

## 研究综述

# 喷丸强化对车辆传动齿轮裂纹扩展影响的研究综述

李杰<sup>1</sup>, 高紫钰<sup>1</sup>, 王晓燕<sup>2\*</sup>, 胡铮<sup>3</sup>, 兰海<sup>3</sup>, 王志勇<sup>3</sup>

(1.北京建筑大学 机电与车辆工程学院, 北京 102616; 2.北京物资学院 统计与数据科学学院, 北京 101149; 3.中国北方车辆研究所 车辆传动重点实验室, 北京 100072)

**摘要:** 疲劳断裂是重载车辆传动齿轮的主要失效形式之一, 齿轮底部疲劳裂纹的扩展将缩短车辆传动系统的服役寿命, 严重时会导致车辆发生安全事故。延缓裂纹扩展的主要方法是在传动齿轮的表面引入一定大小的残余压应力。喷丸技术是一种冷加工表面强化处理工艺, 该技术利用高速弹丸冲击材料表面, 使零件表层产生塑性应变的同时, 在表面和内部引入残余压应力, 从而使裂纹闭合的能力得到强化, 达到延缓裂纹扩展的强化效果。为了更好地揭示喷丸引入的残余压应力对疲劳裂纹扩展的影响, 首先综述了传动齿轮表面疲劳裂纹产生的原因以及疲劳裂纹的扩展行为对重载车辆服役的影响。从强度因子、 $J$  积分以及裂纹闭合效应出发, 介绍了传动齿轮表面疲劳裂纹扩展的理论以及残余压应力与疲劳裂纹扩展速率之间的关系。其次概述了目前国内外常用的新型有益于将残余拉应力转化为残余压应力的微粒子喷丸、激光喷丸、超声喷丸方法, 并传统机械喷丸技术相比较, 阐述了新型喷丸表面强化技术的优缺点。此外, 从数值模拟和试验结果两方面, 论述了喷丸速度、喷丸角度、弹丸直径、弹丸材质和覆盖率 5 个工艺参数对在传动齿轮表面引入残余压应力的改善影响。最后对喷丸强化技术在传动齿轮上的多目标参数优化以及多尺度残余压应力与疲劳性能进行了展望, 并结合重载车辆的使用需求, 强调需要创新设计一种效率高、价格低、适用性广的喷丸技术, 以进一步推动喷丸强化在延缓疲劳裂纹扩展方面的持续发展。

**关键词:** 喷丸强化; 残余压应力; 传动齿轮; 疲劳裂纹扩展速率; 疲劳寿命; 表面强化

**中图分类号:** TG668; TH132.41 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-3660(2024)04-0001-19

**DOI:** 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2024.04.001

## A Review on Effects of Shot Peening on Crack Growth of Vehicle Transmission Gears

LI Jie<sup>1</sup>, GAO Ziyu<sup>1</sup>, WANG Xiaoyan<sup>2\*</sup>, HU Zheng<sup>3</sup>, LAN Hai<sup>3</sup>, WANG Zhiyong<sup>3</sup>

(1. School of Mechanical-electronic and Automobile Engineering, Beijing University of Civil Engineering and Architecture, Beijing 102616, China; 2. School of Statistics and Data Science, Beijing Wuzi University, Beijing 101149, China; 3. Key Lab of Vehicular Transmission, China North Vehicle Research Institute, Beijing 100072, China)

收稿日期: 2023-03-15; 修订日期: 2023-06-14

Received: 2023-03-15; Revised: 2023-06-14

基金项目: 国家自然科学基金 (51675494); 北京建筑大学金字塔人才培养工程 (JDJQ20200308); 北京建筑大学研究生创新项目 (PG2023133)

Fund: The National Natural Science Foundation of China (51675494); The Pyramid Talent Training Project of Beijing University of Civil Engineering and Architecture (JDJQ20200308); Postgraduate Innovation Program of Beijing University of Civil Engineering and Architecture (PG2023133)

引文格式: 李杰, 高紫钰, 王晓燕, 等. 喷丸强化对车辆传动齿轮裂纹扩展影响的研究综述[J]. 表面技术, 2024, 53(4): 1-19.

LI Jie, GAO Ziyu, WANG Xiaoyan, et al. A Review on Effects of Shot Peening on Crack Growth of Vehicle Transmission Gears[J]. Surface Technology, 2024, 53(4): 1-19.

\*通信作者 (Corresponding author)

**ABSTRACT:** Fatigue fracture is one of the main failure modes of the transmission gear of heavy duty vehicles. The service life of the transmission system of vehicles will be shortened due to the expansion of fatigue cracks at the bottom of the teeth, and serious accidents will occur. The generation of residual compressive stress is the main method to delay crack propagation. Shot peening technology is a surface strengthening process of cold working. When the plastic strain is generated on the surface of parts, the residual compressive stress is introduced on the surface and inside, so as to improve the crack closure effect and achieve the strengthening effect of delaying crack propagation. In order to better reveal the influence of the residual compressive stress introduced by shot peening on fatigue crack propagation, the surface of the transmission gear is usually susceptible to a variety of alternating loads, such as external thermal loads and force loads. Compared with static loads, the non-uniformity of the internal structure of the material under alternating loads has a greater influence on the fatigue damage resistance of the material. Fatigue causes tooth breakage. Based on the strength factor,  $J$ -integral and crack closure effect, the theory of fatigue crack growth on the transmission gear surface and the relationship between compressive residual stress and fatigue crack growth rate were introduced. The introduction of compressive residual stress could reduce the crack growth rate, improve the fatigue resistance index of fatigue crack, and reduce the stress intensity factor at the crack tip. The new methods of particle shot peening, laser shot peening and ultrasonic shot peening, which were beneficial to the conversion of residual tensile stress to compressive stress, were summarized. The particle shot peening was to use a smaller diameter projectile to impact the surface of a part at high speed, which could not only introduce compressive residual stress on the surface of the part, but also achieve higher surface finish requirements. Laser shot peening adopted shock wave to carry out high-speed impact, so there would be no additional mechanical damage and surface phase change on the surface of parts. The surface depth after ultrasonic shot peening was much higher than that after traditional shot peening. However, due to its high price or small applicability, it has not been widely used in the surface strengthening of vehicle transmission gears. In the future development, it is necessary to design the shot peening technology with high efficiency, high adaptability, low cost and less energy consumption. At the same time, the relationship between the new shot peening method and the traditional mechanical shot peening technology was described. In addition, based on the numerical simulation and experimental results, the influence of the selection of five process parameters including shot peening speed, shot peening Angle, shot diameter, shot material and coverage rate on the improvement of residual compressive stress introduced on the transmission gear surface was emphatically reported. The compressive residual stress did not increase with the increase of incident velocity and projectile diameter, but tended to be stable when it exceeded a certain limit. Large residual compressive stress could be introduced when the projectile vertically incident impacted the surface of the transmission component. On the other hand, the residual compressive stress increased with the increase of the projectile diameter in the range of 0.2-3.4 mm. Steel shot had a better ability to improve the fatigue strength, ceramic shot after shot peening could achieve better surface smoothness, the final residual compressive stress increased with the increase of shot peening coverage, but the surface coverage was also saturated value. Finally, the future research direction of shot peening technology in transmission gear was prospected, and the technological innovation was further carried out in combination with the use requirements of heavy-duty vehicles, so as to promote the sustainable development of shot peening technology to delay crack propagation. The special simulation of shot peening technology mainly focuses on the selection of single shot peening process parameters of gear, while the analysis of combined parameters is less. However, in practical application, it is necessary to comprehensively consider the influence of coupling effects of various parameters on the gear. Therefore, in future numerical simulation, it is necessary to combine the optimal combination of process parameters to further study the surface integrity of the gear surface after shot peening, such as corrosion resistance, wear resistance and oxidation resistance.

**KEY WORDS:** shot peening; compressive residual stress; transmission gear; fatigue crack growth rate; fatigue life; surface strengthening

随着传动齿轮在重型车辆中的广泛应用,关于传动齿轮在交变载荷作用下失效行为的研究越来越多,而传动系统的稳定性是重载车辆使用安全的重要影响因素之一,传动齿轮作为传动系统的薄弱环节,有关它引发的疲劳断裂失效和服役寿命缩短问题的研

究越来越深入。目前,针对延缓齿轮表面疲劳裂纹扩展原因的研究主要分为2个方面:在传动齿轮工作过程中,交变应力的产生会造成齿面脱落,脱落位置会成为疲劳源;在传动齿轮服役时,外部小颗粒进入齿轮间隙,与齿轮发生摩擦和碰撞。上述2个原因都将

导致齿轮表面产生疲劳裂纹。因此, 疲劳断裂已经成为传动系统中需要解决的关键安全问题和关键技术问题。

国内外许多学者对传动齿轮疲劳断裂过程和断口截面特征进行了大量研究, 结果表明, 通过施加机械力将残余压应力引入齿轮的裂纹区域, 可以有效降低齿面的应力强度因子和  $J$  积分数值, 进而增强齿轮表面的裂纹闭合效应, 延缓裂纹扩展速度, 延长传动齿轮的疲劳寿命。引入残余压应力的主要方法之一是对传动齿轮进行表面强化。目前, 大多数重载车辆的传动齿轮都采用渗碳、热加工工艺进行表面强化。这虽然可以在一定程度上延长传动齿轮的疲劳寿命, 但由于齿轮自身的残余压应力水平较低, 服役寿命的延长极为有限。喷丸强化技术作为一种表面冷加工技术, 在高速且连续的条件将无数弹丸喷射、冲击到零件表面, 使零件表面产生冷塑性变形, 从而在表面产生一个残余压应力层。

在喷丸延缓过程中, 引入的残余压应力会抵消部分初始残余拉应力, 剩余的表面残余压应力会促使裂纹源迁移到距离表面更深的受载荷较小的零件表面内部, 因此, 齿面层残余压应力数值越大、沿厚度方向越深, 喷丸后的传动齿轮强度和寿命提高越多, 可以提升 6.5~8.5 倍<sup>[1]</sup>。文献[2]对铝合金试样进行了旋片喷丸强化处理, 如图 1 所示, 结果表明, 试样表面形成了 300 MPa 的残余压应力, 能够抵消一定大小的外加交变载荷, 使疲劳裂纹源的萌生区域减小, 且位于铝合金的内部, 提高了铝合金的疲劳性能。喷丸强化使孔壁应变层内形成了细化亚结构, 这种细化亚结

构将疲劳载荷作用下的滑移阻止在应变层与基体的界面处, 使疲劳裂纹源转移至铝合金内部, 并且使疲劳裂纹源的萌生区域减小, 裂纹在材料内部萌生所需要的临界应力增大。因此, 喷丸强化技术在试样表层产生了弹性变形区和塑性变形区。由于次表层的弹性变形区有恢复原状的趋势, 而最外层的塑性变形区会抑制弹性变形区的恢复, 因此在材料内部产生了残余压应力, 以此来维持材料内部的平衡。残余压应力层能够有效降低外载荷平均应力对试样表面的作用。Yang 等<sup>[3]</sup>对传动齿轮分别进行了湿喷丸和干喷丸处理, 结果表明, 湿喷丸和干喷丸处理都可以在试样表面引入一定大小的残余压应力层, 干喷丸处理在 25  $\mu\text{m}$  处形成了 1 038 MPa 的残余压应力, 湿喷丸处理在 40  $\mu\text{m}$  处形成了 1 207 MPa 的残余压应力。湿喷丸处理显著提高了试样的疲劳寿命, 对裂纹内部结构进行观察, 如图 2 所示, 疲劳裂纹在喷丸后倾向于在亚表层而非喷丸表面层萌生, 裂纹从最初表面 (见图 2a) 迁移至表面以下 100  $\mu\text{m}$  深度的位置 (见图 2b)。喷丸强化技术还能够减少零件在机加工后产生的表面缺陷, 解决局部应力集中的问题。喷丸强化具有工艺成熟、成本低廉、效果显著的特点, 特别是与其他表面强化技术相比, 喷丸技术有着不受工件形状限制和工作环境影响的特点。此外, 不同喷丸参数会导致齿轮表面的残余压应力增大或减小, 因此, 在不需修改齿轮尺寸等情况下, 设计人员可以通过控制喷丸过程中的参数, 提升表面引入的残余压应力层, 进而达到提高传动齿轮疲劳强度、疲劳寿命的要求。

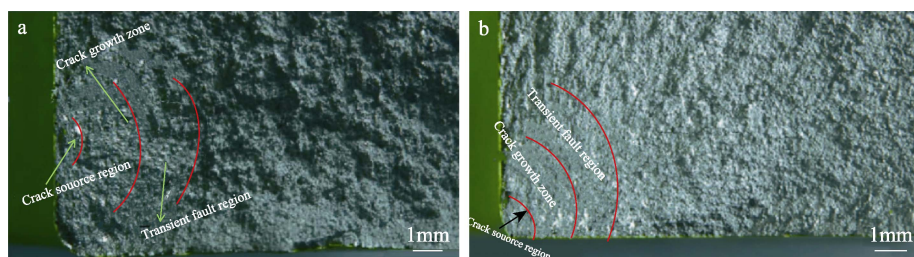


图 1 未旋片 (a) 与旋片 (b) 喷丸强化试样疲劳断口的宏观形貌  
Fig.1 Macro-morphology of fatigue fracture of specimen strengthened by shot peening of unspun sheet (a) and spun sheet (b)

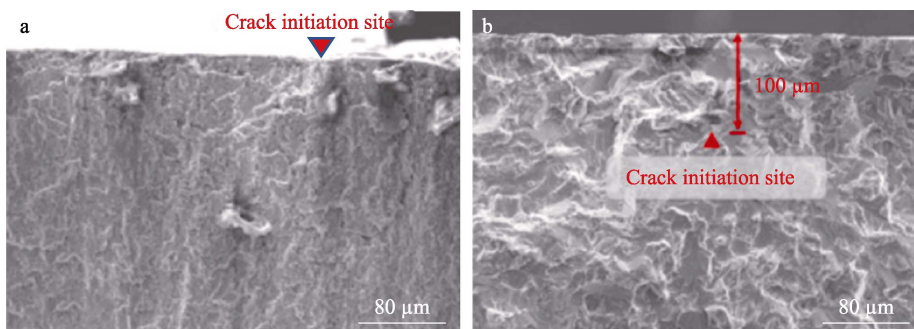


图 2 湿喷丸前 (a) 与湿喷丸后 (b) 试样表面裂纹萌生部位的疲劳断裂形态  
Fig.2 Fatigue fracture morphology of surface crack initiation site before (a) and after (b) wet shot peening

近年来,喷丸强化因可以提高齿轮表面完整性和综合性能、抑制表面裂纹源的形成和扩展而在重载车辆传动齿轮工业中被广泛应用,该技术可以达到提高疲劳性能和延长使用寿命的目的,是目前国内外学者研究的重点。本文介绍了齿轮表面的力学性能,概述了疲劳裂纹产生的原因和危害,探讨了齿轮裂纹扩展情况以及残余压应力和裂纹扩展速率之间的关系,介绍了一些新型喷丸方法并对比分析了新型喷丸方法与传统喷丸技术的优缺点,概述了新型喷丸技术在传动齿轮应用上的不足,重点分析了弹丸冲击齿轮表面后各类动态参数对表面残余压应力的影响,揭示了喷丸强化的作用机理,并对强化技术与疲劳寿命之间的关系进行了总结。

## 1 传动齿轮的力学性能

传动齿轮是重载车辆中关键的变速和传动部件,常用材料为18CrNiMo7-6、40CrNi、20Cr、20CrMnTi、20CrMnTo。与传动轴和轴承等零部件相比,传动齿轮的安全稳定程度对车辆整体的服役状况有很大影响。在传动系统中,传动齿轮的故障比例占各类部件故障总和的60%<sup>[4]</sup>。当传动齿轮系统出现故障时,齿轮副将会产生传动误差和齿轮侧隙,进而导致重载车辆自身振动加剧以及传动平稳性减弱等一系列问题。传动齿轮的使用寿命关乎着整个车辆能否正常运行,严重影响着车辆的可靠性和安全性,因此要求传动齿轮在满足体积小同时具有比较高的力学性能,例如高效率传动以及高强度齿面的特点。传动齿轮在工作时,其表面通常容易受到外界热、力负荷等多种交变载荷的作用<sup>[5]</sup>,与静载荷相比,交变载荷作用下材料内部结构的不均匀性对材料抗疲劳损伤能力的影响更大<sup>[6]</sup>,会出现轮齿发生断裂的现象。

重载车辆传动齿轮结构及裂纹如图3所示。可见,齿轮疲劳断裂的断面比较粗糙、呈斜向分布,且呈现沿晶断裂,这一现象的出现会极大程度地缩短传动齿轮的使用寿命。在变速箱传动系统中,交变负荷问题会导致轮齿摩擦磨损过快,容易产生疲劳裂纹,使齿面发生断裂,或者由于在运行过程中根部容易受到弯曲疲劳和齿面接触疲劳的双重失效影响<sup>[7]</sup>,

致使齿轮使用寿命严重缩短,严重时会导致变速箱齿轮自动滑挡,车辆发生跳挡,危及人的生命安全。此外,在传动齿轮使用过程中,一方面,摩擦导致表面温度过热,会在齿面发生交变热应力,导致齿轮表面发生蠕变和热疲劳损伤,并会引起表面奥氏体晶粒粗大,疲劳强度降低<sup>[8]</sup>,发生断裂现象;另一方面,如果高应力长时间集中于传动齿轮表面一点,同样会致使齿面发生疲劳损坏,导致亚表面材料产生缺陷进而出现疲劳裂纹<sup>[9]</sup>。但是目前难以通过检测手段对含有裂纹损伤的传动齿轮进行有效测试,所以,当使用过程中出现裂纹故障或失效时,会严重威胁到车辆运行的安全,传动齿轮的抗疲劳性对车辆传动系统使用寿命和安全具有重要的影响。因此,目前国内外学者在不断完善抗疲劳强度措施,或者通过技术手段提高齿面和齿根的疲劳强度,以满足重载车辆传动系统的安全使用性能。

在齿轮加工过程中,淬火的作用会使残余拉应力进一步增大。虽然在回火的作用下,疲劳裂纹没有穿透齿面,但在抛开磨削工序中,会产生应力叠加的效果。因此,在后续车辆使用过程中,残余拉应力最终会被释放,导致裂纹萌生并扩展于齿面。此外,在齿轮啮合时,传动齿轮会受到弯曲应力的作用,故最大弯曲应力集中在齿轮根部圆角处。齿轮上用于啮合的凸起部分为轮齿,轮齿在较高弯曲应力的反复作用下将产生疲劳裂纹。当作用的应力超出材料的疲劳极限时<sup>[10]</sup>,会在齿轮表面形成不可逆的损伤累积,致使疲劳裂纹萌生、微小裂纹聚集、长裂纹扩展,严重时裂纹扩展会导致整个齿轮突然断裂。因此,疲劳断裂现象具有突发性和延时性的特点。

齿轮表面受到的高应力首先会使齿轮表面产生疲劳断裂现象,其次使齿轮表面形成疲劳损伤并且损伤逐渐累积,最后使疲劳裂纹进一步扩展,直至到达临界状态时发生完全疲劳断裂。在上述过程中,疲劳裂纹扩展速率可以通过强化手段进行减缓,从而延长裂纹到达临界状态的时间。由于齿轮在使用时发生的裂纹萌生现象是不可避免的,所以在实际生活和工程中,对疲劳裂纹扩展特性的研究尤为重要,以此来保证齿轮不会因为表面疲劳裂纹的持续快速扩展而断裂。因此,进一步研究疲劳裂纹扩展的机理,有助于

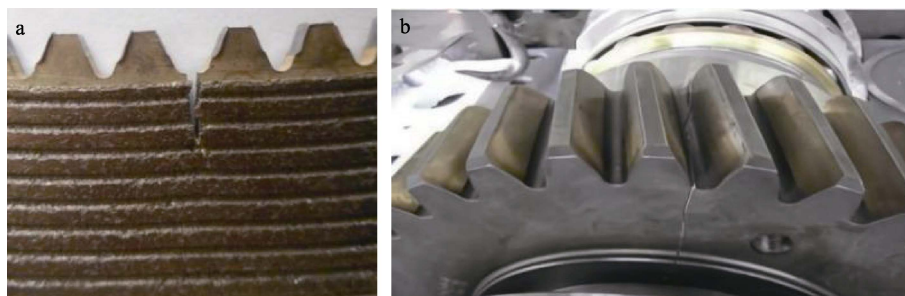


图3 重载车辆传动齿轮结构(a)及裂纹部分(b)

Fig.3 Transmission gear structure (a) and cracked part (b) of heavy duty vehicle

深入了解疲劳断裂现象。

## 2 传动齿轮疲劳裂纹扩展理论

疲劳裂纹扩展理论主要用于估算传动齿轮的疲劳寿命, 进而算出从疲劳裂纹扩展到临界裂纹状态的寿命长短<sup>[11]</sup>。齿轮的疲劳寿命通常由两部分组成: 裂纹萌生寿命和裂纹扩展寿命。车辆传动齿轮在加工及使用过程中会不可避免地因外来颗粒物的介入或摩擦而产生微小裂纹。随着服役寿命的延长, 微裂纹常常会在远小于屈服极限的循环载荷作用下发生裂纹扩展, 进而产生疲劳失效。基于此机制, 裂纹扩展寿命要远远重要于裂纹萌生寿命<sup>[12]</sup>, 所以齿轮的总体疲劳寿命主要取决于疲劳裂纹的扩展寿命, 因此, 了解疲劳裂纹扩展理论对疲劳剩余使用寿命的估算具有重要意义。

摩擦等外在原因造成的疲劳裂纹萌生现象是无法避免的, 目前对疲劳裂纹萌生现象的研究主要是如何延缓裂纹萌生时间。张常青等<sup>[13]</sup>对传动齿轮非喷丸和喷丸后的疲劳短裂纹萌生状态进行了分析, 结果显示, 喷丸强化处理延迟了齿轮裂纹萌生的时间, 延长了等幅扩展寿命。罗学昆等<sup>[14]</sup>在张常青等<sup>[13]</sup>对齿轮短裂纹萌生阶段研究的基础上, 发现喷丸强化技术之所以可以降低裂纹萌生概率以及缩短齿轮裂纹萌生时间, 是因为喷丸后引入的残余压应力在一定程度上减轻了零件结构因应力集中而产生的负向影响, 从而提高了疲劳裂纹萌生寿命。文献<sup>[15]</sup>通过试验发现, 传动齿轮的疲劳裂纹萌生于表面或近表层, 因此改变表面和近表层的局部强度将会影响零件的疲劳裂纹萌生寿命。通过对传动齿轮进行喷丸处理, 可以发现, 当齿轮表面和近表层的显微硬度提高时, 疲劳裂纹萌生寿命的提高幅度可以达到 200%。这是由于喷丸后齿轮表面发生了应变硬化作用, 改性层内的晶粒细化、位错强化以及残余压应力的引入导致萌生位置由表面转移至试样内部较深区域。肖志瑜等<sup>[16]</sup>同样发现在致密度、强度和硬度都较低条件下, 齿轮相对容易发生裂纹萌生的现象, 而喷丸技术则能让齿轮表面层的致密度和形变硬化得到提高和强化, 从而可以有效达到延缓疲劳裂纹萌生、使裂纹源向齿轮亚表面移动的效果。

通过断裂力学方法可以较好地分析和解决疲劳裂纹扩展问题。疲劳裂纹扩展速率公式, 即 Paris 经验公式如式 (1) 所示<sup>[17]</sup>。

$$da/dN = C(\Delta K)^m \quad (1)$$

式中:  $N$  为疲劳循环次数;  $a$  为裂纹长度;  $C$  和  $m$  为实验获得的零件表面材料的疲劳裂纹扩展性能参数;  $\Delta K$  为应力强度因子幅。Paris 公式可以很好地预测“低应力脆性断裂”的疲劳裂纹扩展。目前工程界广泛利用应力强度因子  $K$  对疲劳裂纹的裂尖状态

进行描述, 当应力强度因子达到临界状态时, 齿轮表面将发生失效, 因此基于  $da/dN - \Delta K$  曲线可以对疲劳裂纹扩展寿命进行预测, 该曲线在双对数坐标系下的表现形式如图 4 所示。

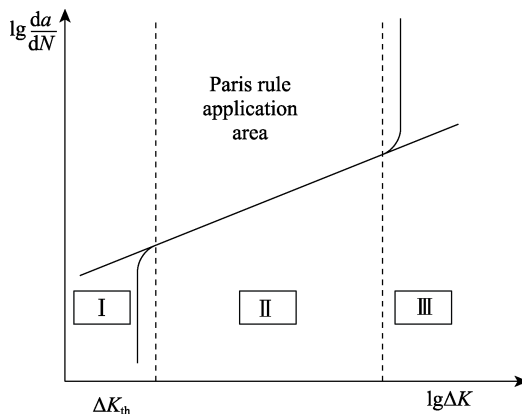


图 4  $da/dN - \Delta K$  曲线  
Fig.4  $da/dN - \Delta K$  curve

图 4 中 I 区为低速率区, 疲劳裂纹扩展速率随着  $\Delta K$  的微小下降而大幅度下降, 当  $\Delta K$  降低到门槛值  $\Delta K_{th}$  (带裂纹零件的疲劳抗力指标) 时, 扩展速率几乎降低为 0。当  $\Delta K < \Delta K_{th}$  时, 裂纹将不再继续发生扩展。II 区为中速率区, 也是裂纹稳定增长区。在该区域, 稳定裂纹扩展速率与  $\Delta K$  具有明显的对数线性关系。III 区是一个高速率区, 在该区域裂纹扩展速率将显著增大, 同时会导致裂纹长度迅速增大, 一旦进入 III 区, 传动部件的使用期限即将结束<sup>[18]</sup>。由于此区域的疲劳寿命极短, 在疲劳寿命中占比较小, 因此不进行重点分析。 $da/dN - \Delta K$  曲线为研究传动齿轮的裂纹扩展和断裂分析提供了一定的参考。

与线弹性断裂力学的应力强度因子一样, 弹塑性断裂力学中的  $J$  积分同样可以影响疲劳裂纹扩展情况。目前对低周疲劳的裂纹尖端附近产生的塑性变形进行分析是必不可少的, 但是应力强度因子仅适合描述高周疲劳裂纹增长情况, 因此必须利用弹塑性断裂力学 ( $J$  积分) 来进行裂纹扩展分析<sup>[19]</sup>。Leblond 等<sup>[20]</sup>最早提出了基于弹塑性断裂力学的  $J$  积分,  $J$  积分等价于能量释放速率 (归因于界面效应和体积效应的乘法组合<sup>[21]</sup>),  $J$  积分达到临界断裂状态时会满足断裂准则, 其重要的特点为在塑性状态下, 可以与路径保持无相关性<sup>[22]</sup>。因此, 可以直接对裂纹尖端部分进行严谨分析。在三维样品的裂纹尖端中,  $J$  积分是唯一确定的, 并且存在相应的临界值  $J_c$ 。 $J_c$  表示裂纹萌生的临界值, 如果疲劳裂纹在裂纹扩展点时,  $J_c$  将代表失稳点。孙光耀等<sup>[23]</sup>通过仿真发现应力强度因子  $K$  和  $J$  积分的数值分布有着一样的变化规律, 基于关于应力强度因子的 Paris 公式, 他们尝试提出  $J$  积分与裂纹扩展速率的类似 Paris 公式, 如式 (2) 所示。

$$da/dN = C_j (\Delta J)^{m_j} \quad (2)$$

式中:  $\Delta J$  为描述裂纹顶端区域应力、应变场强度的物理量;  $C_j$  和  $m_j$  为实验获得的零件表面材料的疲劳裂纹扩展性能参数。使用循环  $J$  积分可以有效避免经验公式复合引起的误差, 可以更加高效地利用 Paris 公式描述疲劳裂纹扩展速率。通过数值计算可以发现, 如果只改变预制裂纹参数,  $J$  积分和应力强度因子的分布有着一样的变化规律。当分析同一齿轮的表面裂纹时, I 区和 III 区的应力强度因子和  $J$  积分都随着裂纹深度的增大而减小, 在 II 区中, 二者均随裂纹深度的增大而增大。因此在进行裂纹速率计算时, 对于完整的低周和高周状态, 可以采用  $J$  积分代替传统的应力强度因子, 但是有关二者耦合作用下的齿轮疲劳断裂寿命以及裂纹扩展问题需要进一步研究。

对裂纹扩展现象进行分析主要是依据裂纹尖端的闭合效应。裂纹闭合通常用来描述裂纹尖端张开或闭合的状态。目前国内外对闭合效应的研究主要依靠裂纹扩展速率, 疲劳裂纹速率降低得越多, 裂纹的闭合效应越好, 传动齿轮的齿面裂纹扩展的抑制效果越佳。影响裂纹扩展速率的因素主要是残余应力, 引入一定大小的残余压应力能够提高齿轮的抗裂纹扩展能力。当残余压应力足够大时, 应力强度因子的范围会减小, 随后将导致疲劳裂纹闭合。残余应力对裂纹扩展速率的抑制或延缓作用的主要依据是应力强度因子的范围 ( $\Delta K$ ) 是否得到修正, 因此, 残余应力与应力强度因子的关系如式 (3) 所示。

$$K_{\text{res}} = \int_0^2 \sigma_{\text{yy}}^{\text{res}}(x)^h(a, x) dx \quad (3)$$

式中:  $K_{\text{res}}$  为表面裂纹在残余应力场中的应力强度因子;  $\sigma_{\text{yy}}(x)^h$  为材料屈服极限;  $\sigma^{\text{res}}(x)^h$  为残余应力大小。对式 (3) 进行数据分析发现, 当  $\sigma^{\text{res}}(x)^h$  减小时,  $K_{\text{res}}$  也随之减小, 裂纹闭合效应显著, 裂纹扩展速率降低。传动齿轮疲劳寿命的长短取决于疲劳裂纹扩展情况, 关于传动齿轮裂纹扩展的研究, 目前主要集中在以下 2 个方面: 致力于开发各种先进的制造技术, 如表面热处理、深冷处理、电磁热处理、复合材料修补、激光表面改性新技术等, 以提高零件的表面性能和质量, 而这些方法也都逐渐形成了完整体系<sup>[24]</sup>, 并逐渐有效地应用于零部件表面改性和延寿工作中; 针对疲劳裂纹的产生及其机制和对疲劳寿命的预测及其控制的工作还有待进一步深入, 这一系列研究是为了建立一个全面科学安全的控制体系和设计控制准则。

### 3 新型喷丸方法

由 Paris 公式分析结果可知, 抑制疲劳裂纹扩展的有效方法是通过强化技术在零部件表面引入残余压应力, 以此降低裂纹扩展速率, 提高疲劳裂纹的疲劳抗力指标, 降低裂纹尖端的应力强度因子。喷丸强

化技术通过物理方法在齿轮表面引入塑性变形和残余应力场, 塑性变形和残余应力场中的残余压应力对疲劳裂纹扩展有阻碍作用, 因此, 该方法是一种可有效降低裂纹扩展速率、解决疲劳裂纹失效的表面改性工艺, 被广泛应用于延缓传动齿轮疲劳裂纹扩展的工业中。

目前, 国内外的传统喷丸方法有 3 类: 内孔喷丸、气动喷丸、干/湿喷丸等。内孔喷丸技术是在喷嘴运动机构上安置喷嘴组件, 搭配合适的喷丸软管和控制箱进行工作<sup>[25]</sup>。气动喷丸是弹丸在经过压缩空气的驱动后<sup>[26]</sup>, 经喷管加速后喷射到零件表面, 使零部件表面产生弹塑性变形, 表层在受到挤压作用后产生残余压应力, 从而达到提高零件抗疲劳性能的目的<sup>[27]</sup>。干/湿喷丸强化的方法目前广泛受到国内外研究者的青睐, Xu 等<sup>[28]</sup>研究发现, 在喷丸强度为 0.4 mmN 的条件下, 湿喷丸可以在硬化层深度为 25  $\mu\text{m}$  处引入 943.9 MPa 的残余压应力, 干喷丸在同等喷丸强度下的残余压应力为 1 191.5 MPa, 硬化深度可达 33  $\mu\text{m}$ 。此外, 还有绿色环保的喷丸方法, 例如高压水射流, 该方法是一种由 Zafredpr 等<sup>[29]</sup>和叶俊华等<sup>[30]</sup>提出的喷丸强化方法, 也是最早的水射流喷丸方法。该方法是将动力源的机械能转换成压力能, 随后巨大的压力能通过喷嘴射出再一次转变成动能, 从而形成高速射流。

不同的喷丸方法对零部件产生的效果是不同的, 特别是微粒子喷丸、激光喷丸和超声喷丸。与传统喷丸方法相比, 这 3 种新型喷丸方法都有独特之处, 如表 1 所示。传统喷丸会在齿轮表层产生微小裂纹, 使齿轮表面的粗糙度增大, 导致应力局部集中, 这会对齿轮的强化过程产生负面影响。而微粒子喷丸在喷丸后产生的残余压应力不会随着高温或外加载荷的变化而发生变化, 同时微粒子喷丸还可以降低表面粗糙度, 提升表面光洁度<sup>[31]</sup>。激光喷丸采用超高压进行冲击, 可产生高达  $10^7 \text{ s}^{-1}$  的高应变率, 因此, 塑性变形层和残余压应力层的深度都可以得到大幅度提高。此外, 激光喷丸具有超快过程, 能实现能量的高效转换与利用。超声喷丸除了设备体积小、能耗低的优点外, 它在强化过程中的噪声相对较小, 还可以在喷丸后使零部件具有一定的热稳定性<sup>[32]</sup>。由此可见, 新型喷丸方法可进一步解决传统喷丸后产生的粗糙度高、表面稳定性不高等问题。

#### 3.1 微粒子喷丸技术

微粒子喷丸技术与传统喷丸工艺比较相似, 不同之处在于微粒子喷丸技术是采用直径更小的弹丸高速冲击零部件表面, 弹丸直径为 40~100  $\mu\text{m}$ <sup>[33]</sup>。传统喷丸技术虽然可以引入较大的残余压应力, 但是撞击后残余压应力容易发生松弛, 从而导致抑制裂纹扩展的效果减弱, 相反微粒子喷丸可以在显著提升齿轮疲劳性能的同时保持较大的残余压应力, 并且由于微粒子喷丸可以降低传动齿轮表面的粗糙度, 所以微粒

子喷丸技术也显著影响着残余压应力松弛度。王文健等<sup>[34]</sup>对传动齿轮进行了传统喷丸和微粒子喷丸强化试验, 结果表明, 传统喷丸后的传动齿轮表面硬度为 660HV~700HV, 但微粒子喷丸强化后的表面硬度可以达到 777HV, 远大于传统喷丸强化后的表面硬度, 这是由于在大量微小粒子高速撞击齿轮时, 粒子的一部分动能转换为热能, 当粒子在短时间内重复撞击齿轮时, 会诱导齿轮表层晶粒细化, 从而使材料得到强化<sup>[35]</sup>。但是微粒子引入的残余压应力层深较浅, 传统喷丸处理后的齿面硬化层深度约为 100 μm, 而微粒子喷丸仅可以在 30 μm 处产生硬度提升幅度较大的现象<sup>[36]</sup>。这是因为动能的转换使微粒子在碰撞时的能量较小, 导致喷丸后产生的作用层较浅但应力值

较大, 虽然微粒子喷丸后的残余应力层较浅, 但对应的齿轮表层发生的塑性变形较小, 齿轮发生歪斜或者尺寸变化的现象较少。

表面粗糙度是反映材料表面完整性的一个重要因素, 微粒子喷丸技术可以有效降低零部件的表面粗糙度。齿轮的表面粗糙度越小, 摩擦损失越小, 膜厚比就越大, 齿面大小不一的粗糙峰之间的接触面积就越小, 摩擦因数越小, 疲劳寿命越长, 承载能力越大。文献[37]同样发现重载车辆中的传动齿轮在喷丸前的表面粗糙度为 0.44~0.95 μm, 如图 5 所示, 传统喷丸处理后的齿轮粗糙度为 0.66~1.67 μm, 与喷丸前的齿轮表面完整性相比, 齿轮断裂的可能性显著加大, 而微粒子强化后的粗糙度为 0.39~0.43 μm, 齿轮喷丸前

表 1 新型喷丸技术属性和特点  
Tab.1 Properties and characteristics of new shot peening technology

New shot peening technology/ properties	Technical characteristics	Advantages compared with traditional shot peening	Disadvantages compared with traditional shot peening
Wide peening cleaning	The size of the projectile is small, about 40-100 μm, and the speed of shot blasting can exceed 200 m/s	1) The formation of fine pits evenly distributed, reduce gear surface roughness, improve lubrication performance; 2) The relaxation ability of the introduced residual compressive stress is low, which can more efficiently offset the residual tensile stress	When a large residual compressive stress value is introduced, the layer depth of the residual compressive stress is shallow, and the residual tensile stress inside the gear can not be offset
Laser shock peening	Pulsed high power laser beam is used to generate residual stress in gear	1) A deep residual compressive stress is introduced into the gear by minimal cold working while maintaining a high surface finish; 2) Cold working can better enable the gear to persist in surface compressive stress under high temperature or high load conditions	1) Expensive, heavy workload; 2) The scope of application has been on aviation key parts, less in the use of heavy-duty vehicles
Ultrasonic shot peening	When the output energy per unit time is high, the ratio of the output energy of the implementing device to the mass of the device is large	1) The cost of ultrasonic shot blasting equipment is low; 2) The residual compressive stress layer after ultrasonic shot peening is deep and the value is large, which can make the surface of the gear sprout nano-layer with a thickness of tens of microns	1) The biggest problem of ultrasonic impact is that the energy output is unstable; 2) The principle of ultrasonic impact is very different from that of traditional shot peening, and there is a big gap in the simulation analysis of modeling

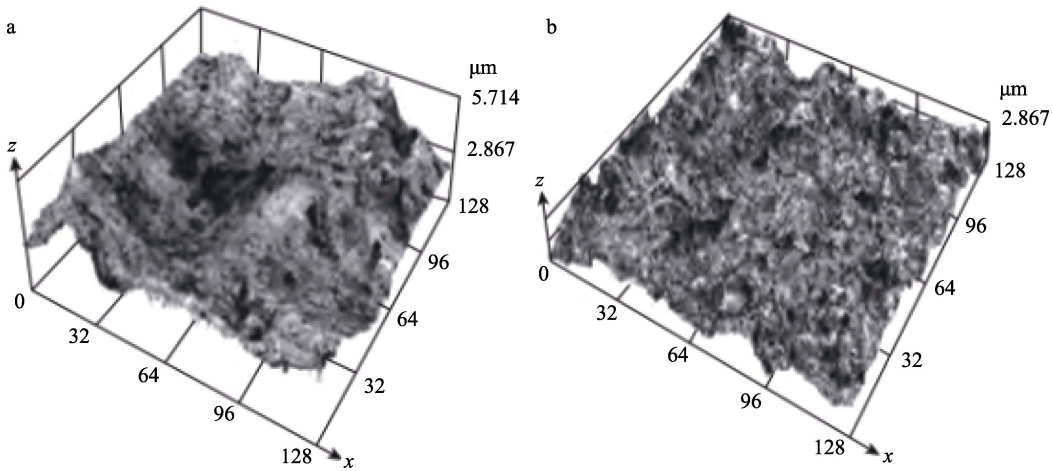


图 5 传统喷丸 (a) 与微粒子喷丸 (b) 后的表面三维形貌  
Fig.5 Three-dimensional surface topography of traditional shot peening (a) and particle shot peening (b)

$36.8 \times 10^4$  cyc 的疲劳寿命提高了 1 000%, 同时承载能力增强了 30%。可以看出, 与未经过喷丸强化的齿轮相比, 经过粒子强化的齿轮的粗糙度更低, 这是因为粒子强化的喷丸强化速度是传统喷丸强化的 2~3 倍, 同时微粒子喷丸所使用的粒子尺寸为传统喷丸弹丸尺寸的 1/10。因此, 在强化齿轮表面的同时, 解决了表面粗糙度较高的问题, 使表面光洁度得到改善, 文献[1]中也得出了类似结论。

综上所述, 通过微粒子喷丸对传动齿轮钢进行处理, 可以发现, 齿面表层的残余拉应力变为残余压应力, 且由于表层产生的残余应力松弛程度低, 所以大大降低了齿轮疲劳裂纹的萌生和扩展速率。这是由于微粒子喷丸在产生残余压应力的同时, 降低了表面粗糙度, 表面光洁度的提高较好地维持了表面残余压应力的稳定性。与传统喷丸特征相比, 微粒子喷丸技术的特别之处在于可以减缓齿轮表面残余应力松弛现象, 因此微粒子喷丸技术有着能使零件表面引入松弛程度较低的残余压应力和较低的表面粗糙度的优势, 这可以更加高效地提高齿轮的表面疲劳寿命。然而微粒子喷丸技术仍存在一些不足, 例如缺乏相关的数值模拟研究以及各参数间的耦合关系研究, 随着理论研究的完整和系统化, 微粒子喷丸技术在重载车辆领域的应用会更加成熟。

### 3.2 激光喷丸技术

激光喷丸是一种利用脉冲激光与材料相互作用产生的冲击波压力进行表面改性的新技术<sup>[38]</sup>。与传统喷丸技术相比, 激光喷丸技术的冲击压力较高, 冲击后形成的压力层深度要比传统技术的深度深 5~10 倍<sup>[39]</sup>。由于激光喷丸是利用冲击波来进行冲击的, 因此激光喷丸可以对更微小的部分进行冲击, 这是传统喷丸所达不到的。最主要的是, 经激光喷丸冲击强化后, 零件表面不会产生畸变、机械损伤, 且不会引起表面相变<sup>[40]</sup>。

激光喷丸强化技术是目前比较普遍且可以替代传统喷丸的新表面改性技术。激光喷丸技术可以进一

步提高抑制疲劳裂纹扩展速率的能力以及解决疲劳裂纹失效等问题<sup>[41]</sup>。如图 6 所示<sup>[42]</sup>, 当激光的功率密度为 5~15 GW/cm<sup>2</sup> 时, 用高功率短脉冲的激光束冲击齿轮表面。激光束是一束聚焦、相干的光, 当光束冲击传动齿轮后, 立即将工件蒸发成薄层等离子体状态, 并对工件施加冲击波压力, 喷丸冲击后会在齿轮表层上附加一层较薄的不透明覆面材料, 用于代替金属蒸发<sup>[43]</sup>, 由于激波(冲击波)会产生冲击波效应, 等离子体会在撞击点重塑工件表面的微观结构, 继而产生金属膨胀和压缩的连锁反应, 连锁反应产生的较深残余压应力可延长部件寿命。由于激光束产生的光斑尺寸更精确同时激光喷丸技术设备的参数可调, 故该技术在多种宏、微观尺度领域上均可进一步深入研究。利用其工艺优势, 可有效对沟、槽、孔等局部表面组织进行高选择性表面处理, 具有较大的工艺灵活性。因此, 激光喷丸是目前被国内外公认的未来有望彻底替代传统机械喷丸并延长寿命的先进绿色装备制造技术<sup>[44]</sup>。

刘麟等<sup>[45]</sup>用 4.5 J 的激光能量对轴承进行了激光喷丸表面强化试验, 在 4.5 J 能量下铜锌合金的硬度提高了 51%, 显微硬度的深度可以达到 143  $\mu\text{m}$ , 经过激光喷丸后, 合金表面的位错密度显著增大, 抗塑性变形的能力也随之增强, 与未喷丸试样相比, 疲劳寿命提高了 1.42~1.66 倍。吴勇华等<sup>[46]</sup>对文献[35]中的激光喷丸强化轴承进行了分析, 认为与传统喷丸技术相比, 激光喷丸可以更显著地提高齿轮表面的完整性和疲劳强度, 因此对高速传动齿轮钢进行了传统喷丸和激光喷丸的对比分析, 结果显示, 激光喷丸产生的最大残余压应力比传统喷丸技术的大 2.5 倍左右, 并且激光喷丸后的残余压应力层深度较深, 相比于传统喷丸技术呈现出更大、更深以及稳定性更强的残余压应力场, 可以更加有效地抑制或延缓齿面疲劳裂纹的萌生和扩展, 强化后的表面硬度比传统喷丸的要大 15HV~20HV, 激光喷丸后的试样疲劳寿命比传统喷丸技术的要高 1.11~2.75 倍。但是上述学者并未对激光喷丸技术和传动齿轮表面粗糙度的关系进行研究

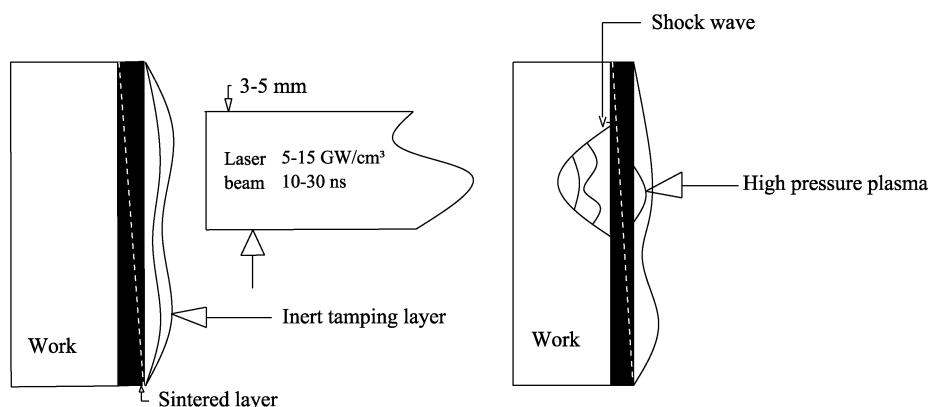


图 6 激光喷丸技术原理

Fig.6 Schematic diagram of laser shot peening technology

分析。在航天关键零部件中,与原始表面粗糙度相比,绝大多数工件的粗糙度在喷丸后都略有提升,因此在重载车辆的强化中,需要综合考虑表面粗糙度,虽然引入了较深的残余压应力层,但是较高的粗糙度会加剧齿轮的断裂。

综上可知,与传统机械喷丸相比,激光喷丸在压力层深、疲劳寿命、精度、耐热度等方面都更优,同时喷丸后的表面完整性较好,不会对齿轮产生机械损伤。由于激光喷丸价格昂贵,因此更多应用于航天领域,在重载车辆传动系统中的应用较少,与其他新型喷丸技术相比,激光喷丸的控制和检测技术都不太成熟,这些都限制了激光喷丸工艺的应用和发展,同时由于激光喷丸技术的难度较大、发展较晚。我国目前缺乏有关提高齿轮结构强度的研究,应该在传动齿轮成形能力和形状精度控制等难点问题上进行深入研究。

### 3.3 超声喷丸技术

超声喷丸提高表面完整性的基本原理如图 7 所示<sup>[47]</sup>,其原理如下:将左侧的超声波电能转换为机械能量,以机械能为振动激励,当弹丸受到振动激励后,利用超声冲击枪前端的冲击针头不断撞击材料表面,从而产生强化效果<sup>[48]</sup>,在此过程中,冲击针头的运动方向和速度均可控,因此超声波喷丸能够解决零部件表面残余压应力层厚度过低的问题。此外,超声喷丸所使用的弹丸数量较少,可以进行循环使用。

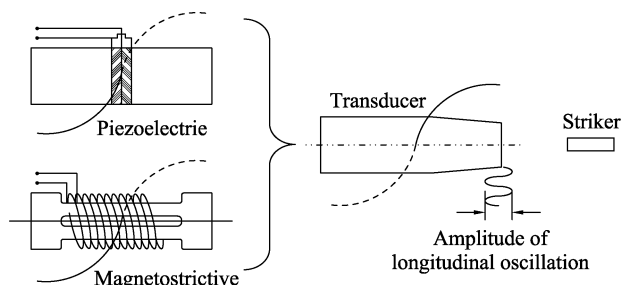


图 7 超声喷丸原理

Fig.7 Schematic diagram of ultrasonic shot peening

20CrMnTi 钢作为一种新型渗碳材料,广泛应用于减速器的齿轮传动中。Kulekci 等<sup>[49]</sup>和 Liu 等<sup>[50]</sup>分析了超声喷丸后重载车辆齿轮表面的残余压应力深度,结果显示,超声喷丸获得的残余压应力深度是传统机械喷丸后深度的 2~4 倍,表面强度显著增强,耐磨性、耐腐蚀性、强度和韧性也都得到了提高。Shi 等<sup>[51]</sup>研究发现,经过超声喷丸后,传动齿轮的显微硬度明显提高了 20%,同时可以达到 300  $\mu\text{m}$  的硬化层深度。文献<sup>[52]</sup>使用超声冲击对汽车渗碳齿轮进行了强化,结果发现,硬化后,渗碳层中的晶粒细化,残余奥氏体转变为硬度更高的马氏体。与未喷丸处理相比,渗碳层的压缩残余应力显著增大,表面显微硬度从 724HV 提高到 992HV,但是如何利用超声喷丸的成形轨迹、间距、喷丸参数与齿轮塑性变形量之间的

关系得到最优的强化效果需要深入研究,以实现强化质量和效率的双重选取。冯淦等<sup>[53]</sup>用超声波喷丸处理了齿轮,发现其表面可以形成厚度为 10 nm 的纳米晶层,此时表面产生的纳米化结构将会阻碍表层以及次表层的晶粒发生位错运动,进而延缓疲劳裂纹的萌生或者扩展。

超声喷丸还可以弥补表面粗糙度大的缺陷。齿轮的耐磨性和传动能力的提高取决于传动系统中齿轮的表面粗糙度。通常传动齿轮经过传统喷丸后,冲击速度过高,弹丸自身因撞击而产生破碎,这终将导致齿面的粗糙度过大,但是超声喷丸使用的冲击介质不仅有硬度较高的钨碳钢弹丸,还有不同曲率半径的钢质撞针等<sup>[54]</sup>。此外,由于超声喷丸技术对冲击介质的速度要求不高,且弹丸或撞针冲击至零件表面时的速度也不会过高,因此导致喷丸处理后的传动齿轮表面粗糙度下降。Zhao 等<sup>[55]</sup>研究表明,经过超声喷丸后,重载车辆传动齿轮齿面的低周疲劳强度可以增强 50% 左右,同时,疲劳寿命提高了 30~35 倍。Ramos 等<sup>[56]</sup>和 Manchoul 等<sup>[57]</sup>研究发现,对齿轮进行超声喷丸处理后,其表面光洁度大幅度提高,表面粗糙度减小,可以避免喷丸产生的裂纹问题,进而使表面质量提高。虽然超声喷丸强化技术已经在车辆传动部件中获得了广泛应用,但超声喷丸强化过程中的力学模型构建、喷丸工艺参数优化等仍是当前研究的重点和热点<sup>[58]</sup>,需要更多地利用有限元方法进行表面强化数值模拟,同时零部件的抗氧化性、耐腐蚀等方面也有待深入研究。

综上所述,与超声喷丸技术相比,微粒子技术的操作流程更接近于传统喷丸,因此对微粒子喷丸的研究重点已经从普通的力学分析转换至喷丸参数的优化,同时微粒子喷丸技术所使用的弹丸直径细小,对降低表面粗糙度的效果更为显著;与激光喷丸相比,微粒子喷丸产生的残余压应力数值和层深都较低,但是激光喷丸的强化作用可以更好地使齿轮在高温或高载荷条件下持续存在表面压应力,然而激光喷丸的价格相对较高,更多是在航空航天关键部件中使用,因此,研究人员随后又设计出超声喷丸技术,超声喷丸可以解决残余压应力层厚度过低的问题,并且其仪器价格相对低廉、操作简单,可以被更多地应用于航空、车辆多领域,但是与上述 2 种喷丸技术相比,超声喷丸在力学模型以及参数分析方面的研究比较少,可参考的力学分析研究较少。因此,设计价格低廉、操作简单、可以满足多种力学性能的喷丸技术是未来研究学者的研究方向。

## 4 残余压应力与疲劳裂纹扩展的关系

新型喷丸技术在对传动齿轮的裂纹扩展进行抑制时,其主要影响来源于高速弹丸撞击齿轮后在表面所形成的残余压应力,残余压应力越大,越能抑制裂

纹的萌生,越能增强裂纹的闭合效应,进而提高工件的疲劳寿命。吕鹤婷等<sup>[59]</sup>研究表明,裂纹闭合情况与残余应力的分布情况呈相对应的关系,裂纹扩展速率随着法向应力的增大而增大,喷丸后产生的残余压应力通过提高裂纹的闭合能力和裂纹的闭合效应来抑制疲劳裂纹的扩展。樊子枫等<sup>[60]</sup>根据 Paris 经验公式,发现残余压应力与裂纹扩展速率之间存在一定的线性关系,他们讨论了疲劳裂纹扩展参数之间的关系,建立了基于神经网络算法的疲劳裂纹扩展模型,结果表明,该神经网络算法能够快速获取临近阈值区域的疲劳裂纹扩展行为,随着残余压应力的增大,试样表面的应力强度因子降低。Gao 等<sup>[61]</sup>根据喷丸后的残余压应力值,采用权函数法计算了带单侧缺口拉伸试样的应力强度因子,其结果证明了樊子枫等<sup>[61]</sup>提出的观点。王建明等<sup>[62]</sup>采用 Robertson 公式建立了二维四点弯曲有限元模型,计算了裂尖应力强度因子对裂纹闭合效应的影响,印证了 Gao 等<sup>[61]</sup>的研究结果,同时还进一步得出,残余压应力的增大将导致裂纹闭合效应显著增强,这是抑制疲劳裂纹扩展的关键。

2006 年,英国材料科学研究中心的 Karthik 等<sup>[63]</sup>研究了激光喷丸后残余应力分布对变速器齿轮钢表面疲劳寿命的影响,结果表明,与常规强化方法相比,激光喷丸强化能更有效地降低钛合金的裂纹扩展速率,使疲劳寿命提高 2 倍以上,这是因为与传统喷丸相比,激光喷丸可以产生更大的残余压应力,因此使裂纹更好闭合,服役寿命得到提高,这为预测喷丸过程中残余应力的分布与裂纹扩展关系提供了研究基础。Rakita 等<sup>[64]</sup>和 Zhang 等<sup>[65]</sup>在 Karthik 等<sup>[63]</sup>的研究基础上,通过在高速车辆传动齿轮表面引入大量能量,发现相比于激光喷丸,超声喷丸能产生更高的残余压应力,进而使齿轮表面达到纳米化效果,抑制了裂纹从萌生到扩展的过程。文献[66]研究表明,在喷丸仿真模拟过程中,当齿轮附着 0.1 MPa 的载荷后,喷丸产生的残余压应力可以降低常用铝合金材料的疲劳裂纹扩展速率,进而有效抑制了裂纹扩展,并且传动部件的疲劳寿命也相应提高了 40.15%。这说明喷丸技术可以适当抑制裂纹扩展行为,喷丸技术有效降低了裂纹扩展速率,使疲劳裂纹扩展寿命提高,残余压应力的引入降低了裂纹尖端有效应力强度因子的范围,从而产生裂纹闭合效应并降低了裂纹扩展速率。

喷丸经过高速冲击后,引入的残余压应力会将疲劳裂纹源由表面推移到齿轮表面强化层下,裂纹源移至构件的内部,齿轮的疲劳寿命得到提高。陈勃等<sup>[67]</sup>基于文献[61]强度因子在权函数法中的应用,利用叠加原理分析了应力强度因子,随后将应力强度因子加到小裂纹扩展分析过程中,得到的自然萌生裂纹扩展曲线如图 8 所示。

分析图 8 可知,在疲劳外载荷的作用下,齿轮表

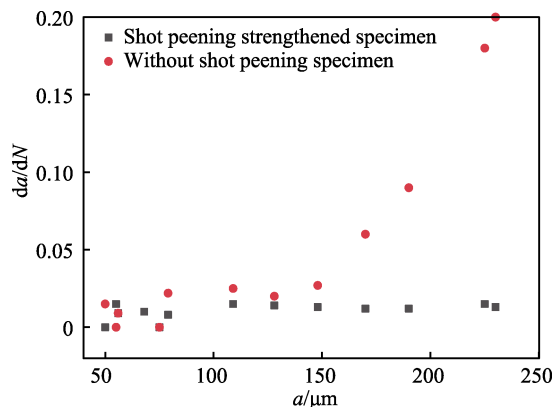


图 8 试验测定的  $da/dN$ - $a$  曲线  
Fig.8  $da/dN$ - $a$  curve measured by experiment

面裂纹很快从二相颗粒处萌生出小裂纹,但是经过喷丸强化后,齿面以半圆表面裂纹的形式向内部扩展,这与上述机理一致。喷丸高速撞击传动部件后,会在表面引入一定的残余压应力,裂纹源位置的改变使残余压应力可以影响裂纹扩展速率,并且随着压应力的增大,裂纹扩展速率降低,进而显著提高了疲劳裂纹扩展的抑制行为,疲劳寿命也随之延长。

Shaw 等<sup>[68]</sup>研究了残余应力的变化对重载车辆传动齿轮弯曲疲劳性能的影响,结果表明,当喷丸各类参数耦合不同时,对应的弯曲疲劳性能不同,因此由强化技术产生的残余压应力大小也不同,其中当引入高残余压应力时,齿轮弯曲疲劳强度提高了 75%,通过对微观组织进行观察发现,疲劳裂纹最初萌生于传动齿轮的次表层,而残余压应力抑制了裂纹扩展到齿轮断裂的过程,从而提高了疲劳强度。Mitsubayashi 等<sup>[69]</sup>基于文献[70]对 Shaw 等<sup>[68]</sup>的研究进行了总结,分析得出,传动齿轮的齿根在距离表面 0.05 mm 深处可以形成最大残余压应力,同时残余压应力的大小和深度对抑制疲劳裂纹扩展极为关键<sup>[71]</sup>。Zhu 等<sup>[72]</sup>对 Mitsubayashi 等<sup>[69]</sup>的总结进行了印证,结果显示,经过高速激光喷丸后,随着残余压应力的增大,传动齿轮裂纹尖端的有效应力强度因子范围逐渐减小,这会导致传动轴表面产生裂纹闭合效应,并降低裂纹扩展速度,使疲劳裂纹扩展寿命提高了 52.6%~78.9%。

通过上述重载车辆传动齿轮喷丸强化性能的研究得出,在越靠近齿轮表面短裂纹的扩展区域,引入的残余压应力越大,对表面疲劳裂纹抑制效果越好;同理,残余压应力层越深,疲劳强度也越高。所以与未经过喷丸处理的齿轮相比,由于残余压应力和高密度位错的耦合作用,喷丸后的齿面疲劳裂纹扩展速率低于未处理试样的,这是因为喷丸后部分残余压应力抵消了初始的残余拉应力,降低了平均应力水平以及裂纹扩展的有效驱动力,从而延长了疲劳裂纹扩展寿命,这与式(4)<sup>[73]</sup>的响应结果一致。

$$\sigma_m = \sigma_{\text{externalload}} + \sigma_{\text{residual}} \quad (4)$$

式中:  $\sigma_m$  为平均残余应力;  $\sigma_{\text{externalload}}$  为初始外加载荷;  $\sigma_{\text{residual}}$  为喷丸后引入的残余压应力。由式 (4) 可知, 平均应力中如果包含的残余应力为拉应力, 微裂纹将会继续发生延长扩展, 但残余压应力的存在会使扩展的速率降低。

综上所述, 抑制疲劳裂纹扩展的有效方法是通过喷丸技术在零部件表面引入残余压应力, 以此降低裂纹扩展速率。微裂纹在残余压应力的作用下无法张开或者张开速度较慢, 将不会继续发生扩展或者扩展得到延缓。随着残余压应力的增大, 抑制疲劳裂纹扩展的行为变得更加显著, 并且随着表面粗糙度的降低, 疲劳裂纹萌生寿命降低, 从而更好地延长了零件的使用寿命。目前, 大量学者利用残余应力场中的裂尖应力强度因子进行计算和分析, 以此来预测裂纹扩展是否在喷丸后得到有效抑制。喷丸技术使传动齿轮表面发生了加工硬化现象并引入了残余压应力层, 导致齿轮表面硬度提高, 以上现象有利于抵抗循环外载荷对齿轮表面带来的损伤并减少外载荷对试样的疲劳破坏。

传动齿轮的齿面疲劳裂纹扩展受力情况较为复杂, Bhamare 等<sup>[74]</sup>通过有限元模拟, 预测了不同激光喷丸工艺参数下齿轮试样的残余应力分布。结果表明, 为了控制最佳残余压应力层的引入, 需要确定一个最优喷丸参数, 对传动齿轮表面的残余压应力大小和应力分布进行转化和调控。目前针对弹性区内疲劳失效的仿真预测<sup>[75]</sup>, 绝大多数都是通过有限元手段以及各种算法进行裂纹扩展模型的构建, 以此进一步掌握影响裂纹扩展的因素和规律, 这也是未来喷丸预测技术的主要研究方向之一。此外, 残余压应力在产生

后将会发生松弛, 松弛后裂纹扩展速率再次提高, 残余应力松弛与裂纹扩展速率之间的关系和机制需要得到更多关注。

## 5 喷丸工艺参数对表面残余压应力的影响

表面完整性是评价零件表面质量的一个重要指标, 一方面包括表面纹理变化, 例如表面硬度、表面粗糙度等, 另一方面包括物理性质变化, 例如微观组织等。其中残余应力是物理性质变化中的一个重要特征量。经过表面强化后, 齿轮表面产生的残余压应力可以有效延缓疲劳裂纹的萌生时间, 并抑制现有裂纹的扩展, 进而延长零件的使用寿命。由于喷丸实际操作的研究周期长、成本高, 且难以深入研究强化机理, 因此大量学者采用有限元数值仿真对传动齿轮进行残余压应力的预判断, 为揭示喷丸强化机理提供了理论指导。

通过计算机软件模拟不同参数下齿轮中残余应力的分布, 确定达到最优喷丸强化效果的不同类型的参数大小。随着模拟仿真技术的发展, 喷丸数值仿真分析的对象也从简单靶材变为复杂三维材料模型, 如图 9 所示<sup>[76]</sup>, 从单一有限元分析变为有限元和离散元耦合分析。喷丸仿真模拟结果能够给予喷丸试验一些指导作用, 可以有效避免大量的重复试验, 减少浪费, 因此本节将探讨喷丸仿真中不同参量对传动齿轮表面残余压应力的影响。

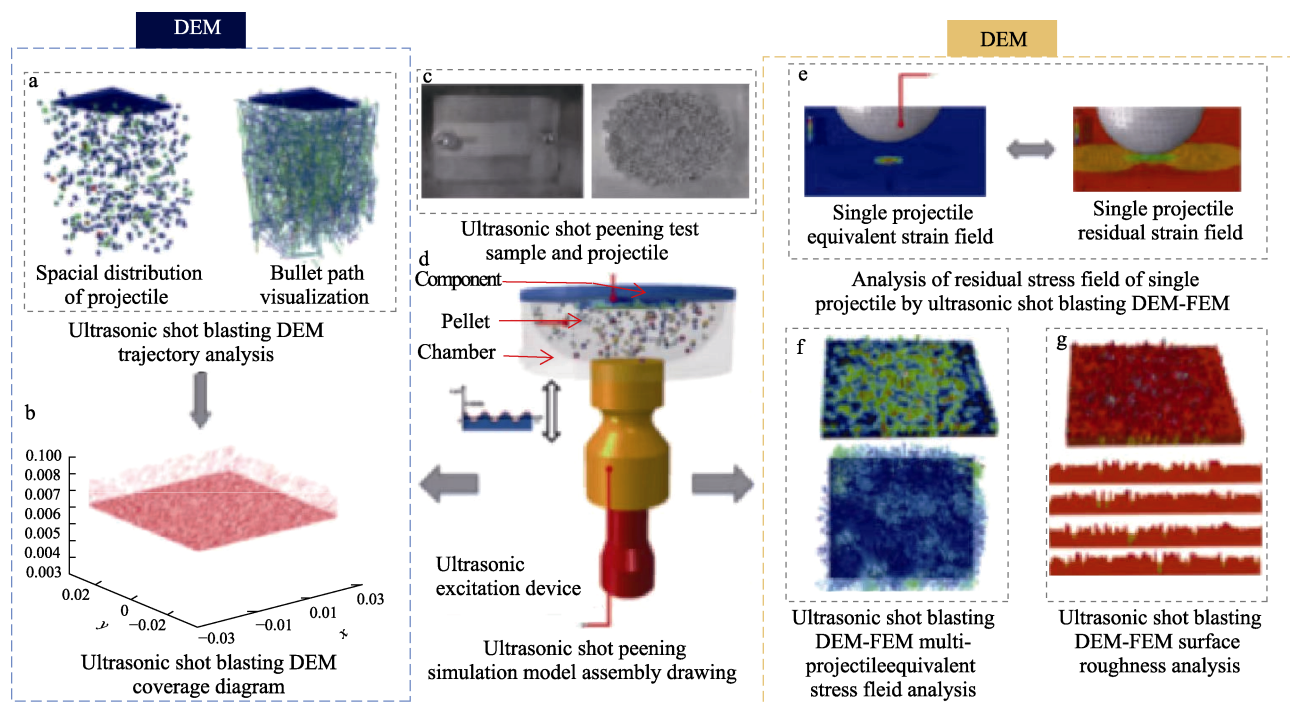


图 9 超声喷丸 DEM-FEM 耦合分析过程示意图

Fig.9 Schematic diagram of ultrasonic shot peening DEM-FEM coupling analysis process

## 5.1 喷丸速度

关于强力喷丸对齿轮表面完整性的影响, Hua 等<sup>[77]</sup>基于 Fuhr 等<sup>[78]</sup>对重载车辆传动轴喷丸进行了研究, 研究表明, 在弹丸初速度为 80~200 m/s 条件下, 与速度为 80 m/s 相比, 当速度为 160 m/s 时齿轮表面的最大残余压应力至少提高了 2 倍, 经喷丸处理后, 齿轮表面平均疲劳寿命提高约 31.5 倍, 喷丸前疲劳裂纹的延缓扩展过程占整体疲劳寿命的 60%, 剩余 40% 为加速扩展过程, 这将导致齿轮的服役寿命大幅缩减, 但是喷丸后的裂纹延缓扩展部分增至 80%, 疲劳寿命得到大幅提高, 因此得出入射速度越大、喷丸后引入的残余压应力越大的结论。Dias 等<sup>[79]</sup>对 Hua 等<sup>[77]</sup>的试验进行了深入研究, 在 0.35 mm 的弹丸直径下, 随着弹丸速度从 60 m/s 增大到 180 m/s, 传动齿轮表面最大残余压应力值达到了 960 MPa, 此时喷丸速度为 100 m/s, 裂纹扩展速率降至  $10^{-3}$  mm/cyc, 疲劳裂纹扩展寿命提高幅度可达 23%。王玖等<sup>[80]</sup>在单一速度下进行了研究, 结果如图 10 所示, 研究发现, 随着弹丸速度的增大, 传动齿轮表面的残余压应力呈现先增大后减小的趋势, 因此王玖等<sup>[80]</sup>否认了文献[78]中提出的单一增大的结论, 他们认为通过单一参数选取的最优残余压应力层不符合实际需求, 实际上喷丸速度还受喷丸中的弹丸流量以及喷丸压力等设备参数的影响, 因此对喷丸速度与残余压应力进行研究需要综合其他喷丸参数。王玖等<sup>[80]</sup>对重载车辆的传动齿轮进行了喷丸, 研究发现, 适当提高齿轮表面的喷丸速度, 喷丸强度会相应增大, 强化效果也会相应提高。但当喷丸速度过高时, 弹丸的破碎率会显著增大, 强化后的效果反而会出现减弱的现象<sup>[81]</sup>, 得出高强度与高速度的组合也未必会产生显著强化效果的结论。综上可知, 当弹丸直径不同时, 最佳弹丸速度也会不同, 在相同弹丸直径或者强度下, 残余压应力会随着入射速度的增大而趋于特定的饱和残余压应力值。

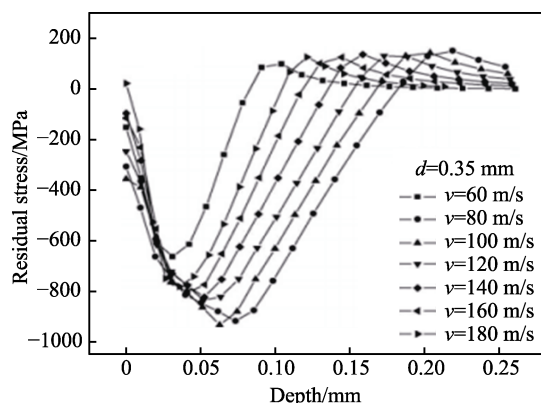


图 10 0.35 mm 弹丸直径和不同喷丸速度下钢板残余应力沿厚度分布结果

Fig.10 Distribution of residual stress along thickness of steel plate with different shot peening speeds and 0.35 mm shot diameter

当喷丸速度过大时, 冲击产生的能量也会过大, 当齿面达到最大形变量后, 随着速度的增大, 齿轮表面的形变量已饱和, 由于塑性变形影响着残余压应力的形成, 相对应的表面残余压应力不再提高, 当弹丸撞击齿轮后, 它在反弹路程中将遇到正向喷射的弹丸。除此之外, 当速度过大时, 两者相撞会改变正向弹丸的冲击路线, 使实际撞击的粒子量减少, 最后冲击的能量和强度也随着减小。因此, 喷丸强化效果并不是持续随着入射速度的增大而增强, 而是存在一个变化范围。上述仿真分析结果表明, 在其他参数相同的条件下, 传动部件表面残余压应力随着入射速度的增大而呈现先增大后饱和的趋势, 通常喷丸的入射速度不会超过 200 m/s, 在与其他参数耦合的情况下, 具体的弹丸速度要依据表面完整性的需求而定。

## 5.2 喷丸角度

在残余压应力影响方面, 王利平等<sup>[82]</sup>通过正交实验法以及极差分析法, 得到喷丸角度是影响最大的因素的结论。当弹丸垂直入射时, 传动齿轮表面可以引入较高的残余压应力。因此, 喷丸角度在提高表面粗糙度和抗疲劳强度方面起着不可忽视的作用。Zhang 等<sup>[83]</sup>研究发现, 随着微粒子喷丸入射角度的增大, 齿面表层残余压应力层加深, 残余压应力峰值也相应上升。分别对入射速度为 100 m/s 和入射角度为  $60^\circ$  以及入射速度为 60 m/s 和入射角度为  $90^\circ$  的 2 种工况进行研究对比, 结果显示, 第二组工况可以产生更高的残余压应力, 这也与前述文献获得的结果基本一致。

文献[84-85]分别利用三维喷丸模型和单粒弹丸强化模型探讨了入射角度对喷丸效果的影响, 将弹丸角度分别设为  $60^\circ$  和  $90^\circ$ , 结果发现, 当产生塑性应变时, 2 种工况下的残余应力层深度几乎相同, 但由于喷丸角度  $90^\circ$  所使用的有效喷丸能量较大, 因此, 在  $90^\circ$  工况下可以产生 1 100 MPa 的残余压应力, 大约是  $60^\circ$  工况下的 2 倍, 平均疲劳寿命提高了 214%, 且随着弹丸角度从  $90^\circ$  下降, 残余压应力也逐渐下降。这对解决受热应力冲击的齿轮疲劳断裂问题提供了理论依据。Taehyung 等<sup>[86]</sup>采用有限元方法解决强化问题时, 同样发现随着弹丸角度接近  $90^\circ$ , 齿轮表面最大残余应力逐渐增大, 应力层深度也相应增大。盛湘飞等<sup>[87]</sup>和王帅等<sup>[88]</sup>研究表明, 当激光冲击角度为  $90^\circ$  时, 齿轮表面将产生较低的表面粗糙度和较高的残余压应力, 喷丸的覆盖率可达 100%, 能够有效减少应力集中问题, 同时激光喷丸引入的较深残余压应力场延长了齿轮的裂纹扩展寿命, 同时应变能转变率由 5.3% 提高到 7.5%, 提高了抗疲劳性能。

对上述学者的研究数据进行分析, 结果表明, 影响残余压应力层最主要的因素是喷丸角度, 主要原因包括: 1) 当弹丸以一个角度  $\theta$  ( $\theta < 90^\circ$ ) 撞击齿面时, 齿轮表面的弯曲以及弹丸流撞击表面的角度都会使  $\theta$  减小, 使喷丸后的真实效果不能达到预期, 喷丸角度

对凹坑尺寸有较大影响, 当  $\theta$  等于  $90^\circ$  时, 球形丸料会产生一个圆形的凹坑, 如果  $\theta$  小于  $90^\circ$ , 则凹坑是椭圆的; 2) 在周长相等的椭圆和圆工况下, 圆的面积要大于椭圆面积, 形成圆形弹坑将会使喷丸面积更大, 撞击齿面面积越大, 单位时间内传导的能量就越多, 形成的残余压应力越大, 又因为圆的直径大于椭圆短轴, 因此撞击后产生的残余压应力层深度更大, 所以大入射角度会影响残余应力场的分布和幅值, 在实际喷丸中为了得到最佳的表面强化效果, 应尽量使弹丸入射方向与零件表面呈垂直状态, 高残余压应力的引入会使齿轮表面致密化, 导致原有空位消失, 形成微裂纹闭合,  $90^\circ$  的入射角度能最大化减小晶粒之间的间距, 阻碍裂纹的扩展。

### 5.3 弹丸直径

目前, 机械喷丸强化标准丸粒直径尺寸为  $0.2 \sim 3.4$  mm。徐刚等<sup>[89]</sup>对某重载车辆传动齿轮表面进行机械喷丸强化, 结果显示, 随着弹丸直径从  $0.28$  mm 增到  $1.16$  mm, 表面残余压应力从  $173$  MPa 增到  $216$  MPa, 并在  $1.16$  mm 的直径条件下, 残余压应力层深度可达最大值  $125$   $\mu\text{m}$ , 裂纹最大扩展速率降低约  $12\%$ , 这是因为弹丸直径的增大会加剧轴表面核心材料的弹性变形, 因此增大弹丸直径后, 表面强化效果会得到明显加强。孟庆帅等<sup>[90]</sup>在喷丸速度为  $60$  m/s, 弹丸直径分别为  $0.4$ 、 $0.6$ 、 $0.8$ 、 $1.0$  mm 的 4 种工况下, 对传动齿轮喷丸后啮合表面最大残余压应力值进行了分析, 结果如图 11 所示, 当弹丸直径为  $0.4$  mm 时, 喷丸产生的残余压应力及其深度和最大残余压应力及其深度分别为  $280$  MPa、 $0.2$  mm、 $785$  MPa、 $0.05$  m, 而在弹丸直径为  $1.0$  mm 时, 表面可以在深度为  $0.49$  mm 处获得  $510$  MPa 的残余压应力, 在深度为  $0.18$  mm 处获得  $946$  MPa 残余压应力, 因此随着弹丸直径的增大, 齿轮表层为压应力, 内部为拉应力, 最大压缩残

余应力出现在次表面, 压缩残余应力层的尺寸和深度随着弹丸直径的增大而增大, 内部的拉应力区域也随之变大, 经过弹丸高速冲击后传动齿轮引入的弹坑随着弹丸直径的增大而增大, 在  $z$  轴上的位移也随之增大。

文献[91]对不同弹丸直径下齿轮表面残余应力沿厚度方向的分布情况进行了分析, 研究发现, 弹丸直径越大, 越容易引入较高的残余压应力, 与  $1.0 \sim 1.7$  mm 的直径相比, 在直径  $2$  mm 的工况下可以产生  $550$  MPa 的残余压应力, 并且在距离表面深度方向上, 残余压应力的范围也随直径的增大而增大, 在达到最大应力值后, 逐渐下降并趋于平稳, 避免了表面出现应力集中现象, 在疲劳裂纹由浅向深的扩展过程中, 最大扩展速率降幅约为  $36.7\%$ 。因此, 喷丸强化层对齿轮裂纹扩展起到抑制作用。

在  $0.2 \sim 3.4$  mm 的弹丸尺寸范围内, 弹丸直径越大, 传动齿轮表面引入的残余压应力及其深度越大, 齿轮抗疲劳强度的提高效果越显著, 使用寿命越长。虽然选用直径较大的弹丸会产生较大的残余压应力层, 齿轮表面的弹坑也较深, 但当齿轮在  $z$  轴方向的位移过大时, 齿轮表面容易损伤。因此, 传统喷丸手段所使用的弹丸直径一般不超过  $2$  mm, 撞击后的弹丸坑连接而成的浅小裂纹为非扩展裂纹, 齿面的主裂纹平行于表面继续扩展, 分叉裂纹再次发生分叉向下扩展, 从而使裂纹扩展的速率减小。此外, 喷丸最佳效果是残余应力水平大约为齿轮表面变形层的屈服强度的一半, 如果直径过大, 与对齿轮表面进行过多的喷丸工艺相比, 将会削弱齿轮表面的延展性, 并使齿轮产生自行退火或者残余应力松弛的倾向。

### 5.4 弹丸材质

喷丸强化中的弹丸类型一般有铸铁丸、陶瓷丸、铸钢丸、玻璃丸、不锈钢丸<sup>[92]</sup>。按材质密度从大到小的顺序依次为铸钢、陶瓷、玻璃。通常情况下, 钢制

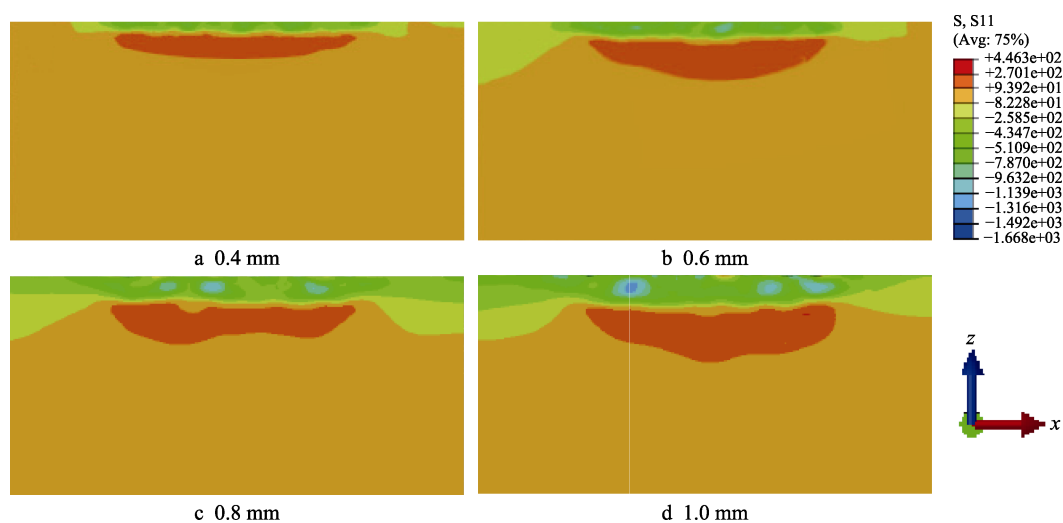


图 11 不同弹丸直径喷丸强化后靶材深度方向的残余应力分布云图

Fig.11 Diagram of residual stress distribution in depth direction of target after shot peening

弹丸密度大,会使喷丸后引入的残余压应力变大。文献[93]研究表明,随着弹丸材质密度的增大,撞击后形成的残余压应力层深也在增大,并且坑深的大小较多依赖于弹丸密度的大小。Chen 等<sup>[94]</sup>研究了微粒子表面喷丸处理技术,研究表明,不同材质的弹丸对齿面的影响效应是不同的,钢制弹丸喷射撞击后产生的最大弹坑直径为 83~109  $\mu\text{m}$ ,该尺寸远远大于陶瓷和玻璃材质形成的弹坑直径,并且钢制弹丸引入了较大的残余压应力,喷覆后导致弹丸表面硬度能达到  $(205.32 \pm 4.11)$  HV,比玻璃材质和陶瓷材质的分别高出 14HV 和 3HV。王强等<sup>[95]</sup>在 Chen 等<sup>[94]</sup>研究的基础上,进一步通过表面形貌测绘进行了观察,研究发现,钢制丸喷丸后的齿轮表面起伏程度远远大于陶瓷丸的,且铸钢丸达到最大残余应力 580 MPa 所需的时间要短于陶瓷丸达到最大残余压应力 550 MPa 所需的时间。

虽然钢质弹丸会引入较高的残余压应力,但是在喷丸后会使得表面整洁度降低,因此目前越来越多地将钢制+陶瓷弹丸的复合喷丸方式应用于齿轮表面强化,这样既可以在钢制弹丸工况下产生均匀且较深较大的残余压应力,使残余奥氏体含量变化明显<sup>[96]</sup>,又可以使齿轮表面粗糙度降低、表面硬度提高。然而陶瓷丸价格昂贵,破碎率高,这可能会导致正在进行喷丸强化的材料上出现不是由于车辆使用中摩擦磨损而产生的微小裂纹,同时因为陶瓷丸的质量较小,必须使用更高的压力才能达到效果,容易引起机械故障。目前市面上更多是以钢制弹丸为主进行强化,后续进行抛光,因此,钢制材料如何提高表面光整度是未来研究的一大方向。

上述文献表明,在选择弹丸材质时,与玻璃和陶瓷材质的弹丸相比,钢制弹丸可以产生较高的残余压应力,铸钢作为固体喷丸强化介质,喷丸强化效果是绝对明显的。同时,通过控制含碳量、热处理和制造工艺,可以获得所需的硬度、韧性、延性、近球形形状和低成本。在相同体积和速度下,钢制弹丸密度最大,对应的质量最大,经过高速冲击后产生的动能最大,齿轮表面发生的塑性变形量最大,强化效果最好。但是由于弹丸高速撞击齿轮表面时,会与零件表面发生一定的摩擦,弹丸材质将对零件表面粗糙度等产生影响,而表面粗糙度等完整性会对引入的残余压应力产生影响,因此,需要根据齿轮表面需求,选取合适的弹丸材质,同时在陶瓷材质弹丸的设计过程中进行改善,以降低成本及提高质量。

## 5.5 弹丸覆盖率

表面覆盖率是零件经过喷丸处理后在表面所留下弹坑的面积占总面积的百分比。根据覆盖面积可以得到覆盖率公式,如式(5)所示<sup>[97]</sup>。

$$\eta = \frac{\pi d^2}{4L^2} \quad (5)$$

式中:  $\eta$  为表面覆盖率;  $d$  为弹坑直径;  $L$  为区域边长。弹坑直径和区域边长主要受弹丸直径、弹丸数量的影响。

Qin 等<sup>[98]</sup>从覆盖率的角度对传动齿轮啮合表面激光喷丸后的表面残余应力进行了研究。他们认为,随着覆盖率的提高,表面最大残余压应力和硬度逐渐增大,相比于 100%覆盖率产生的 100 MPa 残余压应力,1 000%覆盖率下的传动齿轮表面可以产生 1 095.8 MPa 的残余压应力,并且残余压应力层深度也更大,表面硬度从 700HV 提高到 850.1HV,齿轮表面的较大塑性应变导致零件表面产生高密度位错<sup>[99]</sup>,Wu 等<sup>[100]</sup>认为,喷丸覆盖率越高,抗疲劳强度越高,硬度越大,磨损率越小。接着他们通过试验方法,对 Tiako 等<sup>[101]</sup>的研究进行验证,仿真结果显示,覆盖率与残余压应力有着线性关系,在覆盖率从 100%到 400%的增长过程中,表面残余压应力从 628 MPa 增大至 705 MPa,塑性变形层深度达 1 mm,齿面硬度提高了 19%,高程度的表面纳米化和高数值的残余压应力耦合作用阻碍了裂纹的快速扩展。但是文献[93]再一次对文献[100]中建立的传动齿轮过渡区残余应力的有限元模型进行了修正,发现 200%的覆盖率可以在 0.42 mm 处产生 547 MPa 的残余压应力,但是在覆盖率从 150%到 200%的提高过程中,最大残余压应力的增长速率减小,如图 12 所示,在大覆盖率的工况下,喷丸齿轮的疲劳寿命均约为未喷丸齿轮的 2.5 倍。分析文献可知,由于喷丸形成的残余压应力层位置比成形与强化联合作用形成的残余压应力层位置要更加靠近齿轮表层附近,而喷丸引入的残余压应力对提高裂纹扩展疲劳寿命起着主导作用,因此,当最大残余压应力的增长速率减小到 0 时,最大残余压应力达到饱和,相应覆盖度也达到最大极限,这是因为喷丸覆盖率对残余应力的影响也会随着喷丸速度的变化而变化。在实际喷丸过程中,一般所使用的喷丸覆盖率较高,这将导致引入的单个残余应力在同一区域重叠。因此,残余压应力场也会加强,这意味着高覆盖率的喷丸会引入一个连续的表面压应力层,但是因为喷丸是一个冷加工表面技术,所以随着喷丸行为的加载,齿轮表面的冷作硬化现象不会持续发生,对应的残余压应力水平逐渐升高,最终会达到一个稳定值。

综上所述,表面喷丸将会获得更好的齿轮表面改性层,其力学性能将得到进一步提高,使传动齿轮的抗疲劳性能增强,随着弹丸直径和数量的增大,喷丸覆盖率逐渐增大,随着覆盖率的提高,齿轮表面残余压应力增大,但当覆盖率达到一定程度时,残余压应力将呈现饱和状态,趋于稳定。此外,随着入射速度的增大,覆盖率对残余压应力的影响愈发显著,可以在齿轮表面获得相对较快的残余压应力增长速率,但是有关覆盖率与其他工艺参数耦合作用的研究相对较少,因此未来需要对参数的组合效果进行设计研究。

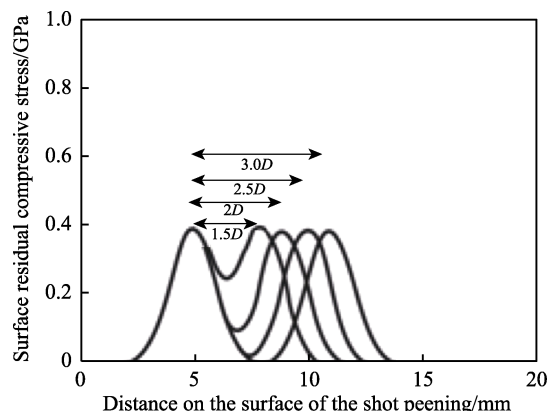


图 12 喷丸凹坑的残余应力叠加的效果  
Fig.12 Effect of superposition of residual stress in shot peening pits

## 6 结论

喷丸产生的残余压应力是影响表面裂纹扩展速率的主要因素之一。残余压应力越大, 应力强度因子越小, 裂纹扩展速率越慢, 传动齿轮的使用寿命越长。残余压应力和残余应力层深度越大, 齿轮表面的裂纹闭合效应越显著, 延缓裂纹扩展速率效果越佳, 因此喷丸强化技术被广泛应用于抑制或延缓传动齿轮表面裂纹扩展领域。常见的新型喷丸方法包括微粒子喷丸、激光喷丸和超声喷丸, 与传统喷丸相比, 新型喷丸除了可以引入较高的残余压应力层, 还可以改善表面粗糙度以及减缓残余压应力的松弛能力。喷丸强化后引入的残余压应力使初始的微裂纹源移动至齿轮内部, 最深可以达到表层下方的残余拉应力区域, 对于已有疲劳裂纹的齿轮, 齿面存在拉应力, 喷丸强化后引入的残余压应力将与之叠加, 降低传动齿轮的实际应力, 同时使齿轮的应力强度因子下降, 进一步延缓疲劳裂纹的扩展, 延长轮齿的服役寿命。

传动齿轮喷丸工艺仿真参数优化研究取得了一定的进展, 一方面残余压应力不会随着入射速度和弹丸直径的增大而增大, 而是存在一个速度的界限, 在界限内, 残余压应力和速度成正比关系, 超过界限后, 残余压应力值会趋于平稳; 当弹丸垂直入射撞击传动部件表面时, 可以引入较大的残余压应力; 另一方面在常用的喷射弹丸直径范围内, 残余压应力随弹丸直径的增大而增大; 相比于陶瓷丸和玻璃丸, 钢制弹丸有着更好的提高抗疲劳强度的能力, 但不同传动部件的需求不同, 因此应根据弹丸材质和传动部件的位置以及表面粗糙度的需求来选择合适的匹配方案, 其中陶瓷丸在喷丸后可以达到更好的表面光洁性。残余压应力将随着喷丸覆盖率的增大而增大, 但是表面覆盖率存在饱和值。

有关喷丸强化技术已经取得了众多的研究成果, 并在高速重载车辆传动齿轮领域中得到了广泛应用,

但是在以下几个方面还需要进一步深入研究:

1) 目前喷丸仿真主要针对齿轮单一喷丸工艺参数的选取, 而对组合参数的分析较少。在实际应用中, 需要综合考虑各参数耦合作用对齿轮的影响。因此, 未来在数值仿真中, 需结合最优组合工艺参数, 深入研究喷丸后齿轮表面的耐腐蚀性、耐磨性和抗氧化性等表面完整性, 建立“多弹丸组合参数模型仿真-算法优化-应力场-粗糙度-疲劳裂纹扩展速率-疲劳寿命”的数学模型, 实现高效率进而达到齿轮寿命增长高承载性能的喷丸技术要求。

2) 目前有关残余压应力的松弛数学模型较少, 与实际喷丸后的残余应力状态存在较大差异。因此, 需要构建“喷丸仿真-残余压应力松弛状态”模型, 通过此模型分析影响松弛现象的原因以及持续时间和松弛现象对裂纹扩展的影响, 以更加准确地模拟喷丸后的实际状态。

3) 复合喷丸技术是未来发展的必要趋势, 可以一次性提高多种力学性能, 比如同时强化零件表面强度、改善物相结构以及提高零部件的耐高温氧化性。但是, 目前复合喷丸技术由于工序繁琐导致成本过高, 在实际中应用较少。因此, 未来需要采用工序简易的复合喷丸技术, 例如微粒子喷丸技术, 并充分利用钢制弹丸和陶瓷弹丸先后 2 次喷丸产生的耦合力学作用, 这样既能满足引入较大残余压应力的需求, 又能达到降低表面粗糙度的效果。

4) 目前国内齿轮裂纹扩展研究主要集中在单尺度, 而对多尺度疲劳性能的分析, 则可以更加全面地提供裂纹扩展预测。因此, 进行多尺度下疲劳性能分析, 并对亚表层微观形态进行全面分析, 是未来的主要任务之一。

## 参考文献:

- [1] LI H, ZHANG J W, HU L K, et al. Notch Fatigue Life Prediction of Micro-Shot Peened 25CrMo<sub>4</sub> Alloy Steel: A Comparison between Fracture Mechanics and Machine Learning Methods[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2022, 277: 108992.
- [2] 王晓阳, 凌晓涛, 徐刚. 旋片喷丸强化对 2024 铝合金预拉伸板疲劳性能的影响[J]. 机械工程材料, 2017, 41(12): 18-21.  
WANG X Y, LING X T, XU G. Effect of Flap Peen Hardening on Fatigue Properties of 2024 Aluminum Alloy Prestretching Sheet[J]. Materials for Mechanical Engineering, 2017, 41(12): 18-21.
- [3] YANG Q, CHENG J H, GUAN H J, et al. Investigation of Wet Shot Peening on Microstructural Evolution and Tensile-Tensile Fatigue Properties of Ti-6Al-4V Alloy[J]. Materials Chemistry and Physics, 2022, 291(208): 126635.
- [4] 涂虎, 张永祥, 朱丹宸. 齿轮裂纹故障诊断方法综述

- [J]. 机电工程技术, 2019, 48(5): 140-146.  
TU H, ZHANG Y X, ZHU D C. Review of Fault Diagnosis Methods for Gear Crack[J]. Mechanical & Electrical Engineering Technology, 2019, 48(5): 140-146.
- [5] Metal Improvement Company. Shot Peening Applications[M]. Paramus: Metal Improvement Company, 2019.
- [6] 袁伟, 刘忠, 郭前建, 等. 高频循环载荷下球面滑动副摩擦学特征研究[J]. 摩擦学学报, 2020, 40(6): 801-807.  
YUAN W, LIU Z, GUO Q J, et al. Tribological Performance Analysis of Spherical-Surface Sliding Pairs under High-Frequency Cyclic Loading[J]. Tribology, 2020, 40(6): 801-807.
- [7] 朱鹏飞, 严宏志, 陈志, 等. 渗碳齿轮齿根喷丸强化研究现状与展望[J]. 表面技术, 2021, 50(1): 10-27.  
ZHU P F, YAN H Z, CHEN Z, et al. Research Status and Prospect of Shot Peening for Carburized Gear Roots[J]. Surface Technology, 2021, 50(1): 10-27.
- [8] OUYANG T C, YANG R, SHEN Y D, et al. Effect of Structural Design Parameters on Nonlinear Dynamic Characteristics of the Gear Transmission[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part D Journal of Automobile Engineering, 2021, 236(4): 522-539.
- [9] NIU W W, ZHANG X Q, FANG J X, et al. Investigation of the Fatigue Life of AISI304 Stainless Steel Round Rod with Small Hole Subjected to Laser Shot Peening[J]. Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, 2020, 42(6): 283.
- [10] WANG Y M, SHAO J P, WANG X G, et al. Thermomechanical Coupled Contact Analysis of Alternating Meshing Gear Teeth Surfaces for Marine Power Rear Transmission System Considering Thermal Expansion Deformation[J]. Advances in Mechanical Engineering, 2018, 10(1): 168781401775391.
- [11] LYU Y, LEI L Q, SUN L N. Effect of Microshot Peened Treatment on the Fatigue Behavior of Laser-Melted  $W_6Mo_5Cr_4V_2$  Steel Gear[J]. International Journal of Fatigue, 2017, 98: 121-130.
- [12] CHEN S Z, GUO M Y, LI Y C, et al. Effects of Residual Stresses on Fatigue Crack Propagation of T-Joint Using Extended Finite Element Method (XFEM)[J]. Metals, 2022, 12(8): 1368.
- [13] 张常青. 喷丸对中碳钢表面短裂纹萌生与扩展的影响[J]. 电力学报, 1997, 12(2): 67-70.  
ZHANG C Q. Effect of Shot Peening on the Initiation and Propagation of Short Fatigue Cracks Form Surfaces in a Medium Carbon Steel[J]. Journal of Electric Power, 1997, 12(2): 67-70.
- [14] 罗学昆, 赵春玲, 查小晖, 等. 喷丸对 TB6 钛合金疲劳应力集中敏感性的影响[J]. 材料导报, 2021, 35(12): 12114-12118.  
LUO X K, ZHAO C L, ZHA X H, et al. Effect of Shot Peening on Fatigue Stress Concentration Sensitivity of TB6 Titanium Alloy[J]. Materials Reports, 2021, 35(12): 12114-12118.
- [15] 王强, 高国强, 罗学昆. 激光喷丸与机械喷丸复合强化对 2124-T851 铝合金疲劳寿命的影响[J]. 表面技术, 2021, 50(4): 96-102.  
WANG Q, GAO G Q, LUO X K. Effect of Laser Shot Peening and Shot Peening Compound Strengthening Process on Fatigue Life of 2124-T851 Aluminum Alloy[J]. Surface Technology, 2021, 50(4): 96-102.
- [16] 肖志瑜, 叶旋, 陆宇衡, 等. 喷丸表面强化处理 Fe-2Cu-2Ni-1Mo-1C 材料的弯曲疲劳性能及断口分析[J]. 机械工程学报, 2013, 49(20): 152-157.  
XIAO Z Y, YE X, LU Y H, et al. Effect of Shot Peening on Bending Fatigue Strength and Fractograph of Fe-Cu-Ni-Mo-C[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2013, 49(20): 152-157.
- [17] SI C R, SUN W B, TIAN Y, et al. Cavitation Erosion Resistance Enhancement of the Surface Modified 2024T351 Al Alloy by Ultrasonic Shot Peening[J]. Surface and Coatings Technology, 2022, 452: 129122.
- [18] FERREIRA N, JESUS J, FERREIRA J A M, et al. Effect of Bead Characteristics on the Fatigue Life of Shot Peened  $Al_{7475}$ -T7351 Specimens[J]. International Journal of Fatigue, 2020, 134(1): 105521.
- [19] 吴鹏飞, 杨邦成. 基于  $J$  积分的复合型疲劳裂纹扩展分析[J]. 科技和产业, 2022, 22(6): 326-333.  
WU P F, YANG B C. Analysis of Mix-Mode Fatigue Crack Growth Based on  $J$ -Integral[J]. Science Technology and Industry, 2022, 22(6): 326-333.
- [20] LEBLOND J B, LEBIHAIN M. An Extended Bueckner-Rice Theory for Arbitrary Geometric Perturbations of Cracks[J]. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 2022, 172(1): 105191.
- [21] WANG J, JIANG W, LI Y Y, et al. Numerical Assessment of Cyclic  $J$ -Integral  $\Delta J$  for Predicting Fatigue Crack Growth Rate[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2018, 205(10): 455-469.
- [22] TSAKMAKIS A, VORMWALD M. Configurational Forces and  $J$ -integrals in Cyclic Metal Plasticity[J]. Theoretical and Applied Fracture Mechanics, 2020, 108: 102565-102578.
- [23] 孙光耀, 穆塔里夫·阿赫迈德, 王鹏程. 斜齿轮裂纹应力强度因子与  $J$  积分的计算分析[J]. 机械传动, 2020, 44(10): 74-79.  
SUN G Y, MUTALIF A, WANG P C. Calculation and Analysis of Crack Stress Intensity Factor and  $J$  Integral of Helical Gear[J]. Journal of Mechanical Transmission, 2020, 44(10): 74-79.
- [24] DAI S J, ZHU Y T, HUANG Z W. Microstructure Evolution and Strengthening Mechanisms of Pure Titanium with Nano-Structured Surface Obtained by High Energy Shot Peening[J]. Vacuum, 2016, 125: 215-221.
- [25] REN J Y, ZHANG Z Y, LI W Q, et al. Shot Peening Technology for Inner Holes of Long and Deep Holes and Curved Parts[J]. Heat Treatment of Metals, 2017, 42(3): 202-205.

- [26] BIAN F L, ZHU Y L, DU X K, et al. Research on Performance of Two Phase Flow Field of the Pneumatic Shot Peening Based on CFD Method[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2015, 32(1): 264-269.
- [27] OHTA T, TSUTSUMI S, MAN S. Direct Measurement of Shot Velocity and Numerical Analysis of Residual Stress from Pneumatic Shot Peening[J]. Surface and Coatings Technology, 2021, 22: 100827.
- [28] XU S C, GAI P T, FU X S, et al. Influences of Dry and Wet Shot Peening Process on Strengthening Layer of TC17 Titanium Alloy[J]. Surface Technology, 2021, 50(9): 91-98.
- [29] ROLDOLFO Z P. High Pressure Water Shot Peening: EP19860306633[P].
- [30] 叶俊华, 李俊辰, 何勇, 等. 高压水射流技术在航空发动机中的应用与展望[J]. 热加工工艺, 2022, 51(17): 6-11.
- YE J H, LI J C, HE Y, et al. Application and Prospect of High Pressure Water Jet Technology in Aero-Engine[J]. Hot Working Technology, 2022, 51(17): 6-11.
- [31] 黄志超, 吕世亮, 谢春辉, 等. 先进喷丸表面改性技术研究进展[J]. 材料科学与工艺, 2015, 23(3): 57-61.
- HUANG Z C, LYU S L, XIE C H, et al. Development on Surface Modification Technology of Advanced Shot Peening[J]. Materials Science and Technology, 2015, 23(3): 57-61.
- [32] SUN Q Q, HAN Q Y, WANG S, et al. Microstructure, Corrosion Behaviour and Thermal Stability of AA 7150 after Ultrasonic Shot Peening[J]. Surface and Coatings Technology, 2020, 398: 126127.
- [33] 李蕊芝, 周香林, 孙澄川, 等. 微粒子喷丸技术研究进展[J]. 航空制造技术, 2021, 64(6): 82-87.
- LI R Z, ZHOU X L, SUN C C, et al. Research Progress of Fine Particle Peening Technology[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2021, 64(6): 82-87.
- [34] 王文健, 唐亮, 刘忠伟, 等. 喷丸对重载齿轮用 18CrNiMo7-6 钢抗胶合性能的影响[J]. 机械工程材料, 2019, 43(2): 43-46.
- WANG W J, TANG L, LIU Z W, et al. Effect of Shot Peening on Scuffing Property of Heavy-Load Gear Steel 18CrNiMo7-6[J]. Materials for Mechanical Engineering, 2019, 43(2): 43-46.
- [35] HASSANI-GANGARAJ S M, CHO K S, VOIGT H J L, et al. Experimental Assessment and Simulation of Surface Nanocrystallization by Severe Shot Peening[J]. Acta Materialia, 2015, 97: 105-115.
- [36] PENG H M. Surface Modification Technology and Application Using Particle Spray[J]. Foreign Locomotive & Rolling Stock Technology, 2016(4): 20-24.
- [37] ZHANG S. Surface Modification with Corpuscule High Speed Impact[J]. Automobile Technology & Material, 2011(3): 23-27.
- [38] 杨启, 付雪松, 周文龙. 激光喷丸表面强化技术的研究综述[J]. 航空制造技术, 2020, 63(12): 14-22.
- YANG Q, FU X S, ZHOU W L. Research Status and Application Progress of Laser Shot Peening Surface Strengthening Technology[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2020, 63(12): 14-22.
- [39] PARKER A. Shocked and Stressed Metals Get Stronger[J]. Science & Technology Review, 2001(3): 26-28.
- [40] WANG G L. Application of Laser-induced Shock Wave in Surface Modification and Forming of Sheet Metal[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2005, 36(12): 148-152.
- [41] MALAKI M, DING H T. A Review of Ultrasonic Peening Treatment[J]. Materials & Design, 2015, 87: 1072-1086.
- [42] MADIREDDY G C R, LIU J F, SEALY M. Distortion Mitigation in Additive Manufacturing of AlSi<sub>10</sub>Mg by Multilayer Peening[J]. Procedia CIRP, 2020, 95(13): 133-137.
- [43] ZHANG X Q, LI H, DUAN S W, et al. Modeling of Residual Stress Field Induced in Ti-6Al-4V Alloy Plate by Two Sided Laser Shock Processing[J]. Surface & Coatings Technology, 2015: 163-173.
- [44] ZHOU J, LIU H, YANG C J, et al. Non-Traditional Forming Process of Sheet Metal Based on Laser Shock Waves[J]. Key Engineering Materials, 2007, 329: 637-642.
- [45] 刘麟, 盛圆圆, 詹普杰, 等. 激光喷丸强化铜锌合金及其疲劳行为[J]. 中国有色金属学报, 2019, 29(2): 295-302.
- LIU L, SHENG Y Y, ZHAN P J, et al. Laser Shot Peening on Brass and Its Fatigue Behavior[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2019, 29(2): 295-302.
- [46] 吴勇华, 闫永君, 耿爱农, 等. 喷丸与激光喷丸强化高强度钢对比试验[J]. 现代制造工程, 2020(5): 119-124.
- WU Y H, YAN Y J, GENG A N, et al. Comparative Strengthening Testing of High Strength Steel Based on Shot Peening and Laser Shock Peening[J]. Modern Manufacturing Engineering, 2020(5): 119-124.
- [47] YIN X M, LI X, LIU Y H, et al. Surface Integrity and Fatigue Life of Inconel 718 by Ultrasonic Peening Milling[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2022, 22: 1392-1409.
- [48] UNAL O, VAROL R. Almen Intensity Effect on Microstructure and Mechanical Properties of Low Carbon Steel Subjected to Severe Shot Peening[J]. Applied Surface Science, 2014, 290: 40-47.
- [49] KULEKCI M K, ESME U. Critical Analysis of Processes and Apparatus for Industrial Surface Peening Technologies[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2014, 74(9): 1551-1565.
- [50] LIU S, TIAN Z J, GAO X S, et al. Effect of Ultrasonic Peening on Microstructure and Properties of Laser Rapid Forming GH4169[J]. Optik, 2018, 172: 443-448.
- [51] SHI X, LU S, ZHANG W. Study on Surface Integrity of Aluminum Alloy Ultrasonic Shot Peening Forming Workpieces[J]. China Mechanical Engineering, 2013,

- 24(22): 3100-3104.
- [52] 殷畅, 张平, 赵军军. 超声冲击对 20Cr<sub>2</sub>Ni4A 渗碳齿轮钢性能的影响[J]. 装甲兵工程学院学报, 2016, 30(4): 88-90.
- YIN C, ZHANG P, ZHAO J J. Effect of Ultrasonic Wave Impact on Properties of 20Cr<sub>2</sub>Ni4A Carburized Gear Steel[J]. Journal of Academy of Armored Force Engineering, 2016, 30(4): 88-90.
- [53] 冯淦, 石连捷, 吕坚, 等. 低碳钢超声喷丸表面纳米化的研究[J]. 金属学报, 2000, 36(3): 300-303.
- FENG G, SHI L J, LYU J, et al. Investigation of Surface Nanocrystallization of a Low Carbon Steel Induced by Ultrasonic Shot Peening[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2000, 36(3): 300-303.
- [54] CHIN K S, IDAPALAPATI S, ARDI D T. Thermal Stress Relaxation in Shot Peened and Laser Peened Nickel-Based Superalloy[J]. Journal of Materials Science & Technology, 2020, 59: 100-106.
- [55] ZHAO Z Y. Investigation and Development Status of the Application Technology to Improve Fatigue Behavior of High Strength Alloys[J]. Engineering Science, 2005, 7(3): 90-94.
- [56] RAMOS R, FERREIRA N, FERREIRA J A M, et al. Improvement in Fatigue Life of Al<sub>7475</sub>-T7351 Alloy Specimens by Applying Ultrasonic and Microshot Peening[J]. International Journal of Fatigue, 2016, 92: 87-95.
- [57] MANCHOUL S, BEN R, SEDDIK R, et al. Comparison between Conventional Shot Peening and Ultrasonic Shot Peening[J]. Mechanics and Industry, 2019, 19(6): 603.
- [58] ZHENG J X, LUO A M, LIU C S. Development of Ultrasonic Surface Enhancement Technique[J]. Special Machining Technology, 2012(10): 32-35.
- [59] 吕鹤婷, 王建明, 刘兴睿. 喷丸残余应力对裂纹闭合效应影响的数值仿真[J]. 中国表面工程, 2016, 29(2): 102-110.
- LYU H T, WANG J M, LIU X R. Numerical Simulation for Residual Stress Fields of Shot-Peening on Crack Closure Effects[J]. China Surface Engineering, 2016, 29(2): 102-110.
- [60] 樊子枫, 朱明亮, 轩福贞. 近门槛值区疲劳裂纹扩展行为的神经网络预测方法[J]. 压力容器, 2021, 38(10): 40-46.
- FAN Z F, ZHU M L, XUAN F Z. Neural Network Based Prediction of Fatigue Crack Growth Behavior in Near-Threshold Regime[J]. Pressure Vessel Technology, 2021, 38(10): 40-46.
- [61] GAO Y K, WU X. Experimental Investigation and Fatigue Life Prediction for 7475-T7351 Aluminum Alloy with and without Shot Peening-Induced Residual Stresses[J]. Acta Materialia, 2011, 59(9): 3737-3747.
- [62] 王建明, 刘伟, 吕鹤婷. 复合型裂纹的扩展路径模拟及疲劳寿命预测[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2015, 36(8): 1086-1091.
- WANG J M, LIU W, LYU H T. Numerical Simulation of Crack Propagation Path and Fatigue Life Prediction for Mixed Mode Cracks[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2015, 36(8): 1086-1091.
- [63] KARTHIK D, SWAROOP S. Laser Peening without Coating Induced Phase Transformation and Thermal Relaxation of Residual Stresses in AISI 321 Steel[J]. Surface & Coatings Technology, 2016(4): 161-171.
- [64] RAKITA M, WANG M, HAN Q Y, et al. Ultrasonic Shot Peening[J]. International Journal of Computational Materials Science and Surface Engineering, 2013, 5(3): 189-209.
- [65] ZHANG N, GUO S, HE G N, et al. Failure Analysis of the Carburized 20MnCr<sub>5</sub> Gear in Fatigue Working Condition[J]. International Journal of Fatigue, 2022, 161(1): 106938.
- [66] OROS C. Investigations Involving Shock Waves Generation and Shock Pressure Measurement in Direct Ablation Regime and Confined Ablation Regime[J]. Shock Waves, 2002, 11(5): 393-397.
- [67] 陈勃, 高玉魁, 吴学仁, 等. 喷丸强化 7475-T7351 铝合金的小裂纹行为和寿命预测[J]. 航空学报, 2010, 31(3): 519-525.
- CHEN B, GAO Y K, WU X R, et al. Small Crack Behavior and Fatigue Life Prediction for Shot Peening Aluminum Alloy 7475-T7351[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2010, 31(3): 519-525.
- [68] SHAW B, AYLOTT C, OHARA P, et al. The Role of Residual Stress on the Fatigue Strength of High Performance Gearing[J]. International Journal of Fatigue, 2003, 25: 1279-1283.
- [69] MITSUBAYASHI M, MIYATA T, AIHARA H. Phenomenal Analysis of Shot Peening: Analysis of Fatigue Strength by Fracture Mechanics for Shot-Peened Steel[J]. JSAE Review, 1994, 15(1): 67-71.
- [70] KRUG T, LANG K H, FETT T, et al. Influence of Residual Stresses and Mean Load on the Fatigue Strength of Case-Hardened Notched Specimens[J]. Materials Science and Engineering A, 2007, 468(5): 158-163.
- [71] VIELMA A, LLANEZA V, BELZUNCE F. Effect of Coverage and Double Peening Treatments on the Fatigue Life of a Quenched and Tempered Structural Steel[J]. Surface and Coatings Technology, 2014, 249: 75-83.
- [72] ZHU W G, MA C, ZHANG C H, et al. Fatigue Crack Propagation Behavior in Ti-6Al-4V Alloy with Surface Gradient Structure Fabricated by High-Energy Shot Peening[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2023, 33(10): 3003-3016.
- [73] SCHIJVE J. Fatigue of Structures and Materials (Second Edition)[M]. Beijing: Aviation Industry Press, 2014: 71-82.
- [74] BHAMARE S, RAMAKRISHNAN G, MANNAVA S, et al. Simulation-Based Optimization of Laser Shock Peening Process for Improved Bending Fatigue Life of Ti-6Al2Sn-4Zr-2Mo Alloy[J]. Surface and Coatings Technology, 2013, 232: 464-474.

- [75] ZHANG Y K, ZHANG S Y. Study of Visual Inspection and Control Methods of Effectiveness of Laser Shock-Processing[J]. *Applied Physics A*, 1997, 65(4): 419-423.
- [76] 蔡晋, 闫雪, 李威, 等. 基于 DEM-FEM 耦合的超声喷丸强化数值分析[J]. *航空学报*, 2022, 43(4): 561-572.  
CAI J, YAN X, LI W, et al. Numerical Analysis of Ultrasonic Shot Peening Based on DEM-FEM Coupling[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2022, 43(4): 561-572.
- [77] HUA C L. Numerical Analysis and Simulation of Residual Stress of Shot Peening Gear[J]. *Mechanical Research and Application*, 2016, 29(145): 22-26.
- [78] FUHR J, BASHA M, WOLLMANN M, et al. Coverage and Peening Angle Effects in Shot Peening on HCF Performance of Ti-6Al-4V[J]. *Procedia Engineering*, 2018, 213(5): 682-690.
- [79] DIAS A M, PINA J, BATISTA A C, et al. Influence of Shots' Material on Shot Peening a Finite Element Model[J]. *Materials Science Forum*, 2022, 404: 153-158.
- [80] 王玖, 张志远, 方雄. 弹丸直径和速度对喷丸残余应力分布的影响分析[J]. *材料科学与工程学报*, 2013, 31(4): 588-591.  
WANG J, ZHANG Z Y, FANG X. Effect of Diameter and Velocity of Shooting Pellet on the Distribution Residual Stress of Shot Peening[J]. *Journal of Materials Science and Engineering*, 2013, 31(4): 588-591.
- [81] 金荣植. 喷丸强化技术在汽车制造业的应用[J]. *汽车工艺师*, 2016(1): 60-63.  
JIN R Z. Application of Shot Peening Strengthening Technology in Automobile Manufacturing Industry[J]. *Auto Manufacturing Engineer*, 2016(1): 60-63.
- [82] 王利平, 王建明, 赵莉莉. 基于正交试验法的喷丸工艺多目标参数优化[J]. *现代制造工程*, 2016(3): 110-114.  
WANG L P, WANG J M, ZHAO L L. Multi-Object Optimization for the Shot Peening Parameters Based on Orthogonal Experiment Method[J]. *Modern Manufacturing Engineering*, 2016(3): 110-114.
- [83] ZHANG H W, ZHANG Y D, ZHAO X C. Numerical Analysis of Residual Stress Field of Shot Peening Based on Kriging Model[J]. *Journal of System Simulation*, 2011, 23(4): 826-831.
- [84] 王成, 李开发, 姚尚成, 等. 喷丸强化 Ti<sub>6</sub>Al<sub>4</sub>V 钛合金的数值模拟[J]. *航空动力学报*, 2021, 36(3): 449-457.  
WANG C, LI K F, YAO S C, et al. Numerical Simulation of Shot Peening of Ti<sub>6</sub>Al<sub>4</sub>V Alloy[J]. *Journal of Aerospace Power*, 2021, 36(3): 449-457.
- [85] MENG L H, SHAN Y C, KHAN A M, et al. Holistic 3D Simulations and Experimental Investigation of Surface Quality and Residual Stresses in Shot Peening[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2022, 121(1): 1027-1047.
- [86] TAEHYUNG K, HYUNGYIL L, HONG C H. Effects of Rayleigh Damping, Friction and Rate-dependency on 3D Residual Stress Simulation of Angled Shot Peening[J]. *Materials & Design*, 2013, 46: 26-37.
- [87] 盛湘飞, 李智, 赵科宇, 等. 喷丸方法对不规则构件表面残余应力分布规律的影响[J]. *表面技术*, 2018, 47(12): 99-104.  
SHENG X F, LI Z, ZHAO K Y, et al. Influence of Shot Peening Method on the Distribution Rule of Surface Residual Stress for the Irregular Component[J]. *Surface Technology*, 2018, 47(12): 99-104.
- [88] 王帅, 王建明, 吕鹤婷. 喷丸表面粗糙度对疲劳寿命影响研究[J]. *组合机床与自动化加工技术*, 2018(2): 12-16.  
WANG S, WANG J M, LYU H T. Research for Surface Roughness of Shot-Peening Affecting on the Fatigue Life[J]. *Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique*, 2018(2): 12-16.
- [89] 徐刚, 夏明莉, 王治国, 等. 喷丸试件表面粗糙度与残余应力相关性分析[J]. *现代制造技术与装备*, 2021, 57(3): 96-97.  
XU G, XIA M L, WANG Z G, et al. Correlation Analysis between Surface Roughness and Residual Stress of Shot Peening Specimen[J]. *Modern Manufacturing Technology and Equipment*, 2021, 57(3): 96-97.
- [90] 孟庆帅, 汪舟, 甘进, 等. 喷丸强化改善点式移动感应淬火 42CrMo 钢残余应力数值模拟分析[J]. *表面技术*, 2018, 47(9): 12-20.  
MENG Q S, WANG Z, GAN J, et al. Numerical Simulation Analysis of Shot Peening for Residual Stress Improvement of Spot Continual Induction Hardened 42CrMo Steel[J]. *Surface Technology*, 2018, 47(9): 12-20.
- [91] QIANG B, LI Y D, GU Y. Numerical Simulation of Residual Stress Field and Surface Roughness of Steel Shot Blasting[J]. *Journal of Southwest Jiaotong University*, 2015, 50(4): 691-697.
- [92] 阳新元, 吴红美. 喷丸强化在传动系统中的应用[J]. *设备管理与维修*, 2019(14): 191-192.  
YANG X Y, WU H M. Application of Shot Peening in Transmission System[J]. *Plant Maintenance Engineering*, 2019(14): 191-192.
- [93] LAN S W, LIU S, QIN J G, et al. Experiment of Super-high-speed Impact Crater of Different Densities Projectiles on Water Ice[J]. *Acta Astronautica Sinica*, 2018, 39(9): 1054-1059.
- [94] CHEN J W, LIAO K, LI L J, et al. Simulation and Experiment for Shot Peening Effect of Different Projectiles on Al-based Alloy[J]. *Surface technology*, 2019(9): 121-125.
- [95] 王强, 乔明杰, 张伟, 等. 喷丸对 TC4 钛合金残余应力场及疲劳寿命的影响[J]. *机械工程材料*, 2012, 36(12): 53-57.  
WANG Q, QIAO M J, ZHANG W, et al. Effect of Shot Peening on Compressive Residual Stress Fields and Fatigue Life for TC4 Titanium Alloy[J]. *Materials for Mechanical Engineering*, 2012, 36(12): 53-57.

(下转第 57 页)