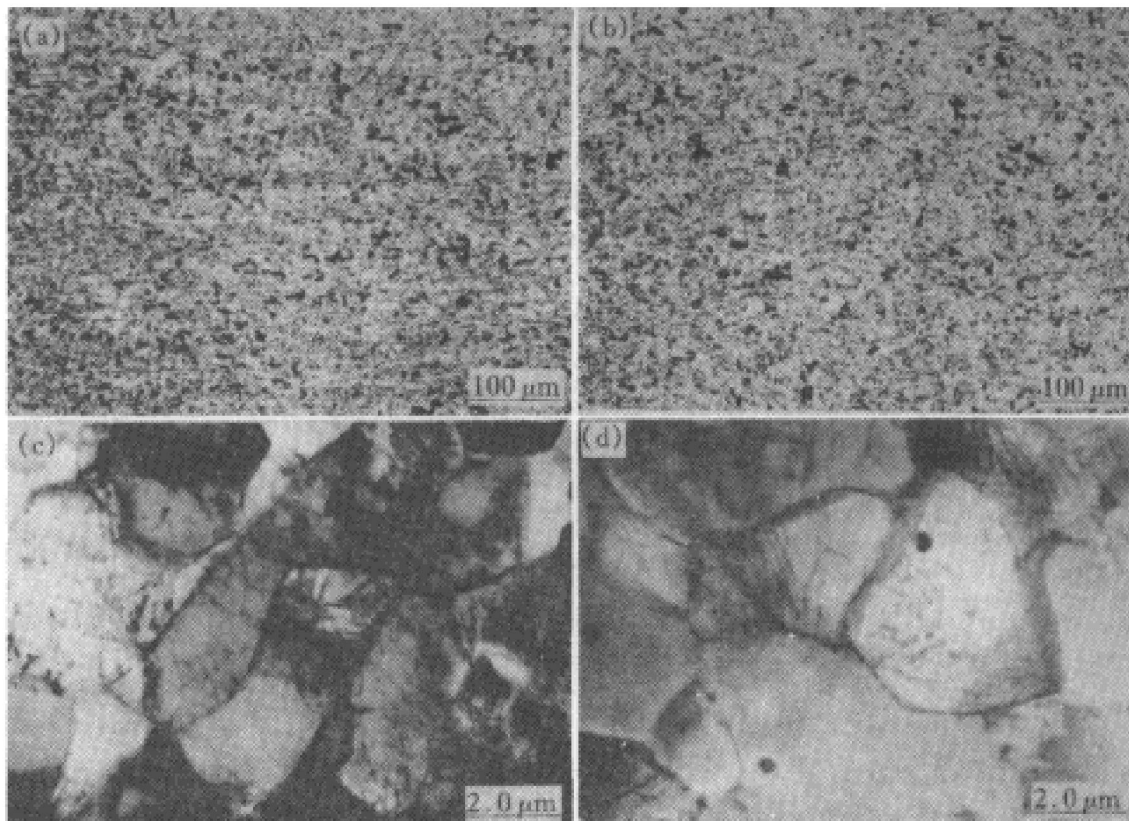


图 1 不同挤压条件($\ln Z$)下的管材显微组织

(a) $-\ln Z = 31.305$; (b) $-\ln Z = 27.789$; (c) $-\ln Z = 31.305$; (d) $-\ln Z = 27.465$

相互消毁和重组,即所谓“重复多边形化”^[7],亚晶粒大小保持相对稳定。此时材料流变应力大小也相对稳定,回复软化和应变硬化亦处于一个相对稳定的动态平衡阶段,从而处于稳态流变阶段。随变形温度的升高,原子和空位活动能力增强,位错相消效应更显著,因而亚晶更为完整,亚晶内位错密度降低(图1(d)),动态回复增强。

本研究中由于挤压机柱塞速度很小,绝热温升忽略不计。对于管材挤压来说金属通过锥形变形区时其应变速率逐渐增大,而在模孔处又降为零。变形时在某一段区域内位错的增殖速度大于相消速度,因而真实流变应力也发生相应变化,亚晶内可积蓄足够高的储能而诱发动态再结晶形核。此时的动态再结晶只是一个重复形核和有限长大的过程^[13]。亚晶粒形成后并不继续长大到与其他新晶粒接触,而是保持大小基本不变,直至整个体积内完全再结晶为止。金属流出模孔后还可能发生“准动态再结晶”^[14],即变形时已形成的动态再结晶核心的长大过程。

Sheppard 等^[7, 11]认为,发生动态再结晶需满足一定的条件:

$$\ln Z = \ln[\dot{\epsilon} \exp(\frac{\Delta H}{RT})] \leq C \quad (4)$$

式中 C 为与材料有关的经验常数。满足此关系式材料热变形时才发生动态再结晶,否则只发生动态回复。由附表数据可以看出,2091铝锂合金发生动态或准动态再结晶的临界条件为:

$$\ln Z \leq 28.7 \quad (5)$$

与此相对应的动态再结晶温度

$$T_{DR} = \frac{\Delta H}{R \cdot \ln(Z/\dot{\epsilon})} \quad (6)$$

当 $\dot{\epsilon} = 0.1 \text{ s}^{-1}$ 时, $T_{DR} \doteq 380 \text{ }^{\circ}\text{C}$; $\dot{\epsilon} = 10.0 \text{ s}^{-1}$ 时, $T_{DR} \doteq 493 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 。低 $\ln Z$ 挤压的管材在 $525 \text{ }^{\circ}\text{C}/40 \text{ min}$ 固溶处理后出现粗晶环(图2),表明此条件下挤压时已发生初始再结晶。

2.2 变形条件和亚晶尺寸的关系

众所周知,金属热塑性变形时,与决定变形特征的位错及其移动距离有关的等效应力和

变形条件之间满足如式(2)所示的热激活关系。因此,这种关系与材料的机械性能也有着密切的关系,而热挤压材料的机械性能好坏在一定程度上可以用亚晶形貌、大小及分布来描述。亚晶大小也因此与变形条件联系起来。

附表 铝锂合金管材挤压条件

管材 编号	加热温度 / $^{\circ}\text{C}$	平均等效应 变速率 $\bar{\epsilon} / \text{s}^{-1}$	挤压比 R	$\ln Z$ / s^{-1}	再结晶 情况
1	420	0.307	19.9	28.002	大部分
2	360	0.525	20.1	31.305	未
3	420	0.248	25.5	27.789	全部
4	380	0.255	24.5	29.604	未
5	350	0.335	16.0	31.362	未
6	420	0.308	22.9	28.005	部分
7	380	0.105	22.1	28.717	极少量
8	410	0.117	31.3	27.465	全部
9	340	0.578	16.8	32.443	未

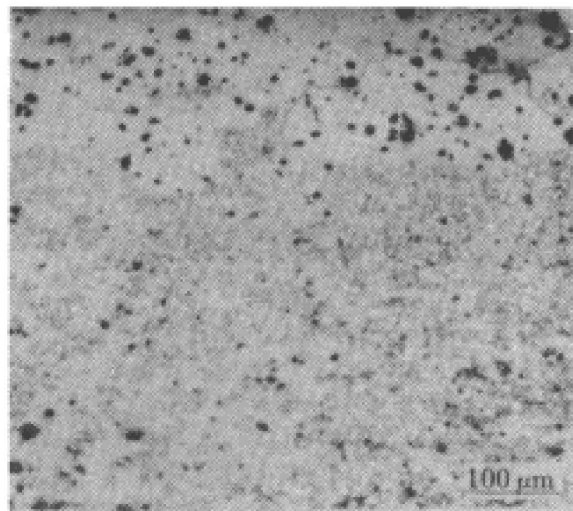


图2 低 $\ln Z$ 挤压的管材(3[#])

固溶处理后外壁出现粗晶环

如前所述,在热变形过程中,亚晶结构是动态回复的一种表现特征,它是位错在基体中滑移、交滑移和攀移而形成的,并在位错增殖和相消速度达到动态平衡时处于稳定状态。而热变形实质上应是位错从位错墙或亚晶内部的位错源长出并通过滑移、交滑移和攀移穿过一个或多个亚晶粒并最终在界面处结合和相消的过程^[9]。因此,亚晶结构与变形条件密切相关,其尺寸随温度升高和应变速率降低(即 Z

值降低) 而增大, 但对温度更敏感。高温时位错很容易重排、变少, 形成简单而紧凑的网络, 温度越高, 位错重排能力越强。因此, 随挤压温度升高, 管材中亚晶尺寸增大, 确切地说, 随 $\ln Z$ 值降低, 亚晶尺寸增大。对大多数铝合金来说, 两者之间通常满足如下关系^[10, 11]:

$$d^{-m} = a + b \ln Z \quad (7)$$

$$\text{或 } d^{-m} = a' + b' \ln(Z/A) \quad (8)$$

一般取 $m = 1$, 即得 Hall-Petch 关系:

$$d^{-1} = a + b \ln Z \quad (9)$$

对 2091 铝锂合金挤压管来讲, 通过线性回归得 d 与 $\ln Z$ 的关系式

$$d^{-1} = -0.173 + 0.1646 \ln Z \quad (10)$$

这种线性关系曲线如图 3 所示, 可见 d 与 $\ln Z$

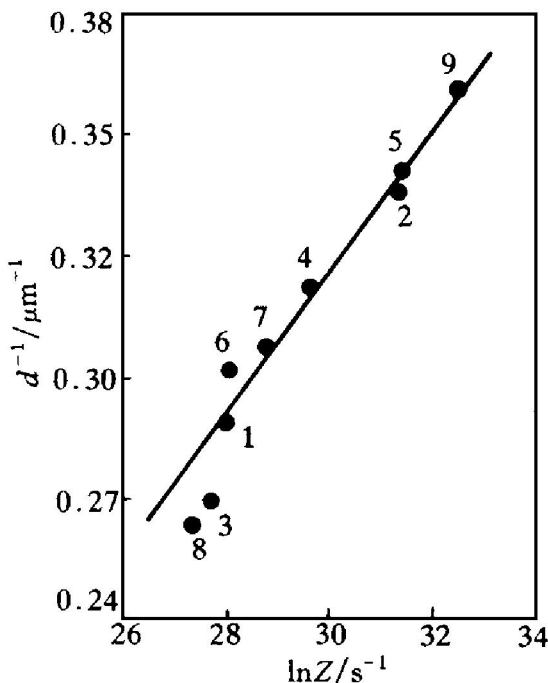


图 3 亚晶粒尺寸 d 与挤压变形条件 $\ln Z$ 的关系

* 数字为管材编号

间的线性关系吻合得较好, 但发生再结晶后偏离直线关系的程度增大, 如 3 和 8 号管材。

3 结论

(1) 2091 铝锂合金管材热挤压时同时存在动态回复和动态再结晶两种恢复机制, 发生动态再结晶的临界条件为 $\ln Z \leq 28.7$ 。

(2) 挤压后管材中亚晶粒直径 d 和 Z 值间满足 Hall-Petch 关系:

$$d^{-1} = -0.173 + 0.1646 \ln Z$$

参考文献

- 1 Meyer P, Dubois B. In: Proc 3rd Int Al-Li Conf. London: Institute of Metals, 1986: 37.
- 2 Davis J R *et al.* Metals Handbook, 10th edition, V. 2. The Materials Information Society, ASM International, USA, 1993: 178.
- 3 沈健, 章四琪, 张新民, 卢斌. 中国有色金属学报 1994, 4(4): 65.
- 4 Wong W A, Joras J J. Trans TMS of AIME, 1968, 242: 2271.
- 5 Castle A F, Sheppard T. Met Technol, 1976, 10: 454.
- 6 Raybould D, Sheppard T. J Inst Met, 1973, 101: 45.
- 7 Raybould D, Sheppard T. J Inst Met, 1973, 101: 65.
- 8 林均品, 安希丹, 雷廷权. 北京科技大学学报, 1993, 14(3): 262.
- 9 Wong W A, McQueen H J, Jonas J J. J Inst Met, 1967, 95: 129.
- 10 Clode M P, Sheppard T. Mater Sci Technol, 1993, 9(4): 313.
- 11 Sheppard T, Raybould D. J Inst Met, 1973, 101: 73.
- 12 Poirier J P 著, 关德林译. 晶体的高温塑性变形. 大连: 大连理工大学出版社, 1989: 75.
- 13 Sellars C M. Dynamic Recrystallization, Met Form, 1981, 4(1-2): 75.
- 14 Ojaic R A P, Jonas J J. J Iron Steel Inst, 1972, 4: 256.

HOT EXTRUSION BEHAVIOR OF 2091 Al-Li ALLOY

Zhang Siqu, Shen Jian*, Zhang Xinmin, Yin Zhiming, Lu Bin

Department of Materials Science and Engineering,

Central South University of Technology, Changsha 410083

* *Beijing General Research Institute for Nonferrous Metals, Beijing 100088*

Zhou Wenbiao, Wang Xueshu

Northeast Light Alloy Fabrication Plant, Harbin 150060

ABSTRACT Dynamic recovery and dynamic recrystallization of 2091 Al-Li alloy tube during hot extrusion were studied. The relationship between extrusion processing parameters and subgrain size was demonstrated by introduction of temperature-compensation strain rate Z and linear regression. The results showed that both dynamic recovery and dynamic recrystallization are main restoration mechanism of hot extrusion of the alloy, however, dynamic recrystallization can only be activated under some conditions; temperature is the most sensitive parameter to the subgrain size of the alloy.

Key words Al-Li alloy hot extrusion recovery recrystallization

(编辑 朱忠国)

(上接 90 页)

3 Porter F C, Stoneman A M, Thichorpe R G. *Trans IMF*, 1988, 66(1): 30.

4 F. Lynch Richard. *J of Metals*, 1987, 39(8): 39- 41.

5 Chen Z W, Kennon N F, See J B, Barter M A. *J of Metals*,

1992, 44(1): 22- 26.

6 See J B, In *Proc 2nd Asian Pacific General Galvanizing Conf*, Kobe: JGA, 1994, 58- 62.

7 Foct J, Reumont G, Dauphin J Y, Perrot P. In: *Proc Inter Conf on Zinc and Zinc Alloy Coated Steel Sheet*. Tokyo: JISI, 1989: 443- 448.

INFLUENCE OF ADDING Ni IN ZINC BATH ON THE MICROSTRUCTURE OF HOT DIP GALVANIZED COATING

Lu Jintang, Chen Jinhong, Xu Qiaoyu, Zeng Guangliang, Liu Lixia

Institute of Materials Science,

South China University of Technology, Guangzhou, 510641

ABSTRACT The microstructure of hot dip galvanized coatings of the steel sheet containing 0.22% Si by dipping in several zinc baths containing 0~ 0.3% Ni was studied by using SEM and EPMA. The result showed that, adding 0.07~ 0.12% Ni into the zinc bath, the ζ layer is thinned and the ζ crystal is fined, Ni is rich in the boundary of the columnar crystal of ζ layer and in the η phase in front of the ζ layer. Adding equal to or greater than 0.20% Ni into the zinc bath, some particles of $Zn-Ni-Fe$ intermetallic compound are precipitated in the η layer. The reason that the coating microstructure is changed after adding Ni into the zinc bath is also discussed according to $Zn-Ni-Fe$ ternary diagram.

Key words hot dip Zn-Ni alloy coating hot dip galvanizing Zn-Ni-Fe compound

(编辑 李克敌)