

不同应力条件下镁合金的疲劳裂纹萌生与扩展规律

卢慧 张晶晶 郝静 陆珍 王斌

陕西服装工程学院, 中国·陕西 西安 712000

摘要: 论文研究了镁合金在多种应力环境下的疲劳裂纹产生与扩展规律, 分析了镁合金的物理与化学属性, 为后续研究提供了理论基础。在拉伸、压缩和交变应力作用下, 镁合金的疲劳裂纹产生规律以及裂纹扩展模式被详细阐述。基于这些分析, 提出了增强镁合金耐疲劳能力的策略, 包括调整合金成分、改善热处理技术以及有效的结构设计以减少应力集中。论文旨在推动镁合金在更多领域的应用, 提高构件的可靠性和耐用度。

关键词: 镁合金; 疲劳裂纹; 萌生规律; 扩展规律

Fatigue Crack Initiation and Propagation of Magnesium Alloy under Different Stress Conditions

Hui Lu Jingjing Zhang Jing Hao Zhen Lu Bin Wang

Shanxi Fashion Engineering University, Xi'an, Shaanxi, 712000, China

Abstract: In this paper, the law of fatigue crack generation and propagation of magnesium alloy under various stress environments was studied, and the physical and chemical properties of magnesium alloy were analyzed, which provided a theoretical basis for subsequent research. The fatigue crack generation rule and crack propagation mode of magnesium alloy under tensile, compressive and alternating stress are described in detail. Based on these analyses, strategies to enhance the fatigue resistance of magnesium alloys are proposed, including adjusting alloy composition, improving heat treatment techniques, and effective structural design to reduce stress concentration. This paper aims to promote the application of magnesium alloys in more fields and improve the reliability and durability of components.

Keywords: magnesium alloy; fatigue crack; initiation rule; expansion law

0 前言

镁合金因其密度小、比强度和比刚度高、资源丰富等特点, 被广泛应用于航空航天、交通运输等领域。镁合金零部件在实际使用时主要承受变幅动态载荷, 长时间低应力作用时易发生失效破坏, 常规静态力学指标并不能准确评价其服役的安全性和可靠性。因此, 研究镁合金高周疲劳性能对镁合金实际生产应用具有重要意义。

1 镁合金的基本特性

1.1 镁合金的物理性质

镁合金拥有众多突出的物理特性。密度较大约介于 $1.74\sim 1.85\text{g}/\text{m}^3$, 这一特性在追求减轻重量的行业里占据了显著优势。在航空和汽车制造行业, 采用镁合金能够减轻结构重量, 提升燃油经济性或增强载重能力。镁合金还具备优秀的导热和导电能力, 为电子产品散热等领域的应用提供了可能。镁合金的热膨胀系数较高, 温度波动时尺寸变化显著, 在特定应用中需特别注意, 以防热胀冷缩带来的结构问题。镁合金还拥有良好的减震特性, 能够有效吸收震动能量, 有助于降低机械设备震动和噪声。经过适当的表面加工, 镁合金可展现出金属特有的光泽, 能够呈现多样化的颜色和质

感。镁合金的强度和硬度不够高, 通过合金化处理和热加工技术, 可以增强性能, 适应各种不同的使用环境。

1.2 镁合金的化学性质

镁合金具备较高的化学活性。作为一种反应性较强的金属, 镁在接触空气时易与氧气产生作用, 生成一层氧化镁的防护层。这层防护层并不算紧密, 在湿润条件下极易被侵蚀, 使得镁合金更易遭受进一步的腐蚀。在酸性或碱性介质中, 特别是在含有氯离子的环境下, 镁合金被腐蚀速率将显著提升。镁合金的储存、应用以及防护措施需要特别重视。为了增强耐腐蚀能力对其进行表面处理, 如化学镀膜、阳极氧化处理或电镀等。在合金制造时通过加入铝、锌、锰等元素可有效提升镁合金的抗腐蚀特性。在高温作业中镁合金易与其他金属元素发生扩散反应, 这一点在高温加工和使用时必须注意。由于镁合金的化学稳定性较弱, 必须采取恰当的保护措施以保障使用寿命得以延长。

2 不同应力条件下镁合金疲劳裂纹萌生规律

2.1 拉应力作用下的裂纹萌生

在拉伸应力的持续作用下, 镁合金的疲劳裂纹产生过程展现出了独特的机制。当镁合金受到外力作用时, 其表层的微观瑕疵和内部隐藏的缺陷便成为裂纹初始生长的薄弱

环节。在初始阶段,材料表面由于磨损、凹陷等瑕疵的存在,拉伸应力的作用导致了显著的应力集中现象。随着应力逐渐增大,这些瑕疵周围的原子键开始逐渐断裂,从而形成微小的裂纹起源。

与此同时,镁合金内部的瑕疵气泡、杂质等由于拉伸应力的作用,在局部区域形成了高应力区,进一步促进了裂纹的产生。而且,拉伸应力的增强不仅加速了裂纹的形成,还影响了裂纹的位置和形态。长期的拉伸应力作用使得材料逐渐发生塑性形变,这种形变不仅加剧了裂纹的生长,还改变了裂纹的拓展路径。

在微观层面,镁合金的晶粒大小和排列方向对裂纹的形成具有显著的影响。晶粒较大的镁合金承受拉伸应力时,更易发生晶界滑动,从而导致裂纹在晶界处产生。而具有特定排列方向的晶粒,由于拉伸应力的作用,其形变机制将发生显著变化,进而改变裂纹的起源路径。

综上所述,镁合金在拉伸应力作用下的疲劳裂纹产生过程是一个复杂而精细的过程,受到多种因素的影响和调控。深入理解这一过程对于提高镁合金的抗疲劳性能、预防裂纹的产生以及优化材料设计具有重要意义。

2.2 压应力作用下的裂纹萌生

当镁合金受到压缩应力作用时,其疲劳裂纹的萌生过程显得尤为复杂。通常情况下,单纯的压缩应力并不足以直接诱发裂纹的产生。然而,在实际应用场景中,应力状态往往更为多变和复杂。例如,当镁合金表面存在瑕疵或内部结构不均匀时,局部区域极易受到拉伸和压缩应力的叠加效应。而复合应力的存在,导致了压缩应力的裂纹在特定区域的快速产生。

此外,镁合金在经历循环压缩应力的过程中,其微观结构将发生显著变化,如位错堆积和滑动。而微观层面的变化致使了局部应力集中的出现,进而触发裂纹的生成。同时,压缩应力还影响了镁合金的表面状况,如引发微小的皱纹或形变。这些表面变化在后续应力作用下极易成为裂纹的起点,进一步加速了裂纹的扩展。

压缩应力的大小及施加方式对裂纹的起始具有显著影响。过大的压缩应力易导致材料产生显著的塑性变形,从而增加了裂纹起始的风险。另外,不同的加载速度和周期导致了材料内部应力分布和微观结构的变化,进而影响裂纹起始的模式。

2.3 交变应力下的裂纹萌生

由于交变应力的持续作用,镁合金的疲劳裂纹萌生展现出独特的特性。该载荷使材料在拉伸与压缩状态之间不断往复,形成了一种加速疲劳损伤累积的循环应力状态。在交变应力的初期作用阶段,无论是材料表层还是内部的微小瑕疵,均成为裂纹优先萌生的关键区域。随着应力循环次数的累积,瑕疵处的应力集中现象愈发凸显,逐渐促使裂纹的形成。相较于恒定的拉力或压力,交变应力状态的裂纹萌生速

度往往更为迅猛。这主要归因于交变应力下材料内部位错的持续运动和积累,进一步加速了疲劳损伤的进程。

交变应力的强度和频率对裂纹的萌生具有显著的影响。较高的应力幅值导致了材料遭受更为广泛的应力波动,从而显著提高裂纹萌生的风险。而高频的交变应力则导致材料内部热量积聚,进而改变其力学特性,对裂纹的萌生产生间接影响。从微观结构层面观察,交变应力作用的镁合金,晶粒将经历反复的形变与恢复过程。此过程易导致晶界的削弱,以及裂纹在晶界处的萌生。此外,交变应力还将促使第二相粒子与基体界面发生分离,形成裂纹的起点。

3 不同应力条件下镁合金疲劳裂纹扩展规律

3.1 拉应力下的裂纹扩展

对于拉应力的作用,镁合金疲劳裂纹的扩展呈现出鲜明的特征。起初,拉伸应力促使裂纹尖端迅速裂开,形成以张开型(I型)为主的裂纹扩展模式。随着拉伸应力的持续作用,裂纹尖端的应力集中因子逐渐增强,有力地推动裂纹不断向前延伸。在扩展过程中,裂纹往往沿着与拉伸应力垂直的方向稳定增长,这是由于拉伸应力的存在,使材料的原子键在垂直于应力的方向上更容易出现断裂。

镁合金的微观结构对拉应力下的裂纹扩展同样发挥着至关重要的作用。例如,晶粒尺寸较小的镁合金,由于其晶界的阻碍作用,裂纹扩展的速度相对较慢。晶界能够改变裂纹的拓展路径,使裂纹在晶界附近发生偏移或停滞,从而有效减缓裂纹的扩展速度。

此外,镁合金中的第二相颗粒也对裂纹的扩展产生了显著影响。当裂纹遇到第二相颗粒时,便选择绕过颗粒继续扩展,或者在颗粒处产生局部应力集中,从而加速裂纹的扩展。拉伸应力的大小以及加载速度同样对裂纹扩展具有显著影响。较大的拉伸应力加速了裂纹的扩展速度,而较慢的加载速度则为材料提供更多塑性变形的时间,从而在一定程度上减慢裂纹的扩展速度。

不可忽视的是,环境因素如温度和湿度对裂纹扩展的影响。在高温条件下,镁合金的强度将显著下降,从而导致裂纹扩展速度加快。而在潮湿环境中,镁合金易受腐蚀影响,腐蚀与裂纹扩展之间的相互作用进一步加剧裂纹的进展。

3.2 压应力下的裂纹扩展

当镁合金承受压应力作用时,其疲劳裂纹的扩展过程较为复杂。单一的压缩应力通常对裂纹扩展起到抑制作用。具体而言,在压缩应力的影响下,裂纹尖端呈现闭合状态,这有效减少了裂纹尖端的应力强度系数,从而削弱了裂纹扩展的驱动力。然而,在实际应用场景中,应力状态往往更为复杂。当存在残留的拉伸应力或局部应力集中时,压缩应力与其他应力协同作用,反而加剧裂纹的扩展。此外,镁合金在经历循环压缩应力时,其内部微观结构也将随之变化,如位错堆积和滑动。此类微观结构的变化易引发局部应力集

中,进而触发裂纹的扩展。压缩应力的 $\text{大小及其施加方式对裂纹扩展具有显著影响。过大的压缩应力导致材料发生极大的塑性变形,从而增加裂纹扩展的风险。同时,不同的加载速度和周期亦调整了材料内部的应力分布和微观结构变化,进而影响裂纹扩展的模式。此外,环境因素在压缩应力条件下也对裂纹扩展产生作用。例如,在潮湿环境中,压缩应力加剧了镁合金的腐蚀过程。而腐蚀与裂纹扩展之间的相互作用进一步加速裂纹的进展,对材料的完整性和耐用性构成了严重威胁。}$

3.3 交变应力下的裂纹扩展

当镁合金承受交变应力作用时,其疲劳裂纹增长展现出了独有特性。交变应力使镁合金在拉伸和压缩应力之间反复切换,而反复的应力循环不仅加剧了裂纹的扩展,还使其呈现出蜿蜒、分支等复杂形态。在交变应力的持续影响下,裂纹尖端所受的应力强度因子不断波动,进而推动裂纹以复杂模式扩散。而该扩散轨迹的复杂性,正是由于交变应力引起的材料内部位错持续移动和聚集,导致材料微观结构发生变化,从而影响了裂纹的扩散轨迹。

4 提高镁合金抗疲劳性能的措施

4.1 合金成分精细化调整

对镁合金进行成分调整,是提升其抗疲劳性能的核心策略。科学地掺入不同的合金元素,能够显著增强镁合金的机械属性和耐疲劳属性。铝作为常见的添加元素,适量加入不仅增强了合金的坚固度和硬度,还有助于提升耐腐蚀性。然而,铝的过量添加使镁合金脆化,影响其柔韧性和耐疲劳性。因此,需要精确控制铝的添加量,以实现最佳的耐疲劳效果。

锌元素的加入同样不可或缺,它不但强化了镁合金的强度,还对其可塑性及耐蚀性有可观提升。锌的强化作用主要源于固溶强化和沉淀强化的共同作用。

此外,锰、锆以及稀土元素等也能作为强化剂融入镁合金,以增强其耐疲劳特性。锰能提升镁合金的耐蚀性和耐疲劳性,锆有助于细化晶粒,进一步提升合金的强度和韧性。而稀土元素则对提高镁合金的高温性能和耐疲劳性有显著效果。

在调整合金成分时,必须全面考虑各种元素的作用及其相互作用,确定最理想的合金配比。同时,还需兼顾合金的生产工艺和成本问题,确保成分调整的可行性和经济效益。

4.2 热处理工艺优化

热处理工艺对镁合金的抗疲劳特性具有显著影响。通过恰当的热加工处理,可显著增强镁合金的耐疲劳能力。同时,热处理过程还对镁合金的内部组织结构具有优化效用,使其更加致密和均匀。

在热处理的第一步——固溶处理阶段,合金元素能在镁基体内均匀分布,形成一致的固溶体。该过程不仅增强了

合金的机械强度和可塑性,还提升了其抗腐蚀和耐疲劳的特性。固溶处理的温度与时长需根据合金的具体成分及性能指标进行精确调整。

时效处理作为热处理的后续步骤,能够促使已固溶的合金元素析出,生成强化相,进一步增强合金的强度和硬度。此过程对提升抗疲劳性能有着重要助益。时效处理的温度和时间也需针对合金特性进行优化选择。

此外,热处理的其他方法如淬火和回火也会对镁合金的疲劳特性产生作用。淬火能够促使镁合金迅速冷却,生成微细晶粒和亚稳态相,从而提升机械强度和韧性。而回火则有助于消除淬火产生的内应力,稳定组织结构,进一步增强抗疲劳性能。

在挑选热处理工艺时,必须全面考虑镁合金的成分、性能需求、加工工艺等多方面因素,确定最适宜的热处理参数。同时,热处理过程中的温度、时间控制以及气氛的维持也是确保工艺稳定性和效果可靠性的关键环节。

4.3 结构设计以分散应力为核心

在设计镁合金结构时,必须周密考虑应力分散的规避,以增强其耐久疲劳的能力。首先,在设计轮廓的规划上,应竭力消除锐利的转折和急剧的断面变化。转折点极易引发应力汇聚,从而加速疲劳裂纹的起始与蔓延。为了解决这一问题,可采用圆滑过渡、流畅曲线等设计手法来实现应力的均衡分布。

在镁合金部件的设计中,将直角转折替换为弧形转折是一种有效的优化方式。这种转变能够显著减少应力汇聚的比率,从而降低部件在受力时产生的局部高应力集中。此外,恰当的架构布局也是避免应力集中的关键。通过合理布局,可以降低应力汇聚的风险,避免单一区域承受连续的高应力负荷。为了进一步优化应力的分布,还可采用增设加固肋、调整支撑结构等方式来分散应力。

在连接点的规划上,也需要采用适宜的连接技术来防止应力汇聚的加剧。例如,在螺栓连接时,应挑选合适的螺栓规格和预紧力,以避免螺栓孔周边出现过高的应力。在焊接连接时,应选择恰当的焊接技术和参数以确保焊纹的优良质量,从而降低焊接缺陷导致的应力汇聚风险。

此外,通过表面处理等手段可进一步提升镁合金架构的表面品质。减少表面瑕疵引发的应力汇聚是提高抗疲劳性能的重要环节之一。运用喷砂、滚压等表面强化技术能够在镁合金表面形成压缩应力层增强其耐久疲劳能力。

5 结语

论文深入探讨了镁合金在多样化应力状态下的疲劳裂纹起始与扩散特性,详尽地分析了拉伸、压缩以及交变应力作用下,镁合金疲劳裂纹的多种表现形式及扩散模式。在此基础上,提出了若干切实有效的策略,旨在提升镁合金的抗疲劳性能。尽管研究已取得一定进展,但仍存在一些局限,

例如对复杂应力环境的探究尚显不足,但本研究无疑为镁合金的抗疲劳性能研究开辟了新的路径。展望未来,随着研究范围的拓展和高端检测技术与模拟手段的融合,我们将能够更精确地解析镁合金疲劳裂纹的生成与演变机理。持久而深入的探索将为镁合金的优化设计及其安全、高效应用提供坚实的理论支撑和技术保障。

参考文献:

- [1] 杨福来,王强,张峥.AZ31镁合金在高周疲劳过程中微观组织和孪晶演变特征[J].稀有金属材料与工程,2023,52(8):2693-2701.
- [2] 刘坤,李洁,王浩,等.镁合金焊接凝固裂纹敏感性评价及晶间液相回填规律分析[J].焊接学报,2023,44(9):9-15.
- [3] 刘宸汗,刘玉,詹敏,等.WE94镁合金长寿命疲劳小裂纹萌生和扩展行为研究[J].中国测试,2023.
- [4] 冀盛亚,常成,常帅兵,等.医用镁合金微弧氧化/有机复合涂层的研究现状及演进方向[J].表面技术,2023,52(12):315-334.
- [5] 袁远,肖柱,马牧之.高速铁路铜镁合金弹性吊索失效分析[J].科技创新与应用,2023,13(16):75-78.

作者简介: 卢慧(1999-),女,壮族,中国广西河池人,硕士,助教,从事复合材料腐蚀与防护研究。

课题项目: 陕西服装工程学院 1112 工程特色本科课程项目,项目编号: 2024TSKC043。