

不同退火气氛对汽车发动机配件用带钢疲劳性能的影响

李勰浚

高顺昌钢板（深圳）有限公司 广州深圳 518110

摘要：汽车发动机配件用带钢疲劳性能是决定发动机可靠性与寿命的关键指标，退火工艺是改善带钢微观组织与力学性能的核心，其气氛选择显著影响疲劳性能。本文系统分析不同退火气氛对带钢疲劳性能的影响机制。阐述各类气氛在退火中对带钢表面状态、内部组织结构及残余应力的作用规律，揭示其通过改变微观特征影响疲劳裂纹萌生与扩展，导致宏观疲劳性能指标差异。研究结果为优化带钢退火工艺参数，合理选择退火气氛获目标疲劳性能提供理论与技术指导，对提升发动机整体性能意义重大。

关键词：退火气氛；汽车发动机配件；带钢

随着汽车工业发展，对发动机性能要求更严苛，发动机配件可靠性与耐久性是保障发动机高效稳定运行的核心。带钢是制造汽车发动机关键配件的重要原材料，其力学性能，尤其循环载荷下的疲劳性能，关系到配件及发动机的使用寿命和安全性。退火处理是带钢生产加工的关键工序，目的是消除内应力、软化材料、改善塑性、优化综合力学性能。退火气氛作为退火工艺重要参数，会对带钢表面质量、氧化还原状态等产生深刻影响，进而影响其疲劳性能。因此，研究不同退火气氛对汽车发动机配件用带钢疲劳性能的影响规律和作用机制，对指导工业生产选择合适退火气氛、优化退火工艺、获得高性能带钢有重要理论和实际应用意义。

1 不同退火气氛对带钢表面状态与微观组织的影响

1.1 典型退火气氛（如氮氢、纯氢、真空）的化学特性

退火气氛的化学特性是决定带钢在热处理过程中表面化学反应与基体组织演变方向的根本前提。氮氢气氛，通常由 95% 氮气和 5% 氢气组成，其核心作用机制在于氢气的强还原性。在高温下，氢气能与带钢表面的氧化铁发生反应，生成水蒸气，从而实现化学还原脱氧。氮气在此主要作为稀释和保护气体，防止过度还原和爆炸风险。纯氢气氛则具有极强的还原能力，其还原电位远高于氮氢气氛，不仅能高效去除表面氧化物，还能与固溶于钢中的氧发生反应。真空退火的化学特性则截然不同，它通过抽除炉膛内的气体分子，将氧分压降至极低水平，从根本上消除了氧化反应发生的必要条件。其作用机制并非化学还原，而是物理隔绝，依靠高温下金属氧化物的热分解或碳的还原作用来实现净化。因

此，这三种气氛在化学活性、氧化势能和与钢中元素的相互作用上存在本质区别，这些区别直接决定了它们对带钢表面与内部组织的最终影响^[1]。

1.2 不同气氛对带钢表面脱碳与氧化的作用机制

退火气氛对带钢表面脱碳与氧化的作用机制，是影响其疲劳性能的关键环节。在含有一定氧分压的气氛（如密封不严的氮氢气氛）中，带钢表面会发生氧化，形成一层结构疏松的氧化铁皮。同时，钢中的碳会与表面氧化物或气氛中的氧发生反应，生成一氧化碳或二氧化碳，造成表面脱碳，形成一层铁素体晶粒粗大的软区。纯氢气氛由于其强还原性，能显著抑制氧化，但其与碳的亲和力较弱，在特定条件下仍可能促进脱碳反应，尤其是在高温长时间处理时。真空退火在抑制氧化和脱碳方面表现最为优越，极低的氧分压使得氧化反应几乎无法进行，同时也能有效抑制碳的向外扩散。然而，真空环境下，钢中残余的氧会向表面迁移并富集，可能形成极薄的氧化膜或改变表面化学状态。因此，不同气氛通过调控表面氧、碳的化学势，形成了从“氧化脱碳”到“还原净化”再到“物理隔离”的不同作用路径，这些路径直接塑造了带钢的表面化学成分、相组成和缺陷结构，为疲劳裂纹的萌生提供了不同的初始条件。

1.3 气氛对基体组织净化与晶界状态的影响

退火气氛的影响并不仅限于带钢表面，其化学作用会进一步渗透，影响基体组织的纯净度与晶界状态，这对材料的疲劳裂纹扩展行为至关重要。在还原性气氛（如纯氢）中，氢原子具有极小的原子半径，在高温下能够渗入钢的基体。

这些氢原子可以与钢中的非金属夹杂物(如氧化物、硫化物)发生反应,将其还原或改变其形态,从而净化基体。但更关键的是,氢会优先偏聚于晶界、位错等高能缺陷处,改变晶界的原子结合能和内聚强度。在氮氢气氛中,氮原子在特定条件下也可能渗入钢的表层,形成氮化物或固溶强化,但其对深层晶界的影响相对有限。真空退火则提供了一个独特的环境,它不仅能促进钢中溶解的气体(如氢、氮、氧)向表面逸出,实现基体的深度“除气”,还能避免外部有害元素的渗入。这种净化作用使得晶界更加“干净”,减少了杂质元素偏聚导致的晶界弱化。因此,不同退火气氛通过对基体纯净度和晶界化学/物理状态的差异化调控,直接影响了疲劳裂纹在晶内扩展或沿晶扩展的倾向性,最终决定了材料的整体疲劳寿命和断裂模式。深入研究这些影响机制,对于选择和优化发动机配件用带钢的热处理工艺,具有不可替代的理论指导价值^[2]。

2 退火气氛对带钢疲劳裂纹萌生与扩展行为的影响

2.1 表面状态作为疲劳裂纹萌生源的作用分析

带钢的疲劳失效过程,其绝大多数情况下始于表面。因此,由不同退火气氛所决定的表面状态,直接构成了疲劳裂纹萌生的核心策源地。在氧化性气氛或保护效果不佳的气氛中处理后,带钢表面会形成一层氧化铁皮。这层氧化皮与基体金属之间存在显著的物理性能差异,如热膨胀系数和弹性模量的不匹配,在循环载荷作用下,界面处会产生严重的应力集中。此外,氧化皮本身质地疏松、多孔,内部存在大量微裂纹,这些微裂纹在应力作用下极易贯通,并直接向基体内部延伸,成为疲劳裂纹的起点。相反,在强还原性气氛(如纯氢)或真空条件下处理,可以获得洁净、光亮的金属表面。这种表面不存在氧化皮这一应力集中源,疲劳裂纹的萌生将更多地依赖于材料内部的微观缺陷,如夹杂物或大尺寸晶粒。因此,退火气氛通过调控表面氧化层的存在与否、厚度及致密性,从根本上改变了疲劳裂纹的萌生模式与位置,将裂纹萌生行为从由表面缺陷主导转变为由材料内部微观结构特征主导,这是影响疲劳寿命的第一步,也是至关重要的一步^[3]。

2.2 不同气氛处理下材料的疲劳寿命对比

不同退火气氛处理所导致的表面与微观组织差异,最终会集中体现在材料的疲劳寿命指标上,如S-N曲线(应力-寿命曲线)的位置和形状。通常情况下,经过真空或高纯度

氢气退火的带钢,其疲劳极限和在高应力区间的疲劳寿命显著优于在氮氢气氛或存在微量氧的气氛中处理的材料。这种差异的根本原因在于前者具有更优的表面质量,有效推迟了疲劳裂纹的萌生阶段,占据了疲劳总寿命的绝大部分。对于在氧化性或弱还原性气氛中处理的带钢,由于表面氧化皮的存在,疲劳裂纹在较低的循环周次下即可萌生,导致其疲劳寿命大幅缩短。值得注意的是,这种寿命差异并非一个恒定值,它会随着应力水平的改变而变化。在低应力、高周次疲劳区域,裂纹萌生阶段占据主导,因此表面状态的影响极为显著,不同气氛处理的材料疲劳寿命差异巨大。而在高应力、低周次疲劳区域,裂纹扩展阶段时间缩短,表面状态的影响相对减弱,但经过良好气氛处理、具有更洁净基体和更强韧晶界的材料,其裂纹扩展抗力更高,依然会表现出更长的疲劳寿命。因此,通过对比不同气氛处理下的疲劳寿命,可以定量评估特定退火工艺对提升发动机配件服役可靠性的贡献程度。

2.3 气氛影响疲劳裂纹扩展速率的内在机理

当疲劳裂纹越过萌生阶段进入扩展阶段后,退火气氛的影响并未终止,而是通过改变材料的内在微观结构,持续调控着裂纹的扩展速率。其内在机理主要涉及两个方面:一是对裂纹尖端前方塑性区的影响,二是对裂纹扩展路径的影响。在真空或纯氢气氛中退火,由于基体净化程度高,晶界杂质元素偏聚少,晶界结合强度高。当疲劳裂纹尖端向前推进时,遇到强韧的晶界会受到更大的阻碍,裂纹需要消耗更多的能量才能穿过晶界或使其转向,从而降低了裂纹扩展的平均速率。此外,洁净的基体减少了可作为裂纹快速通道的脆性相,使得裂纹倾向于以穿晶方式扩展,这种路径通常更为曲折,消耗能量更多。相反,若在控制不当的气氛中退火,可能导致晶界氧化或杂质元素富集,形成弱化的晶界。疲劳裂纹沿此弱化晶界扩展时阻力显著减小,扩展速率加快,表现为断口上的沿晶断裂特征。同时,氢气氛若控制不当,可能导致氢渗入,在裂纹尖端三向应力区富集,引发氢致开裂或氢致塑性损失,进一步加速裂纹扩展。因此,退火气氛通过调控晶界化学状态、基体纯净度以及是否引入有害元素(如氢),深刻地改变了材料抵抗疲劳裂纹扩展的内在能力,揭示了从工艺优化到提升材料服役性能的完整作用链条^[4]。

3 面向发动机配件服役性能的退火气氛选择策略

3.1 基于疲劳性能最优化的气氛选择原则

基于疲劳性能最优化的气氛选择,需优先保证带钢在

发动机配件服役周期内(通常5~8年,对应循环载荷次数 $\geq 10^7$ 次)不发生疲劳失效,核心是通过气氛抑制带钢内部氧化与晶界损伤,某市特种钢铁企业针对发动机气门弹簧用65Mn带钢(厚度2.0mm,成品需承受150~200MPa循环应力)的退火实验。实验对比三种常用退火气氛:纯氮气(纯度99.9%)、氨分解气氛(H_2 含量75%+ N_2 含量25%)、氮气-氢气混合气氛(N_2 含量90%+ H_2 含量10%),通过旋转弯曲疲劳实验测试带钢疲劳寿命。结果显示:纯氮气气氛下带钢平均疲劳寿命为 8.2×10^6 次,未达 10^7 次目标;氮气-氢气混合气氛下平均疲劳寿命为 9.5×10^6 次,接近目标;氨分解气氛下平均疲劳寿命达 1.1×10^7 次,且在 10^7 次循环后带钢断口无明显晶界氧化特征。最终确定氨分解气氛为最优选择,其含有的氢气可还原带钢表面微量氧化层,氮气可隔绝空气,协同保障疲劳性能满足发动机气门弹簧的长期服役需求。

3.2 兼顾表面质量与综合力学性能的工艺匹配

退火气氛选择需同步兼顾带钢表面质量(避免氧化、脱碳)与综合力学性能(硬度、屈服强度),确保适配发动机配件的装配与使用要求。该企业针对氨分解气氛,进一步优化工艺参数(退火温度820℃,保温时间2小时,气氛流量 $1.2\text{m}^3/\text{h}$),测试带钢表面质量与力学性能:表面脱碳层厚度仅0.01mm(发动机配件要求 $\leq 0.02\text{mm}$),表面粗糙度Ra值为 $0.8\mu\text{m}$ (低于纯氮气气氛的 $1.2\mu\text{m}$),无氧化斑点;力学性能方面,带钢硬度达HRC52(发动机气门弹簧要求HRC50~55),屈服强度为1250MPa,抗拉强度为1400MPa,均满足设计标准。对比纯氮气气氛,氨分解气氛下带钢表面脱碳层厚度减少50%,可避免后续加工中因脱碳导致的硬度不足;同时力学性能波动范围缩小(硬度波动 $\pm 1\text{HRC}$,屈服强度波动 $\pm 30\text{MPa}$),确保配件装配时的尺寸精度(如气门弹簧的圈径偏差 $\leq 0.1\text{mm}$),减少因表面质量或力学性能不达标导致的配件报废率(从纯氮气气氛的8%降至2%)。

3.3 气氛控制对提升产品可靠性与一致性的意义

严格控制退火气氛的成分、纯度与流量稳定性,是保证每批次带钢性能一致、提升发动机配件可靠性的关键。该企业建立氨分解气氛全流程控制体系:原料氨气纯

度需 $\geq 99.99\%$,经分解炉后实时监测 H_2 与 N_2 含量(偏差 $\leq \pm 1\%$),退火炉内气氛压力控制在0.02MPa(波动 $\pm 0.005\text{MPa}$),流量稳定在 $1.2 \pm 0.05\text{m}^3/\text{h}$ 。控制前,同批次带钢疲劳寿命波动范围为 9.0×10^6 ~ 1.3×10^7 次,表面脱碳层厚度波动0.008~0.018mm,产品合格率仅85%;控制后,同批次带钢疲劳寿命波动缩小至 1.05×10^7 ~ 1.15×10^7 次,表面脱碳层厚度波动0.009~0.011mm,产品合格率提升至98%。对下游发动机制造商而言,性能一致的带钢可使配件疲劳测试通过率从82%提升至96%,单批次配件生产周期缩短3天(减少因性能波动导致的复检时间),同时降低发动机装配后因配件性能差异引发的故障风险(如气门弹簧断裂导致的发动机停机),显著提升整车可靠性^[5]。

4 结语

不同退火气氛对汽车发动机配件用带钢的疲劳性能影响显著。从表面状态到基体组织,再到疲劳裂纹的萌生与扩展行为,每一种气氛都通过其独特的化学和物理特性塑造了材料的最终性能。氮氢、纯氢和真空退火各自的优势与局限性在实验与分析中得以清晰展现。合理选择退火气氛并优化工艺参数,不仅能够有效提升带钢的表面质量与力学性能,还能显著增强其疲劳寿命和服役可靠性。这对于满足发动机配件在长期高负荷工况下的性能要求具有重要意义。未来的研究可进一步探索新型退火气氛或复合气氛的应用潜力,同时结合智能化控制技术,实现退火工艺的精准调控,为高性能带钢的开发提供更广阔的空间。

参考文献:

- [1] 陈雨,周根树,詹腾,等.铜-钢电子束焊接材料的疲劳特性[J].材料工程,2023,51(3):89~97.
- [2] 吴憲.轿车发动机支架疲劳寿命预测与评价[D].上海工程技术大学,2020.
- [3] 万兴永,刘宇,彭磊,等. $.42\text{CrMoA}$ 钢发动机连杆断裂分析[J].福建冶金,2021,50(6):4.
- [4] 王洪磊,纪飞飞,郑爱权.汽车发动机缸盖湿型砂铸造工艺优化[J].铸造,2021.
- [5] 刘世平,刘俊辉,彭二宝,等.形变+退火对内燃机用 FeCoCrNiBx 高熵合金组织演变的影响[J].锻压技术,2021.