

高镁合金氧化料水波纹的成因及改善措施

师庆龙 韩德地 邵凯峰 凡鹏杰 闫碧霄
河南中孚高精铝材有限公司 河南 郑州 451200

摘要: 冷轧高镁合金氧化料铝合金带材在轧制后易出现表面“水波纹”缺陷,严重影响其在3C电子产品等高端领域的应用。本文系统分析了水波纹缺陷的形貌特征与形成机理,指出其本质是由于轧制变形区内润滑状态不均导致金属流动不一致所致。主要诱因包括轧制油膜强度不足、材料加工硬化加剧以及工艺润滑不良等。针对上述问题,本文提出并验证了一系列综合改善措施:优化轧制油中醇、酯比例以提升油膜强度;合理选择轧辊直径与粗糙度;适当提高轧制速度以增强油膜厚度;添加适量油膜增强剂以改善极压性能;优化退火与轧制道次分配;并在后工序采用碱洗工艺清除残留物。试验结果表明,通过多维度协同调控,可显著减轻甚至消除水波纹缺陷,有效提升高镁合金带材的表面质量与成品率。

关键词: 水波纹; 高镁合金; 油膜强度; 润滑状态; 油膜增强剂; 酸值添加; 退火工艺优化; 轧辊辊径; 碱洗

引言

高镁合金(主要为5系铝合金)因其优异的力学性能、良好的成形性、轻质、耐腐蚀及优良的热传导性能,被广泛应用于消费电子、汽车、航空航天等领域。尤其在3C电子产品(如笔记本电脑外壳、手机中框)中,经阳极氧化处理后的高镁合金不仅具备高硬度和强耐腐蚀性,还能呈现均匀亮丽的金属光泽,满足高端外观件对表面质感的严苛要求。然而,在实际生产过程中,冷轧高镁合金氧化料常在阳极氧化后出现一种沿轧制方向分布、明暗相间、呈倾斜水波状的表面缺陷,业内称之为“水波纹”。该缺陷虽不显著影响材料力学性能,但严重破坏产品外观一致性,导致大量返工甚至报废,已成为制约高镁合金高端应用的关键瓶颈之一。

1 高镁合金氧化料铝合金的生产工艺流程

高镁合金主要以5系铝合金为主,典型规格为厚度0.20 mm~0.60 mm、宽度1100 mm~1800 mm。该类合金具有易成形、重量轻、耐腐蚀、热传导性好、无味、无毒、印刷效果佳及可回收等优点,特别适用于对表面质量和环保性能要求较高的领域。其完整的生产工艺流程较为复杂,依次包括熔炼、铸造(扁锭)、锯切、铣面、加热、热粗轧、热精轧、冷轧、切边、清洗、再次冷轧、退火、精轧、拉矫、最终切边至成品规格以及包装等环节^[1]。其中,冷轧阶段是决定带材表面质量的核心工序,也是水波纹缺陷最易产生的关键节点。由于高镁合金在冷轧过程中加工硬化速率较快,且对润滑条件极为敏感,若工艺控制不当,极易在带材表面诱发微观不均匀变形,进而在后续阳极氧化处理中放大为肉眼可见的水波纹缺陷。目前,关于水波纹缺陷的研究多集中于

润滑机制与轧制工艺参数的关联性分析。陈国生指出,提高轧制油黏度与洁净度可增强油膜强度,从而缓解水波纹;路纪轩则强调通过调整添加剂配比或引入极压抗磨剂改善润滑状态。然而,现有研究多聚焦单一因素,缺乏系统性整合与工程化验证^[2]。

2 水波纹缺陷的形貌及分析

带材表面水波纹缺陷通常表现为沿轧制方向延伸、明暗相间、光泽差异明显、由带材边缘向中部倾斜一定角度的条纹,形态酷似水面波动,且上下表面对称分布。这种缺陷在特定光照条件下尤为明显,严重影响阳极氧化后的视觉效果和产品一致性。通过对缺陷样品进行扫描电镜分析发现,水波纹区域存在明显的明暗交替现象:暗区表面轧制纹理清晰,显示出典型的边界润滑特征,即摩擦副表面微凸体发生部分直接接触;而亮区则在垂直于轧制方向上出现横向光亮裂纹,属于边界润滑与流体润滑共存的混合润滑状态^[1]。由此可以推断,水波纹的产生与轧制变形区内润滑状态的不均匀密切相关。当局部区域油膜强度不足时,润滑方式由理想的流体润滑退化为边界润滑甚至干摩擦,导致该区域金属流动阻力增大,变形不均,最终在宏观上表现为周期性起伏的水波纹形貌。

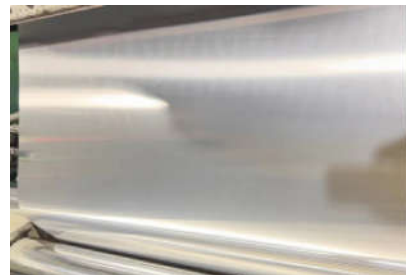


图1 缺陷图

3 产生水波纹原因

水波纹缺陷的形成涉及多个工艺环节的耦合作用，其根本原因在于轧制过程中润滑状态的动态失衡。在冷轧高镁合金时，材料本身加工硬化倾向强，随着道次增加，变形抗力迅速上升，对润滑系统提出更高要求。若轧制油膜强度不足，无法在高压、高速条件下维持连续有效的隔离层，则会导致轧辊与带材表面局部直接接触，形成边界润滑区域。与此同时，其他区域可能仍处于混合或流体润滑状态，造成变形区内应力分布不均，金属流动速率差异显著。此外，道次压下量过大、轧制速度过低、后张力设置不合理等因素也会加剧油膜破裂风险。已有研究表明，提高轧制油的黏度和洁净度有助于增强油膜承载能力，而调整添加剂中醇、酯比例或引入极压抗磨剂则可有效改善润滑性能^[2]。因此，水波纹并非单一因素所致，而是润滑体系、设备参数与材料特性共同作用下的综合表现。

4 消除水波纹的缺陷措施

4.1 提高醇酯比例增加及油温的保证

轧制油的添加剂主要包括酸、酯、醇三类，它们在油膜形成与润滑性能方面各具特点。其中，酯类形成的油膜最厚，酸和酯的油膜强度相当且均优于醇类，而醇类则在润湿性和抗油斑方面表现更佳。理论上，增加酸和酯的含量有助于提升油膜强度和厚度，从而改善原本处于边界润滑状态的暗区，促使其向混合润滑过渡。然而，酸类添加剂虽能降低轧制力、减少铝粉脱落，但其高活性易引发设备腐蚀、加速轧制油老化，并影响退火后带材表面洁净度，因此并非理想选择。相比之下，通过优化醇酯比例更为稳妥。实践中将醇与酯的比例调整为6:2进行生产，结果显示水波纹有所缓解，但尚未完全消除，说明仅靠基础油品调整尚不足以彻底解决问题，需与其他工艺手段协同配合。

表1 特性分析

特性	酸	酯	醇
油膜厚度	薄	厚	薄
油膜强度	强	强	弱
润湿性	良	差	优
热安全性	差	良	可
光泽	优	可	良
抗油斑	差	可	良

4.2 提高轧制速度

根据轧制速度效应理论，油膜厚度与轧制速度呈正相关关系。随着轧速提升，轧制区内的动压效应增强，有助于形成更厚、更稳定的油膜，从而改善润滑状态。

依据油膜厚度公式 $t_d = \frac{\eta v}{\alpha p}$ （其中 η 为轧制油黏度， v 为轧制速度， α 为入口夹角， p 为轧制力），提高速度 v 可直接增加油膜厚度 t_d ，同时降低单位轧制力也有助于维持油膜稳定性^[3]。试验表明，适当提升轧制速度后，轧制力显著下降，润滑状态由边界润滑逐步向混合润滑转变，水波纹缺陷明显减轻。因此，在设备允许范围内合理提高轧速，是改善润滑条件、抑制水波纹的有效手段。

4.3 使用辊径较小的轧辊进行轧制生产

轧辊直径对轧制过程中的接触状态具有重要影响。随着辊径增大，轧辊与带材的接触弧长增加，外摩擦作用加剧，导致轧制压力上升，不利于油膜稳定。反之，采用较小辊径的工作辊可有效缩短接触长度，减小轧制力和轧机弹跳，提升系统刚性，有利于维持均匀的变形条件。然而，辊径过小亦存在弊端：一方面可能削弱弯辊调控能力，影响板形控制；另一方面若辊径小于轧辊表面淬硬层深度，将导致表面硬度不足，反而恶化带材表面质量。因此，在保证轧辊淬硬层深度（通常 ≥ 3 mm）的前提下，选用适中偏小的辊径（如 $\Phi 420$ – $\Phi 450$ mm）可在降低轧制力与保障表面质量之间取得良好平衡。

4.4 使用油膜增强剂

在边界润滑状态下，摩擦副表面微凸体容易发生直接接触，导致油膜局部破裂，引发磨损甚至粘结。油膜增强剂（通常为含硫、磷的极压抗磨剂）能够在高温高压条件下与金属表面发生化学反应，生成剪切强度较低的固体保护膜，有效隔离两接触面，显著提升轧制油的极压性能。本研究在轧制油中添加质量分数为0.05%的油膜增强剂，经GB/T 3142四球法测试，油膜强度由原来的30 kgf提升至34 kgf。实际轧制后，带材表面水波纹虽未完全消失，但已有轻微改善。需要注意的是，过量添加此类添加剂可能导致带材表面残留，增加后续清洗难度，因此必须严格控制添加比例。

4.5 使用专门轧辊不同粗糙度的进行选择

考虑到轧辊表面粗糙度可能影响油膜分布与带材表面复制效应，曾尝试使用不同粗糙度（ $Ra = 0.10$ – $0.25 \mu\text{m}$ ）的轧辊进行对比试验。然而跟踪结果显示，水波纹缺陷并无明显改善趋势。分析认为，由于高镁合金氧化料需经过退火和拉矫等后续工序，原始轧制表面的微观起伏在一定程度上被“抹平”，因此轧辊粗糙度对最终水波纹表现的影响相对有限。尽管如此，为确保表面一致性，仍建议将轧辊粗糙度控制在稳定范围内（如 $Ra = 0.15 \pm 0.02 \mu\text{m}$ ），避免因波动引入额外变量。

4.6 使用碱洗进行生产进行改善

水波纹虽源于轧制阶段的润滑不均,但其在阳极氧化后的显影效果往往受到表面残留物的放大作用。带材表面附着的铝粉、油污或添加剂残留会在氧化过程中形成局部电化学差异,加剧明暗对比。因此,在拉矫工序引入碱洗环节至关重要。通过调整碱液浓度(20–40 g/L NaOH)与拉矫速度(50–100 m/min)进行多组试验,发现碱浓度过低清洗不彻底,过高则易造成基体过腐蚀;速度过快则清洗时间不足。最终确定最佳参数为碱液浓度30 g/L、拉矫速度70 m/min,此条件下带材表面洁净度显著提升,水波纹在视觉上的可见度明显降低,说明后处理清洗对缺陷“隐形化”具有积极作用。

4.7 道次压下量的分配调整

高镁合金在多道次冷轧中加工硬化迅速,若单道次压下量过大,将导致局部轧制力剧增,破坏油膜连续性,诱发润滑失效。理论上,通过增加道次数量、减小每道压下率,可有效降低单位面积轧制力,改善润滑稳定性。然而,实际生产中每增加一道次需额外占用约半小时轧制时间,对整体生产效率影响较大。经产效综合评估,仅在最后两道精轧工序适度减小压下量(分别控制在14%和12%),既可缓解局部应力集中,又不至于显著拖慢节奏。试验表明,该策略对水波纹有一定改善效果,但单独实施难以根治,需与其他措施联用。

4.8 通过添加含酸类添加剂进行改善

酸类添加剂因其优异的极压性能和减摩效果,曾在铝合金轧制油中广泛应用。其主要作用机理是在金属表面形成一层可溶性皂化膜,降低摩擦系数,减少铝粉脱落,并在一定程度上提升加工率。在初步试验中,向轧制油中引入少量酸性成分确实观察到轧制力下降和表面光洁度提升的现象。然而,深入评估后发现,其潜在弊端远超短期收益。首先,高酸值环境对轧机设备构成腐蚀风险,尤其对铜质轴承和密封件危害显著;其次,酸性物质会加速轧制油的氧化变质,缩短油品使用寿命,

增加维护成本;更为关键的是,在后续退火过程中,残留的酸性组分可能与铝基体发生反应,生成难以清除的氧化物或盐类沉积,严重影响带材表面洁净度。这些污染物在阳极氧化时会成为电化学活性中心,导致膜层不均、色差甚至斑点缺陷,反而加剧外观质量问题。因此,从全流程质量控制和长期稳定生产的视角来看,酸类添加剂并非理想的解决方案。仅在特殊工况(如极高硬度材料试轧)下,可谨慎微量添加,并同步加强油品酸值监控(建议控制在 ≤ 0.5 mgKOH/g)及后工序清洗强度,以最大限度规避其负面影响。

5 结语

高镁合金氧化料表面出现水波纹缺陷,其根源在于轧制过程中润滑状态不均引发金属流动差异。本文经系统分析得出结论:水波纹本质是边界润滑与混合润滑区域交替分布造成,关键因素是油膜强度不够;单一措施改善效果有限,需采用“油品优化+工艺调控+设备匹配+后处理强化”的综合策略,如优化醇酯比例、添加微量油膜增强剂、提高轧速、合理选辊径及碱洗参数,能显著抑制水波纹产生。工艺改进后,产品表面质量达到3C电子高端应用标准,具备良好工业化推广价值。展望未来,可进一步探索智能润滑监控系统与在线表面检测技术,达成水波纹缺陷的实时预警与闭环控制,推动高镁合金氧化料生产质量再上新台阶。

参考文献

- [1]陈国生.铝薄带“水波纹”缺陷的成因及其预防[J].轻合金加工技术,2005,(07):23-24.
- [2]路纪轩,路瑶,黄东海.3003铝合金冷轧带材水波纹缺陷分析及其改善措施[J].轻合金加工技术,2022,50(09):33-35+40.
- [3]张志平,周立,毛大恒.铝箔轧制润滑机理和速度效应的研究[J].轻合金加工技术,2004,(12):16-19+33.