

Al-Mg-Mn 和 Al-Mg-Mn-Sc-Zr 合金的再结晶

Recrystallization of Al-Mg-Mn and Al-Mg-Mn-Sc-Zr Alloys

尹志民, 朱大鹏, 姜 锋 (中南大学材料学院, 长沙 410083)
YIN Zhi-min, ZHU Da-peng, JIANG Feng
(School of Material Science and Engineering,
Central South University, Changsha 410083, China)

摘要: 研究了 Al-Mg-Mn 和 Al-Mg-Mn-Sc-Zr 合金冷轧后在不同退火温度下合金的组织性能的变化。结果表明, 与不添加钪和锆的合金相比, 复合添加 0.4%Sc (质量分数) 和 Zr 能使 Al-Mg-Mn 合金的再结晶开始温度提高 120 左右。添加微量 Sc 和 Zr 合金没有明显再结晶终了温度, 在接近熔点时显微组织仍是加工态纤维组织。Sc, Zr 复合添加形成的纳米级的二次 $Al_3(Sc, Zr)$ 相质点, 对位错和亚晶界有强烈的钉扎作用, 再结晶难以形核和长大, 从而有效地抑制冷轧后退火过程中的再结晶。

关键词: 钪; 锆; Al-Mg-Mn 合金; 再结晶
中图分类号: TG146.2 文献标识码: A 文章编号: 1001-4381 (2004) 06-0003-04

Abstract: The change of Al-Mg-Mn and Al-Mg-Mn-Sc-Zr alloys' structures and properties after cold-rolling at different annealed temperatures was studied. The results show that adding of 0.4% (Sc+ Zr) (mass fraction) can increase the recrystallization temperature by 120 compared with the alloys without minor Sc and Zr. The alloys with minor Sc and Zr have no obvious ending recrystallization temperature, and the microstructure remain fiber structure even at 550 . Combined adding of Sc and Zr can form the second $Al_3(Sc, Zr)$ particles with nanometer size. Those particles can strongly pin dislocation and subgrain boundaries, which effectively inhibit the recrystallization during annealing by inhibiting the nucleation of recrystallization and the growth of subgrains.

Key words: Sc; Zr; Al-Mg-Mn alloy; recrystallization

Al-Mg-Mn 系合金具有中强、低密、耐蚀、可焊的特点, 广泛用于航天、航空、舰船、电子、仪器仪表等行业^[1,2]。微量钪、锆添加到 Al-Mg 基合金中, 可显著提高合金的强度而保留合金高韧、耐蚀、可焊的特点, 是新一代航天、航空、舰船用轻质结构材料^[1~4]。微量钪和锆对 Al-Mg 合金组织和性能的影响已有许多报道^[5~7], 但添加微量 Sc 和 Zr 对 Al-Mg-Mn 系合金再结晶的影响还未有系统的研究。这类合金是非热处理强化的合金, 其工艺是热加工后冷加工, 冷加工后实施稳定化退火。因此, 研究冷加工后退火过程中合金的再结晶行为有实际意义。本工作研究了复合添加微量 Sc, Zr 对不同 Mg 含量的 Al-Mg-Mn 合金再结晶的影响, 研究结果可为这种合金加工——热处理工艺的制订提供理论和实验依据。

1 材料与实验方法

采用铸锭冶金法制备了系列含和不含微量 Sc 和 Zr 的 Al-Mg-Mn 合金, 合金名义成分见表 1。合金熔炼时, 铝、镁以纯金属加入, 锰、钪、锆分别以 Al-Mn,

Al-Sc, Al-Zr 中间合金形式加入。铸锭经均匀化退火、热轧、冷轧成材。为了提高合金的耐蚀性能和焊接性能, 传统的 Al-Mg-Mn 合金冷轧后的板材均需经稳定化退火。为了探讨合金退火过程中的再结晶行为, 采用硬度、拉伸和力学性能测试和显微组织综合评估的方法进行研究。退火温度取 100 到 600 , 退火时间定为 1h。硬度选用 $\phi 2.5mm$ 的钢球, 负荷 62.5kg, 加载时间为 30s。拉伸试样取自板材的轧向, 拉伸速度为

表 1 研究用合金的化学成分 (质量分数/%)
Table 1 The composition of the studied alloys (mass fraction/%)

Alloys	Mg	Mn	Sc+ Zr	Al
Al-2Mg-0.4Mn	2	0.4	-	Balance
Al-2Mg-0.4Mn-0.4 (Sc+ Zr)	2	0.4	0.4	Balance
Al-4Mg-0.4Mn	4	0.4	-	Balance
Al-4Mg-0.4Mn-0.4 (Sc+ Zr)	4	0.4	0.4	Balance
Al-6Mg-0.4Mn	6	0.4	-	Balance
Al-6Mg-0.4Mn-0.4 (Sc+ Zr)	6	0.4	0.4	Balance

2mm/min。金相样品经氟硼酸水溶液电解抛光复膜后用偏光观察。透射电镜样品经机械预减薄后用双喷电解减薄法制备，电解液为 30% 硝酸+ 70% 甲醇溶液，电解减薄温度低于- 25 。透射电子显微组织的观察在 H-800 透射电镜上进行。

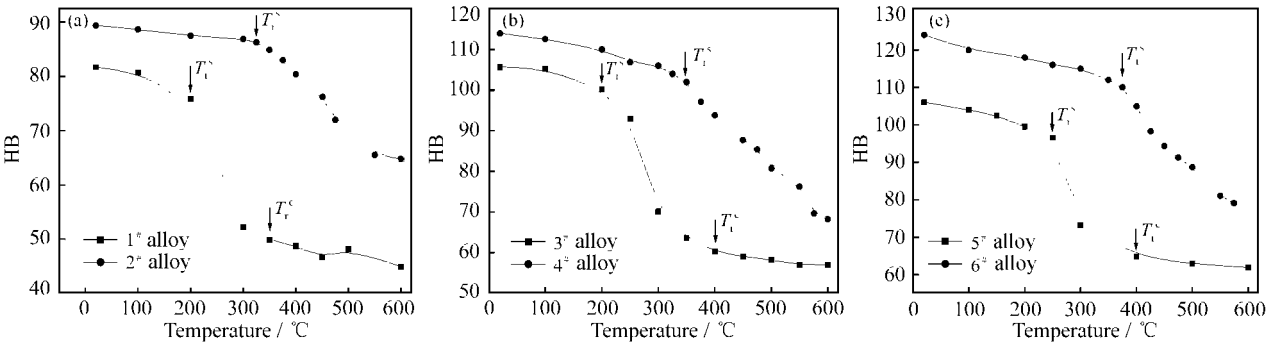


图1 退火温度对研究合金冷轧板材硬度的影响

Fig. 1 The effect of annealing temperature on the hardness of cold rolled plate

表 2 退火过程中合金的再结晶起始温度 T_i^s 和终了温度 T_f^s

Table 2 The starting and ending recrystallization temperature of the studied alloy during annealing

Number	1#	2#	3#	4#	5#	6#
$T_i^s /$	200	325	200	350	250	375
$T_f^s /$	350	-	400	-	400	-

Note: “-” means no obvious ending recrystallization temperature

图 1 结果表明：第一，随退火温度升高，开始阶段合金硬度平缓下降，随后硬度急剧下降，之后硬度下降趋于平缓，不含 Sc 和 Zr 的 1[#]，3[#]，5[#] 合金有明显的再结晶起始温度和终了温度；第二，合金的硬度随 Mg 含量增加而相应提高，Mg 含量对合金的再结晶温度有一定的影响，但影响不大；第三，添加 Sc 和 Zr 的 2[#]，4[#] 和 6[#] 合金没有明显再结晶终了温度。

2.2 退火温度对合金拉伸力学性能的影响

研究了退火温度对研究合金拉伸力学性能的影响，作为例子，表 3 列出了不同温度退火下 5[#] 和 6[#] 合金的拉伸力学性能。

表 3 的结果表明：研究合金冷加工后退火处理，随着退火温度的升高，抗拉强度和屈服强度逐渐减小，而延伸率升高。此外，在 Mg 含量相同的情况下，未添加 Sc 和 Zr 的合金在高温下的性能与冷轧态相比有大幅度的下降，合金中加入微量的 Sc 和 Zr，合金在较高的温度下仍保持较高的强度。

2.3 不同退火温度下合金的金相显微组织

研究了不同退火温度下合金的金相组织及其变化，作为例子，图 2 列出了 1[#] 和 2[#] 合金在 250，350 和 550 的金相组织。

2 实验结果

2.1 冷轧退火后合金再结晶温度的确定

合金冷轧后在不同温度下退火 1h，硬度与退火温度的关系见图 1。合金的再结晶起始温度和终了温度见表 2。

表 3 不同温度退火条件下 5[#] 与 6[#] 合金板材拉伸力学性能

Table 3 Tensile properties of different annealed alloy plates

Parameter	5 [#] (Al-6Mg-0.4Mn)			6 [#] (Al-6Mg-0.4Mn-0.4(Sc+Zr))		
	σ_b / MPa	$\sigma_{0.2} / \text{MPa}$	$\delta / \%$	σ_b / MPa	$\sigma_{0.2} / \text{MPa}$	$\delta / \%$
Cold rolled	423	375	5.2	480	455	4.6
130 / 1h	387	303	8.8	450	371	8.8
250 / 1h	374	262	12.2	436	327	9.2
340 / 1h	312	147	22.4	415	300	13.5
500 / 1h	318	147	23.6	396	246	14.3

图 2 的结果表明，不加 Sc 和 Zr 的合金，250 / 1h 退火，纤维状晶粒之间出现了少量的再结晶晶粒，350 / 1h 退火，纤维状组织消失，代之以等轴的再结晶组织，550 / 1h 退火，晶粒显著粗化，添加 Sc 和 Zr 的合金，直到 550 / 1h 高温退火，纤维状组织间才出现部分再结晶晶粒，但纤维状组织依然清晰可见，表明合金还没有发生完全的再结晶。这个结果与硬度法测试的结果是一致的。

2.4 不同退火温度下合金的透射电子显微组织

研究了不同退火温度下合金的电子显微组织及其变化，作为例子，图 3 给出了 5[#] 合金在冷轧态，250，350 和 6[#] 合金在冷轧态，350，550 退火 1h 的透射电子显微组织。比较图 3a 和图 3b 可以看出，冷轧态合金晶粒呈明显的纤维状，合金经过冷轧后，晶粒内部产生了大量的位错缠结。未添加微量 Sc 和 Zr 的 5[#] 合金，250 / 1h 退火后晶内位错密度大大降低，位错移到胞壁处形成低能态的亚晶界。350 / 1h 退火时，晶粒内部位错消失，再结晶过程完成，晶

界上还出现平衡的第二相。添加微量 Sc 和 Zr 的 6[#] 合金, 350 / 1h 退火后晶粒内部位错密度减少, 位错向胞壁处运动形成明显的胞状组织; 550 / 1h 退火时,

亚晶界被弥散分布的第二相粒子钉扎, 难以运动, 所以合金在高温时只发生回复过程, 只发生了部分再结晶。

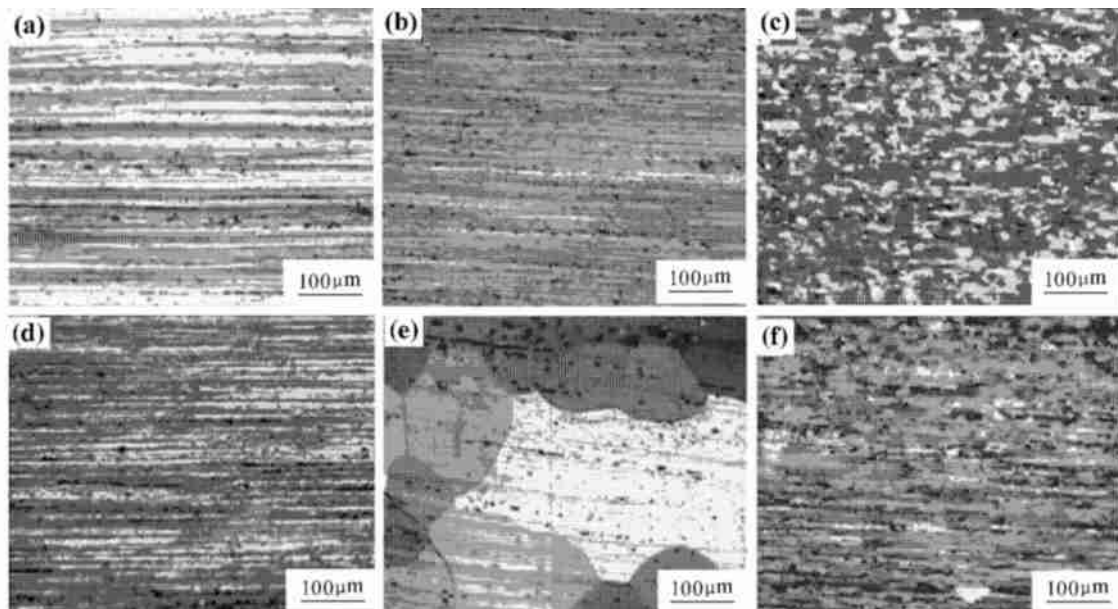


图 2 不同退火温度下 1[#] 和 2[#] 合金的金相显微组织 (a) 1[#] 合金 250 / 1h;

(b) 2[#] 合金 250 / 1h; (c) 1[#] 合金 350 / 1h; (d) 2[#] 合金 350 / 1h; (e) 1[#] 合金 550 / 1h; (f) 2[#] 合金 550 / 1h

Fig. 2 Optical microstructure of the studied alloys at different annealed condition

(a) alloy 1[#], 250 / 1h; (b) alloy 2[#], 250 / 1h; (c) alloy 1[#], 350 / 1h;

(d) alloy 2[#], 350 / 1h; (e) alloy 1[#], 550 / 1h; (f) alloy 2[#], 550 / 1h

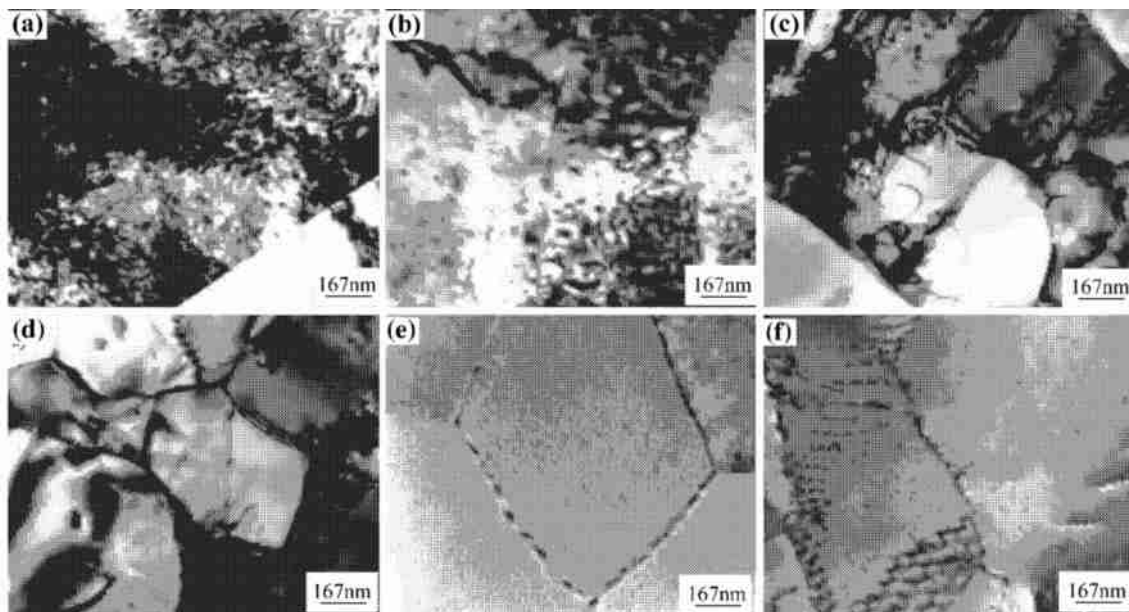


图 3 不同处理态合金的电子显微组织

(a) 5[#] 合金, 冷轧态; (b) 6[#] 合金, 冷轧态; (c) 5[#] 合金, 250 / 1h 退火;

(d) 6[#] 合金, 350 / 1h 退火; (e) 5[#] 合金, 350 / 1h 退火; (f) 6[#] 合金, 550 / 1h 退火

Fig. 3 TEM microstructure of the studied alloys at different annealed condition

(a) alloy 5[#], cold-rolled; (b) alloy 6[#], cold-rolled; (c) alloy 5[#], 250 / 1h;

(d) alloy 6[#], 350 / 1h; (e) alloy 5[#], 350 / 1h; (f) alloy 6[#], 550 / 1h

