

铝及铝铁合金的加工软化机理^①

李凤珍 刘兆晶 金 铨 俞泽民
(哈尔滨理工大学材料科学与工程系, 哈尔滨 150080)

摘 要 研究了三种纯度的铝及其 Al-2% Fe 合金在室温轧制状态下的加工软化行为及软化机理。试验证明: 99.996% Al 当轧制率为 80% 以上时出现加工软化现象; 99.96% Al 和 99.6% Al 不发生加工软化。用 99.996% Al 配制的 Al-2% Fe 合金当轧制率为 60% 以上时出现加工软化; 用 99.96% Al 配制的 Al-2% Fe 合金当轧制率为 90% 以上时出现加工软化; 用 99.6% Al 配制的 Al-2% Fe 合金不发生加工软化。室温回复是加工软化的主要原因; Fe 有净化铝基体的作用; 弥散的第二相有利于室温回复。

关键词 加工软化 回复 轧制率

研究发现, 铝及其合金在室温压力加工过程中, 当变形量增加到一定程度时, 强度和硬度下降, 即出现了加工软化现象^[1-4]。但对其加工软化规律及产生机理还需要进一步探讨, 以便对铝及其合金塑性变形理论及压力加工成型具有指导作用。本文研究了不同杂质含量的铝及用其配制的 Al-2% Fe 合金的加工软化行为, 并着重对软化机理进行了分析。

1 试样制备及试验方法

1.1 试验材料及试样制备

试验用三种纯铝的化学成分见表 1。

表 1 铝的化学成分(%)

No.	Al 含量	杂质含量(≤)			
		Fe	Si	Fe+ Si	Cu
I	99.996	0.0015	0.0015	-	0.001
II	99.96	0.015	0.015	-	0.005
III	99.6	0.25	0.20	0.36	0.010

用铝铁中间合金按不同比例配制不同含铁量的铝铁合金, 经试验筛选出最佳软化效果的铝铁合金, 其铁含量为 2%。本文的铝铁合金

铁含量均为 2%。

将不同杂质含量的铝及铝铁合金分别经保护熔炼后, 在金属模中铸成 200 mm × 140 mm × 30 mm 的铸锭, 经 673 K, 24 h 均匀化处理后轧制成 6 mm 厚试样, 并进行 1 h 的中间退火。在室温下将 6 mm 试样进行轧制, 轧制率分别为 20%、40%、60%、80%、90%、95%。轧制率的计算方法为 $\Delta d = [(d_0 - d) / d_0] \times 100\%$, 式中 d_0 为轧制前试样厚度, d 为轧制后的试样厚度, Δd 为轧制率。

1.2 硬度的测定及拉伸试验

硬度测定采用 71H 型显微硬度计, 每个试样在不同位置测定 6 点, 取其平均值做为试验数据。拉伸试验在 1-5-2 型万能精密拉伸试验机上进行, 每个轧制率下取 3 个拉伸试样, 将其平均抗拉强度作为该轧制率下的抗拉强度试验数据。

1.3 组织分析方法

金相组织观察用 4X 型金相显微镜, 薄膜试样组织 TEM 分析使用荷兰 PHILIPS 公司制造的 EDAX 型透射电镜。微区成分用电子探针 (EPA) 分析。薄膜试样采用双喷电解减薄, 电解液为 30% HNO₃ + 70% CH₃OH, 电压为 10

① 收稿日期: 1996-02-28, 修回日期: 1996-05-10 李凤珍, 女, 51 岁, 副教授

V, 电流为 200 mA。

2 试验结果与分析

2.1 杂质对纯铝软化行为的影响

从图 1、图 2 可见, 当轧制率超过 80% 以上时, 99.996% Al 硬度和抗拉强度下降, 出现加工软化, 99.96% Al 和 99.6% Al 硬度和抗拉强度却随轧制率增加而提高, 表现加工硬化。

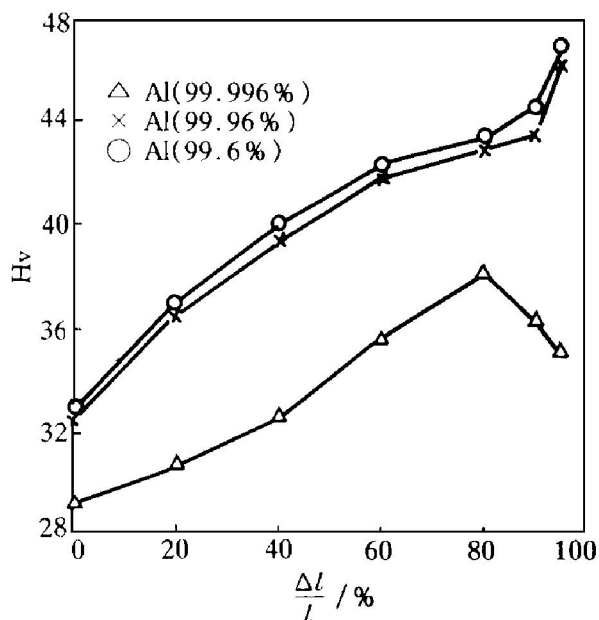


图 1 铝的轧制率与硬度之间的关系曲线

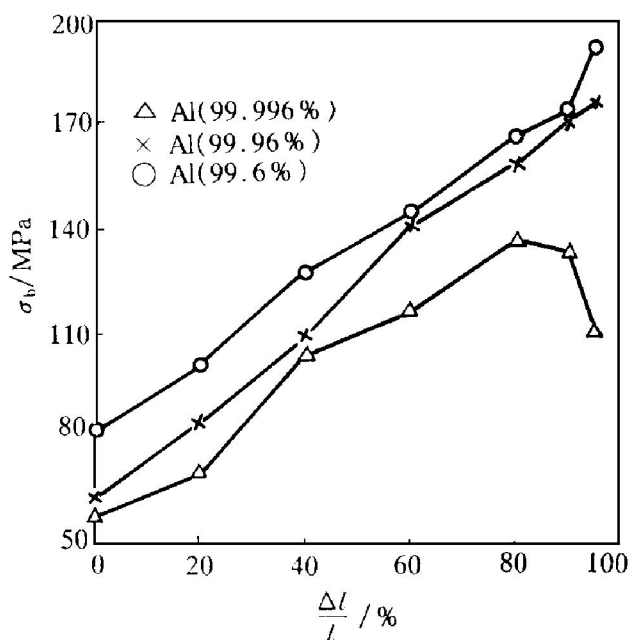


图 2 铝的轧制率与强度之间的关系曲线

图 3 为 99.996% Al 在轧制率为 95% 时发生软化后的电镜照片, 可见亚结构趋于多边化, 形成等轴亚晶, 亚晶内无位错, 位错集中在亚晶界上, 并形成了较清晰的亚晶界。从 99.996% Al(轧制率 95%) 出现软化后的金相观察可见被拉长或压扁的晶粒, 没发生再结晶。图 4 为 99.96% Al(轧制率 95%) 电镜组织照片, 亚结构为大量缠结位错, 并有明显的方向性, 可见没发生回复。

2.2 纯铝软化行为的分析

在变形初期, 99.996% Al 随变形量的增加, 位错急剧增加, 应变能显著增大, 当应变能增大到一定程度时, 可诱发多边化回复, 使应力得到松弛。但这种回复是在继续变形中进行的, 硬化还是软化, 取决于回复作用和继续变形过程中不断产生硬化作用的综合结果^[3]。

铝是面心立方晶格的金属材料, 具有较高的层错能。层错能随其杂质含量的降低而提高^[5]。99.996% Al 杂质含量低, 层错能高, 高层错能晶体中扩展位错窄, 位错能借助交滑移来克服运动时所遇到的障碍, 具有较大的移动性, 随着变形量的增加, 位错不断增殖和运动, 会很快地形成胞状亚结构。当畸变能增加到一定程度时, 在室温下位错即可在弹性应力场的作用下使滑移和交滑移顺利进行, 完成多边化回复, 释放出大量的畸变能, 缓解内应

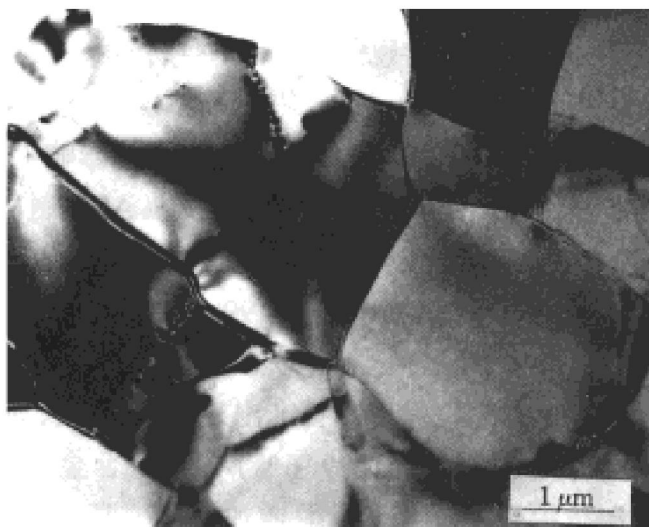


图 3 99.996% Al TEM 照片 (轧制率 95%)

力,使继续变形阻力减小。对 99.996% Al, 当轧制率超过 80% 时, 回复机制起到明显效果, 使软化速率大于硬化速率, 表现出加工软化。

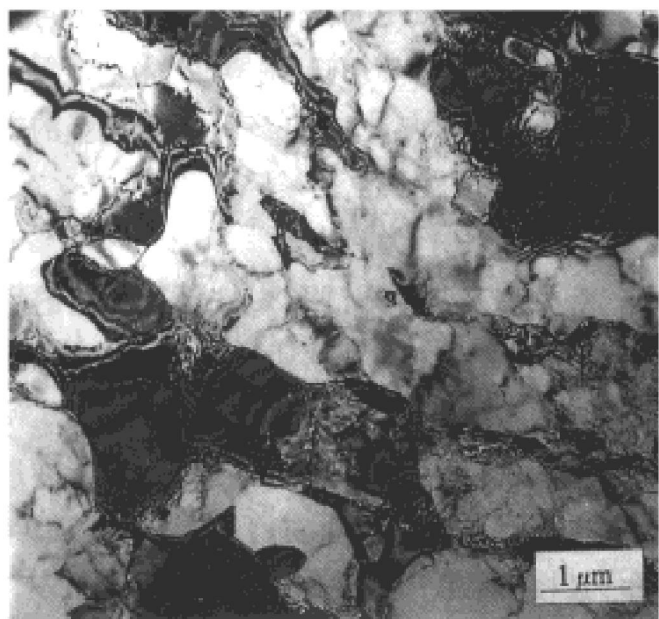


图 4 99.996% Al TEM 照片(轧制率 95%)

对于 99.996% Al 和 99.6% Al, 由于基体中杂质元素含量高, 尤其是形成置换固溶体的杂质元素能显著降低层错能^[6]。层错能低, 在塑性变形时位错易分解成甚宽的扩展位错, 使交滑移困难。由于位错移动性差, 在继续变形中增殖大量位错, 杂乱地排列于晶体中构成复杂的网络, 即使在大量变形时也不倾向于形成胞状亚结构, 不易通过多边化回复释放畸变能, 内应力得不到缓解, 进一步变形阻力加大。在轧制的从始至终, 硬化机制起主导作用, 没有软化行为。

2.3 杂质对铝铁合金加工软化行为的影响

从图 5、图 6 可见, 用 99.996% Al 配制的 Al(99.996%)-2% Fe 合金, 当轧制率超过 60% 时出现明显的软化。用 99.96% Al 配制的 Al(99.96%)-2% Fe 合金, 当轧制率超过 90% 时, 硬度和抗拉强度下降, 出现软化现象。用 99.6% Al 配制的 Al(99.6%)-2% Fe 合金, 硬度和抗拉强度随变形量的增加连续提高, 没发生加工软化。

图 7 所示为用 99.996% Al 配制的 Al

(99.996%)-2% Fe 合金当轧制率为 95% 时的电镜照片, 可见亚结构为粗大等轴状亚晶, 晶内无位错, 有弥散的第二相质点。

图 8 所示为用 99.96% Al 配制的 Al

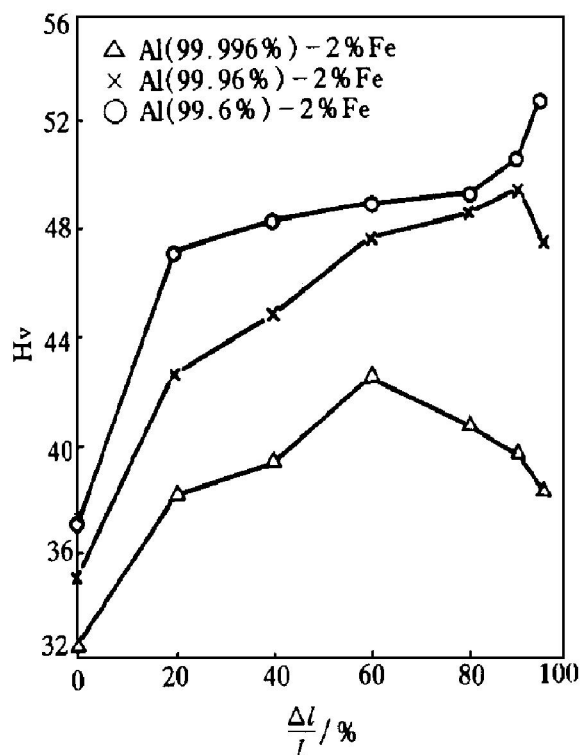


图 5 Al-2%Fe 合金轧制率与硬度之间的关系曲线

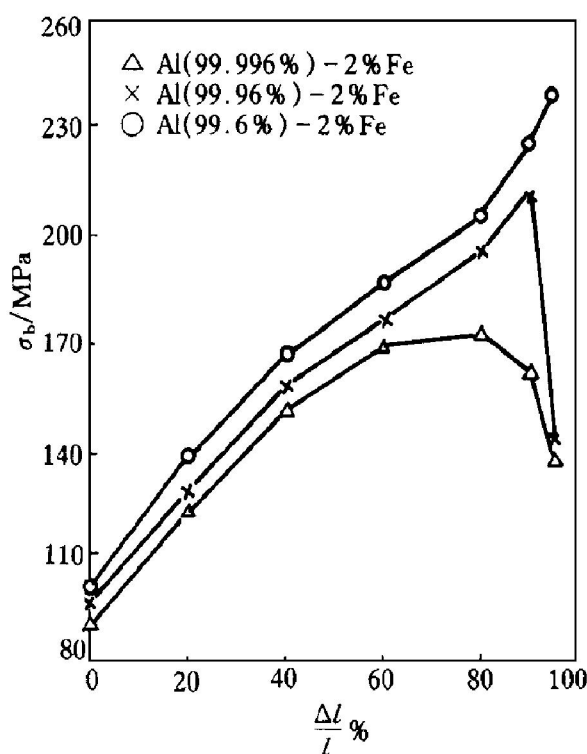


图 6 Al-2%Fe 合金轧制率与强度之间的关系曲线

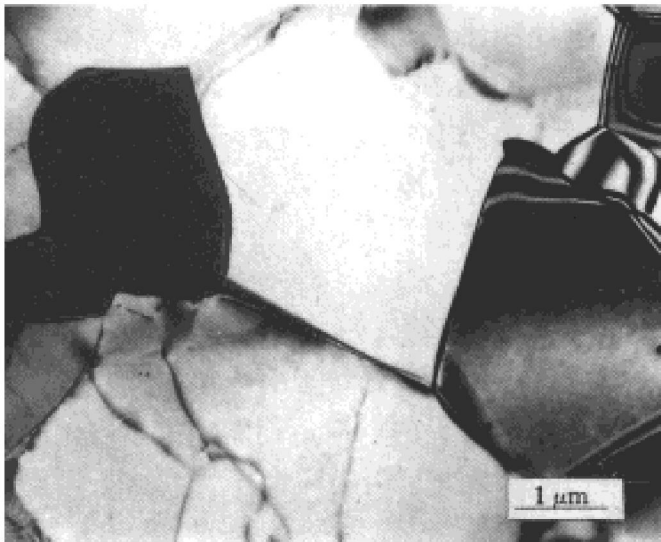


图7 Al(99.996%)-2% Fe 合金 TEM 照片
(轧制率 95%)

(99.96%)-2% Fe 合金当轧制率为 95% 时的电镜照片, 可见亚结构为粗大等轴晶, 晶内几乎看不到位错, 已经发生了较充分的回复。在基体和晶界处还可见到第二相存在。

图9为用 99.6% Al 配制的 Al(99.6%)-2% Fe 合金当轧制率为 95% 时的电镜照片, 可见少部分晶粒有多边化趋势, 非等轴晶有方向性, 亚晶内有大量位错。

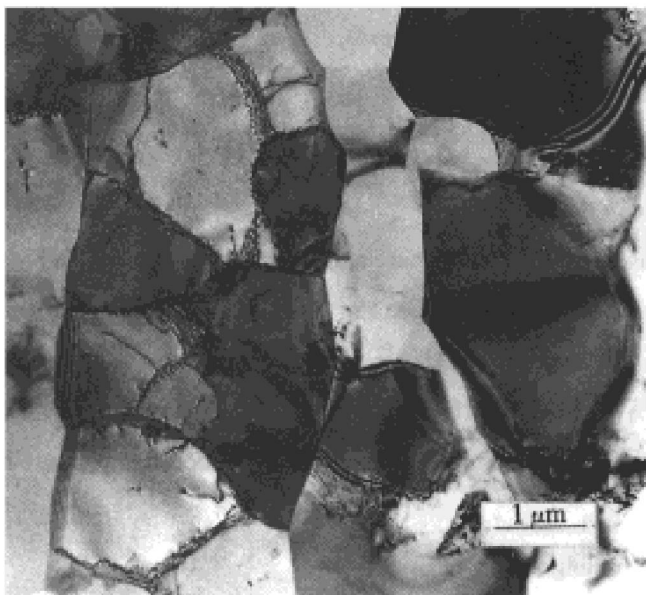


图8 Al(99.96%)-2% Fe 合金 TEM 照片
(轧制率 95%)

图10为 Al(99.96%)-2% Fe 合金当轧制率为 95% 时软化后的基体 EPA 能谱线。谱线表明: 基体上没有其它元素的能谱峰。

图11为 Al(99.96%)-2% Fe 合金当轧制率为 95% 时软化后的第二相区域的 EPA 能谱线, 可见除 Al、Fe 能谱峰外还有 Si、Cu 等杂质元素的能谱峰。说明 Si、Cu 等主要杂质元素富集在第二相 Al_3Fe 中。

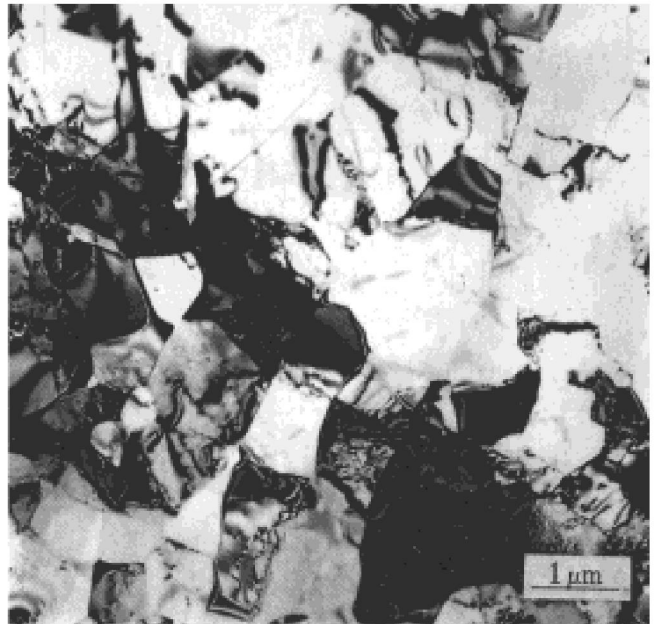


图9 Al(99.6%)-2% Fe 合金 TEM 照片
(轧制率 95%)

2.4 Al-2% Fe 合金加工软化行为分析

用 99.996% Al 和 99.96% Al 配制的 Al-2% Fe 合金, 由 Al-Fe 相图可知, Al 中加入 2% Fe, 这一合金成分在共晶点附近, 因此 Al-2% Fe 合金在熔铸和均匀化处理过程中, Al 与 Fe 及其它杂质元素易形成第二相, 经 EPA 能谱分析, 该第二相主要为 Al-Fe 化合物, 结合相图可确认为 Al_3Fe 相。能谱分析同时发现 Al 中的 Si、Cu 等主要杂质元素富集于 Al_3Fe 第二相中(见图 11)。而基体能谱线没有杂质峰(见图 10)。说明 Al 与 Fe 及其它杂质元素形成的第二相减少了铝基体中杂质元素含量。Fe 的加入起到了净化铝基体的作用。铝的纯度越高, 净化效果越好。净化后的铝基体层错能进一步提高, 有利于多边化回复, 促进软化行为

发生。

Al(99.996%)-2% Fe 合金基体杂质含量

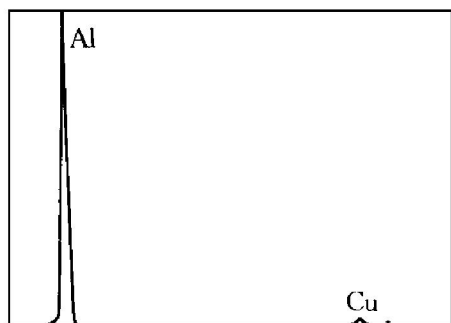


图 10 Al(99.96%)-2% Fe 合金基体 EPA 能谱
(轧制率 95%)

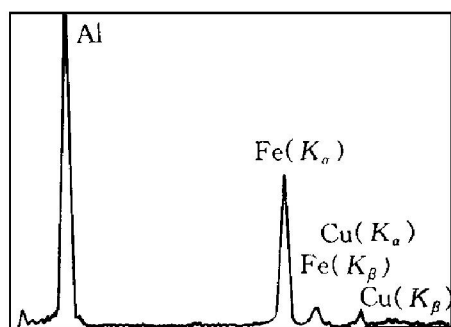


图 11 Al(99.96%)-2% Fe 合金第二相区 EPA 能谱
(轧制率 95%)

低, Fe 的净化作用使铝基体纯度进一步提高, 层错能也得到进一步提高, 多边化回复易进行, 当轧制率达 60% 时即出现软化现象。Al(99.96%)-2% Fe 合金, 基体杂质含量高, 净化后的基体仍有一定量杂质, 层错能得到一定提高, 促使了多边化回复, 当轧制率达 90% 时出现软化现象。

Al(99.6%)-2% Fe 合金基体杂质含量很高, Fe 净化后的基体杂质含量仍较高, 层错能仍很低^[5], 位错运动很困难, 在继续变形过程中产生的足够大的内应力不能通过多边化回复来缓解, 继续变形阻力不断增大, 加工软化现象难以出现。

参考文献

- 1 当摩建, 竹内庸. 轻金属, 1976, (26): 10.
- 2 竹井 见等. 轻金属, 1980, 30: 626.
- 3 金 铨等. 哈尔滨科学技术大学学报, 1993, 17(2): 28.
- 4 刘兆晶等. 哈尔滨科学技术大学学报, 1994, 18(4): 41.
- 5 冯 端等编著. 金属物理. 北京: 科学出版社, 1987: 350.
- 6 葛列里克 S S. 金属和合金的再结晶. 北京: 机械工业出版社, 1985: 63- 65.

WORK-SOFTENING MECHANISM OF PURE ALUMINUMS AND Al-Fe ALLOYS

Li Fengzhen, Liu Zhaojing, Jin Quan, Yu Zemin

Department of Material Science and Engineering,

Harbin University of Science and Technology, Harbin 150080

ABSTRACT The work-softening behaviors and mechanisms of three kinds of pure aluminium and three Al-2% Fe alloys in the rolling state at room temperature were studied. the results show that when the rolling ratio is over 80%, there occurs work-softening in the 99.996% Al but not in the 99.96% Al and 99.6% Al; that there occur work-softening in the Al(99.996%) - 2% Fe alloy when the rolling ratio is over 60% and in the Al(99.96%) - 2% Fe alloy when the rolling ration is over 90%, but not in the Al(99.6%) - 2% Fe alloy. The main reason of work-softening is room-temperature recovery which is caused by the dispersive second phases.

Key words pure aluminiums Al-Fe alloys work-softening rolling ratio recovery

(编辑 彭超群)