

6082 铝合金挤压成形与组织性能调控研究进展

刘师炜 黄钰雯 陈依柳 许艺耀 黎夏云 唐思怡 周 冰 王佳瑞 陈飞宏 刘灿雍

南宁职业技术大学, 广西 南宁 530008

摘 要: 6082 铝合金是 6xxx 系所列强铝合金中比较典型的品种, 就其挤压成形性、焊接能力及耐腐蚀性而论, 已适合用于高端制造。但传统 6082 铝合金有关强度-塑性配合、较厚截面的淬火敏感度、粗晶环(挤压类)形成或焊接弱化诸项性能仍有待进一步解决。文中对近来发表的有关 6082 铝合金挤压及性能调控的文献作一归纳分析, 进而提出目前所涉工艺-组织-性能定量联系、多级缺陷共存机理、服役寿命预测诸项内容尚有不完善之处的观点。

关键词: 6082 铝合金; 挤压成形; 热处理; 动态再结晶; Mg_2Si 析出相; 搅拌摩擦焊

DOI: 10.64649/yh.shygl.issn3105-0085.202609022

1 引言

1.1 研究背景

6082 铝合金是 6 系列强铝合金中较典型的材料, 其 Mg 成分是 0.6%-1.2%, Si 是 0.7%-1.3%, 相对于 6061 而言含较多锰, 所形成的 $Al(Mn, Fe)Si$ 相较弥散分布, 能减缓再结晶现象, 对热加工有利; 同 6063 相比, 它的镁及硅比例更大, 时效处理后强度上升较为明显。若采用 T6 方式处理, 6082 铝合金的各项性能都较优良, 因而适合用于制造机械、运输工具或各种结构性零件。

1.2 领域核心瓶颈

从目前的角度看, 6082 铝合金已有较明显的发展, 但其目前仍有瓶颈:

(1) 强度-塑性的固有权衡: 按传统方法所获的 6082-T6 材料来说, 强度和塑性不能同时达到高峰, 强度上升多是以塑性为代价的, 应用受此限制^[1]。

(2) 淬火敏感性: 厚截面材料在慢冷过程

中, 平衡 β 相以富铁相粒子为核心不均匀析出并长大, 导致无沉淀析出带宽化, 合金硬度降低^[2]。

(3) 挤压粗晶环问题: 挤压棒材易出现粗晶环, 当断面形成相当多的粗晶环区域时, 材料的力学性能、疲劳强度显著降低^[3]。

(4) 焊接接头性能弱化: 搅拌摩擦焊(FSW)虽能避免熔化焊缺陷, 但接头搅拌区存在组织不均匀性, 导致接头系数通常仅为 0.7-0.8。

2 6082 铝合金的成分设计与相图特征

2.1 合金成分标准

6082 铝合金的化学成分应符合 GB/T 3190-2020 标准^[4]。其中, Mg 和 Si 是主要合金元素, 形成 Mg_2Si 强化相; Mn 用于控制晶粒尺寸和提高再结晶温度; Cr 和 Ti 作为可选元素, 分别用于提高耐蚀性和细化铸锭晶粒; Fe 作为杂质元素需严格控制, 以避免形成粗大的含 Fe 相。具体成分范围如表 1 所示。

表1 6082铝合金化学成分(质量分数, %) ^[4]

元素	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	其他	Al
含量范围	0.7-1.3	≤ 0.50	≤ 0.10	0.40-1.0	0.6-1.2	≤ 0.25	≤ 0.20	≤ 0.10	≤ 0.15	余量

2.2 合金成分标准

有关 6082 铝合金的化学组成应参照 GB/T 3190-2020 的标准^[4]。其中 Mg、Si 是基本合金组元(所形成的 Mg_2Si 是强化相); Mn 起晶粒控制及再结晶温度调节的作用; Cr、Ti 是非必要元素, 对耐蚀性或铸锭晶粒有某种改善意义。

2.3 成分优化研究进展

2.3.1 微合金化

用 0.05%-0.15% 的 Cu 来合金化可使时效强化更明显, 不过耐蚀性略有下降; 以 0.1%-0.3% 的 Ag 来合金化有利于加快时效过程, 所

用时间较短; 若加入 0.2%-0.35% Sc 或 0.15%-0.25% Zr 就能获得 $Al_3(Sc, Zr)$ 类粒子, 晶粒被细化、再结晶受抑制, 只是成本有所上升^[5]。

3 挤压成形工艺优化研究进展

3.1 热压缩变形行为与本构关系

热压缩实验是研究铝合金高温变形行为的基础手段, 可为挤压工艺参数设计提供理论依据。计算得到 6082 铝合金的形变热激活能为 $171.15 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$, 并通过 MATLAB 计算建立了 O 态 6082 铝合金在应变为 0.3 和 0.6 时的热加工图, 确定 6082 铝合金的最佳热加工参数为:

温度 450–500℃, 应变速率 $0.2\text{--}0.5\text{ s}^{-1}$ 。^[6]

建立了流变应力模型, 可较好地预测 6082 铝合金在变形过程中的应力情况。

3.2 挤压过程有限元模拟

有限元模拟已成为研究挤压工艺优化的重要工具。^[7] 基于 ANSYS 对 6082 铝合金 T 形接头 MIG 焊有限元模拟结果: 焊接速度会影响温度场范围与熔池温度, 焊接速度越大, 温度场范围越小、熔池温度越低, 焊缝各点温度循环曲线越陡峭; 焊接角变形随距焊缝距离增加而增大, 提高焊接速度则角变形减小。

3.3 挤压工艺参数优化

有学者结合热压缩实验与有限元模拟开展挤压仿真研究, 坯料温度升高使挤压温度上升、温度分布更均匀, 等效应变先增后减; 模具温度升高会造成棒材内部温度不均, 等效应变小幅上升; 挤压比增大, 挤压温度与等效应变显著提高; 挤压速度增大, 棒材温度略有下降, 等效应变有所增大。

4 热处理制度设计与析出相调控

4.1 均匀化处理

均匀化处理的目的是消除铸造组织中的枝晶偏析, 使合金元素充分固溶, 为后续加工和热处理奠定基础。系统研究了 6082 铝合金的均匀化工艺, 结果表明:

单级均匀化: $550^\circ\text{C} \times 6\text{ h}$, Mg_2Si 相充分溶解, 晶粒均匀;

双级均匀化: $480^\circ\text{C} \times 4\text{ h} + 560^\circ\text{C} \times 8\text{ h}$, 第二相溶解更充分, 晶粒更细小。

4.2 固溶处理

固溶处理的目的是使强化相充分溶解, 形成过饱和固溶体。实验表明:

固溶温度: $530\text{--}540^\circ\text{C}$, 低于共晶温度 (约 595°C), 避免过烧;

固溶时间: $0.5\text{--}1\text{ h}$, 根据截面厚度调整, 厚截面需适当延长;

冷却方式: 水淬, 冷却速率 $>100^\circ\text{C}/\text{s}$, 抑制预析出。

张宇^[10]研究了复杂截面铝合金型材的在线淬火工艺, 发现界面换热系数随温度降低而减小, 在 $300\text{--}400^\circ\text{C}$ 范围内变化显著。

5 搅拌摩擦焊接头组织性能研究

5.1 组织不均匀性的成因

搅拌区组织不均匀性的主要原因是搅拌头旋转和前进运动的耦合作用^[7]:

前进侧: 材料流动方向与搅拌头旋转方向

相同, 剪切变形更剧烈, 再结晶更充分;

后退侧: 所用材料的流动方向同搅拌头旋转方向相反, 因而剪切变形小、再结晶欠全。

此外, 有关焊接的参数 (即旋转速度、焊接速度及下压力) 对组织不均匀性影响很大。若用较大的旋转速度、较小的焊接速度来操作, 所获组织较一致, 但晶粒易粗。

6 现存研究瓶颈与挑战

6.1 理论层面

6.1.1 多尺度缺陷协同作用机制不清

6082 铝合金中存在多尺度缺陷, 它们之间的交互作用复杂: 位错与析出相的交互作用; 晶界与析出相的交互作用; 空位与溶质原子的交互作用 (溶质-空位复合体)。目前缺乏系统的多尺度模型来描述这些交互作用。

6.1.2 动态再结晶机理研究不足

挤压过程中的动态再结晶机制及其与工艺参数的关系尚不完全清楚, 特别是: 动态再结晶的临界应变和临界晶粒尺寸; 第二相粒子 ($\text{Al}_6(\text{Mn,Fe})$) 对再结晶的钉扎作用; 再结晶组织的形成与演变。

6.2 实验层面

6.2.1 原位表征技术应用不足

高温变形和时效过程中的组织演变难以实时观测: 缺乏原位高温 TEM、XRD、SEM 表征数据; 析出相形核和长大的动态过程不清楚; 位错运动和交互作用的实时观察困难。

6.2.2 实验参数不统一

不同研究团队的热压缩、挤压、时效实验参数差异大, 导致结果难以对比: 热压缩的应变速率范围 ($0.001\text{--}50\text{ s}^{-1}$) 差异大; 时效温度 ($160\text{--}200^\circ\text{C}$) 和时间 ($2\text{--}24\text{ h}$) 不统一; 性能测试标准 (拉伸速率、试样尺寸) 不一致。

6.2.3 长期服役性能评价不足

现有研究多关注短期性能, 缺乏长期服役性能数据: 高温 ($100\text{--}200^\circ\text{C}$) 长期时效的组织稳定性; 腐蚀-疲劳耦合作用下的寿命预测; 实际服役环境 (海洋大气、工业大气) 的加速评价方法。

6.3 工程层面

6.3.1 厚截面材料性能不均匀

对于壁厚 $>10\text{ mm}$ 的型材, 芯部与表层性能差异显著: 淬火冷却速率不均匀导致析出相分布不均; 在线淬火工艺参数优化困难; 缺乏有效的均匀化淬火技术。

6.3.2 焊接接头性能弱化

FSW 接头系数仅 $0.7\text{--}0.85$, 限制了焊接结构的应用: 热影响区软化问题难以根本解决;

双面焊接的组织不对称性影响性能;缺乏有效的焊后热处理恢复技术。

7 结论

所论内容是有关 6082 铝合金的挤压工艺、热处理、焊接与抗腐蚀诸项研究的系统性总结,其结论为:

(1) 有关成分设计方面:6082 铝合金应把 Mg_2Si 当作基本的强化组分,在 Mg/Si 比为 1.2 ~ 1.5、 Mn 含量为 0.6% ~ 0.8% 时能同时获得强而耐蚀的性能;采用微合金化对晶粒有细化作用,可防止再结晶。

(2) 有关挤压成形方面,以热压缩试验及有限元方法分析所得结果为准,对 6082 铝合金来说最适宜的热加工条件是 450–500 °C、应变速率 0.2–0.5 s^{-1} ;所用温度、速度及挤压比三者结合影响金属流态及动态再结晶。

(3) 热处理制度方面,均匀化处理 (550 °C × 6 h 或 480 °C × 4 h + 560 °C × 8 h) 可消除铸造偏析;固溶处理 (530–540 °C × 0.5–1 h) 需配合快速冷却 (>100 °C /s)

(4) 焊接接头的性能方面,搅拌摩擦焊接头所含的组织有不均匀之处(前后两侧不同),此时接头系数一般为 0.7 ~ 0.85;对焊接条件或焊后状态作适当调整可使性能得到改善。

6082 铝合金是目前比较重要的结构材料,有关其高性能设计及实际运用的思考对交通运输轻量化很有价值。从现在起应把基础理论和工程实际结合起来,用多尺度计算、机器学习手段或智能方法来促进设计、优化制造,对厚截面材料及焊接部位所遇的性能问题做较完整的处理,使所开发产品能适应将来更严格、更复杂的使用条件。

参考文献:

- [1] Li X T, Liu R, Hou J P, et al. Trade-off model for strength-ductility relationship of metallic materials[J]. Acta Materialia, 2025, 244: 120942.
- [2] 龙社明,王孟君,温柳,等.6082 铝合金的淬火特性及微观组织 [J]. 稀有金属材料与工程,2017,46(9):2553–2557.
- [3] 曹振华,孙巍,荣伟,等.6082 铝合金挤压棒材粗晶环问题研究 [J]. 热处理技术与装备,2014,35(5):37–39.DOI:10.19382/j.cnki.1673–4971.2014.05.009.
- [4] 中华人民共和国国家标准. GB/T 3190–2020 变形铝及铝合金化学成分 [S]. 北京:中国标准出版社,2020.
- [5] Qi Yushi, Wei Fangming, Wang Yu, et al. Microstructure and Mechanical Property of 6082 Aluminum Alloy via Sc and Zr Addition Combined with Squeeze Casting[J]. Materials, 2025, 18(9): 1988.
- [6] 李辉,赵奇,史春丽,等.6082 铝合金热压缩变形行为及本构关系 [J]. 热加工工艺,2017,46(20):96–99.DOI:10.14158/j.cnki.1001–3814.2017.20.026.
- [7] 赖明建,汤小红,张闪影.基于 ANSYS 的 6082 铝合金 T 形接头 MIG 焊的有限元模拟 [J]. 焊接技术,2013,42(5):14–17+5.DOI:10.13846/j.cnki.cn12–1070/tg.2013.05.007.

作者简介: 刘师炜(2007.09—),男,汉族,江西泰和人,专科在读,研究方向:铝合金材料研发。