

文章编号: 1673-9469 (2018) 03-0097-04

doi:10.3969/j.issn.1673-9469.2018.03.019

## 中温轧制对 Al-Cu-Mg-Ag 耐热铝合金组织与抗腐蚀性能的影响

刘平, 刘晓艳, 崔振华, 高飞, 郑立允

(河北工程大学材料科学与工程学院, 河北邯郸 056038)

**摘要:** 通过晶间腐蚀和剥落腐蚀性能测试, 对经过不同中温轧制变形的 Al-Cu-Mg-Ag 合金的抗腐蚀性能进行研究, 并通过金相分析和透射电子显微分析等对其机理进行探讨。结果表明, 采用合适的中温轧制变形后, 合金的抗腐蚀性能在不同程度上得到提高。随着变形量的增加, 晶内析出相发生变形并向晶界移动, 导致晶间无沉淀析出带变窄, 合金的腐蚀通道变窄, 抗晶间腐蚀性能得到提高。另一方面, 沿着轧向变长的晶粒会降低合金的剥落腐蚀性能, 导致变形量较小时 (10%~50%) 合金的抗腐蚀性能得到提高, 而较大的变形量 (80%) 会降低合金的抗剥落腐蚀性能。

**关键词:** 耐热铝合金; 中温轧制; 腐蚀性能; 微观组织

**中图分类号:** TG174.3

**文献标志码:** A

## Effects of rolling at intermediate temperature on the microstructure and corrosion resistance of Al-Cu-Mg-Ag heat-resistance Al alloy

LIU Ping, LIU Xiaoyan, CUI Zhenhua, GAO Fei, ZHENG Liyun

(Hebei University of Engineering, College of Materials Science and Engineering, Handan 056038, China)

**Abstract:** The corrosion resistance of Al-Cu-Mg-Ag alloy was studied by intergranular corrosion test and exfoliation corrosion test. The mechanism was discussed by metallographic analysis and transmission electron microscopy. The results show that, the corrosion resistance of the alloy can be enhanced by appropriate rolling deformation. With increasing the deformation amount, the strengthening phases deform and move to the grain boundaries, which leads to a narrower precipitation free zone (PFZ). The corrosion channel narrows and the corrosion resistance of the alloy increase. On the other hand, the elongated grains along the rolling direction can decrease the exfoliation resistance of the alloy. As a result, the corrosion resistance of the alloy with a relative smaller deformation amount (10~50%) is increased, and that of the alloy with a larger deformation amount (80%) is decreased.

**Key words:** heat-resistance Al alloy; rolling at intermediate temperature; corrosion resistance; microstructure

Al-Cu-Mg 系变形耐热铝合金, 由于轻质、高强度和良好的耐热性被广泛应用于航空航天领域。在 Al-Cu-Mg 合金中添加微量 Ag 后, 合金的耐热性能进一步提高, 该系合金具有优良的高温性能和热稳定性<sup>[1-2]</sup>。铝合金在使用前经常需要进行一定的变形, 以达到服役条件下形状的要求。变形过程中会产生

大量的位错, 对强化相等微观组织会产生一定的影响, 进而影响其性能。因此对铝合金轧制工艺和变形量等的研究具有重要的工程意义<sup>[3-5]</sup>。

本文对时效态 Al-Cu-Mg-Ag 耐热铝合金进轧制, 主要研究轧制变形对合金组织与抗腐蚀性能的影响, 并结合微观分析探讨其中的机理。为此类合金的轧

收稿日期: 2018-06-27

特约专稿

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (51601053); 河北省高等学校科学技术研究项目 (ZD2018213); 河北省自然科学基金资助项目 (E2017402039, E2017402139)

作者简介: 刘平 (1992-), 男, 山西朔州人, 硕士, 研究方向为高性能铝合金。

制工艺提供理论指导。

## 1 实验材料与方法

本文实验材料为 Al-5.3Cu-0.8Mg-0.5Ag-0.3Mn-0.15Zr, 合金铸锭经 500℃ 均匀化处理 1 h 后在 460℃ 下进行热轧。热轧至 6 mm 后进行 400℃ /2 h 的中间退火后再进行冷轧。最终得到厚度为 3 mm 的薄板。合金板材在 515℃ 下固溶处理 1.5 h 后, 再进行 185℃ /4 h 的时效处理。之后进行轧制变形, 变形前试样均在 185℃ 下保温 15 min。变形量为 0%、10%、35%、50%、65%、80%。之后对试样进行微观组织分析与性能测试。

试样的晶间腐蚀按照 GB/T7998-2005 试验标准进行, 晶间腐蚀结束后, 在试样沿着轧制方向切去 5 mm, 经过磨抛后在金相显微镜下进行腐蚀深度观察与测量。剥落腐蚀按照 ASTM/G 34-01 试验标准进行, 每隔一段时间进行拍照, 根据宏观形貌对其腐蚀性能进行评价。透射电子显微分析试样采用双

喷电解制备, 之后在 ECNAI G2F30 型透射电镜上进行观察。

## 2 实验结果与分析

图 1 给出了合金晶间腐蚀后的横截面照片。从图中可以看出, 经过轧制后, 不同变形量的时效态 Al-Cu-Mg-Ag 均发生了不同程度的晶间腐蚀。为了更加精确的对晶间腐蚀进行评价, 对试样最大腐蚀深度进行测量。未变形的试样腐蚀深度最大, 约为 162 μm, 腐蚀等级为 4。经过轧制后, 不同变形量的试样最大晶间腐蚀深度均变小。通过对比可以看出, 随着变形量的增大, 合金的最大腐蚀深度逐渐减小。变形量为 65% 和 80% 的试样的最大腐蚀深度非常小, 约为 72 μm 和 69 μm, 腐蚀等级均为 3, 抗晶间腐蚀能力明显增强。

图 2 给出了时效态合金经过不同中温轧制后剥落腐蚀 96 h 后的照片。从图中可以看出, 合金均发生了不同程度的剥落。时效态合金表面出现了大量

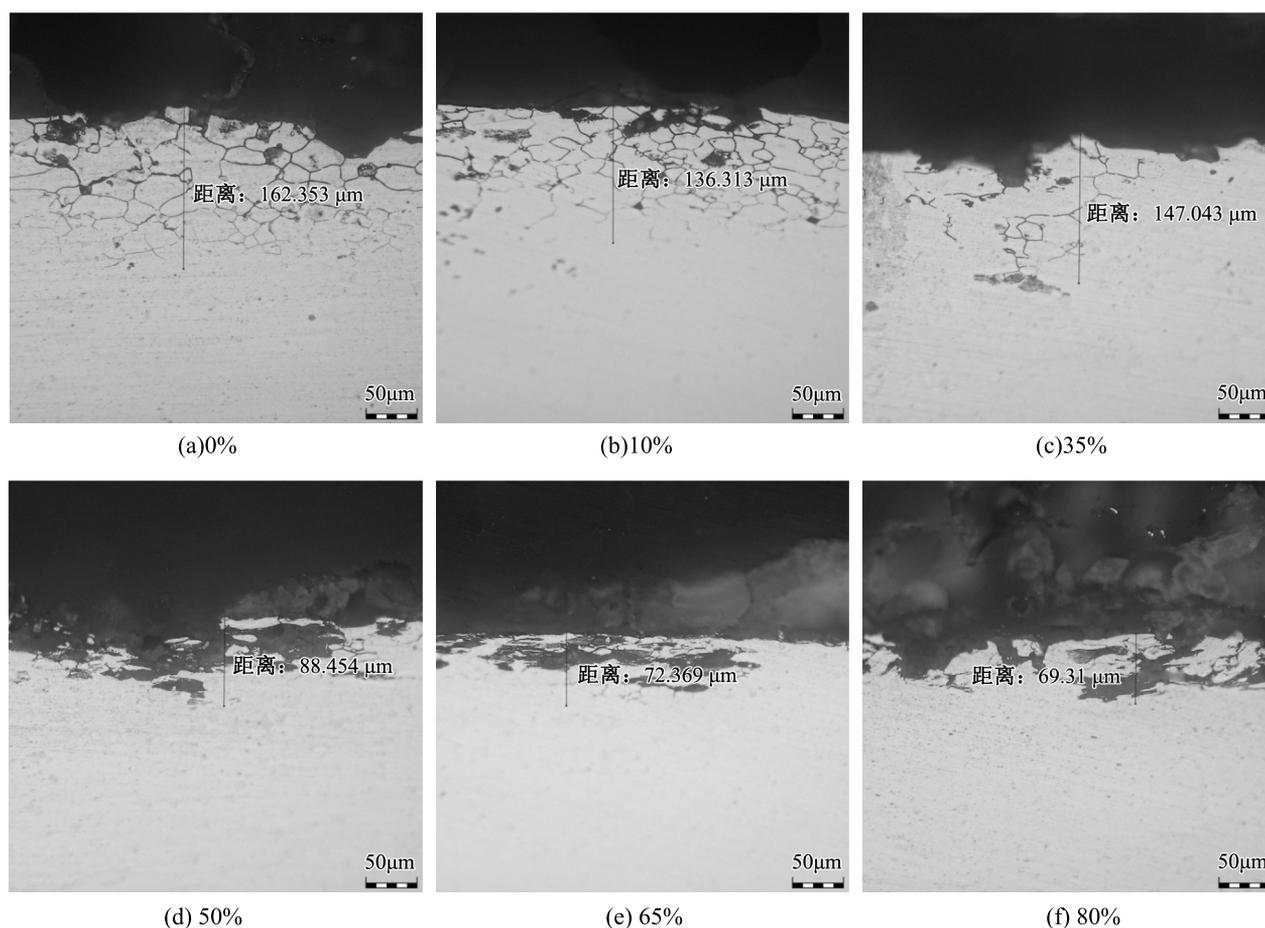


图 1 不同中温轧制后合金的晶间腐蚀照片

Fig.1 Intergranular corrosion pictures of the sample after different rolling at intermediate temperature

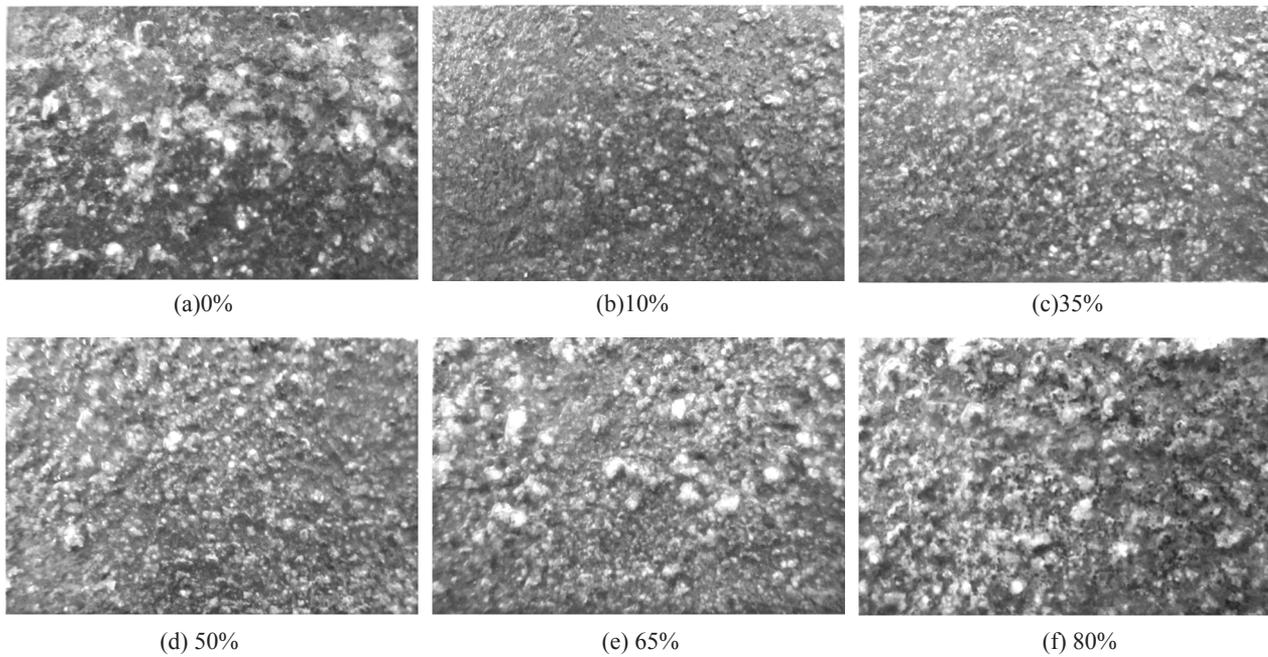


图2 不同中温轧制变形量试样的剥落腐蚀照片

Fig.2 Exfoliation corrosion pictures of the sample after different rolling at intermediate temperature

的剥落。对比图2中剥落腐蚀形貌可以看出,与时效态合金相比,轧制变形量为10%、35%、50%的试样,腐蚀程度明显降低,变形量为65%的试样腐蚀程度与时效态合金相当,变形量进一步增大至80%时,合金的剥落腐蚀程度加深。由此可以推断出,较小的变形量能够提高合金的剥落腐蚀性能,而较大的变形量会降低合金的剥落腐蚀性能。

图3给出了时效态合金经过不同中温轧制后的金相照片。从图3(a)中可以看出,固溶时效处理后,合金发生了再结晶,出现了大量的等轴晶。经过35%轧制后,晶粒明显沿着轧制方向变长;进一步增大变形量至65%,晶粒变形程度进一步增大,形成了沿着轧制方向呈细长结构的晶粒;变形量为80%的试样中出现了大量细小的沿着轧制方向分布的变形晶粒。

图4给出了时效态合金经过不同中温轧制变形后的投射电子显微照片。从图4(a)中可以看出,时效处理后,合金中析出了大量的 $\Omega$ 相,强化相均匀弥散分布在基体中。晶间上的第二相非常粗大,其析出过程中消耗了晶界周围大量的溶质原子,导致晶界附近出现了明显的无沉淀析出带(precipitation free zone, PFZ)。在轧制过程中,晶粒被挤压变形,晶界发生迁移,晶内强化相也在外力作用下向晶界发生移动,晶粒发生变形,并且会导致晶界附近强化相增多,无沉淀析出带变窄(图4(b))。

晶间腐蚀和剥落腐蚀均属于电化学腐蚀,在Al-Cu-Mg-Ag系合金中,电位较低的PFZ在电化学腐蚀过程中充当阳极被腐蚀<sup>[6]</sup>。因此,此类合金晶界形貌对其抗腐蚀性能影响很大。经过中温轧制后,合金的PFZ明显变窄,腐蚀通道变窄,合金的抗晶间腐蚀性能得到提高。因此,随着中温轧制变形量的增大,合金的抗晶间腐蚀性能随着变形量的增大逐渐提高。剥落腐蚀除了受PFZ的影响,还受到变形晶粒的影响。变形量越大,晶粒越细长,单位面积内的晶界就越多,剥落腐蚀中的腐蚀产物越多,侵入力越大,剥落腐蚀越严重。PFZ与变形晶粒形貌二者共同作用使得合金的抗剥落腐蚀性能在较小的变形量下抗腐蚀性能较高,而在较大的变形量下抗腐蚀性能降低。

### 3 结论

合适的中温轧制能够在不同程度上改变Al-Cu-Mg-Ag耐热铝合金的微观组织和抗腐蚀性能。不同变形量的中温轧制均能够提高合金的抗晶间腐蚀性能,随着变形量的增大,合金的抗晶间腐蚀性能逐渐提高。变形量为10%~50%时合金的抗剥落腐蚀性能得到提高,变形量为80%时合金的抗腐蚀性能有所降低。

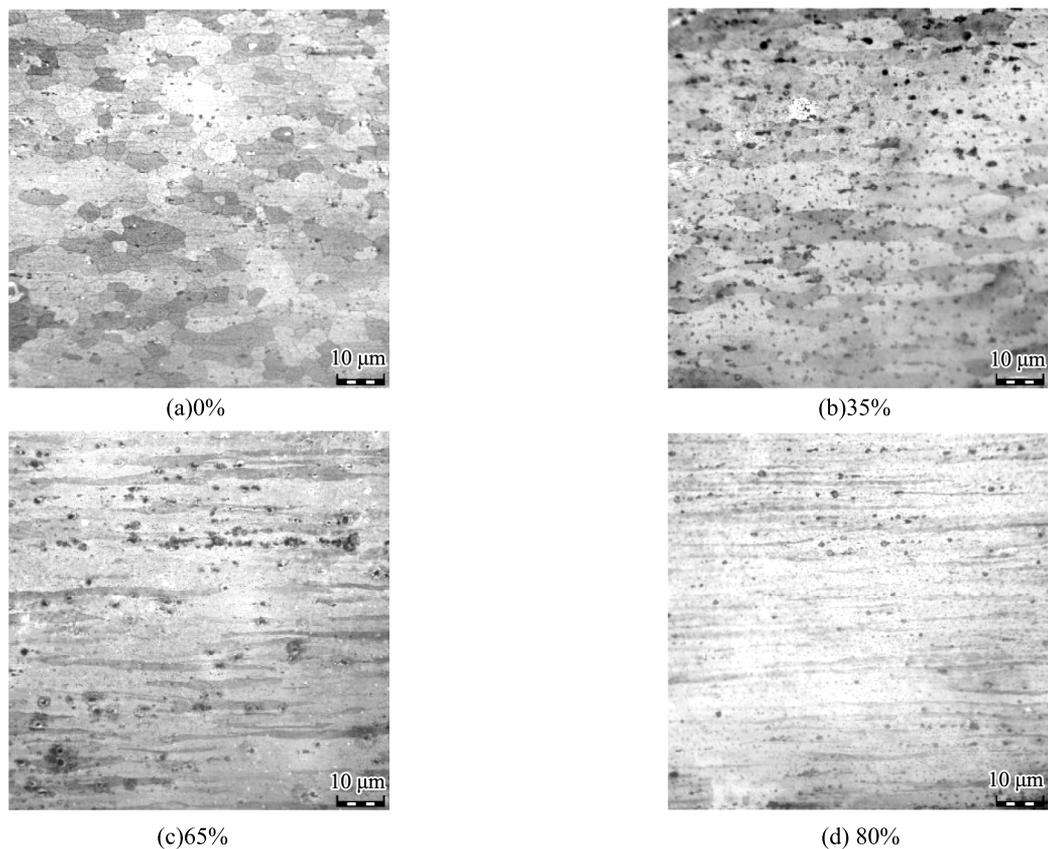


图3 不同中温轧制变形量试样的金相照片

Fig.3 Metallographic pictures of the sample after different rolling at intermediate temperature

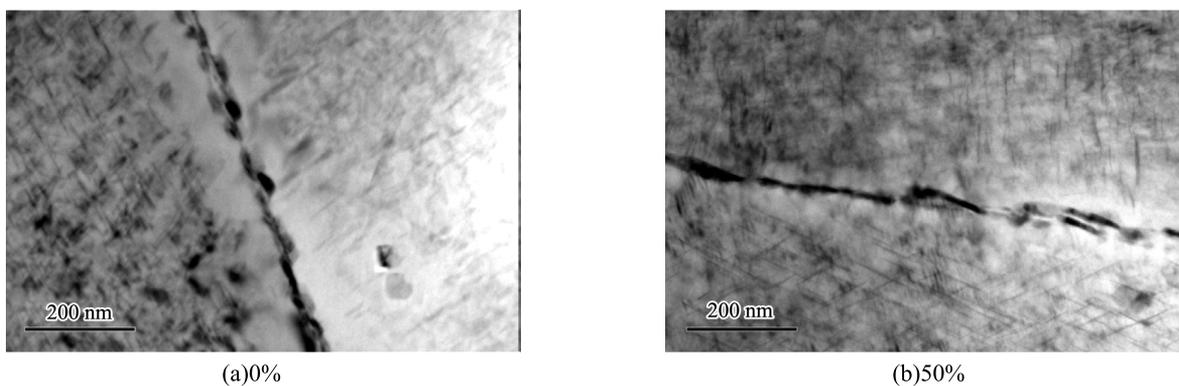


图4 不同中温轧制变形量试样的TEM照片

Fig. 4 TEM pictures of the sample after different rolling at intermediate temperature

## 参考文献:

- [1] 张坤, 戴圣龙, 黄敏, 等. 长时间热暴露对 Al-Cu-Mg-Ag 合金微观组织的影响 [J]. 材料工程, 2007(11): 15-19.
- [2] 张建波, 张永安, 朱宝宏, 等. 多级断续时效对 Al-Cu-Mg-Ag-Zr 合金组织和性能的影响 [J]. 稀有金属, 2011, 35(2): 170-175.
- [3] 刘文胜, 刘东亮, 马运柱, 等. 变形温度对 2A14 铝合金显微组织和力学性能的影响 [J]. 中国有色金属学报, 2015, 25(2): 308-314.
- [4] 杨吟飞, 张峰, 李亮, 等. 7085 铝合金残余应力及加工变形的数值仿真与试验 [J]. 航空学报, 2014, 35(2): 574-581.
- [5] 张新明, 刘胜胆. 航空铝合金及其材料加工 [J]. 中国材料进展, 2013, 32(1): 39-55.
- [6] 齐浩, 刘晓艳, 梁顺星, 等. Al-Cu-Mg-Ag 新型耐热铝合金的抗腐蚀性能 [J]. 中国有色金属学报, 2015, 25(11): 3033-3039.

(责任编辑 王利君)