

参考特征向量计算是根据初值化的数据，计算各个运行状态下的典型特征。对每一种不同的运行状态（无故障状态、滤清器堵塞故障状态、旁通阀泄漏故障状态、冷却器积垢故障状态和滤清器泄露故障状态），需先收集该状态下多组（设为 t 组）初值化后的监测数据，再对每个监测点的 t 组数据取平均值，得到对应监测点的参考特征值，公式为：某状态下某监测点的参考特征值 = 该状态下该监测点的 t 组初值化数据之和 \div 数据组数 t

其中“数据组数 t ”指为某一运行状态采集的有效数据总组数，参考特征向量代表了各个运行状态监测参数的典型特性，是故障诊断的依据。

改进灰色关联度的计算是该方法最大的创新之处，在传统的灰色关联度的基础上，引入了欧式距离因子，对特征向量的趋势相似性和距离接近性进行了综合评价，具体分三步进行：

首先，求传统灰色关联系数：关联系数用于反映待检状态与参考状态单个监测点数据的趋势相似程度，取值范围为 0-1，数值越接近 1，说明两个监测点数据的变化趋势越一致，计算时需结合分辨系数，一般取 0.5 以调节差异灵敏度。

然后，计算传统灰色关联度：对 9 个监测点的传统灰色关联系数取平均值，公式为：

$$\text{传统灰色关联度} = 9 \text{ 个监测点的关联系数之和} \div \text{监测点总数 (9)}$$

该数值越接近 1，说明待检状态与参考状态整体的趋势相似性越高。

接下来，算出待检的特征向量同参考的特征向量之间的平均欧式距离，并进行归一化处理：欧式距离用于衡量待检与参考特征向量的数值差距，差距越小说明两组数据越接近；为方便结合分析，需将欧式距离转化为 0-1 范围的归一化距离，公式为：

$$\text{归一化距离} = 1 - (\text{待检与参考的欧式距离} - \text{所有欧式距离最小值}) \div (\text{所有欧式距离最大值} - \text{所有欧式距离最小值})$$

最后，结合灰色关联度和欧式距离计算改进的灰色关联度：引入权重系数 α ，一般选择 0.5 以平衡趋势相似性和距离接近性的重要性，公式为：

$$\text{改进灰色关联度} = \alpha \times \text{传统灰色关联度} + (1 - \alpha) \times \text{归一化距离}$$

故障模式识别是指通过改进灰色关联度排序结果来确定需要检测状态的故障类型。改进后的灰色关联度越大则说明待检状态越接近参考状态，将待检状态作为最大改进灰色关联度所对应的运行状态，即可完成故障诊断。

3.2 灰色关联分析应用的改进研究

为验证改进灰色关联分析算法于船舶柴油机润滑系统故障辨识领域的工程适用性，研究团队构建了典型案例研究框架。研究对象为某型船舶发电柴油机，据此确定润滑油样采样时间窗不大于 200 h 的连续监测方案。实验周期内各受

试柴油机的累计运行时间约都是 500h，单台机组取油样 4 份以保证监测数据序列完整性及可比性。

研究首先对每个油样进行原子光谱分析和 PQ 指数分析（PQ 指数是反映铁磁性颗粒含量的参数）。根据实验数据分析可知，1# 柴油机首份油样中铁元素浓度为 27.1 $\mu\text{g/g}$ ，铝元素浓度为 19.9 $\mu\text{g/g}$ ，PQ 指数为 35。经过长时间的跟踪检测可以得出上述指标的明显上升趋势，在 1786h 的时候，铁元素的浓度是 40 $\mu\text{g/g}$ ，铝元素的浓度降到了 11.6 $\mu\text{g/g}$ ，PQ 指数同步达到 40 已经超过正常磨损限值。从铁谱表征可知，油液中有大约 20 μm 的金属磨屑，证明异常磨损已经发生。

利用改进灰色关联分析对这些数据进行分析，首先建立了无故障状态、滤清器堵塞、旁通阀泄漏、冷却器积垢、滤清器泄露五种状态的参考特征向量。然后将待检状态特征向量与各参考特征向量进行改进灰色关联度计算，得到待检状态与滤清器堵塞状态的改进灰色关联度最大，诊断为滤清器堵塞故障。

为验证诊断结论的准确性，利用船舶检修窗口对 1# 柴油机实施拆解检验，现场观测表明，气缸套内表面呈现大量呈非规则分布的划痕形貌，活塞本体磨损程度相对较轻，而活塞环与气缸套配合界面存在显著刮擦痕迹。上述宏观失效特征与前期诊断结果高度一致，从而反向验证了诊断方法的有效性。此外，由于润滑油的粘度值变小，这也意味着活塞环与缸套之间的间隙过大，有部分燃油进入到润滑油内，该案例证明了改进灰色关联分析对润滑系统故障诊断的有效性。

4 结语

本文全面探究了船舶柴油机润滑系统智能监测及故障预报警技术的主要环节，经由探究得知，把多种参数的在线检测传感器同改良灰色联系分析等智能算法综合起来使用，可以很好地做到对磨损故障的提前警报以及精确识别，并给船舶柴油机的安全经营给予了切实可行的技术道路。但是现有技术仍存在海洋环境复杂、传感器时间长、多源信息融合等问题，今后该技术将朝着传感器更加集成化、智能化、诊断算法更加强大的自学习、自适应能力以及与数字孪生相结合，实现整个生命历程的健康管理方向发展，对保障船舶航行安全、延长设备寿命、改善维修资源、助力绿色航运发展产生强大的支撑作用。

参考文献

- [1] 赵霄鹏, 江帆, 许之兴, 孟令群, 许福忠. 某非道路用柴油机润滑系统优化仿真[J]. 小型内燃机与车辆技术, 2025, 54 (03): 35-39.
- [2] 任东平. 船舶柴油机润滑系统故障诊断研究[D]. 大连海事大学, 2020.
- [3] 牛新朋, 张文权, 温金羽, 孟雪锋, 张京辉, 魏铭扬. 某 3 L 柴油机润滑系统优化提升研究[J]. 拖拉机与农用运输车, 2025, 52 (02): 50-53.

Research on the Mechanism of Extrusion Process Effects on Intergranular Corrosion Behavior of 6061 Aluminum Alloy

Wei Teng

Jiangsu Guly Technology Co., Ltd., Zhangjiagang, Jiangsu, 215600, China

Abstract

6061 aluminum alloy, renowned for its high specific strength, excellent processability, and corrosion resistance, is widely used in transportation equipment profiles, architectural structural components, and electronic heat sinks. However, during extrusion, factors such as temperature field, stress field, and flow velocity collectively alter microstructure morphology and grain boundary precipitation behavior, thereby increasing intergranular corrosion sensitivity. Engineering studies indicate that extrusion speed, extrusion ratio, flow uniformity, and extrusion temperature directly influence the continuity of Mg₂Si phase at grain boundaries and the width of depletion zones, which in turn affects service corrosion resistance. Through analysis of microstructural evolution, precipitation behavior, and residual stress distribution, optimizing temperature ranges, improving metal flow and steady cooling, combined with appropriate aging regimes, can effectively reduce continuous precipitation and enhance intergranular corrosion stability of 6061 aluminum alloy profiles.

Keywords

6061 aluminum alloy; extrusion process; intergranular corrosion; intergranular precipitates; industrial section; microstructure control

挤压工艺对 6061 铝合金晶间腐蚀行为的影响机理研究

滕威

江苏固铝科技有限公司，中国·江苏 张家港 215600

摘要

6061铝合金因比强度高、加工性与耐蚀性优良，被广泛应用于交通装备型材、建筑结构件及电子散热器等领域。但在挤压过程中，温度场、应力场及速度等因素共同作用，使组织形貌和晶界析出行为发生变化，导致晶间腐蚀敏感性提升。工程研究表明，挤压速度、挤压比、流动均匀性和出料温度直接影响晶界Mg₂Si相的连续性与贫化区宽度，从而改变服役耐蚀性能。基于对组织演变、析出行为与残余应力分布的分析，可通过优化温度区间、改善金属流动和平稳冷却，并与合理时效制度匹配，有效降低连续析出，提升6061铝合金型材的晶间腐蚀稳定性。

关键词

6061铝合金；挤压工艺；晶间腐蚀；晶界析出相；工业型材；组织控制

1 引言

6061 铝合金 Al-Mg-Si 系可热处理强化材料，依托挤压与时效可获得强化相，因轻量化、耐蚀性和加工性优良而广泛应用于轨道交通型材、建筑幕墙框架及汽车结构件等领域。然而工程实践表明，部分挤压型材在服役中出现沿晶界发展的腐蚀沟槽，其形成并非源于材料本征缺陷，而与挤压过程中的组织演化密切相关。挤压速度、挤压比、模具流道与出料温度等因素共同影响再结晶行为和晶界析出动态，使晶界贫化区宽度与析出连续性呈现区域化差异，进而诱发晶间腐蚀敏感性波动。因此，有必要系统揭示挤压工艺、组织特征与腐蚀行为之间的关联，以支撑型材及交通装备领域的

工艺优化和可靠性提升。

2 挤压加工过程对 6061 铝合金组织与晶界形貌的影响

2.1 挤压温度对再结晶与晶界结构的影响机理

挤压温度是影响 6061 铝合金组织结构的首要因素，其直接关系到金属塑性流动能力及动态再结晶发生程度。温度偏低时，合金流动阻力增大、位错密度升高，可形成沿流动方向延伸的纤维状变形组织，晶界呈明显拉长状态，由此导致晶界应力集中，成为后续腐蚀萌生的敏感区域。若温度过高，动态再结晶将大量发生，使晶粒快速长大，不均匀的再结晶核分布可能形成局部粗晶带。这类粗晶带因晶界短、晶粒大而造成析出动力学差异，晶界 Mg₂Si 相的分布不均，从而加剧晶间电偶差异。在工业应用中，建筑幕墙型材、轨道交通车窗框等产品常因挤压温度不稳定出现组织带状或局

【作者简介】滕威（1985–），男，中国江苏常熟人，本科，助理工程师，从事材料学，铝型材热挤压研究。

部粗晶问题。此类组织在服役过程中表现出晶间腐蚀敏感性的区域性增强，对长期耐候性产生影响。选择适中的挤压温度曲线，使动态回复与局部再结晶平衡，是降低晶间腐蚀的关键路径之一。

2.2 挤压速度与金属流动均匀性的影响机制

挤压速度决定金属在模具内部的流动状态，对组织纤维化程度与析出相分布具有显著调控作用。高速挤压提升产能，但使金属在死区与流动中心区域出现速度梯度，易形成沿挤压方向的带状结构。该结构中晶界分布呈现周期性变化， Mg_2Si 相析出连续性亦表现出差异，导致部分区域形成明显贫化带，构成晶间腐蚀的潜在通道。此外，速度过高使出模温度快速上升，促进晶界连续第二相的析出。在交通装备用长型材生产中，高速挤压带来生产效率优势，但假如流动不平衡，产品在焊合部位或边缘位置常呈现晶间腐蚀优先发展的现象。控制速度梯度、提升模具内金属同步流动性，是减少晶间腐蚀的关键工艺策略。

2.3 挤压比对晶粒取向及第二相分布的调控效应

挤压比反映变形量大小，对材料内部晶粒取向分布及第二相形核行为具有显著影响。较大挤压比使金属获得充分塑性变形，有助于破碎原始粗大析出相，加速第二相在挤压过程中的重新分布，提高晶界间 Mg_2Si 颗粒的离散性，降低连续析出的概率，从而减少晶间腐蚀通道。然而，过大挤压比将增加单位体积应变能，使晶界能量过度提升，加剧晶界敏化风险。对于大型建筑结构型材或汽车底盘连接件，需要控制适中挤压比，以实现组织均匀性与耐蚀性能的综合平衡。

3 晶界析出行为在挤压工艺影响下的演化特征

3.1 晶界 Mg_2Si 相析出连续性的形成机制

6061 铝合金的晶间腐蚀敏感性主要取决于晶界 Mg_2Si 相的析出连续性，而这一特征深受挤压过程中的温度、应变速率与金属流动状态影响。在挤压变形过程中，位错密度增加使原子扩散增强， Mg 、 Si 元素更易向晶界偏聚，形成初始的断续析出相。当挤压温度过高或出模区域温升失控时，偏聚行为进一步加剧，使原本离散的 Mg_2Si 析出颗粒逐渐连成连续链状结构，晶界局部电化学活性差异随之扩大，形成易腐蚀的弱化区。在建筑型材和轨道交通型材中，由于截面复杂、速度梯度明显，金属流动不均常导致局部温升高于平均水平，因此连续析出区域往往集中出现在流速突变带或焊合线附近。这些连续析出带在腐蚀介质作用下极易形成贯穿晶界的腐蚀沟槽，显著降低构件在户外服役环境中的可靠性。

3.2 PFZ 宽度与晶间腐蚀敏感性的关联

贫化区（PFZ）是晶界附近因溶质元素向晶界偏聚而形成的低合金化区域，其宽度可直接反映晶界敏化程度，是判断晶间腐蚀倾向的重要指标。在挤压加工过程中，高温段

停留时间过长或金属在模具出口处冷却不及时，会促进大量 Mg 、 Si 向晶界迁移，使 PFZ 逐渐扩展。较宽的 PFZ 不仅导致晶界与晶内之间形成更显著的电位差，也使晶界强化不足，腐蚀更易沿 PFZ—晶界路径扩展。反之，若出模温度控制合理并辅以快速风冷或雾化冷却，可抑制溶质过度向晶界扩散，使 PFZ 保持在较窄范围内，从而提高晶界电化学均匀性。工程实践中发现，PFZ 较窄的挤压型材在盐雾或湿热环境下表现出更高的耐蚀稳定性，腐蚀范围通常局限于局部点蚀而非贯通晶界的沟槽型腐蚀。因此，通过优化温度与冷却制度调控 PFZ 宽度，是提升 6061 铝合金抗晶间腐蚀性能的重要工艺路径。

3.3 位错密度与加速析出效应对腐蚀的影响

挤压变形过程中产生的大量位错可作为 Mg_2Si 析出的优先形核位置，使第二相析出的动力学过程显著加快。当位错密度在晶内均匀分布时，有助于形成细小弥散的强化相，提高材料综合性能；但若位错在晶界附近聚集，则会形成连续的扩散通道，促进 Mg_2Si 沿晶界快速生长，使晶界析出相从离散状态向半连续甚至连续状态转变，形成潜在的腐蚀敏化带^[1]。特别是在模具出口附近，由于金属流速突变和应变集中，位错累积更为明显，使这些区域成为晶间腐蚀易发部位。在工业型材生产中，许多腐蚀缺陷被证明与此类“应变集中区”高度相关。位错导致的加速析出不仅改变晶界相形貌，也使局部电化学差异进一步扩大，加速腐蚀介质侵入并沿晶界扩展。因此，控制挤压应变路径和速度梯度、改善模具流道设计，是避免位错聚集与防止晶界连续析出的关键措施。

4 残余应力与宏观形变对应的腐蚀敏感性差异

4.1 挤压残余应力场对晶间腐蚀的促进作用

挤压过程中因快速变形与温度骤降，6061 铝合金表层金属产生高密度塑性应变并形成显著张应力，而内部因冷却迟滞和形变较弱呈现低应力状态，导致应力呈“表层集中—内部缓和”的梯度分布。高张应力使晶界能量升高，促进腐蚀介质优先侵入；当晶界 Mg_2Si 富集带与该应力场叠加时，腐蚀裂纹更易沿晶界扩展并贯穿多个晶粒。此外，张应力可诱发晶界微裂纹萌生，使局部电化学活性提升，加速腐蚀产物积聚，形成典型应力强化型晶间腐蚀特征。工程型材中，外层快速冷却区常最先出现沿晶界扩展的腐蚀沟槽，表明挤压残余应力场在晶间腐蚀启动与加速中具有关键促进作用。

4.2 型材几何形状对应力分布与腐蚀的耦合作用

工业型材的几何复杂性决定金属流动路径与应力分布特征，其影响直接体现在晶间腐蚀的区域化发展上。汽车行李架中空型材、散热器多齿基材及建筑幕墙框架等结构因厚薄差异和转角变化，使金属流动受阻、应力集中方式各异。薄壁区域因流速高、应变大，易形成位错密集带并积累张应力，使晶界析出相趋于连续；多腔型材的隔板部位因金属补