

机械振动对工业纯铝凝固过程影响研究

赵田跃 李 高 吴臣先

云南云铝海鑫铝业有限公司 云南 昭通 657000

摘要: 机械振动原理通过使物体振动、提高振动频率等方式改变物体状态或性能。其对工业纯铝凝固过程影响显著, 机制包括枝晶应力折断、增加非自发形核、改善传热和流体流动、扩大补缩通道。优化策略涵盖振动参数、方式、时间的调整, 以及与其他工艺协同优化, 以细化晶粒、改善凝固组织, 提升工业纯铝铸件的综合性能, 满足生产和应用需求。

关键词: 机械振动; 工业纯铝凝固过程; 影响

引言

在工业纯铝的制备过程中, 凝固环节的质量对最终产品的性能起着决定性作用。然而, 传统凝固工艺下, 工业纯铝易出现晶粒粗大、成分偏析等缺陷, 限制了其性能提升。机械振动作为一种有效的物理场干预手段, 在金属凝固领域展现出独特优势。通过引入机械振动, 可改变工业纯铝的凝固过程, 优化微观组织结构。本文将深入探讨机械振动原理, 剖析其对工业纯铝凝固过程的影响机制, 并提出相应的优化策略, 为提升工业纯铝质量提供理论支持。

1 机械振动原理

机械振动原理是研究物体在其平衡位置附近作有规律往复运动的理论体系, 广泛应用于机械工程、土木工程及仪器仪表等领域。其核心在于通过弹性恢复力与惯性力的相互作用, 使系统产生周期性运动, 这种运动形式既包含能量转换也涉及阻尼损耗。在无外部持续激励的条件下, 系统会因初始扰动产生自由振动, 其频率完全由系统固有属性决定。例如单自由度弹簧质量系统在去除外力后, 会以特定频率持续衰减振动, 振幅随时间指数式减小, 最终因能量耗散停止运动。这种特性在建筑结构抗震分析中具有重要应用, 通过计算固有频率可评估结构在地震作用下的共振风险。当系统受到周期性外力作用时, 将产生受迫振动, 若外力频率接近系统固有频率, 振幅会急剧增大形成共振现象, 这种特性在机械传动系统设计中需特别关注。例如汽车发动机悬置系统需通过优化刚度参数, 使固有频率避开路面激励频率, 避免产生共振导致的噪声与疲劳损伤。通过主动控制技术可利用共振原理实现能量高效传输, 如超声波清洗机通过20kHz以上的高频振动, 在液体中产生空化效应实现精密清洗。阻尼特性是机械振动系统的重要参数, 直接影响振动衰减速度。过阻尼系统因阻尼力过大导致响应迟缓, 欠阻尼系统则因阻尼不足产生持续振荡, 临

界阻尼状态可实现最快无振荡稳定。在精密仪器设计中, 常采用磁流变阻尼器实现阻尼参数在线调节, 确保系统在不同工况下均保持最佳动态性能。

2 机械振动对工业纯铝凝固过程的影响机制

2.1 枝晶应力折断作用

在工业纯铝的凝固进程中, 机械振动所引发的枝晶应力折断作用对其微观组织及凝固特性有着关键影响。当对处于凝固阶段的工业纯铝施加机械振动时, 振动能量会以应力波的形式在液态金属中传播。这种应力波在遇到已生长的枝晶时, 会在枝晶内部产生复杂的应力分布。由于枝晶不同部位所承受的应力大小和方向各异, 在应力集中区域, 枝晶会承受远超其自身强度的应力。随着振动持续进行, 应力不断累积, 枝晶在这种高应力作用下极易发生折断现象。枝晶折断后, 原本作为凝固核心并持续生长的部分被破碎成多个小尺寸的枝晶片段。这些枝晶片段并非失去活性, 相反, 它们成为了新的结晶核心, 分散于液态金属中。由于枝晶折断大幅增加了结晶核心的数量, 后续凝固过程中, 更多的晶核开始生长, 使得最终凝固组织中的晶粒得到显著细化。这种细化的晶粒结构能够有效提升工业纯铝的力学性能, 例如增强其强度和韧性, 降低材料内部的应力集中点, 提高材料整体的均匀性和稳定性, 进而对工业纯铝在实际应用中的表现产生积极作用^[1]。

2.2 增加非自发形核

机械振动对工业纯铝凝固过程中增加非自发形核方面有着重要贡献。在工业纯铝液态时, 其内部存在着一些微小的杂质颗粒或其他异质界面。这些杂质和异质界面本就具备一定的促进形核的能力, 但在常规凝固条件下, 其形核效果有限。当施加机械振动后, 情况发生了显著变化。机械振动促使液态铝中的原子产生剧烈运动, 这种运动使得原本分散在液态中的杂质颗粒和异质界面能够更频繁地与周围原子相互作用。第一, 振动增

强了原子向这些杂质和异质界面处的扩散速率,使得原子更容易在其表面聚集并排列成规则的晶格结构,从而降低了形核所需的能量壁垒。第二,振动引起的局部压力和温度波动,也有助于在杂质和异质界面附近创造出更有利于形核的热力学条件。在这样的协同作用下,大量原本难以成为有效形核点的杂质和异质界面,在机械振动的影响下,成功地引发了非自发形核过程。大量新增的非自发形核点使得工业纯铝在凝固初期就拥有了丰富的结晶核心,进而在后续凝固过程中形成更加细小、均匀的晶粒组织。这种因机械振动而增加的非自发形核现象,极大地改善了工业纯铝的凝固组织形态,为提升其综合性能奠定了坚实基础。

2.3 改善传热和流体流动

机械振动对工业纯铝凝固过程中的传热和流体流动有着显著的改善作用。在工业纯铝凝固时,热量需要从液态金属向周围环境传递,同时液态金属自身也存在着复杂的流动现象,而这两者对凝固组织的形成至关重要。当施加机械振动后,首先在传热方面,振动使得液态铝内部产生强烈的扰动。这种扰动打破了原本在液态金属中形成的相对稳定的温度边界层,增加了液态铝与外界环境之间的换热面积和换热系数。原本热量传递较为缓慢的区域,在振动作用下,热量能够更快速地传递出去,从而加快了整体的凝固速度。在流体流动方面,机械振动产生的应力波和机械力使得液态铝中的流体产生强烈的对流运动。这种对流运动不仅能够将高温区域的液态铝快速输送到低温区域,促进热量的均匀分布,而且能够有效地将凝固过程中产生的溶质原子及时扩散出去,避免溶质原子在局部区域的偏聚。强烈的对流运动还能够将已经形成的细小枝晶或晶核在液态铝中更均匀地分散开来,使得后续凝固过程中晶粒的生长更加均匀,从而改善了工业纯铝的凝固组织。这种对传热和流体流动的有效改善,使得工业纯铝在凝固过程中能够形成更理想的微观组织,对其性能的提升具有不可忽视的作用^[2]。

2.4 破碎枝晶后补缩通道扩大

在工业纯铝凝固进程中,破碎枝晶后补缩通道扩大这一现象与机械振动紧密相关。当对工业纯铝施加机械振动时,如前文所述,枝晶会因应力作用而发生折断破碎。这些破碎后的枝晶片段会在液态金属中重新分布。随着凝固过程的推进,液态金属逐渐转变为固态,在此期间,由于液态金属凝固时体积会发生收缩,需要有足够的液态金属来补充收缩产生的空隙,这个过程即为补缩。在未施加机械振动时,枝晶较为完整且连续生长,

形成的补缩通道相对狭窄且容易被堵塞。机械振动破碎枝晶后,情况发生了明显改变,破碎的枝晶不再像完整枝晶那样紧密排列,而是在液态金属中形成了更多、更宽的间隙。这些间隙共同构成了扩大后的补缩通道。液态金属能够更加顺畅地通过这些扩大的通道,向因凝固收缩而产生的空隙处流动,从而更有效地完成补缩过程。补缩效果的提升意味着凝固过程中材料内部因收缩产生的孔洞、缩松等缺陷能够得到更好的填充,大大提高了工业纯铝凝固后的致密度。这种因破碎枝晶而扩大补缩通道所带来的改善,对提升工业纯铝的质量和性能具有重要意义,使得工业纯铝在实际应用中能够更好地满足各种工程需求。

3 机械振动在工业纯铝凝固过程中的优化策略

3.1 振动参数的优化

(1) 频率作为关键振动参数,对工业纯铝凝固组织影响显著。低频时,液体金属流动缓慢,对凝固区域作用温和,易形成粗大但均匀的晶粒;频率升高,对流加剧,搅拌效果强,形核核心增多,晶粒细化。过高频率会致液体过度紊流,消耗能量且不利晶粒稳定生长,故需依特性及工艺要求,精准筛选适宜频率区间。(2) 振幅的调控同样至关重要。较小振幅只能在铝液局部区域产生微弱扰动,对凝固组织改善有限。适当增大振幅,能够增强液体的整体流动性,有效打破凝固前沿的温度梯度,阻碍柱状晶的生长,促进等轴晶的形成。过大振幅会使铝液产生剧烈波动,甚至可能导致凝固过程不稳定,引发内部缺陷,故而在实际操作中要精准把控振幅大小,平衡凝固组织优化与工艺稳定性。(3) 振动加速度直接关联着铝液所受外力强度。适度的加速度可增强传质效果,使溶质元素在铝液中分布更均匀,有助于改善凝固组织的成分均匀性。不过,加速度过大可能破坏已形成的晶核,干扰正常凝固进程,因此要综合考虑纯铝凝固动力学及传热特性,确定最佳振动加速度值,以实现凝固组织的最优化。

3.2 振动方式的优化

(1) 连续振动在工业纯铝凝固初期能持续为铝液提供能量,促使其内部保持活跃的对流状态,有效细化晶粒。这种振动方式有利于在整个凝固过程中维持相对稳定的液体流动模式,对于形成均匀一致的凝固组织具有积极作用。长时间连续振动可能导致能量过度集中,在某些区域产生过热现象,影响凝固质量,所以需合理控制连续振动的时长与强度。(2) 间歇振动则是在凝固过程中适时启停振动。在关键的形核阶段开启振动,能够激发大量晶核形成,随后关闭振动,让晶核在相对稳定

环境中生长。通过巧妙设置间歇周期与振动时长，可以在保证晶核数量的同时，避免过度振动带来的负面影响，使凝固组织在细化晶粒的基础上，保持良好的力学性能。

(3) 复合振动融合了多种振动形式，例如同时施加垂直与水平方向的振动。这种方式能在铝液中产生复杂的流场，进一步增强液体的搅拌效果，使形核核心在更广泛区域均匀分布。相较于单一振动方式，复合振动能够更全面地改善凝固组织，提升工业纯铝的综合性能，但对设备要求更高，需精确协调不同振动分量的参数^[3]。

3.3 振动时间的优化

(1) 在工业纯铝开始凝固的初期阶段引入振动，此时铝液温度较高、粘度较低，振动能够高效地促使溶质元素均匀分布，激发大量晶核形成。适宜的早期振动时间可有效细化初始凝固组织，为后续凝固过程奠定良好基础，显著提升纯铝的力学性能。若振动时间过早且过长，可能会导致晶核过度细化，甚至出现团聚现象，反而降低材料性能，因此要精准把握初期振动的开启时机与持续时长。(2) 凝固中期，随着固相比例增加，铝液流动性变差。此时合理的振动时间设置能够打破凝固前沿的枝晶网络，阻止柱状晶的过度生长，促进等轴晶的转变。恰当的中期振动时长可以优化晶粒形态与分布，提高材料内部结构的均匀性。如果振动时间不当，可能干扰已部分凝固区域的结构稳定性，引发内部缺陷，所以要依据凝固进程动态调整振动时间。(3) 在凝固后期，大部分铝液已转变为固态，此时振动主要作用于尚未完全凝固的少量液相。精准控制后期振动时间，能够消除局部缩孔、疏松等缺陷，进一步提升材料的致密度。过长的后期振动可能对已凝固部分造成损伤，破坏材料整体结构，故而要严格控制在后期振动时间，确保在改善缺陷的同时不影响材料性能。

3.4 与其他工艺的协同优化

(1) 将机械振动与电磁搅拌协同运用在工业纯铝凝固过程中，能够发挥两者优势。电磁搅拌可在铝液中产生宏观的环形流动，而机械振动则能在微观层面增强液体的局部扰动。两者结合，既能扩大溶质元素的扩散范

围，又能细化晶粒，显著改善凝固组织。通过合理调节电磁搅拌强度与机械振动参数，可实现对凝固过程的精准控制，大幅提升纯铝产品质量。(2) 机械振动与变质处理协同作用同样效果显著。变质剂的加入能够为铝液提供大量异质形核核心，而机械振动可以促进变质剂在铝液中均匀分散，并增强液体对流，使形核核心更充分地参与凝固过程。这种协同优化能够进一步细化晶粒，提高工业纯铝的强度与韧性，在提升材料性能的同时，拓展其应用范围。(3) 在工业纯铝凝固过程中，机械振动与快速冷却工艺协同操作也具有独特优势。快速冷却能够增加过冷度，促进晶核大量形成，机械振动则能在快速冷却过程中，改善铝液内部的温度与成分均匀性，减少热应力与成分偏析。两者协同优化，可制备出具有特殊微观结构与优异性能的工业纯铝材料，满足高端领域对材料的特殊需求^[4]。

结语

综上所述，机械振动作为一种有效的物理场调控手段，在工业纯铝凝固过程中展现出显著的影响机制。通过枝晶应力折断、促进非自发形核、改善传热与流体流动以及扩大补缩通道等作用，机械振动能够细化晶粒、提高组织均匀性，进而优化材料性能。未来研究应聚焦于振动参数、方式及时间的精准优化，并探索其与其他工艺的协同作用，以推动工业纯铝凝固技术的进一步发展与应用。

参考文献

- [1] 宋岩, 江鸿翔, 赵九洲, 等. Al-Ti-B 细化工业纯铝凝固组织演变过程数值模拟[J]. 物理学报, 2021, 70(8): 322-330.
- [2] 闫春雷, 沈利, 鲍鑫宇, 等. 脉冲磁场及 Al-5Ti-1B 中间合金对工业纯铝凝固组织的影响[J]. 轻合金加工技术, 2020, 48(10): 17-20, 30.
- [3] 李刚, 孙亚威, 赵振, 等. 等流速下新型脉冲磁场对纯铝凝固组织的影响[J]. 铸造, 2022, 71(11): 1389-1396.
- [4] 裘尧衡, 陈朝轶, 李军旗, 等. 1060 工业纯铝杆件夹杂物分析[J]. 铸造, 2023, 72(7): 863-869.