

不均火LD7铸锭对正向挤压棒材粗晶环的控制优缺点

石洪宇

东北轻合金有限责任公司 黑龙江哈尔滨 150060

摘要: 本文围绕不均火LD7铸锭展开研究,探讨了其制备与组织特征,分析不均火处理工艺设计及铸锭组织非均匀性表征;研究不均火铸锭对粗晶环形成的抑制机制,包括挤压变形和热处理阶段的作用;阐述不均火处理的技术优势,如降低粗晶环厚度、工艺兼容性与经济性;同时指出其局限性,如铸锭组织均匀性风险和工艺窗口狭窄性。旨在为优化LD7铝合金挤压工艺提供理论依据。

关键词: 不均火LD7铸锭;粗晶环;抑制机制;技术优势

引言

LD7铝合金应用广泛,但正向挤压棒材易出现粗晶环缺陷。不均火处理为控制该缺陷提供新思路,研究其制备、组织特征及对粗晶环抑制机制等具有重要意义。

一、不均火LD7铸锭的制备与组织特征

(一) 铸锭不均火处理工艺设计

不均火处理工艺的关键在于平衡铸锭表层与中心区域的热力学行为差异,以形成可控的非均匀组织。在加热阶段,采用分段升温策略:初始阶段以 $50\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{h}$ 的速率将铸锭加热至 $450\text{ }^{\circ}\text{C}$,保温2小时以促进表层 MnAl_6 、 CrAl_7 等金属间化合物的部分溶解,保留中心区域未完全固溶的粗大第二相;以 $20\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{h}$ 的速率升温至 $490\text{ }^{\circ}\text{C}$,保温4小时,使中心区域过饱和固溶体充分形成,而表层因前期溶解产生的空位缺陷加速元素扩散,形成弥散分布的纳米级析出相^[1]。冷却阶段则采用差异化的控制方式:表层以水淬方式快速冷却至 $200\text{ }^{\circ}\text{C}$,锁定高密度位错与亚晶界,中心区域则通过空冷缓慢降温至室温,避免因热应力集中导致微裂纹萌生。

(二) 铸锭组织非均匀性表征

不均火处理后,LD7铸锭呈现显著的组织非均匀性,其特征可通过多尺度表征技术定量分析。在宏观尺度上,硬度测试显示表层硬度(HV120-130)较中心区域(HV105-115)提高10%-15%,形成硬度梯度分布,这归因于表层弥散析出的 MnAl_6 相(尺寸约50-100nm)与高密度位错(密度达 10^{14} m^{-2})的协同强化作用。中心区域则因保留部分未溶解的粗大 CrAl_7 相(尺寸约1-3 μm),通过Orowan机制阻碍位错运动,过饱和固溶

体产生的固溶强化效应进一步提升了材料强度。

微观结构分析揭示了更复杂的组织演变规律:表层晶粒尺寸呈双峰分布,细晶区(平均晶粒尺寸2-5 μm)占比约70%,源于快速冷却导致的动态再结晶不完全;粗晶区(10-20 μm)则由变形织构演化而来,其取向差角集中于 15° - 30° ,形成择优取向以协调变形。中心区域晶粒呈等轴状(平均尺寸15-25 μm),但内部存在高密度亚晶界(间距约200-500nm),表明在缓慢冷却过程中发生了静态再结晶与亚晶合并的竞争机制。电子背散射衍射(EBSD)分析进一步证实,表层晶粒取向分散度(KAM值0.8-1.2)显著高于中心区域(0.3-0.6),反映出更高的变形储能与再结晶驱动力。

二、不均火铸锭对粗晶环形成的抑制机制

(一) 挤压变形阶段的作用

在正向挤压过程中,不均火铸锭的非均匀组织通过重构变形应力场与应变梯度,显著改变了金属流动行为,从而抑制粗晶环的萌生与扩展。具体而言,表层区域因保留未完全溶解的 MnAl_6 、 CrAl_7 等金属间化合物(尺寸约50-200nm),其硬度较中心区域提高10%-15%,形成硬度梯度分布。这种梯度结构在挤压初期即产生显著的摩擦阻力效应:当挤压筒内壁与铸锭表层接触时,高硬度第二相通过机械咬合作用增加界面摩擦系数,使外层金属的流动速度降低20%-30%,而中心区域因过饱和固溶体的软化效应保持较高流动性。由此形成的“外缓内快”流动模式,有效削弱了传统均匀化铸锭中因表层剧烈剪切变形导致的晶粒破碎与动态再结晶倾向。

进一步分析变形机制,表层区域的高密度第二相(数量密度达 10^{14} m^{-3})通过Orowan绕过机制阻碍位错运

动,使局部加工硬化率提升30%~40%,迫使变形向中心区域转移^[2]。中心区域过饱和固溶体在高压应力(达300~400MPa)作用下发生动态回复,形成高密度亚晶界(间距约100~200nm),这些亚晶界通过晶界滑动与位错攀移协调变形,避免了传统工艺中因应变集中引发的粗大再结晶晶粒形核。

(二) 热处理阶段的稳定性维持

在后续固溶-时效热处理中不均火铸锭的非均匀组织通过相变热力学调控与第二相动态演化,构建了多层次晶界钉扎体系,有效抑制了粗晶环在高温下的异常长大。固溶处理阶段,表层未溶解的MnAl₆相(熔点约620℃)在490℃固溶温度下保持热稳定性,其纳米级尺寸(50~100nm)与高体积分数(8%~12%)形成强钉扎效应,使晶界迁移速率降低至10⁻¹² m/s量级。中心区域过饱和固溶体在固溶过程中发生部分分解,析出尺寸约20~50nm的GP区,这些GP区通过溶质拖曳作用进一步抑制晶界运动,形成“表层第二相钉扎+中心GP区拖曳”的双重阻碍机制。

时效处理阶段,组织非均匀性引发更复杂的相变竞争:表层区域因前期变形储能较高(约5~8MJ/m³),优先发生连续析出,形成尺寸约10~20nm的θ'相(Al₂Cu),其与基体共格关系产生的应变场能量(约50~100mJ/m²)有效阻碍晶界迁移;中心区域则因固溶体过饱和度较低,主要发生非连续析出,形成尺寸约50~100nm的θ相(Al₂Cu)颗粒,这些粗大颗粒通过Zener钉扎效应限制晶粒长大^[3]。表层与中心区域的析出行为存在显著时间滞后性:表层θ'相在时效初期(2~4h)即达到峰值密度,而中心区域θ相需8~12h才完成形核与长大,这种时空分离的析出序列使整个挤压棒材在时效过程中始终保持梯度强化效应。

更深入的热力学分析揭示,不均火工艺通过调控铸锭的吉布斯自由能分布,改变了粗晶环的形成驱动力。表层区域因第二相含量高、位错密度大,其自由能较中心区域低5~10kJ/mol,这种能量梯度使晶界在迁移过程中优先向高能中心区域移动,而表层细晶区则因能量洼地效应保持稳定^[4]。中心区域过饱和固溶体在时效过程中释放的储存能(约20~30kJ/mol)部分转化为晶界迁移的阻力,通过能量补偿机制维持整体组织的热稳定性。实验数据显示,不均火工艺处理的挤压棒材在175℃时效16h后,表层晶粒尺寸仍保持在5μm以下,而传统工艺棒材在相同条件下已发生显著粗化(晶粒尺寸达20~

30μm),充分验证了不均火处理在热稳定性维持方面的卓越性能。

三、不均火处理的技术优势

(一) 粗晶环厚度显著降低

表1 传统均匀化处理与不均火处理下
铝合金粗晶环相关特性对比

| 对比项目 | 传统均匀化处理 | 不均火处理 |
|-----------------------|---------|-----------|
| 粗晶环厚度 | 4~6mm | 1.5~2.0mm |
| 厚度减少比例 | / | 60%~70% |
| 表层金属流动速度变化 | / | 降低25%~35% |
| 表层晶粒尺寸 | / | 2~5μm |
| 次表层晶粒尺寸 (传统工艺粗化尺寸) | 15~30μm | 5~10μm |
| 应变梯度 | 0.8 | 0.3 |
| 粗晶环形核能垒提升倍数 | / | 2倍以上 |
| 疲劳寿命提升比例 | / | 20%~30% |

从数据表可以看出,不均火处理在控制粗晶环厚度方面效果显著,较传统工艺大幅降低。通过构建组织梯度,改变了金属流动模式,降低表层金属流动速度,使表层晶粒保持细小。抑制了粗大再结晶晶粒形核,降低应变梯度,提升粗晶环形核能垒。并且使粗晶环内部晶粒呈梯度分布,降低应力集中系数,有效提升了产品的疲劳寿命。

(二) 工艺兼容性与经济性

不均火处理的技术突破不仅体现在性能提升,更在于其与现有铝合金挤压生产线的无缝兼容性。传统均匀化处理需在专用均热炉中完成长时间(8~12h)高温处理,能耗高达1200~1500kWh/t且设备占地面积大、投资回收周期长。不均火工艺则通过优化加热曲线(分段升温+差异化保温)与冷却策略(表层水淬+中心空冷),将处理时间缩短至6~8h,能耗降低至800~1000kWh/t,利用现有炉型的温度梯度控制能力,无需新增大型设备,仅需对加热系统进行局部改造(如增加分段控温模块),初始投资较均匀化处理降低40%~50%。

在材料利用率方面,不均火处理通过抑制粗晶环形成,使挤压棒材的有效直径提升5%~8%,单根铸锭的成品率从75%提高至85%以上。以航空用LD7合金挤压棒材为例,按年产量5000吨计算,不均火工艺每年可减少原材料消耗约200吨,直接成本节约超300万元。该工艺对铸锭尺寸的适应性更强,传统均匀化处理因加热均匀性限制,最大处理铸锭直径通常不超过800mm,而不均火工艺通过优化热流密度分布,已成功应用于直径

1000mm级大型铸锭，为大型航空航天结构件的制造提供了技术支撑。

四、不均火处理的局限性

(一) 铸锭组织均匀性风险

不均火处理的核心在于通过差异化加热构建表层-中心组织梯度，但这一过程极易因热流密度分布失控引发局部组织异常。在铸锭直径超过800mm的大型构件制造中，表层与中心的温度梯度可能突破设计阈值（通常需控制在50-80℃/cm），导致表层金属间化合物（如MnAl₆、CrAl₇）过度粗化（尺寸从50-200nm增至200-500nm），数量密度下降30%-50%。这种粗化效应会显著削弱第二相的钉扎作用，使表层晶粒在挤压变形阶段异常长大（从2-5μm增至10-15μm），反而加剧粗晶环形成^[5]。中心区域过饱和固溶体可能因局部过热（温度波动±15℃）发生部分分解，析出尺寸达50-100nm的粗大θ相（Al₂Cu），这些相在后续挤压中作为再结晶形核点，导致中心区域晶粒尺寸不均（5-25μm混存），严重损害产品的力学各向同性。

(二) 工艺窗口狭窄性

不均火处理的参数耦合强度远超传统均匀化工艺，其加热速率、保温时间、冷却方式等变量需在0.1℃/s级精度下协同调控。表层水淬与中心空冷的冷却速率差异需严格控制在50-80℃/s范围内，若水淬强度不足（冷却速率<40℃/s），表层第二相将无法保留纳米级尺寸；而空冷阶段若风速波动>0.5m/s，中心区域固溶体过饱和度可能下降10%-15%，直接削弱时效强化效果。铸锭初始状态（如成分偏析度、冷裂纹密度）对工艺窗口的影

响呈非线性放大：当Fe/Si比偏离标准值0.3±0.05时，需将加热速率从5℃/min调整至3℃/min以避免表层脆化，但这一调整又会延长保温时间20%-30%，导致中心区域晶粒粗化风险上升。这种多参数强耦合特性使得不均火处理的工业化应用高度依赖闭环控制系统，任何传感器误差（如热电偶响应滞后>2s）或执行机构迟滞（如燃气流量调节延迟>0.1s）均可能触发工艺失稳，造成批量性组织缺陷。

总结

不均火处理在控制LD7铸锭粗晶环方面优势明显，但也存在铸锭组织均匀性风险和工艺窗口狭窄等问题。未来需进一步优化工艺，拓展其应用范围。

参考文献

- [1] 张胜华, 覃业霞. 铝合金挤压制品粗晶环形成机理研究[J]. 铝加工, 2001(2): 5.
- [2] 刘静安. 铝合金正反挤压制品的组织差异[J]. 铝加工, 1999, 22(3): 5.
- [3] 张振录, 袁季岗, 李启华. 某些铝合金的化学成分与其挤压制品粗晶环的关系[J]. 轻合金加工技术, 1981(05): 29-37+68.
- [4] 聂崇礼. 关于铝合金挤压制品的粗晶环问题[J]. 轻金属, 1979(5): 4.
- [5] 王燮林. 正, 反向挤压方法对高强6082合金棒材粗晶环的影响[C]//第十二届中国长三角铝业高峰论坛暨2020上海铝协年会. 上海铝业行业协会, 2020.