

# 环境友好型镁合金塑形成形工艺研究

宋晓茜

山西科技学院, 中国·山西 晋城 048000

**摘要:** 论文探讨了环境友好型镁合金成形工艺的开发与优化,这在注重减重的行业(如汽车和航空航天)中日益重要。研究涵盖了镁合金成形中固有的延展性低和反应性高(特别是在高温条件下)的挑战,强调了可持续成形方法的必要性,包括低温成形、非传统加工技术和无污染润滑剂的应用,这些方法都有助于减少能耗和废弃物。此外,论文研究了镁合金的先进回收技术,以促进闭环生产周期。最后,分析了基于仿真的工艺和材料参数优化技术,以确保效率并最小化环境影响。该研究为符合环保标准的可持续成形实践提供了见解,并支持镁合金在环保应用中的发展。

**关键词:** 镁合金; 环境友好成形; 低温技术; 非传统加工; 无污染润滑

## Research on Environmentally Friendly Magnesium Alloy Shaping Process

Xiaoqian Song

Shanxi Institute of Science and Technology, Jincheng, Shanxi, 048000, China

**Abstract:** This paper explores the development and optimization of environmentally friendly magnesium alloy forming processes, which are increasingly important in industries that focus on weight reduction, such as automotive and aerospace. The study covers the challenges of inherent low ductility and high reactivity (especially under high temperature conditions) in magnesium alloy forming, emphasizing the necessity of sustainable forming methods, including low-temperature forming, non-traditional processing techniques, and the application of pollution-free lubricants, all of which contribute to reducing energy consumption and waste. In addition, the paper investigates advanced recycling technologies for magnesium alloys to promote closed-loop production cycles. Finally, simulation based process and material parameter optimization techniques were analyzed to ensure efficiency and minimize environmental impact. This study provides insights into sustainable forming practices that comply with environmental standards and supports the development of magnesium alloys in environmentally friendly applications.

**Keywords:** magnesium alloy; environmentally friendly formation; low temperature technology; non-traditional processing; non polluting lubrication

## 1 镁合金的材料特性及成形难点

### 1.1 镁合金的基本材料特性

镁合金是最轻的结构材料之一,具有高强度重量比和优异的比刚度,在需要轻量化材料的行业如汽车、航空航天和电子行业中极具价值。镁合金的密度约为  $1.74\text{g/cm}^3$ ,远低于铝和钢,从而显著减少了重量。镁合金还具有良好的电磁干扰(EMI)屏蔽特性和振动阻尼性能,这些特性提升了其在电子应用中的功能性。

然而,镁的六方密排(HCP)晶体结构限制了其延展性,因为与铝或钢中的立方结构相比,它的滑移系较少。这导致镁合金在室温下相对脆性,增加了其塑性成形的复杂性。镁合金中的主要合金元素如铝、锌和锰可增强其强度和耐腐蚀性,但通常会降低其成形性。此外,镁在高温下的高活性要求在加工过程中使用保护气氛,以避免快速氧化和燃烧<sup>[1]</sup>。

### 1.2 镁合金成形过程中的难点

镁合金在室温下的低延展性使得传统的成形过程极具挑战性。由于滑移系的限制,镁需要在高温下进行成形以实

现充分的塑性变形。通常,成形过程在  $200^\circ\text{C}$  以上进行,以激活额外的滑移系,从而允许更大程度的变形。然而,保持温度梯度的控制较为困难,因为加热不均匀可能导致应力集中和裂纹。

镁合金成形的另一个难点是其各向异性,这导致机械性能在不同方向上存在差异。该各向异性源于合金的微观结构,可能导致不可预测的变形行为,可能导致成形件出现褶皱、撕裂和回弹等缺陷。此外,镁合金的快速应变硬化限制了成形性,降低了在断裂前的变形程度。镁合金在氧气环境下的高活性要求严格的过程控制,以减轻氧化。燃烧风险进一步限制了成形方法,因为镁在高温下易于在空气中点燃,需要昂贵的保护气氛或涂层。

### 1.3 镁合金成形过程中的环保问题

传统镁合金成形工艺存在诸多环境问题。高温成形过程需要大量能量输入,导致高能耗和相关的温室气体排放,特别是在依赖化石燃料为能源的工艺中。此外,通常使用惰性气体(如氩气)的保护气氛,增加了操作成本和资源消耗,

对可持续性产生影响。

在镁合金成形过程中使用润滑剂和保护涂层也带来了环境挑战。传统润滑剂可能含有有害化学物质，废弃时会渗入环境，导致土壤和水体污染。此外，频繁的润滑剂清洁和再应用产生废物并需要进一步的能量消耗。镁合金废料的回收利用也存在环保问题，因为成形过程中积累的杂质和氧化层影响了可回收性，需要进行高强度处理。

## 2 环境友好型镁合金塑形成形工艺原理

### 2.1 环境友好型工艺的基本概念

环境友好型成形工艺旨在通过减少能源消耗、废物生成和有害物质的释放来尽量减少生态影响。在镁合金成形中，这意味着开发低温工艺、减少对保护气氛的依赖以及使用可持续或可回收材料。一个重要的目标是通过降低工艺温度或利用先进的保温和能量回收技术来提高能效。

这些工艺优先使用环境毒性低且可回收性高的润滑剂和涂层，或者在某些情况下，旨在完全消除这些材料的使用。另一个核心概念是促进镁废料的回收利用，增强闭环材料循环，减少对原始镁提取的需求，这本身是一个高能耗过程。通过可持续的成形技术开发轻量化的镁合金零件，直接支持汽车和航空航天行业减少排放，并实现燃油效率设计。

### 2.2 现有工艺的环境影响评估

当前的镁合金成形工艺主要因其高能耗和对保护气氛的需求而产生显著的环境影响。例如，热锻造和挤压等常见的镁合金成形方法通常在 300°C 以上的温度下操作，消耗大量的能源。能源密集型过程不仅增加生产成本，还会在以化石燃料为主要能源的情况下产生大量的温室气体排放<sup>[1]</sup>。

在镁合金加工过程中频繁应用和丢弃的传统润滑剂和冷却剂将化学污染物引入环境。传统润滑剂的成分评估显示，许多润滑剂中含有氯、硫和重金属等添加剂，这些添加剂对环境和健康有不利影响。此外，镁的高活性需要在成形过程中使用氩气或 SF<sub>6</sub> 气氛，以防止氧化和燃烧。然而，SF<sub>6</sub> 是一种极具温室效应的气体，其全球变暖潜力是 CO<sub>2</sub> 的数千倍，使其在成形工艺中的使用变得不可持续。

### 2.3 环保改进技术的基本原理

为了解决这些问题，提出并开发了几种环境友好的改进措施。一个关键的途径是通过合金设计和工艺创新来降低成形温度。研究表明，稀土元素或钙等合金元素可以增强镁合金在低温下的延展性，从而降低成形温度，减少能量消耗。

具有最小环境影响的替代润滑剂和表面涂层也在不断研究中。例如，从可再生资源中提取的生物基润滑剂提供了有效的润滑而不会带来传统润滑剂的有害残留。此外，通过使用特殊涂层模具或创新的成形方法，干式或半干式成形技术消除了对外部润滑剂的需求，极大地减少了化学废物。

另一项有前途的改进是激光辅助成形技术，它将热量精确定位到变形区域，实现定向加热并减少整体能耗。惰性

气氛可以通过保护涂层或环保气体混合物来替代。回收改进措施，包括使用熔剂和精炼技术去除杂质，有效促进镁合金废料的再利用，进一步降低了生产对环境的影响。

### 2.4 可持续性材料应用分析

在镁合金成形工艺中结合可持续材料是提升其环境兼容性的一个重要方面。使用再生镁合金不仅减少了对初级镁的需求，还降低了与开采和加工相关的碳足迹。开发在多次循环使用后仍保留性能的可回收合金配方是一个主要研究领域。再生镁精炼等二次加工技术的进步有助于创建镁产品的闭环生命周期，这对于可持续性至关重要。

可持续润滑剂和涂层也受到广泛关注，重点放在可生物降解或能有效过滤出废物流的材料上。此外，实施可重复使用的模具材料和工具减少了频繁更换的需求，从而最小化了资源消耗和浪费。传感器和过程控制系统的集成能够优化成形参数，以尽量减少材料浪费，从而支持可持续材料的使用。

## 3 环境友好型镁合金塑形成形工艺的主要方法

### 3.1 低温塑形技术

低温塑形技术旨在提高镁合金的成形性，同时避免高温成形过程中的高能耗。传统上，镁合金成形依赖高温以实现足够的塑性变形，但这会增加能耗并带来环境影响。低温成形方法通过开发可以在较低温度下（通常低于 200°C）进行变形的合金和技术，大幅减少了能量需求<sup>[1]</sup>。

一种方法是通过在合金成分中添加钙和稀土金属等元素来提高低温延展性。这些元素能够增强滑移系的激活并减少变形时的内摩擦，从而支持低温成形。此外，研究还探索了低温控制下的低温成形技术，通过在受控的低温条件下提升材料性能和降低能耗。低温成形能够细化晶粒结构，从而提高延展性和强度，而无需额外的热能输入。该技术的发展有望大幅降低镁合金成形的能源足迹，实现更具环保性的镁合金成形工艺。

### 3.2 非传统加工工艺（如冲击成形、超塑性成形）

非传统的加工方法，如冲击成形和超塑性成形，为减少能耗和浪费提供了环保的替代方案。冲击成形技术利用高速冲击塑形成形镁合金，从而在无需持续高温的情况下实现快速变形。该方法能够实现高应变率并形成复杂形状，适合精密零件生产需求。

超塑性成形（SPF）是另一种选择，利用某些镁合金在特定温度下的超塑性行为。通过保持受控的应变率，SPF 可以在最小力下实现大变形，生成复杂的形状并减少材料浪费。尽管 SPF 通常需要高温，但通过在掺杂稀土元素的镁合金中优化工艺，能够在较低温度下操作。该技术减少了复杂模具的需求，并通过减少废料降低了环境浪费。

### 3.3 无污染润滑技术的应用

无污染润滑技术的使用对于镁合金成形工艺的环保兼容性至关重要。传统润滑剂通常含有对环境有害的添加剂，在

处置时会释放污染物。开发环保替代品,如生物基或水基润滑剂,能够通过减少成形工艺的生态足迹来解决这些问题。

生物基润滑剂来自植物油等可再生资源,能够有效润滑,且对环境影响较小。这些润滑剂可生物降解且易于过滤,降低了环境污染风险。此外,含有可生物降解添加剂的水基润滑剂提供了替代解决方案,减少了废流中的化学残留,提升了工艺清洁度。针对镁合金,这些润滑剂必须具有优良的热稳定性,以应对高温成形过程,同时保持润滑效果。

还开发了干式或半干式润滑技术,以尽量减少对外部润滑剂的需求。在干式成形中,模具上的特殊涂层形成低摩擦界面,从而消除润滑剂的使用。这些涂层通常由类金刚石碳(DLC)或陶瓷材料组成,具有高耐磨性,并能承受成形工艺的应力。半干式润滑通过精准提供少量润滑剂到接触点,减少了润滑剂消耗和废弃物生成。通过减少化学品使用和废物生成,这些润滑技术不仅降低了成形工艺的环境负担,还降低了运营成本。

### 3.4 材料回收与再利用技术

镁合金的回收和再利用对可持续生产至关重要,因为镁的提取能耗高且环境负担重。有效的回收方法可以减少对初级镁生产的需求,从而降低能耗和温室气体排放。镁合金的回收技术主要集中在保持合金的机械性能,并清除前次制造周期中积累的杂质。

在熔化和铸造过程中加入熔剂可以提高回收镁的质量,通过去除氧化物和杂质,使得回收材料能够达到与初级镁相当的性能。真空蒸馏则是一种先进的回收技术,通过受控的温度和压力去除杂质,实现高纯度的镁回收。这些工艺不仅提高了回收材料的质量,还为镁合金创建了闭环生命周期,降低了镁生产的环境影响。

另一种方法是将镁废料升级为具有改进性能的新合金。通过添加特定的合金元素,再生镁可以转化为具有定制性能的合金,扩大了回收材料的应用,并为回收过程增值。这些回收技术的发展对于在镁生产中创建可持续材料循环至关重要,减少了对原材料的依赖,并支持环保生产实践。

## 4 成形工艺的优化与仿真技术

### 4.1 基于数值模拟的工艺优化方法

数值模拟技术在优化镁合金成形工艺的性能和环境可持续性方面起着关键作用。有限元分析(FEA)广泛应用于模拟成形过程,使工程师能够优化温度、应变率和材料流动模式等参数。通过确定最佳工艺条件,模拟可以减少实际测试中的反复试验,从而节约时间和材料。

模拟还可以预测成形缺陷,如开裂、褶皱或回弹,这有助于完善工具设计,减少浪费。通过模拟进行工艺优化支持可持续实践,最大限度地减少了材料浪费、能耗和成形操作的总体环境影响。针对低温和高效工艺,数值模拟尤其有价值,因为它能够确定实现所需材料性能的最低可行温度,从而节约能源<sup>[4]</sup>。

### 4.2 工艺参数对环境影响的仿真分析

通过仿真分析工艺参数对环境的影响使得制造商可以做出平衡性能与可持续性的基于数据的决策。通过建模不同成形温度和应变率的能耗,仿真可以识别出在保持产品质量的前提下,最小化能耗的条件。此方法提供了成形温度或润滑剂应用等具体参数对温室气体排放、材料浪费和污染的影响的见解。

此外,生命周期评估(LCA)模型可以集成到仿真中,以评估镁合金成形过程在其整个生命周期内的环境影响,从原材料提取到最终处置。这样的分析可以帮助制造商确定最可持续的工艺路径,结合环境和经济因素。这些洞察有助于开发符合法规标准和环保目标的生态友好型镁合金成形方法。

### 4.3 新型环保润滑材料的仿真效果分析

仿真对于评估新型环保润滑材料在成形过程中的性能和环境影响也具有重要价值。通过建模生物基和水基润滑剂的行为,仿真可以评估它们在减少摩擦、磨损和材料黏附方面的有效性,以适应不同的成形条件。这有助于确定在不造成传统润滑剂相关环境危害的前提下提供所需功能的润滑解决方案。

新润滑剂材料的热稳定性、耐磨性和降解特性可以在虚拟环境中测试,提前验证其性能,减少物理试验中的材料消耗。这类仿真还可以预测润滑性能在重复成形循环中的变化情况,提供润滑剂使用寿命和成本效益方面的见解。通过仿真优化润滑剂选择和应用方法,制造商可以减少化学废弃物、降低成本并改善镁合金成形工艺的环境可持续性。

## 5 结语

综上所述,开发环境友好型镁合金成形工艺需要多方面的综合方法,包括先进材料科学、可持续技术集成以及严格的工艺优化。通过采用低温成形和冲击、超塑性成形等非传统方法,行业可降低镁合金成形通常所需的高能耗。无污染润滑剂的使用和有效的回收流程进一步减少了环境影响,促进了对长期生态平衡至关重要的可持续材料循环。此外,基于仿真的优化技术能够对工艺参数进行精确调整,提高效率并减少浪费。这些进展共同支持镁合金在注重轻量化和燃油效率设计的行业中的广泛应用,同时符合环保标准。

### 参考文献:

- [1] 张丽,宋爱华.镁合金微乳化加工液的试制研究[J].润滑油,2010,25(1):23-26.
- [2] 陈波水,方建华,李芬芳.环境友好润滑剂[M].北京:中国石化出版社,2006.
- [3] 段亚利,张治民,薛勇.镁合金的应用及其塑性成形技术[J].湖南有色金属,2007,23(1):38-41.
- [4] 赵鸿,孟庆鑫.镁合金应用的发展趋势及切削加工要点[J].工具技术,2005,39(6):30-33.

作者简介:宋晓茜(1997-),助教,从事中国金属塑性成形研究。