

铝合金加工裂纹形成原因及解决措施

徐晨光

东北轻合金有限责任公司 黑龙江 哈尔滨 150060

摘要：本文剖析铝合金加工裂纹成因并提出解决措施。阐述铝合金物理化学性质及加工性能影响因素，指出材料成分、内部缺陷，工艺温度、速度、冷却方式，应力作用，环境温湿度与气体等均为裂纹诱因。针对性提出优化材料选择预处理、改进加工工艺、强化应力管理、控制环境等措施，为提升铝合金加工质量提供参考。

关键词：铝合金；加工裂纹；形成原因；解决措施

引言：铝合金因其密度低、强度高、耐腐蚀等优良性能，在航空航天、交通运输和电子设备等领域广泛应用。然而，在加工过程中常出现裂纹问题，严重影响产品性能与使用安全。裂纹的产生涉及材料特性、工艺控制、应力状态及环境条件等多个因素，机理复杂。深入分析裂纹成因，并采取针对性的预防措施，对提升铝合金加工质量、延长产品使用寿命具有重要意义。

1 铝合金的基本特性

1.1 铝合金的物理与化学性质概述

铝合金是以铝为基的合金总称，其物理性质独特。密度方面，相较于钢铁材料，铝合金密度较低，这一特性使其在航空航天、交通运输等对减重有需求的领域备受青睐。在熔点表现上，铝合金熔点随合金元素种类与含量变化而改变，不同类型铝合金熔点存在差异，这种特性影响着铸造等加工工艺的温度控制。铝合金的导热与导电性能同样突出。良好的导热性使其在电子设备散热领域广泛应用，能够快速传导热量，保证设备稳定运行。导电性能虽不及纯铜，但在满足电气性能要求的同时，凭借密度优势，在电力传输等领域可作为铜的替代材料。铝合金具有一定的强度与韧性，通过调整合金成分和热处理工艺，可显著提升其强度，使其既能承受一定载荷，又具备抵抗变形与断裂的能力。化学性质上，铝在空气中易与氧气发生反应，表面迅速形成一层致密的氧化铝薄膜。这层薄膜隔绝了内部铝与空气的接触，有效防止进一步氧化，赋予铝合金良好的耐腐蚀性能。然而，在特定化学环境中，如接触强酸碱物质，氧化铝薄膜可能被破坏，铝合金的耐腐蚀能力随之下降，甚至发生严重腐蚀，在特殊使用场景需采取防护措施。

1.2 影响铝合金加工性能的关键因素介绍

合金成分是影响铝合金加工性能的核心因素。不同合金元素加入铝基体后，会与铝发生各种物理化学反应，改变铝合金的组织结构与性能^[1]。例如，铜元素的加

入可显著提高铝合金强度与硬度，但会降低其塑性，在锻造等塑性加工过程中，含铜量高的铝合金变形难度增加。硅元素能改善铝合金的铸造性能，降低熔点，提高流动性，使铝合金在铸造过程中更易填充模具型腔，减少铸造缺陷。热处理工艺对铝合金加工性能影响深远。通过退火处理，可消除铝合金加工过程中产生的内应力，降低硬度，提高塑性，改善切削加工性能，便于后续机械加工。淬火与时效处理则能显著提升铝合金强度与硬度，不过过度时效会导致合金韧性下降，在后续加工中易出现裂纹等缺陷。合理选择热处理工艺参数，精确控制加热温度、保温时间和冷却速度，对保证铝合金加工性能至关重要。加工方式同样会影响铝合金加工性能。在铸造加工中，浇铸温度、模具温度和冷却速度决定了铝合金的凝固过程与组织形态。浇铸温度过高，合金液吸气量增加，易产生气孔缺陷；冷却速度过快，可能导致铸件内部产生较大热应力，引发裂纹。塑性加工时，变形量、变形速度和变形温度相互关联，变形量过大或变形速度过快，铝合金内部会产生大量位错堆积，形成应力集中，降低加工性能，甚至造成加工件开裂。

2 铝合金加工裂纹形成的原因分析

2.1 材料方面

合金成分是影响铝合金加工性能的关键因素。不同合金元素添加量改变金属晶格结构，直接影响材料塑性与韧性。铜元素强化铝合金的同时，会降低高温下的抗裂性，因为铜在晶界处偏析形成低熔点相，削弱晶界结合力。镁元素能提高合金强度，但过量会形成脆性金属间化合物，在加工变形时成为裂纹萌生的核心。锌元素添加虽能提升强度，却会增加应力腐蚀敏感性，使材料在加工过程中更易出现裂纹。材料内部存在的气孔、夹杂物等缺陷，同样对裂纹形成产生作用。气孔在加工过程中会因受力而变形，其尖锐边缘产生应力集中现象，当应力超过材料强度极限，就会引发裂纹。夹杂物与基

体材料的物理性能差异大,在加工变形时两者变形不协调,导致夹杂物与基体间出现微裂纹。这些微裂纹在后续加工过程中不断扩展,最终形成宏观裂纹。

2.2 工艺条件

加工温度对铝合金加工过程影响显著。温度过高时,铝合金晶粒会迅速长大,导致材料强度和塑性下降,加工过程中易出现开裂现象。高温还会使铝合金表面氧化加剧,形成疏松氧化膜,这层膜在加工时会破裂卷入金属内部,成为裂纹源。而温度过低,铝合金塑性降低,变形抗力增大,加工过程中产生的变形热不足以软化材料,使得材料内部应力急剧增加,当应力超过材料强度,裂纹随即产生。不合适的加工速率也会引发诸多问题。加工速度过快,铝合金内部产生的变形热来不及散发,导致局部温度升高,材料组织发生变化,强度降低。高速加工时材料变形不均匀,产生较大的附加应力,促使裂纹萌生。加工速度过慢,生产效率大幅降低,且长时间的机械作用会使材料内部产生疲劳损伤,累积到一定程度便会形成裂纹。冷却方式不同,给铝合金加工带来的挑战也不同^[2]。快速冷却时,铝合金内部会产生较大的热应力。因为表层与心部冷却速度差异大,收缩不一致,当热应力超过材料的屈服强度,就会产生塑性变形,若应力持续增加超过抗拉强度,裂纹就会形成。缓慢冷却虽能减少热应力,但可能导致第二相在晶界处析出和长大,降低晶界强度,在后续加工过程中,晶界处易产生裂纹。

2.3 应力作用

残余应力的产生源于铝合金加工过程中的不均匀变形。在加工过程中,材料各部分变形程度不同,相互约束产生内应力,加工结束后这些应力残留在材料内部。残余应力处于不稳定状态,会自发地寻求释放。当残余应力超过材料的临界应力值,就会引发裂纹。特别是当残余拉应力与加工过程中产生的应力叠加,使局部应力水平显著提高,大大增加裂纹形成的可能性。外部载荷与内部应力共同作用,推动裂纹扩展。外部载荷施加在含有初始微裂纹的铝合金材料上,会使裂纹尖端的应力集中程度加剧。内部应力则为裂纹扩展提供持续驱动力,两者相互配合,使裂纹不断向材料内部延伸。在循环载荷作用下,裂纹尖端反复张开和闭合,导致材料发生疲劳损伤,加速裂纹扩展速度,最终使材料失效。

2.4 环境因素

环境湿度和温度变化对铝合金加工存在影响。湿度较高时,铝合金表面易吸附水分,形成水膜。在加工过程中,水膜会渗入材料表面的微小裂纹中,与铝合金

发生化学反应,促进裂纹扩展。温度变化会使铝合金产生热胀冷缩,若加工环境温度波动频繁,材料内部会产生热应力。热应力与加工应力叠加,增加裂纹形成的风险。空气中氧含量及其他气体对铝合金表面氧化层有影响。氧含量高时,铝合金表面迅速形成氧化膜。这层氧化膜若生长不均匀,会在膜内产生应力,导致氧化膜破裂。破裂的氧化膜碎片在加工过程中会进入材料内部,成为裂纹源。其他气体如二氧化硫、氯气等,会与铝合金发生化学反应,降低材料表面质量,削弱材料性能,使铝合金在加工过程中更容易出现裂纹。

3 防止铝合金加工裂纹的解决措施

3.1 优化材料选择与预处理

根据加工需求选择合适牌号的铝合金材料是预防裂纹的首要环节。不同牌号的铝合金,其合金成分、力学性能和加工特性存在显著差异。例如,对于需要进行复杂塑性变形的加工工艺,如锻造、轧制,应优先选择塑性良好的铝合金牌号,这类合金在变形过程中能更好地适应外力作用,减少应力集中导致的裂纹风险。而用于铸造的铝合金,则需注重其流动性和收缩率,选择流动性佳、收缩率小的牌号,以保证铸件的成型质量,降低缩孔、裂纹等铸造缺陷产生的可能性。对原材料进行适当的预处理可有效减少内部缺陷^[3]。熔炼过程中,严格控制合金元素的添加顺序和比例,确保成分均匀,避免因成分偏析产生局部性能差异。采用精炼工艺,通过向合金液中加入精炼剂,去除其中的气体和夹杂物。精炼剂与气体、夹杂物发生物理化学反应,使其上浮至合金液表面,进而被清除。除气处理同样关键,利用真空除气或吹气除气等方法,降低合金液中的气体含量,防止气孔等缺陷在后续加工中成为裂纹源。对原材料进行探伤检测,运用超声探伤、X射线探伤等技术,提前发现内部存在的缺陷,并剔除不合格材料,从源头上保障材料质量。

3.2 改进加工工艺

调整最佳加工温度范围并确保均匀加热,是防止裂纹的重要工艺改进措施。每种铝合金都有其适宜的加工温度区间,在此区间内,材料的塑性和变形抗力达到良好平衡。加工前,通过工艺试验确定具体铝合金的最佳加工温度范围。加热过程中,采用均匀加热方式,避免局部过热或过冷。可使用多区加热设备,对工件进行分区控温,使温度场分布均匀。在加热过程中设置适当的保温时间,确保材料内部温度一致,减少因温度不均产生的热应力。控制合理的加工速度能有效避免过度变形。加工速度过快易导致应变集中和热积累,过慢则会增加残余应力。根据铝合金的种类、加工工艺和设备能

力,制定合理的加工速度曲线。在加工初期,采用较低的速度使材料逐渐适应变形,随后根据材料的变形情况和设备负载能力,逐步提高速度。实时监测加工过程中的各项参数,如力、温度、位移等,根据参数变化动态调整加工速度。当发现局部变形过大或温度异常升高时,及时降低速度,防止裂纹产生。改进冷却方法,采用渐进式冷却技术,可减少热应力。传统的快速冷却或缓慢冷却都存在弊端,渐进式冷却结合两者优势。在冷却初期,采用相对较快的冷却速度,使铝合金表层迅速凝固,形成一定强度的外壳。随着冷却的进行,逐步降低冷却速度,使内部缓慢冷却,减小表层与内部的温差,降低热应力。可通过控制冷却介质的流量、温度和喷射方式实现渐进式冷却。例如,在淬火冷却时,先使用温度较低、流量较大的冷却液快速冷却,一段时间后,降低冷却液温度和流量,实现缓慢冷却,有效避免因冷却不当产生的裂纹。

3.3 应力管理

实施有效的应力释放措施,如热处理,可消除加工过程中产生的残余应力。退火处理是常用的应力释放方法,将铝合金加热至适当温度并保温一定时间,使材料内部的位错重新排列,晶格畸变得到恢复,从而降低残余应力。对于不同的加工工艺和铝合金类型,选择合适的退火工艺参数至关重要。固溶时效处理不仅能提高铝合金的强度和硬度,还能在一定程度上调整内部应力状态。通过精确控制固溶温度、时间和时效工艺,使合金在强化的同时,消除部分残余应力。在设计阶段考虑结构优化以分散应力集中点,从根源上减少应力集中导致的裂纹风险。避免设计尖角、缺口等容易产生应力集中的结构,采用圆角过渡、平滑曲面等设计形式。合理布置加强筋、凸台等结构,分散载荷分布,降低局部应力^[4]。通过有限元分析等手段,对设计结构进行应力模拟分析,预测可能出现应力集中的部位,并对设计进行优化调整。例如,在铝合金零件的受力关键部位,增加结构厚度或改变结构形状,使应力分布更加均匀,减少裂纹产生的可能性。

3.4 环境控制

维持适宜的工作环境条件,稳定加工参数,为铝合金加工创造良好外部环境。严格控制加工车间的温度和湿度,避免环境因素对铝合金性能产生不利影响。过高的湿度会加速铝合金表面腐蚀,而过低的温度可能降低材料塑性。将环境温度控制在铝合金加工的适宜范围内,湿度保持在较低水平,并通过温湿度调节设备实时监控和调整。稳定加工过程中的各项参数,如压力、速度、温度等,减少因参数波动导致的加工不稳定。采用自动化加工设备和精确的控制系统,确保参数的稳定性和一致性。使用保护气体或涂层来隔离有害环境因素。在加工过程中,向加工区域通入保护气体,如氩气、氮气等,形成保护气膜,隔绝空气中的氧气、水分和其他腐蚀性气体与铝合金表面的接触,防止表面氧化和腐蚀。对于一些对表面质量要求较高的加工工艺,如焊接、热处理,保护气体的使用尤为重要。在铝合金表面涂覆防护涂层,如有机涂层、无机涂层,也能有效隔离有害环境因素。涂层不仅能防止表面腐蚀,还能在一定程度上减少加工过程中的摩擦,降低表面损伤和裂纹产生的风险。

结束语

铝合金加工裂纹的形成是多种因素综合作用的结果,必须从材料、工艺、应力和环境四个方面系统应对。通过优化材料选择、改进加工参数、实施应力释放和控制环境条件,能够有效抑制裂纹的产生。未来应进一步加强对铝合金加工过程的动态监测与智能调控,推动加工技术向精细化、高效化方向发展,全面提升铝合金产品的可靠性与安全性。

参考文献

- [1]朱黎原.铝合金焊接裂纹产生的原因和预防措施[J].中国金属通报,2022,(07):92-94.
- [2]杜亮,闫福旭.铝合金焊接常见缺陷及预防措施研究[J].中国金属通报,2021(7):71-72.
- [3]么天元.铝合金部件焊接接头裂纹分析[J].金属加工(热加工),2022,(05):72-74.
- [4]李大洋,熊俊良.铝合金电镀金鼓包原因分析及解决措施[J].电镀与精饰,2024,46(7):111-115.