

DOI: 10.19344/j.cnki.issn1671-5276.2026.03.001

航空齿轮表面强化研究进展和发展趋势

余震^{1,2}, 谢焕钧¹, 刘艳霞¹, 宋靖东³, 李发家³

(1. 中国航发中传机械有限公司技术部, 湖南长沙 410023;

2. 中南大学机电工程学院, 湖南长沙 410083;

3. 济南大学机械工程学院, 山东济南 250022)

摘要:航空齿轮的良好力学性能是航空航天和高端装备等领域传递动力的重要保障。齿轮的齿面磨损、剥离和齿根的弯曲疲劳失效大多数是从齿轮表面发生,并不断向其心部进展直至最终失效从而影响齿轮正常服役。在不改变齿轮内部结构的基础上,表面强化技术可以对齿面和齿根不同部位进行精准改性,通过向表层组织引入梯度微观组织结构和梯度残余压应力场,有效改善齿轮的综合性能。该文围绕最近几年齿轮表面强化技术的国内外相关研究成果,介绍了齿轮的两种重要的传统热处理表面强化方法,总结了其原理、优点及不足;梳理了两种以激光为动力源的主要高能束齿轮表面强化技术,总结了其技术优势和局限问题;对以塑性变形为原理进行表面强化的喷丸和超声滚压进行对比分析,在此基础上以强化原理对三类复合强化技术进行分类总结;对齿轮表面强化技术进行总结和未来的发展趋势进行展望。

关键词:航空齿轮;梯度结构;表面强化;塑性变形;激光;复合强化

中图分类号:TH132 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5276(2026)03-0001-07

Research Progress and Development Trend of Aeronautic Gear Surface Strengthening

YU Zhen^{1,2}, XIE Huanjun¹, LIU Yanxia¹, SONG Jingdong³, LI Fajia³

(1. AECC Zhongchuan Transmission Machinery Co., Ltd., Technology Department, Changsha 410023, China;

2. College of Mechanical and Electrical Engineering, Central South University, Changsha 410083, China;

3. School of Mechanical Engineering, University of Jinan, Jinan 250022, China)

Abstract: The benign mechanical properties of aeronautic gear is an important guarantee for transmitting power in areas including aerospace and high-end equipment. Tooth surface wear and peeling, as well as dedendum bending fatigue and failure mostly arises from gear surface and then evolves towards its core until the final failure, affecting the normal performance of the gear. Without changing the internal structure of the gear, surface strengthening, through the integration of gradient microstructure and gradient residual compressive stress field into the surface structure, can accurately modify properties of different parts of the tooth surface and dedendum, effectively improving the comprehensive service performance of gear components. This paper focuses on the domestic and foreign research achievements on surface strengthening technology of gear components in recent years. Firstly, two important traditional heat treatment surface enhancement methods for gear components are introduced and their principles, advantages and disadvantages are summarized. Secondly, two major High-energy beam gear surface strengthening technologies with laser as power source are analyzed and its technical advantages and limitations are summarized. In addition, based on the principle of plastic deformation, a comparative analysis is made between shot peening and ultrasonic rolling, methods for the enhancement of surface. And based on that, three categories of compound enhancement techniques are classified and summarized according to strengthening principle. Finally, the paper summarizes the gear surface strengthening technology and looks into its future development.

Keywords: aeronautic gear; gradient structure; surface strengthening; plastic deformation; laser; compound strengthening

基金项目:山东省自然科学基金项目(ZR2021ME101);济南市“新高校20条”资助项目(202228116)

第一作者简介:余震(1986—),男,湖南长沙人,高级工程师,博士,研究方向为机械结构、机械传动,253487299@qq.com。

通信作者简介:宋靖东(1988—),男,山东临沂人,讲师,博士,研究方向为机械部件结构强度、齿轮强化,me_songid@ujn.edu.cn。

0 引言

齿轮传动是机械传动中应用最广泛的一种传动形式,在传动系统中具有不可替代的独特优势,因其具有传动比高和传动效率稳定等优点,通常作为各类机械传动系统的关键部件,被广泛应用于各类机械系统的传动装置^[1]。齿轮的性能直接影响到整个机械系统的整体性能,齿轮的安全服役性能,直接关系到其服役的传动系统安全服役寿命,影响到设备的安全生产。为了保证齿轮安全运转,其表面要具备足够的硬度和强度,以保证齿轮具有良好的安全使用寿命。因此,表面强化技术可以实现对齿轮表层强化处理,以满足齿轮表面具有较高的硬度和耐磨损性能^[2],同时心部又具有良好的韧性使其保有足够的抗接触疲劳^[3]性能。一方面通过引入新物相,化学热处理表面强化技术,如渗碳^[4]、渗氮^[5]、碳氮共渗^[6]等,一定程度上可提升耐磨损性能,但温度过高可能会影响金属材料的耐磨损性能。另一方面,通过形变实现齿面表层强度和韧性的提升以达到改善宏观力学性能,如机械喷丸^[7]、激光冲击强化^[8]等。随着齿轮传动性能的需求提升,新兴的表面强化技术和复合强化技术得到一定的发展,都已在齿轮表面强化处理得到应用,效果比较可观。本文综述了以相变为主的化学热处理表面强化、以形变为主的塑性变形表面强化和复合强化技术,最后对未来齿轮表面强化技术的发展趋势进行了展望。

1 化学热处理表面强化

化学热处理技术通过渗碳、渗氮、碳氮共渗等工艺,将特定活性原子(如 C、N)扩散至材料表层,形成梯度分布的复合强化结构,这可显著提升齿轮表面硬度(可达 60~70 HRC),降低摩擦因数并抑制裂纹萌生。近年来,针对航空齿轮的精密化与高性能化需求,表面强化技术进一步融合了离子渗入、等离子体增强化学气相沉积(PECVD)等创新手段,在控制齿面变形量、优化渗层均匀性及界面结合强度方面取得突破。然而,复杂渗剂反应动力学机制、梯度结构设计与疲劳寿命的关联性仍是研究难点。本小节综述航空齿轮化学热处理的关键工艺参数与微观组织调控,探讨渗层厚度、残余应力分布及界面特性对航空齿轮力学性能的影响规律,以期为航空动力系统的高可靠性设计提供理论支撑。

1.1 金属材料渗碳

渗碳热处理原理是将工件置于特定热处理温度下的活性介质中。通过高温加热和一定时间的低温回火,利用气氛中的元素扩散行为进入工件表层,完成对工件表层化学成分和微观组织的改性,从而实现对工件表层材料力学性能的改性。由菲克定律^[9]可知,渗碳的温度高低和渗碳时间长短是决定渗碳质量优劣的关键条件。渗层较厚如图 1 所示^[10],其热处理的温度一般为 900 ℃~950 ℃。

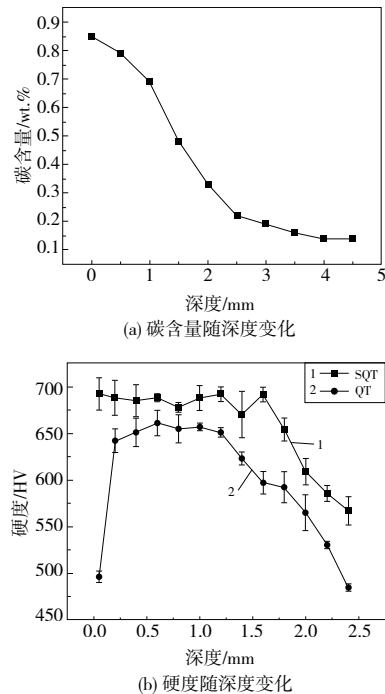


图 1 渗碳 15MnNi4Mo 钢的截面碳含量和硬度随距离表面深度的变化分布

热处理温度过高,热处理结果不理想,即引起齿轮表层晶粒粗化,形成不可避免的热变形,影响齿轮加工精度。这主要因为渗碳引入了新的碳化物物相,使得表面为高碳马氏体,达到较高的硬度以保证高耐磨性。同时,心部为低碳马氏体,保证了心部足够的韧性。较高的温度会引起齿轮热变形,低温渗碳热处理应运而生。因此,齿轮热处理的变形需要采用轻微磨削处理^[11],以保证齿轮的加工精度。20 世纪 20—70 年代,国外相关研究人员研究出不锈钢低温渗碳技术。其原理也是热处理,将渗碳温度从 900 ℃降低到 500 ℃以下(低于 M23C6 型的形成温度^[12])。化学热处理强化技术,虽然可以一定程度上通过表层硬化来改善齿轮表面的耐磨损性能,但是也会降低齿轮的脆

性。因此,对于齿面和齿根,一般需要分别进行表面强化,各自提升其耐磨损性能和抗疲劳性能,还可以通过表面复合强化达到兼顾耐磨损性能和抗疲劳性能的综合目的。

1.2 金属材料渗氮

除了渗碳之外,渗氮也是一种常用的热处理技术,调控表层渗氮层微观组织结构。渗氮的工艺参数中,温度是等离子渗氮过程中的关键参数,影响渗氮层的宏观力学性能,其热处理温度一般为 $460\text{ }^{\circ}\text{C} \sim 600\text{ }^{\circ}\text{C}$ [13-14]。这个热处理温度与低温渗碳的热处理温度近似。由于热处理的温度较低,期间引起的热变形较小,渗氮可以作为中低碳合金材料齿轮加工的最终处理工艺。这也是渗氮得到不断推广应用的一个重要原因。渗氮处理之后的零部件,其表面的硬度得到一定程度提升,相应地提升了其耐磨损性能 [15] 和耐腐蚀性能 [16-17]。目前,比较常用的渗氮技术主要是气体渗氮和离子渗氮,同时因渗氮的良好效果,常被用于对耐磨性能有较高要求的齿轮上,例如汽车齿轮和机床齿轮 [18] 等。

等离子渗氮的时间也是一个影响渗层质量的关键因素,渗层厚度 d 与渗入时间 t 的变化关系,可以表示为

$$d^2 = Dt \quad (1)$$

式中: d 为渗层厚度, μm ; t 为渗氮时间, s ; D 为渗氮扩散系数。

随着渗层的引入,可以提升部件的耐磨损性能,但也会降低工件表层的韧性,脆性较大,耐磨损性能降低。

2 高能束表面强化

高能束表面强化,像激光淬火 [19]、激光冲击强化 [20] 和激光表面合金化 [21] 等,是一种利用高能量密度束流对材料表面快速加热和冷却,从而改善材料表面性能的先进制造技术。其本质是淬火,利用高能量密度的能源实现对部件表面的加热。停止加热后,利用部件自身快速自激冷却完成部件表面的淬火。本文对激光淬火和激光熔覆这两种典型高能束激光表面强化技术展开讨论。

2.1 金属材料表面激光淬火

激光淬火,又名激光相变硬化,原理如图 2 所示。起源于 20 世纪 70 年代,其原理主要是对钢铁和铸铁材料进行快速表面加热,使得材料表面瞬间升温到相变和熔点之间,实现金属材料相变,达到

靶材力学性能改性的目的。传统的表面淬火主要有感应加热、火焰加热和电接触加热 3 种方式。表面淬火一方面可以形成较厚的淬硬层,约 $0.5 \sim 2.5\text{ mm}$ [22],有效提升中低碳合金钢表面耐磨性。另一方面可以使得工件心部获得足够的韧性,提高其抗疲劳性能。此外,考虑表面淬火的经济性和节能性,其相关性能研究 [23] 和数值模拟研究成果 [24] 突飞猛进,使其成为齿轮表面强化的主要方法之一,并已在汽车小型齿轮厂广泛应用 [25]。

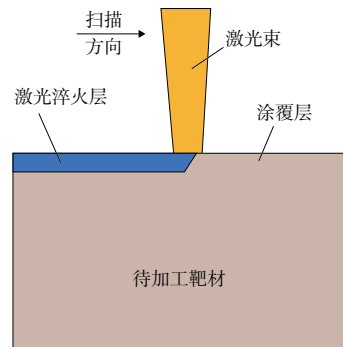


图 2 激光表面淬火原理示意图

与传统热处理淬火相比,激光淬火主要有以下优势:

1) 激光淬火处理速度快。激光淬火可实现快速加热和快速冷却,升降温速度可达 $104\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{s}$,扫描速度可达到 $10 \sim 20\text{ mm}/\text{s}$ 以上,即可以在毫秒内完成淬火处理。因此,可以实现相对较高效率的加工。

2) 硬化效果佳。激光因其能量密度高,工艺处理实践较短,对靶材引入的热变形较小。因此,不会引起原材料表面质量较大变化,对表面粗糙度影响不大。激光淬火促进靶材微观组织尺寸细化,引入的表层残余压应力分布均匀,提升靶材硬度水平较好,对钢材耐磨损性能有明显改善 [26]。

3) 工艺周期短,可操控性强。激光光斑直径小,淬火区域较小,同时配备的数控系统可以灵活实现机械部件特殊位置/复杂形状等强化加工,例如倒圆角、槽、孔等部位。不仅工艺操控性强,一定程度上还可以提高加工效率,实现自动化生产。

4) 无污染,可实现清洁制造。激光制造工艺的主要能源是激光,属于清洁能源,从源头上避免了污染。同时,激光淬火不需要借助其它介质实现降温,从工艺操作上避免了污染和能源浪费。

近年来,激光淬火发展迅猛,已经广泛应用于航空航天、冶金、汽车、航海等多个领域。但是,该项技术仍然存在一些理论、工艺和技术问题需要

进一步解决:

1) 激光淬火诱导产生的残余应力过大,甚至会引发不必要的裂纹,需要后续二次处理。由于残余应力不能及时去除,并且淬火层不同相区的相变时间和相变速度不同,不能有效避免相近区域间产生的残余应力。

2) 淬火硬化层的均匀性问题。不论是激光全淬火还是激光离散淬火,扫描过程中,淬火区域不可避免会发生重叠,形成回火软化,引起相邻区域的硬化效果不一。最终,在后续的服役过程中,不同区域的服役寿命存在一定差异。

3) 工艺参数实时监测难。激光淬火过程中相变的温度变化都是瞬态,其中的应力和应变也是瞬态的。因此,不能实时获得良好的工艺参数,但如果多次测试积累工艺数据又会造成能源、人力和时间成本等大量浪费。

2.2 金属材料表面激光熔覆

激光熔覆(laser cladding, LC),也被称为激光堆焊技术,指在移动激光束的照射作用下,金属或陶瓷粉末等熔覆材料与金属基材一起快速冷却熔凝,依靠自激冷却形成与基体材料形成冶金结合涂层的表面改性技术。激光熔覆具有以下优点:1)热影响区小,对基体性能的影响较小;2)熔覆层与基体层以冶金形式结合,结合强度高;选材可选性强,可将两种完全不同成分和性能的基体材料和熔覆层材料结合在一起,几乎不受基体材料与熔覆层种类的限制;3)易于实现自动化,所用的激光等能量密度高、清洁无污染。

对于激光熔覆技术的应用,针对目标部件服役性能的需求,可以通过选择不同熔覆材料对航空部件损伤部位进行精准修复,可以实现优异的耐磨损性能、耐腐蚀性能和抗疲劳性能等。我国激光熔覆技术在航空领域的应用开始于20世纪90年代。21世纪初,北京航空航天大学王华明院士团队对航空材料表面的激光熔覆技术的改性开展了大量研究工作,不仅耐磨损性能^[27]和高温氧化性能^[28-29]有效提升,还可以提高表面质量时降低表面粗糙度等。

3 金属材料塑性变形表面强化

除上述利用化学热处理或高能束表面强化齿轮外,金属材料可通过自身塑性完成变形,所以还可以利用不同力学手段实现部件表层变形,从而达到对金属材料表层强化的目的。其主要原理是采

用机械手段(弹丸冲击、滚压或挤压等)借助外加载荷使金属材料表层产生塑性变形和加工硬化实现表面强化。在此机械变形过程中,金属材料会发生屈服而形成晶粒细化,在金属材料表层引入残余应力场和一定厚度的加工硬化层。例如,喷丸强化(shot peening, SP)、激光冲击强化(laser shock peening, LSP)、表面机械研磨处理(surface mechanical attrition treatment, SMAT)和表面机械碾磨处理(surface mechanical grinding treatment, SMGT)等。本文对其中两种典型的以塑性变形为原理的机械表面强化技术进行讨论分析。

3.1 金属材料表面喷丸

喷丸,是20世纪30年代美国汽车工业推出的表面强化技术,目前在汽车领域应用最为广泛,如变速箱齿轮、发动机和连杆等零部件,可以显著提升零部件的耐磨损、抗应力腐蚀、抗弯曲、抗疲劳和耐点蚀性能等。喷丸的原理如图3所示^[30]。由图3(a)可以看出,喷丸可以诱导表层材料形成一定厚度的残余压应力场,这是表层材料塑性变形强化的结果。究其原因,主要是弹丸冲击表层材料引起的微观组织梯度变化,例如位错密度增大,晶粒尺寸细化等等,这是组织强化,如图3(b)所示。喷丸作为一种兼具成本低廉、工艺简易、加工效率较高和强化效果明显等优势的表面加工技术,在齿轮加工领域越来越受到青睐。但是,机械喷丸后齿面粗糙度会有所增加,会对齿面表面质量带来负面影响,引起齿轮传动过程中的振动。

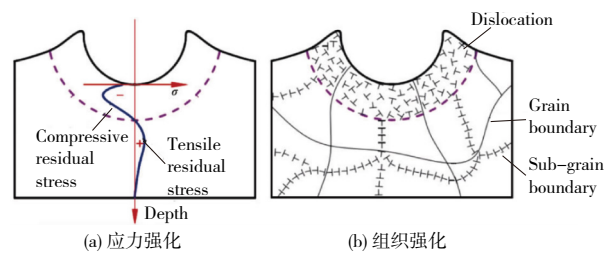


图3 金属材料喷丸强化示意图^[31]

3.2 金属材料表面超声滚压

超声滚压技术,其实是一种表面复合强化技术,其原理是将传统的机械表面滚压技术和超声加工技术复合在一起的表面技术。一方面相对于热处理来说,超声滚压是一种常温状态下的冷加工,该技术对靶材表层微观组织形成塑性变形能力,即冷作硬化。另一方面,超声滚压还可以明显改善靶材表面质量,有的表面滚压还可以实现镜

面加工^[32]。因为超声滚压可以通过塑性变形提升靶材表层硬度,引入残余压应力,如图4所示。

因此,该技术可以有效改善靶材的耐腐蚀、耐磨损和抗疲劳等力学性能。

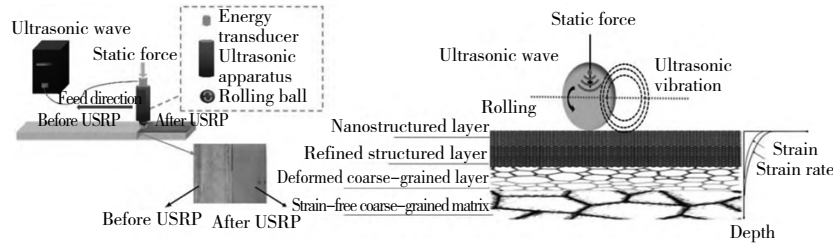


图4 超声滚压加工示意图

但是,超声滚压技术也存在一些需要解决的不足。1)超声滚压过程的稳定性。由于滚压参数控制和超声参数控制是两套系统,只有利用实时监测对过程参数实现实时调控,方可实现超声滚压技术的稳定性;2)多物理场耦合的超声滚压技术原理有待进一步探究,因为目前主要针对单一物理场的强化过程;3)超声滚压技术对金属材料的力学性能影响机制需要进一步深入研究,例如需要夯实原子尺度级别的界面相关理论研究基础。

4 复合强化

上文已对金属材料表面渗碳、渗氮、喷丸等单一表面强化进行了讨论,每种表面强化技术都有其自身的技术优势,同时也存在一定的局限性。随着航空齿轮性能要求的不断提升,单一表面强化技术已无法满足航空齿轮加工需求。因此,将两种表面强化技术进行有效组合,可以兼顾不同单一表面强化技术的优势,弥补单一技术自身缺陷,同时可以提升齿轮的综合服役性能,因此齿轮复合强化技术具有广阔的发展空间。

4.1 相变+相变

热处理作为传统的齿轮钢相变工艺,被广泛应用于齿轮钢强化。20CrNi2Mo钢是一种被广泛应用的齿轮钢材料,陈健^[33]为提升其耐磨损和抗接触疲劳寿命,利用碳氮复渗技术对其复合渗处理,从微观组织结构、表面完整性和接触疲劳失效三者之间的关系,研究发现碳氮复合渗可以有效改善单一渗碳引起的表面质量下降的负面影响。这是因为C-N复合表层的微观组织分布更加均匀,且长时间回火可以实现部分残余奥氏体向马氏体转变,以进一步改善单一渗碳后的表面质量。此外,在接触疲劳失效演化方面,发现复合渗后C-N复合层的高硬化和高残余压应力会将疲劳裂纹萌生位置延迟到次表面。因此,碳氮复渗对

20CrNi2Mo钢的接触疲劳性能提升也优于单一渗碳或者分离式复合渗(C+N)。

对于渗碳钢而言,渗碳可以获得新的物相从而实现相变,激光相变也可以实现相变。利用两种不同原理实现相变的复合强化,可以使齿轮钢获得更优的服役性能。因此,操应刚等^[34]利用渗碳和激光相变对16Gr3NiWMoVNbE钢进行复合强化,研究了不同相变复合强化对其韧塑性的变化。发现复合强化后,残余奥氏体的形状由薄膜状向块状转变,且数量不断增加,同时伴随着球状碳化物数量减少,最终得到了韧塑性优异的复合强化16Gr3NiWMoVNbE钢。

4.2 相变+形变

通常为了提升齿轮的服役性能,需要对齿面进行高温渗碳处理。但是,齿根部位的弯曲疲劳和齿面的接触疲劳失效问题,一直是齿轮部件在服役过程中难点问题。除了利用两种相变技术对靶材进行复合强化,还可以利用塑性变形和相变进行复合强化,也能充分结合两种不同表面强化原理的优势。

为改善12GrNi3A齿轮钢的耐磨损性能,李靖等^[35]利用激光冲击强化和渗碳复合工艺对12GrNi3A齿轮钢进行处理,结果表明激光冲击强化与渗碳复合处理后能够降低单一渗碳12GrNi3A齿轮钢试样的比磨损率51%。分析发现,激光冲击强化可以促进12GrNi3A齿轮钢的渗碳效果,可以促进渗碳层结构致密和大量细小碳化物甚至促进第二相强化作用,这些都可以提升12GrNi3A齿轮钢的耐磨损性能。但是,先渗碳再激光冲击强化,12GrNi3A齿轮钢的渗层的相变效果不明显,只有轻微的形变强化对12GrNi3A齿轮钢的耐磨损性提升有限。可以认为,先进行合适的形变强化,再进行合适的相变强化,对齿轮钢的服役性能效果更佳。不过,形变强化的强度也不

是越大越好。常晓东等^[36]利用合适的喷丸强化与渗碳复合强化处理 18Cr2Ni4WA 齿轮钢,可以有效提升其接触疲劳性能。其主要原因一方面是喷丸强化在前,可以有效促进残余奥氏体向马氏体转变,进而提升其表面承载能力。另一方面,喷丸还可以引入一定厚度层的残余压应力场,可以有效阻碍和延缓接触疲劳裂纹的萌生和扩展。

4.3 形变+形变

利用变形原理实现强化的表面强化技术不可避免会对工件的表面完整性产生影响,表面完整性参数也是对金属材料部件的宏观力学性能主要影响因素,例如磨损和疲劳性能。

机械喷丸作为最常用的表面强化技术,二次喷丸可改善一次喷丸试样的表面完整性,同时也能进一步降低工件的表面粗糙度^[37],力学性能方面表面显微硬度和残余应力的标准差都明显下降。对于喷丸和超声滚压复合强化,研究发现比同种表面强化叠加的复合强化比二次喷丸复合强化对表面完整性和表面显微硬度提升的效果更好,对应提升的残余压应力的标准差从 89.50%下降到 23.36%。可以发现,两种不同类别的形变表面强化比相同类别的表面强化技术复合叠加对工件表面完整性改善效果更加显著。结合喷丸对近表层影响优势和激光冲击强化对近表层以下的影响优势特征,激光冲击与喷丸复合强化^[38]不仅可以进一步提升残余应力稳定性,还可以有效降低激光冲击强化带来的残余应力梯度变化。因为喷丸和激光冲击强化的作用机制都以形变为主,其强化的先后顺序对其复合强化的残余应力稳定性效果影响不大。

5 结语

经过科研工作者的持续钻研,齿轮表面强化研究取得了一定的进步:

1) 对齿轮钢表面耐磨损性能的改性,主要是利用不同技术手段实现齿面表层加工硬化。本文梳理传统齿轮表面强化渗碳和渗氮两大主要的热处理方式,利用加热的方式使得 C 元素或者 N 元素通过活性介质渗入到工件内部,借助形成渗层的微观组织、相成分和残余应力改变实现对齿轮钢的服役性能优化。高能束的激光表面强化也是利用能束带来的热量实现对靶材的热处理,达到对齿轮钢的耐磨损性能改性。

2) 针对齿根弯曲疲劳和齿面接触疲劳的改性

需求,主要通过引入塑性变形手段引入残余压应力,从而抑制裂纹萌生和扩展延长疲劳寿命。喷丸或者机械表面滚压等表面强化技术,可以引入残余压应力场和表层硬化,提升齿轮钢表层硬度同时不降低齿轮钢表面质量。

3) 综述了“相变+相变”、“相变+形变”和“形变+形变”三类不同的齿轮钢表面复合强化技术。选择合适的表面强化技术进行复合强化,同时要考虑两种技术复合的先后顺序,兼顾不同单一表面强化技术的优势,弥补单一技术自身缺陷,可提升齿轮的综合服役性能,具有广阔发展空间。

参考文献:

- [1] PENG C, XIAO Y Z, WANG Y Z, et al. Effect of laser shock peening on bending fatigue performance of AISI 9310 steel spur gear [J]. *Optics & Laser Technology*, 2017, 94: 15-24.
- [2] FENG K, NI Q, BEER M, et al. A novel similarity-based status characterization methodology for gear surface wear propagation monitoring [J]. *Tribology International*, 2022, 174: 107765.
- [3] CAMERON Z A, KRANTZ T L. Statistical distribution of gear surface fatigue lives at high reliability [J]. *International Journal of Fatigue*, 2023, 167: 107350.
- [4] SHI L, CUI X F, LI J, et al. Improving the wear resistance of heavy-duty gear steels by cyclic carburizing [J]. *Tribology International*, 2022, 171: 107576.
- [5] HUANG Z, GUO Z X, LIU L, et al. Structure and corrosion behavior of ultra-thick nitrided layer produced by plasma nitriding of austenitic stainless steel [J]. *Surface and Coatings Technology*, 2021, 405: 126689.
- [6] HEYDARZADEH SOHI M, EBRAHIMI M, HONARBAKHSH RAOUF A, et al. Effect of plasma nitrocarburizing temperature on the wear behavior of AISI 4140 steel [J]. *Surface and Coatings Technology*, 2010, 205: S84-S89.
- [7] UNAL O, MALEKI E, KARADEMIR I, et al. Effects of conventional shot peening, severe shot peening, re-shot peening and precised grinding operations on fatigue performance of AISI 1050 railway axle steel [J]. *International Journal of Fatigue*, 2022, 155: 106613.
- [8] LI C, AMANOV A, WANG C, et al. Effect of laser shock peening on fretting wear behaviour of AISI 304 stainless alloy [J]. *Tribology International*, 2024, 193: 109386.
- [9] ZHOU Z S, DAI M Y, SHEN Z Y, et al. Effect of D. C. electric field on salt bath nitriding for 35 steel and kinetics analysis [J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2015, 623: 261-265.
- [10] SU S R, WANG L, SONG R B, et al. Gradient microstructure evolution and hardening mechanism of carburized steel under novel heat treatment [J].

- Materials Letters, 2020, 280: 128486.
- [11] 丁明亮,付杰,邓基伟,等. 齿轮成形磨削热变形有限元仿真分析[J]. 机械工程师, 2023(12): 140-141, 144.
- [12] 周宋泽,汪小锋,陈剑斌. 低温回火时间对 GCr15 钢组织演变与力学性能的影响[J]. 材料热处理学报, 2021, 42(5): 64-71.
- [13] WANG L, JI S J, SUN J C. Effect of nitriding time on the nitrided layer of AISI 304 austenitic stainless steel[J]. Surface and Coatings Technology, 2006, 200(16/17): 5067-5070.
- [14] SHEN H Y, WANG L. Influence of temperature and duration on the nitriding behavior of 40Cr low alloy steel in mixture of NH_3 and N_2 [J]. Surface and Coatings Technology, 2019, 378: 124953.
- [15] MIYAMOTO J, ABRAHA P. The effect of plasma nitriding treatment time on the tribological properties of the AISI H13 tool steel [J]. Surface and Coatings Technology, 2019, 375: 15-21.
- [16] SHEN H Y, WANG L. Mechanism and properties of plasma nitriding AISI 420 stainless steel at low temperature and anodic (ground) potential [J]. Surface and Coatings Technology, 2020, 403: 126390.
- [17] BOTTOLI F, JELLESEN M S, CHRISTIANSEN T L, et al. High temperature solution - nitriding and low - temperature nitriding of AISI 316: Effect on pitting potential and crevice corrosion performance [J]. Applied Surface Science, 2018, 431: 24-31.
- [18] 韩晓雷, 祁红. 表面离子渗氮对数控机床主轴的组织与耐磨性能的影响[J]. 铸造技术, 2017, 38(1): 92-95, 102.
- [19] MENG L, XIAN C, ZHU B B, et al. Comparison on the microstructure, bending properties and tribological behaviors of rail materials treated by laser dispersed quenching and induction assisted laser dispersed quenching [J]. Surface and Coatings Technology, 2021, 410: 126936.
- [20] MALEKI E, UNAL O, GUAGLIANO M, et al. The effects of shot peening, laser shock peening and ultrasonic nanocrystal surface modification on the fatigue strength of Inconel 718 [J]. Materials Science and Engineering: A, 2021, 810: 141029.
- [21] AHMAD SIDDIQUI A, DUBEY A K. Recent trends in laser cladding and surface alloying [J]. Optics & Laser Technology, 2021, 134: 106619.
- [22] MÜHL F, JARMS J, KAISER D, et al. Tailored bainitic-martensitic microstructures by means of inductive surface hardening for AISI4140 [J]. Materials & Design, 2020, 195: 108964.
- [23] 张永辉,张双杰,王伟,等. 激光表面淬火对铬钼铸铁组织和硬度的影响[J]. 金属热处理, 2022, 47(11): 160-164.
- [24] 张帅坤,张超勇,吴剑钊,等. 40Cr 钢滚刀织构表面激光淬火的数值模拟[J]. 金属热处理, 2024, 49(5): 47-54.
- [25] 刘鑫,田国富,王涛. 大型曲线齿锥齿轮复合加工中的激光淬火轨迹规划研究[J]. 制造技术与机床, 2018(7): 138-142.
- [26] WU W M, CHEN X Z, FANG T H, et al. Research on the laser quenching performance of $\text{Ti}_6\text{Al}_4\text{V}-7.3\%\text{Cu}$ alloys fabricated by wire - powder collaborative arc additive manufacturing [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2024, 1002: 175450.
- [27] 刘建弟,张述泉,王华明. 激光熔覆 WC 颗粒增强复合涂层的组织及耐磨性[J]. 中国有色金属学报, 2012, 22(9): 2600-2607.
- [28] 刘秀波,王华明. TiAl 合金激光熔覆金属硅化物复合材料涂层耐磨性和高温氧化性能研究[J]. 中国激光, 2005, 32(8): 1143-1149.
- [29] 黄灿. 钛合金表面激光熔覆 TiCrAlSi 系多元合金涂层的研究[D]. 北京:北京有色金属研究总院, 2012: 84-91.
- [30] 王成. 喷丸强化过程的数值模拟与疲劳裂纹扩展行为研究[D]. 杭州:浙江工业大学, 2016: 12-13.
- [31] XIONG Z F, JIANG Y, YANG M, et al. Achieving superior strength and ductility in 7075 aluminum alloy through the design of multi-gradient nanostructure by ultrasonic surface rolling and aging [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2022, 918: 165669.
- [32] 赵波,姜燕,别文博. 超声滚压技术在表面强化中的研究与应用进展[J]. 航空学报, 2020, 41(10): 023685.
- [33] 陈健. 碳氮复合渗对 20CrNi₂Mo 钢滚动接触疲劳性能的影响[D]. 贵阳:贵州大学, 2023: 60-70.
- [34] 操应刚,王帅棋,聂翔宇,等. 渗碳与激光相变强化复合处理 16Cr₃NiW₂MoV₂NbE 钢的组织演化[J]. 表面技术, 2022, 51(10): 10-19, 29.
- [35] 李靖,李军,何卫锋,等. 激光冲击与渗碳复合工艺改善 12CrNi3A 钢磨损性能 [J]. 强激光与粒子束, 2014, 26(5): 059005.
- [36] 常晓东,刘道新,崔腾飞,等. 渗碳与喷丸复合处理对 18Cr₂Ni₄WA 钢表面完整性及疲劳性能的影响[J]. 机械科学与技术, 2013, 32(11): 1584-1590.
- [37] 王振,孙浩,崔义龙,等. 表面复合强化对 18CrNiMo7-6 渗碳齿轮钢表面完整性的影响研究[J]. 机械强度, 2025, 47(8): 36-47.
- [38] 曹子文,张杰,车志刚,等. 激光冲击与喷丸复合强化 TC17 钛合金表层残余应力研究 [J]. 表面技术, 2018, 47(11): 80-84.

收稿日期: 2025 - 05 - 26