

冷轧加工率及退火温度对5383铝合金板材力学和腐蚀性能影响研究

陈卫嘉, 黄文辉, 杨雨浩, 苏开列

广西广投柳州铝业股份有限公司, 柳州 广西

收稿日期: 2023年7月2日; 录用日期: 2023年8月1日; 发布日期: 2023年8月11日

摘要

为提升5383铝合金板材力学性能与耐蚀能力, 本文采用力学性能与剥落腐蚀测试的方式, 对比研究了不同压冷轧加工率及退火温度对板材抗拉强度、屈服强度、延伸率以及晶间腐蚀影响规律及机理。研究结果表明: 板材抗拉强度、屈服强度以及晶间腐蚀等级均与冷轧加工率、退火温度均成反比关系, 延伸率随着冷加工率增加而下降, 但随着退火温度增大逐渐增加, 且当退火温度超过225℃后, 加工率大的板材其延伸率增长速率更快。

关键词

5383铝合金, 冷加工率, 退火, 晶间腐蚀, 剥落腐蚀

Effect of Cold Rolling and Annealing Temperature on Mechanical and Corrosion Properties of 5383 Aluminum Alloy Sheet

Weijia Chen, Wenhui Huang, Yuhao Yang, Kailie Su

GIG Liuzhou Aluminum Co., Ltd., Liuzhou Guangxi

Received: Jul. 2nd, 2023; accepted: Aug. 1st, 2023; published: Aug. 11th, 2023

Abstract

In order to enhance the mechanical performance and corrosion resistance of 5383 aluminum alloy

文章引用: 陈卫嘉, 黄文辉, 杨雨浩, 苏开列. 冷轧加工率及退火温度对 5383 铝合金板材力学和腐蚀性能影响研究[J]. 材料科学, 2023, 13(8): 764-769. DOI: 10.12677/ms.2023.138083

sheet, tensile tests and exfoliation corrosion experiments were performed to uncovering the effects of cold working deformation rate and annealing temperature on the tensile strength, yield strength, elongation rate and intergranular corrosion behavior and underlying mechanism. The results indicated the tensile strength, yield strength, and the anti-intergranular corrosion ability decreased for the increase of cold working deformation rate and annealing temperature. Elongation rate was decreased for the growing cold working rate while enhanced for the increasing annealing temperature, and the growing rate of elongation rate becomes bigger for those with larger cold working rate.

Keywords

5383 Aluminum Alloy, Cold Rolling, Annealing, Intergranular Corrosion, Exfoliation Corrosion

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

Al-Mg 合金具有轻质、中等强度、耐腐蚀、易成形、可焊接等优势,广泛应用于海洋工程、船舶、集装箱、新能源汽车等领域[1]。作为不可热处理强化合金,Al-Mg 合金主要强化方式为固溶强化和形变强化。随着 Mg 含量的提高,Al-Mg 合金力学强度逐步升高,但过饱和的镁元素容易在加工过程中优先以阳极相 β 相(Mg_2Al_3 或 Al_8Mg_5)形式在晶界析出,导致合金晶间腐蚀及应力腐蚀敏感性增加[2]。晶间腐蚀是金属在腐蚀环境由于基体与第二相间的微腐蚀电位差异导致,沿着或紧挨着晶界发生和发展的局部腐蚀破坏形态,使晶粒间的结合力降低,并可能导致材料失效。

为了提升 Al-Mg 合金的综合性能,部分学者研究了变形量、稳定化退火等因素对 Al-Mg 合金力学性能及耐蚀性能的影响。孟凡林等[3]研究了不同工艺制备的船用 5083 铝合金板材的晶间腐蚀性能,研究发现采用 25%~35%冷加工变形并稳定化退火后,板材力学性能满足相关标准要求,且腐蚀性能优良, β 相在晶粒内均匀分布,无连续的沉淀析出网状结构。张珂等[4]采用正交法设计了一种 Al-Mg 合金的冷轧及稳定化处理工艺方案,研究发现该合金晶间腐蚀和剥落腐蚀倾向随冷变形量的增大和稳定化处理温度的降低而增大,稳定化时间的影响不明显,当冷变形量在 20%~25%,稳定化温度在 200℃~220℃、时间为 2 h 时,合金的耐腐蚀性能最优。韩帅[5]通过对完全退火后 5083 铝合金板材不同冷加工率、稳定化退火温度、稳定化退火保温时间及对板材晶间腐蚀试验、剥落腐蚀试验等系列检测和分析,确定了具有良好综合性能的 5083-H116 合金制备工艺。现有报道中对 5083、5052 等牌号合金研究较多,相比之下,变形量及热处理工艺对 5383 铝合金力学性能与耐腐蚀性能的影响研究较少。本文作者结合实际生产,系统研究了冷轧加工率(15%~60%)、退火温度(100℃~325℃)对 5383 铝合金板材力学性能耐蚀能力的影响规律及机理,为工业化稳定生产高强度耐腐蚀的 5383 铝合金板带材提供理论及实际指导。

2. 试验材料及方法

2.1. 试验材料

试验用 5383 铝合金板材制备流程为:熔铸→锯切→铣面→加热→热轧→冷轧→退火。采用直接水冷铸造方式生产的 5383 铝合金扁锭,其化学成分控制见表 1。

Table 1. Chemical composition of 5383 alloy (wt%)**表 1.** 5383 铝合金化学成分(质量分数, %)

| Si | Fe | Cu | Mn | Mg | Cr | Zn | Ti | Al |
|-------|-------|-------|---------|---------|-------|-------|-------|----|
| ≤0.25 | ≤0.25 | ≤0.20 | 0.7~1.0 | 4.0~5.2 | ≤0.25 | ≤0.40 | ≤0.15 | 余量 |

铸锭进行锯切、铣面后, 进行 510℃保温 4 小时加热并热轧成 6.0 mm 厚热轧卷材, 其终轧温度为 330℃。热轧卷冷却至室温后, 在冷轧机分别轧制到 5.1 mm、4.2 mm、3.3 mm、2.4 mm 厚并切取各厚度样品, 总加工率分别为 15%、30%、45%、60%。对不同加工率的冷轧样品在热处理实验炉中进行退火, 退火温度为 100℃、125℃、150℃、175℃、200℃、225℃、250℃、275℃、300℃、325℃, 保温时间 3 小时。

2.2. 试验方法

对不同冷轧加工率和温度退火后的样品进行力学性能、剥落腐蚀、晶间腐蚀以及金相检测。力学性能测试按 GB/T 228 标准进行, 剥落腐蚀试验按 ASTM G66 标准进行, 晶间腐蚀试验按 ASTM G67 标准进行, 金相检测按 GB/T 3246.1 标准进行。

3. 实验结果与分析

3.1. 冷轧加工率及退火温度对力学性能的影响

5383 铝合金板带材经过 15%、30%、45% 和 60% 冷轧加工率轧制, 在不同温度保温 3 小时退火后的力学性能测试结果如图 1 所示。

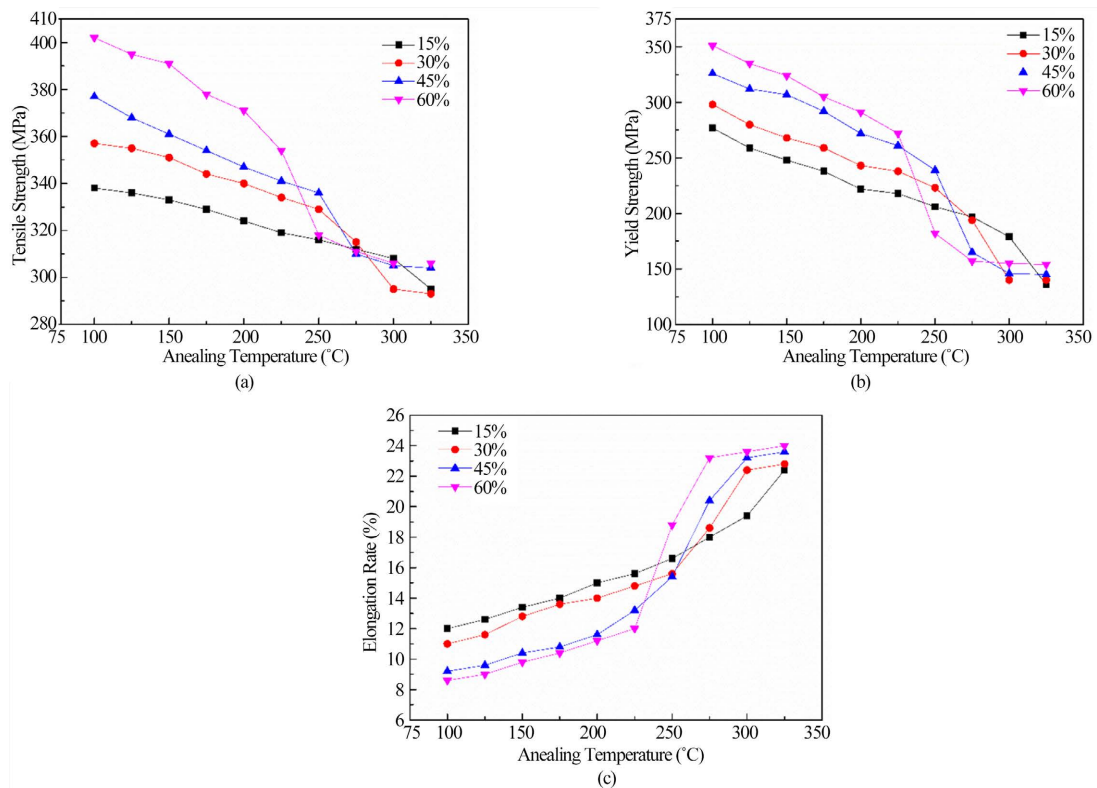


Figure 1. 5383 aluminum alloy sheet under different cold working rates (a) tensile strength, (b) yield strength, (c) elongation with annealing temperature

图 1. 5383 铝合金板带材不同冷加工率下(a) 抗拉强度、(b) 屈服强度以及(c) 延伸率随退火温度变化规律

可以看出,当退火温度低于 225℃时,5383 铝合金板材抗拉强度、屈服强度以及延伸率均随着冷加工率的增大而降低。当冷加工率保持不变时,板材抗拉强度、屈服强度随着退火温度的增大而逐渐降低,延伸率则随之增大,并最终趋于稳定。但不同加工率样品的性能变化趋势存在差异,15%加工率样品的力学性能在退火温度 300℃~325℃范围内出现突变,30%和 45%加工率样品的力学性能在退火温度 250℃~300℃范围内出现突变,而 60%加工率样品的力学性能在退火温度 220℃~275℃范围内出现突变。此后继续提高退火温度,样品的抗拉强度、屈服强度和断后伸长率变化急剧减弱。这表明,随着冷轧加工率增大,出现力学性能突变的退火温度降低。

冷轧后的铝合金板带材在退火过程中,随着退火温度升高,发生了回复和再结晶,完成完全再结晶后其组织和性能恢复到平衡状态。冷加工金属退火时,基体当中位错/空位等缺陷由于体系能量的提高而运动,当退火温度低时,所提供能量不足以支持材料发生动态再结晶,冷变形金属以动态回复为主,合金强度降低、塑性提高;当退火温度达到临界温度时,外界所提供能量足以促使基体储能达到发生动态再结晶临界值,经过加工硬化的铝合金开始出现再结晶,强度快速降低、塑性快速提高。冷变形程度是影响再结晶温度的主要因素之一,冷轧加工率较小时,铝合金内部畸变小,冷变形储能低,再结晶温度高;冷轧加工率大时,铝合金内部畸变大,冷变形储能增大,再结晶温度降低[6]。

3.2. 冷轧加工率及退火温度对腐蚀性能及组织的影响

经过不同冷轧加工率轧制的 5383 铝合金板带材在不同温度保温 3 小时退火后的晶间腐蚀重量损失统计如图 2 所示。试验结果表明,所有试验冷轧加工率的 5383 铝合金板材样品,晶间腐蚀重量损失在 100℃~150℃范围内随着退火温度升高而增大,在 150℃~225℃范围内随着退火温度升高而快速降低,在 ≥225℃退火后保持稳定且重量损失 < 5 mg/cm²,具有良好的耐晶间腐蚀性能。

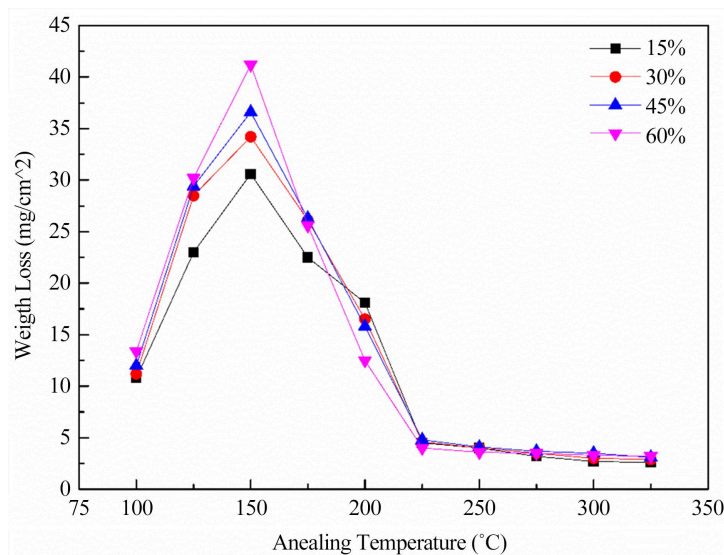


Figure 2. The intergranular corrosion loss of 5383 aluminum sheet after annealing with different cold working rate

图 2. 不同冷加工率 5383 铝板退火后晶间腐蚀失重

退火温度对不同冷加工率 5383 铝合金板材的剥落腐蚀性能影响如表 2 所示,由试验数据表明,所有试验加工率的样品的耐剥落腐蚀性能在 100℃~200℃范围内变化较小,在 225℃~275℃退火后迅速提升,≥275℃退火后保持稳定。

Table 2. Corrosion evaluation of 5383 aluminum sheet under different processing
表 2. 不同冷加工率 5383 铝板剥落腐蚀试验结果

| Annealing Temperature/°C | Cold Working Rate | | | |
|--------------------------|-------------------|-----|-----|-----|
| | 15% | 30% | 45% | 60% |
| 100 | PA | PB | PB | PC |
| 125 | PA | PB | PB | PC |
| 150 | PA | PB | PB | PC |
| 175 | PA | PB | PB | PC |
| 200 | PA | PB | PB | PC |
| 225 | PA | PA | PA | PB |
| 250 | PA | PA | PA | PB |
| 275 | N | N | N | N |
| 300 | N | N | N | N |
| 325 | N | N | N | N |

为进一步研究冷轧加工率和退火温度对 5383 铝合金晶间腐蚀性能的影响, 选取样品进行金相检测。**图 3** 为 30% 加工率经过 100°C、150°C、200°C、250°C 退火后样品的二次相分布, 可以看出随着退火温度升高, 网状分布的二次相先增加后减少。100°C 退火样品有较多二次相析出, 局部形成网状分布; 150°C 退火样品析出的二次相明显呈网状分布; 200°C 退火样品与 150°C 样品相比二次相析出数量和网状分布减少; 250°C 退火样品二次相数量大为减少, 分布均匀。

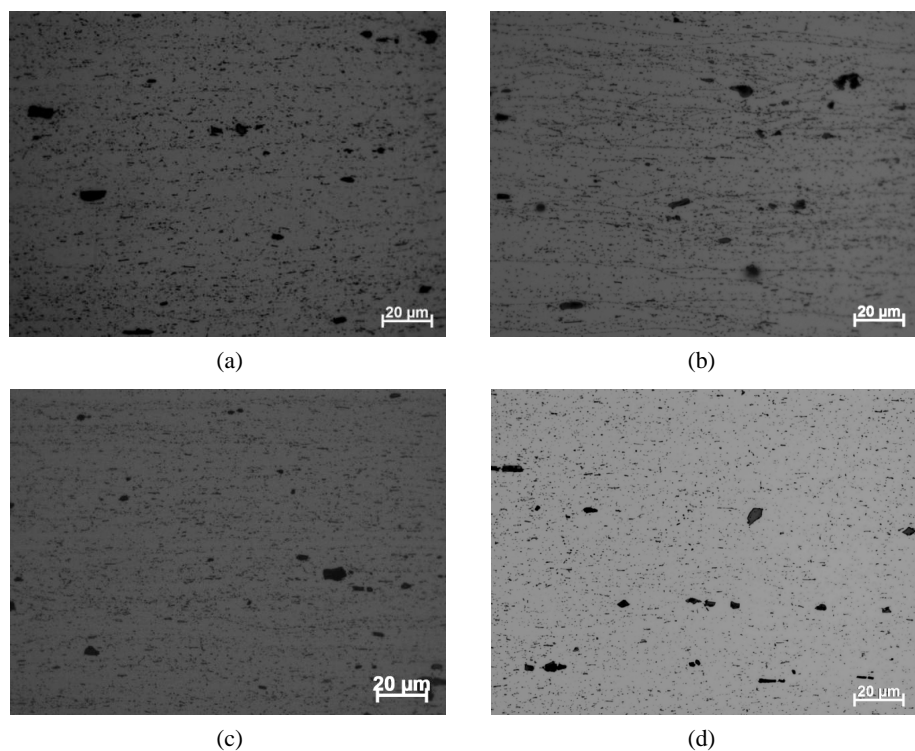


Figure 3. The SEM images of 30% processing rate 5383 aluminum alloy sheet at different annealing temperatures (a) 100°C, (b) 150°C, (c) 200°C, (d) 250°C

图 3. 30% 加工率 5383 铝合金板材不同退火温度下腐蚀表面形貌 (a) 100°C、(b) 150°C、(c) 200°C、(d) 250°C

Al-Mg 合金发生晶间腐蚀的主要原因是晶界及其附近区域析出 β 相(Mg_2Al_3 或 Al_8Mg_5)与基体存在微腐蚀电位差异, 形成微腐蚀电池导致的选择性溶解[7]。对于 5383 这种镁含量较高的铝合金, α 固溶体在热轧后的冷却过程中不能完全析出第二相而处于过饱和状态, 在冷轧后进行 $100^\circ\text{C}\sim 150^\circ\text{C}$ 退火时随着退火温度升高第二相易沿晶界析出, 导致耐晶间腐蚀性能下降; 在 $150^\circ\text{C}\sim 225^\circ\text{C}$ 范围内随着退火温度升高镁在铝基体中的扩散速度增加, 析出相分布均匀, 同时基体当中的高能位错/缺陷区域由于原子运动而减少, 使得合金耐晶间腐蚀性能逐渐提升; 而在 $\geq 225^\circ\text{C}$ 退火时, 由于温度达到对应镁含量的固溶温度, 镁元素在退火过程中溶入铝基体中, 并在冷却过程中来不及完全析出, 从而大幅提升耐晶间腐蚀性能。

剥落腐蚀是由于经过冷轧加工后形成纤维组织, 具有晶间腐蚀倾向的铝合金腐蚀沿轧制方向的晶界发展, 生成的腐蚀产物体积膨胀产生与轧制面法向张应力向外鼓起, 使合金表面鼓泡, 严重时会使合金表面呈层状撬起或产生剥落[8]。随着退火温度升高, 一方面导致晶界第二相化合物溶解固溶, 晶界微腐蚀电位差异减小; 另一方面由于基体位错/空位等的运动产生动态再结晶而消失, 体系能量降低, 从而使 Al-Mg 合金的耐晶间腐蚀性能提升, 同时也发生再结晶形成等轴晶, 使剥落腐蚀性能提升。

4. 结论

本文通过正交实验的方法, 系统研究了冷加工率与退火温度对 5383 铝合金板材力学性能与耐蚀能力的影响规律与机理, 得到结论如下:

(1) 随着退火温度升高, 冷轧 5383 铝合金板带材的抗拉强度、屈服强度逐渐降低, 断后伸长率逐渐升高; 随着冷轧加工率增大, 再结晶温度降低。

(2) 冷轧态 5383 铝合金耐晶间腐蚀性能随退火温度升高, 呈先降低后提高趋势, 150°C 退火后耐晶间腐蚀性能最低, $\geq 225^\circ\text{C}$ 退火后耐晶间腐蚀性能良好。

(3) 随着退火温度升高和冷轧加工率降低, 冷轧态 5383 铝合金耐剥落腐蚀性能提高。

(4) 5383 铝合金经过加工率 30%~45% 的冷轧和 $225^\circ\text{C}\sim 250^\circ\text{C}$ 、保温 3 小时退火后同时具有较高的强度和良好的耐腐蚀性能。

基金项目

广西科技重大专项(编号: 桂科 AA23023028)。

参考文献

- [1] 张新明, 邓运来. 新型合金材料——铝合金[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2018.
- [2] 刘静安, 谢水生. 铝合金材料应用与开发[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2011: 271-278.
- [3] 孟凡林, 周崇. 冷变形及退火对船用 5083 铝合金板腐蚀性能的影响[J]. 轻合金加工技术, 2015, 43(10): 35-39.
- [4] 张珂, 黄光杰, 汪凌云, 等. 冷变形量及稳定化处理对 5083 铝合金耐腐蚀性能的影响[J]. 机械工程材料, 2011, 35(9): 5-10.
- [5] 韩帅. 5083-H116 铝合金板材工艺研究[J]. 有色金属加工, 2016, 45(2): 29-34.
- [6] 尹晓辉, 李响, 刘静安, 等. 铝合金冷轧及薄板生产技术[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2010: 109-113.
- [7] 刘道新. 材料的腐蚀与防护[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2006: 137-142.
- [8] 宋鹏程. 新型 Al-Mg 系船用铝合金的腐蚀行为研究[D]: [硕士学位论文]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2020.