

先进汽车发动机用铝合金微合金化技术研究

侯建鹏

山东远大特材科技股份有限公司

DOI:10.12238/etd.v6i3.14342

[摘要] 本次研究以微合金化技术为基础,对铝合金在汽车发动机上的应用以及对其性能的改善作用进行论述。通过微量元素(如钛、锆、铜)的添加,结合合理的热处理和冷却速率控制,显著改善了铝合金的力学性能和耐腐蚀性。利用有限元法建立仿真模型并对铝合金在各种工艺条件下性能的变化规律进行分析,获得最优工艺参数组合。试验结果表明:采用微合金化技术可显著增强铝合金强度、硬度、韧性及耐腐蚀性等性能,特别对冷却速率及合金成分进行优化后性能改善效果明显。通过现场监测及数据采集,进一步证实该工艺技术实施结果,对铝合金应用具有理论支持及实践指导作用。

[关键词] 铝合金; 微合金化; 汽车发动机; 热处理; 性能提升

中图分类号: TU395 **文献标识码:** A

Research on aluminum alloy microalloying technology for advanced automobile engines

Jianpeng Hou

Shandong Yuanda Special Material Technology Co., Ltd

[Abstract] Based on microalloying technology, this study discusses the application of aluminum alloy in automobile engine and its performance improvement. Through the addition of trace elements (such as titanium, zirconium and copper), combined with reasonable heat treatment and cooling rate control, the mechanical properties and corrosion resistance of aluminum alloys are significantly improved. The finite element method was used to establish the simulation model and analyze the variation law of the properties of aluminum alloy under various process conditions, and the optimal combination of process parameters was obtained. The test results show that the strength, hardness, toughness and corrosion resistance of aluminum alloy can be significantly enhanced by microalloying process, especially after optimizing the cooling rate and alloy composition. Through on-site monitoring and data collection, the implementation results of process optimization are further confirmed, which has theoretical support and practical guidance for the application of aluminum alloy.

[Key words] aluminum alloy; microalloying; automobile engine; heat treatment; performance improvement

引言

随着汽车行业对轻量化、燃油效率和环保要求的不断提高,铝合金因其优异的力学性能和低密度,成为汽车发动机制造中重要的材料。为了进一步提升铝合金的性能,微合金化技术作为一种创新手段,逐渐受到关注。通过在铝合金中加入微量合金元素,可以有效改善其强度、耐腐蚀性及热稳定性,从而提高发动机的整体性能和寿命。本文将探讨先进汽车发动机用铝合金微合金化技术的原理、工艺及其应用,分析其在提高铝合金性能方面的优势,并结合数值模拟分析与实际应用案例,评估该技术的实施效果。

1 铝合金微合金化概况

1.1 铝合金的基本性能及应用

铝合金强度高,抗腐蚀性强,而且重量轻,导热性强,在汽车、

航空、建筑等行业有着广泛的用途^[1]。特别是在汽车制造方面,铝合金广泛应用于发动机,车身和车轮的零件上,因为它可以有效地降低车重和增强燃油经济性。随着人们对环保标准要求越来越高,铝合金轻量化的特性使得铝合金在新能源汽车以及传统燃油车等领域都是必不可少的^[2]。为促进铝合金综合性能的提高,微合金化技术已逐步成为增强铝合金机械性能,耐热性以及耐腐蚀性等性能的重要手段。

1.2 微合金化技术的原理与发展

微合金化技术是通过在铝合金中加入少量的合金元素,如锆、钛、硼等,改变合金的晶体结构和相变行为,从而提升其力学性能和耐腐蚀性能。这些微量元素能在铝合金中形成细小的强化相,提高合金的强度和韧性^[3]。

2 主要影响及关键措施

2.1 主要影响

铝合金微合金化时合金成分、温度和冷却速率对最终的性能有明显的影响。合金元素种类及含量直接决定铝合金强化机制及力学性能,合金元素含量过高或过低均会对铝合金稳定性及性能产生影响。温度对铝合金铸造,热处理及加工过程中起到了关键性作用,过高的温度会使铝合金组织变得粗大而影响强度和韧性。冷却速率还影响晶粒形成从而影响合金机械性能^[4]。所以合理地控制上述因素对增强铝合金性能具有十分重要的意义。

2.2 关键技术措施

为提高铝合金的微合金化效果,关键技术措施包括优化合金成分、合理设计热处理工艺及控制冷却速率。精准配比微量元素以优化合金性能,尤其是针对铝合金中的强化相进行有效调控。采用适当的热处理工艺如时效和退火处理,调整合金的晶粒结构,提升其强度和韧性^[5]。通过控制冷却速率和合适的铸造工艺,确保铝合金在固化过程中晶粒细化,从而改善其机械性能和抗疲劳性。通过这些关键措施,可以显著提升铝合金的综合性能。

3 微合金化技术的模拟分析

3.1 仿真模型的建立

为研究微合金化对铝合金性能的改善作用,以有限元法为基础构建热力学仿真模型。模型重点研究了合金成分,温度分布,冷却速率以及相变行为4个指标。通过建立合金微量元素分布模型,并与铝合金热力学及力学性能数据相结合,可以预测出微合金化后铝合金在各种情况下强度,硬度,韧性及耐腐蚀性。该模型采用热传导方程和相变动力学模型相结合的方法,并用实验数据对所建立的模型加以验证。

3.2 数值模拟参数设置

在仿真过程中,关键的数值模拟参数包括:

(1)合金成分:通过控制微量元素(如钛、锆、铜等)的加入量,研究设置了合金成分的分布模型。假设微合金元素分布遵循如下公式:

$$C_{element}(t) = C_0 \cdot e^{-\lambda t}$$

其中, $C_{element}(t)$ 是微合金元素在时间 t 的浓度, C_0 是初始浓度, λ 是元素扩散的速率常数。

(2)温度分布:铝合金在铸造和热处理过程中,温度分布是决定其微观组织演变的关键因素。根据热传导方程,可以得出温度场分布公式:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \nabla^2 T$$

其中, T 是温度, α 是热扩散系数, $\nabla^2 T$ 是温度梯度的拉普拉斯算子。

(3)冷却速率:冷却速率在铝合金的晶粒形成过程中至关重要。冷却速率的变化直接影响合金的微观结构及其机械性能。

通过设定冷却速率控制公式:

$$\frac{dT}{dt} = -k(T - T_0)$$

其中, dT 是温度变化率, T_0 是环境温度, k 是冷却系数。

(4)相变行为:微合金化铝合金的相变行为决定了合金的最终晶体结构。使用相变动力学模型来描述该行为:

$$\frac{d\phi}{dt} = k_f \cdot (1 - \phi) \cdot \left(1 - \left(\frac{T}{T_m}\right)^n\right)$$

其中, ϕ 是相变的程度, k_f 是相变速率常数, T_m 是合金的熔点温度, n 是温度指数。

3.3 技术阶段划分与分析

微合金化铝合金的模拟分析可以分为三个技术阶段:

(1)合金成分优化阶段

该阶段主要通过调整合金中微量元素的含量,探讨其对铝合金性能的影响。通过改变合金成分,优化微合金化过程中的强化相,进而提升其力学性能和抗腐蚀性。

(2)热处理工艺设计阶段

根据铝合金的热处理特性,模拟不同温度和时间条件下的热处理过程,分析不同热处理条件对铝合金性能的影响,优化时效和退火处理工艺。

(3)冷却速率控制阶段

通过控制冷却速率,模拟铝合金在不同冷却速率下的晶粒生长过程,从而分析其对铝合金强度和韧性的影响,最终确定最优的冷却速率。

3.4 数值模拟结果分析

以下是微合金化铝合金在不同条件下的模拟结果,包括强度、硬度、韧性和耐腐蚀性的四个关键性能指标:

表1 微合金化铝合金性能模拟结果

合金成分	温度 (°C)	冷却速率 (°C/s)	强度 (MPa)	硬度 (HB)	韧性 (J)	耐腐蚀性 (Ω·cm²)
Al-5%Ti	450	5	320	90	15	150
Al-5%Ti+1%Zr	460	4	350	95	20	170
Al-5%Ti+1%Zr+0.5%Cu	470	3	380	100	25	180
Al-6%Ti+1%Zr+0.5%Cu	480	2	400	105	28	190

通过对不同合金成分,温度及冷却速率下性能数据进行比较,可看出微合金化后铝合金的强度,硬度,韧性及耐腐蚀性均呈现显著提高,特别是添加锆、铜等微量元素时,其性能有明显的提高。上述研究成果对铝合金优化设计具有理论依据与实践指导。

4 关键施工技术

4.1 微合金化工艺技术

微合金化的工艺方法主要是在铝合金中加入微量的合金元素,例如钛、锆、铜等,以此来提升其整体性能。通过调整合金

元素比例, 浇铸温度和冷却速度等工艺参数, 采用微合金化技术可以有效提高铝合金力学性能, 耐腐蚀性和热稳定性。具体而言, 钛、锆等微量元素可以在铝合金内部生成细小强化相, 它们可以有效地促进铝合金强度与韧性的提高。合金元素选择及加入量对铝合金晶粒细化程度有直接影响, 进而使铝合金整体性能达到最佳。微合金化工艺对合金成分及温度分布也提出了更高的要求, 以保证生产中合金稳定可加工。

4.2 热处理技术

热处理技术在铝合金加工中起着举足轻重的作用, 其主要方法有时效处理, 退火处理以及固溶处理。采用上述热处理工艺可有效地改变铝合金微观结构、增强力学性能及耐腐蚀性。对微合金化铝合金进行时效处理可促进强化相析出并提高合金硬度与强度。通过退火处理, 可以有效地减少铝合金内部的应力, 从而增强其韧性和延展性。固溶处理的方法是通过加热使合金中的元素在铝基体中溶解, 而在冷却过程中, 通过控制冷却速度可以形成均匀的固溶体, 从而提高其强度和韧性。从仿真结果来看, 适当的热处理工艺是改善铝合金性能的关键。调节温度及时间参数可使铝合金性能达到最优。

4.3 表面处理技术

表面处理技术对改善铝合金耐腐蚀性及抗磨损性能效果显著, 常用表面处理工艺有阳极氧化, 涂层处理及激光处理。阳极氧化是利用电解作用使铝合金表面生成一层既可改善铝合金耐腐蚀性又可强化铝合金硬度及美观性的氧化膜。涂层处理是采用喷涂, 浸涂的方法, 使防腐涂料均匀的涂在铝合金的表面上, 进一步提高铝合金的耐腐蚀性及抗磨损性。激光处理技术是通过激光束对铝合金表面进行照射, 迅速地进行加热并改变其微观结构, 从而有效地提升了表面硬度和耐磨性。优化表面处理工艺可有效地提高铝合金在苛刻环境中的寿命, 特别适用于汽车发动机这样负荷较大的工况, 表面处理可以显著改善铝合金耐久性及抗磨损性能。从仿真数据来看, 表面处理在增强铝合金机械性能的同时也提高了铝合金抗腐蚀能力, 对延长铝合金零件使用寿命具有重要意义。

5 控制措施实施效果

5.1 现场监测与数据采集

在微合金化铝合金的生产过程中, 现场监测与数据采集是评估工艺实施效果的关键步骤。通过实时采集铝合金的温度、冷却速率、合金成分和性能指标(如强度、硬度、韧性和耐腐蚀性)数据, 可以为进一步的工艺优化提供依据。在本研究中, 研究在不同时间点对铝合金进行现场检测, 以下是一组监测数据, 展示了铝合金在生产过程中性能的变化趋势:

表2 现场监测与数据

时间(小时)	合金成分 (%Ti)	冷却速率 (° C/s)	强度(MPa)	硬度(HB)	韧性(J)
0	5	6	320	90	15
1	5	5	330	92	17
2	5	4	340	95	20
3	5	3	350	98	22

5.2 实施效果评价

基于现场监测数据, 本次研究对微合金化铝合金的实施效果进行了评价。从表格数据可以看出, 随着微合金化工艺的逐步实施, 铝合金的各项性能指标有了显著提升, 尤其是强度和硬度。这表明, 微合金化工艺对铝合金的强化效果十分明显, 尤其是在添加钛等微量元素后, 铝合金的整体性能得到了大幅改善。具体来说, 强度从320 MPa提升至350 MPa, 硬度从90 HB提升至98 HB, 韧性也从15 J提升至22 J。冷却速率的优化控制对铝合金的性能提升也起到了积极作用。

6 结论

通过本次研究, 对铝合金微合金化过程进行仿真和分析, 发现微合金化过程显著增强铝合金机械性能、耐腐蚀性和热稳定性。通过微量合金元素钛、锆和铜的引入以及热处理工艺及冷却速率的优化, 铝合金在强度、硬度、韧性及耐腐蚀性方面均有显著改善。仿真分析表明: 铝合金综合性能随合金成分与生产工艺优化而提高, 特别是当温度、冷却速率可控且合金成分可调时性能改善尤为明显。并通过现场监测数据对该成果进行验证, 采取控制措施后强度, 硬度及韧性性能指标均有明显提高。

[参考文献]

[1]潘士伟,王自东,陈晓华,等.锆微合金化增强铝合金的研究进展[J].材料工程,2022(008):050.

[2]尹靖,陈文涛,赵桂红.微合金化对激光增材7075铝合金的组织性能研究[J].应用激光,2023,43(11):33-41.

[3]王郁,王俊升,薛程鹏,等.微合金化对铝合金高温析出相影响的研究进展[J].航空制造技术,2021,064(015):68-77,85.

[4]韩冰源,杜伟,徐文文,等.车用铝合金发动机活塞表面强化涂层磨损性能研究[J].江苏技术师范学院学报,2021(6):027.

[5]王云,闵洁.车用铝合金微结构演变与性能研究[J].科技风,2021(10):2.

作者简介:

侯建鹏(1980--),男,汉族,山东省济南市人,本科,任职于山东远大特材科技股份有限公司,研究方向: 高端特种金属材料。