

文章编号: 0258-7025(2009)Supplement 1-0134-05

激光再制造齿类零件的关键问题研究

董世运 徐滨士 王志坚 张晓东

(装甲兵工程学院装备再制造技术国防科技重点实验室, 北京 100072)

摘要 齿类件是机械中的重要零件,在机械中承担着传递动力和运动等重要功能。齿类件失效往往是因为齿的磨损和断裂而引起。但是,齿类件修复一直是机械行业关注的热点和难点问题。本文针对齿类件损伤齿的再制造,介绍了装备再制造工程的内涵和特点,阐述了激光再制造的概念和技术途径;对齿类件齿损伤形式进行了分类,并针对不同损伤形式,从技术工艺、再制造齿的性能和形状等多方面,探讨了损伤齿的激光再制造的关键问题,并结合研究实例,分析了断齿、齿面磨损和齿端磨损等损伤齿类件的激光再制造方法。最终指出,激光再制造是实用性很强的齿类件修复技术,具有广阔的应用前景。

关键词 激光制造;激光再制造;齿类零件;齿面;齿形

中图分类号 TG174.44 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL200936s1.0134

Vital Problems on Laser Remanufacturing Gears

Dong Shiyun Xu Binshi Wang Zhijian Zhang Xiaodong

(National Key Laboratory for Engineering, Academy of Armored Forces Engineering, Beijing 100072, China)

Abstract Gears are important components in mechanism, which take roles of transferring power and speed. Their failures are mainly caused by tooth fracture and abrasion. However, reparation of the damaged gears is still a popular and hard problem in machinery industry. In this paper, as to remanufacturing or repairing the damaged gear-tooth, it introduced connotation and technical characters of remanufacture engineering, stated connotation and technical processes of laser remanufacture. Then it divided the damage of gear tooth into three sorts, and discussed the vital problems on laser remanufacturing of the damaged gear tooth from various aspects such as remanufacturing processing, performance and shape of the remanufactured teeth. With practical samples, it interpreted the laser remanufacturing methods for the fracture, tooth-surface abrasion and tooth-end abrasion gears individually. At last, it points out that laser remanufacturing is great practical technology for damaged gear repair, which shows great prosperous applications.

Key words laser fabrication; laser remanufacturing; gears; gear-tooth surface; gear-tooth shape

1 引言

齿类件是机械系统中传递载荷和运动的重要零件。齿类件主要因齿面或齿体而失效,如齿面磨损和局部剥层、齿体断裂或出现裂纹等。齿的失效直接影响到机械系统的正常运行。由于齿类件数量多、作用大、成本较高,所以对齿损坏的齿类件进行修复具有重大的社会意义和显著的经济效益,齿类件的修复一直是工程领域的研究热点。国内外广泛研究了堆焊、喷熔、镶嵌等多种修复方法^[1,2]。但是,多年来,由于技术本身的局限性或修复的齿类件

无法满足服役性能要求,这些修复方法无法获得推广应用。然而,随着“节能降耗”、发展循环经济、建设节约型社会等国家政策的不断贯彻落实,规范化高性能修复齿类零件的需求越来越迫切。

随着资源和环境已成为社会发展的主题,再制造工程应运而生,并已成为科技和工业的新兴领域。再制造是以产品后半生为研究对象,提升、改造废旧产品的性能,使废旧产品重获生命力。实践证明,再制造可使废旧产品中蕴含的价值得到最大限度的开发和利用,是节约资源的重要手段。再制造虽然也

基金项目: 国家自然科学基金(50505052)及 NSFC-RS 合作基金(50711130231)资助项目。

作者简介: 董世运(1973—),男,博士,副研究员,主要从事激光加工、装备再制造方面的研究。

E-mail: syd422@sohu.com。

要消耗部分能源、材料和一定的劳力投入,但是,它充分挖掘了蕴涵在成形零部件中的材料、能源和加工附加值,使经过再制造的产品性能达到或超过新品,而成本是新品的 50%、节能 60%、节材 70%,环保显著改善^[3,4]。中国的再制造从上世纪 90 年代后期开始起步,进入 21 世纪得到快速发展。

激光作为一种高能量密度的光源,在材料加工领域具有巨大应用潜力。自 20 世纪 80 年代大功率激光器开始工业应用以来,激光加工技术已成为材料加工和装备制造先进技术。同时,激光为研发再制造工程先进技术提供了新的技术途径。基于激光熔覆原理的激光再制造技术,既可以进行金属零件表面修复,又可以进行三维成形,具有沉积金属层与基体冶金结合、性能优异、修复件后加工余量小等诸多优点,为齿类件的修复和再制造提供了可行的高性能技术途径^[5~9]。本文针对齿类件激光再制造,

介绍激光再制造技术手段,研究分析其技术关键问题,为齿类件修复和再制造提供思路和技术途径。

2 齿类件齿形失效特征

齿类零件失效主要是齿的失效而引起。由于齿类件服役工况和受载情况不同,根据齿的失效部位不同,齿的失效主要可以分为齿面失效、齿端失效和齿体失效等不同形式,见表 1。齿的失效部位是和齿的受载条件和工作方式密切相关的。例如,常啮合齿面在相对平稳的运行过程中、在持续均匀的载荷的作用下,相互啮合齿面发生滑动磨损和接触疲劳磨损;而当由于操作不当或运行状况突然变化时,载荷突然增大或造成过大的冲击载荷,就会造成断齿或齿体出现裂纹。图 1 给出了不同失效形式的失效齿类件的实物照片。

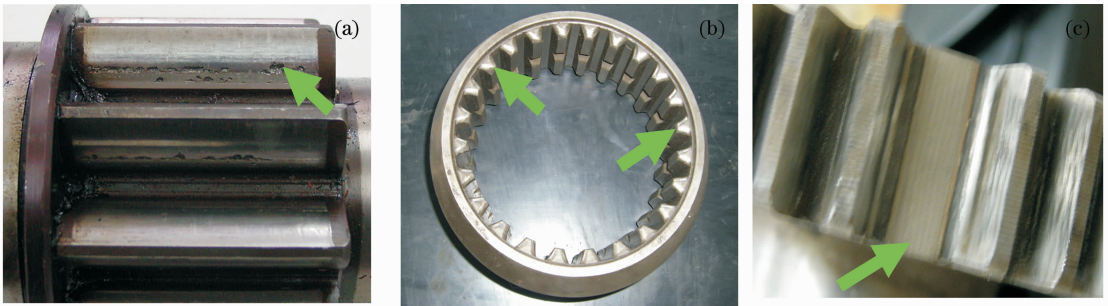


图 1 不同失效齿部位的失效特征

Fig. 1 Failure features of various parts of the damaged gear-tooth. (a) worn tooth-surface; (b) worn tooth-end, (c) fractured tooth

表 1 不同部位失效齿类件的失效特征及失效原因

Table 1 Failure features and causes of the gears damaged in different parts

Failure part	Characteristics	Faiure mechanism	Typical parts
Tooth surface	(1) Worn surface with base tangent length error	(1) Abrasion, adhesion	Constant mesh gears
	(2) Surface spalling	(2) Contact fatigue	
Tooth side	Worn side	Impact worn	Frequent mesh gears, e. g., coupling sleeve gears
Tooth body	Fracture or cracks	Affected by sudden heavy load	Possible for all gears

这些不同齿部位失效的齿类件,均可以基于激光熔覆技术对其进行修复或再制造,但是,需要针对性地研究不同的技术实施方法。

3 激光再制造的概念及其技术分类

激光再制造是指利用激光表面处理、激光烧结成形、激光焊接、激光切割、激光打孔等各种激光加工与处理技术恢复损伤零部件的形状和性能。激光再制造技术是应用激光束对废旧零部件进行再制造

处理的各种激光技术的统称。按激光束对零件材料作用结果的不同,激光再制造技术主要可分为两大类,即激光表面改性技术和激光加工成形技术,如图 2 所示。

采用高能量激光束,利用表面合金化、表面熔覆等技术手段,恢复和提升局部损伤机械零部件的几何尺寸和功能,可以大大节约原材料,使零件变形小或无变形,符合再制造的技术要求。激光再制造具有效率高、精度高、再制造零件质量和性能优异等特

点。目前,激光再制造技术主要针对表面磨损、腐蚀、冲蚀、缺损等零部件局部损伤及尺寸变化进行结

构尺寸恢复,同时提高零部件服役性能。

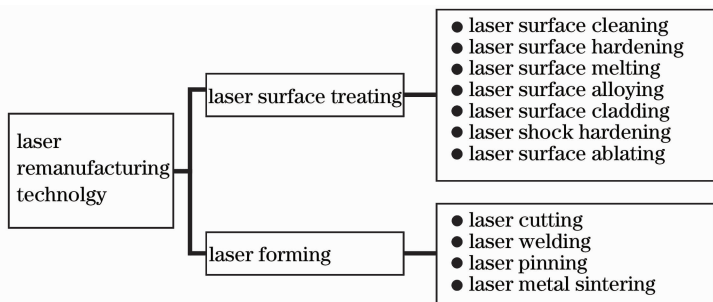


图 2 激光再制造技术分类

Fig. 2 Sorts of laser remanufacturing technology

激光熔覆技术是目前工业中应用最为广泛的激光再制造技术。激光熔覆技术是把激光加工与数控技术相结合,通过在金属基体表面预置粉末或同步送粉的方法,利用激光的高能量把金属粉末熔化,与基体形成良好的冶金结合,从而达到改善产品性能的特种加工方法。激光熔覆件表面硬度较高,具有良好的耐磨、耐蚀性能。由于激光熔覆的热影响区极小,零部件基本不变形,特别适合于高精度零部件的磨损后修复。1981年,英国 Rolls-Royce 公司将激光熔覆技术用于 RB211 型燃气轮机叶片连锁肩的修复。从此,激光熔覆技术在世界各主要工业国家获得了大量研究和应用。美国、英国、德国等均采用激光熔覆等激光加工技术进行叶片等零部件的高性能修复。目前,中国沈阳大陆(集团)公司已经注册成立了激光再制造技术公司,在石油、化工、轧钢、电厂等重点工业领域激光再制造了多种齿类零件,创造了显著的经济和社会效益。

4 激光再制造失效齿的技术要求

在工程实践中,目前一般采用同步送粉激光熔覆技术对失效齿进行再制造。在齿类件激光再制造时,总的技术要求就是恢复齿形、保证再制造齿和零件基体的服役性能等。

(1) 恢复齿形

齿类件承担着联接不同机构、传递动力和速度等功能,一般齿类件对齿的形状和尺寸均有严格要求。无论齿损伤失效部位在哪儿,恢复齿形都是需解决的首要问题。在恢复齿形的激光再制造过程中,应当考虑足够的机械后加工余量。

这一方面要求齿的激光再制造材料具有良好的工艺成形性,另一方面要求采取合适的激光再制造工艺路径和方法。

(2) 保证齿体或齿面的性能

齿体性能主要指耐磨性、抗冲击性能、抗弯强度等,齿面性能主要包括抗接触疲劳性能、耐磨性、耐腐蚀性等。激光再制造齿面和齿体的性能是保证激光再制造齿类件满足服役性能要求的关键。

这要求激光再制造齿所用的熔覆沉积金属应当具有优异的耐磨性和力学性能。同时,为了保证再制造齿面或齿体具有良好的服役性能,激光再制造沉积金属还应当和基体金属具有良好的界面结合性能。

(3) 不降低基体的性能

基体性能主要指基体的韧性和强度。在制造过程中,为了保证齿面的高硬度、高耐磨性和齿体的韧性和强度,齿类零件尤其是重载齿类零件一般均经过复杂的热处理工艺。而激光再制造齿面或齿体过程中,由于激光束能量输入基体,难免对基体热处理状态造成影响,从而影响机体的性能。这要求采取合适的激光再制造工艺方法和规范,尽量减少激光束热量对齿类件基体材料的影响。

综上所述,为了实现激光再制造齿类件齿形和性能的要求,一般要从激光再制造工艺参数、再制造用材料和工艺实施方法(工装夹具、前后处理)等方面进行综合考虑。具体包括:

(1) 激光再制造工艺参数主要是激光束参数(激光器类型、光斑直径、光束能量密度等)、激光束扫描速度、保护气参数(保护气种类和流量)、送粉参数(粉末粒度、送粉速率、送粉方式)等。

(2) 再制造用材料方面主要考虑粉末材料的成分、粒度、颗粒形状、水份或杂质含量等。

(3) 工艺实施方法主要指激光再制造过程中,针对不同的具体零件而专门采用的前后处理方法、工装夹具、激光束扫描路径设计、零件不同部位的处理顺序等。

下面结合实例进一步分析激光再制造齿类件中的关键技术问题。

5 激光再制造齿类件的关键问题分析及实例

5.1 齿面磨损修复

如图 1(a)所示,该齿类件为某重载车辆主动齿轮轴,在车辆运行中起着传递动力的作用,其齿面承受载荷大。该重载齿类件采用 18 CrNiWA 钢制造,共有 9 齿,模数为 9,且齿面有渗碳层(或碳氮共渗层,厚度约 1.5 mm),表面硬度不低于 HRC 55。该件磨损失效后,齿面发生磨损导致公法线超差,齿面发生接触疲劳而局部剥落,但磨损齿面仍有残余渗碳层(厚度约为 0.5 mm)。由于该齿类件性能要求高,其失效齿面一直缺乏有效的修复技术手段。通过研究,作者所在研究小组采用激光熔覆技术成功实现了该齿类件齿面的激光再制造。在齿面再制造时,为了保证齿面再制造质量和性能,其关键技术问题在于以下几方面。

(1)相邻齿对激光束的遮挡。一般而言,激光束与零件待处理部位表面垂直时,可以获得最高的光斑能量密度,从而获得最佳的激光熔覆效果。但是,在激光再制造齿类件过程中,当激光处理某一齿面时,其相邻齿可能会遮挡激光束。为此应当根据齿类件模数进行分析,设计激光束和齿面之间的夹角。针对该齿类件,由于其模数大,相邻齿之间不会相互遮挡激光束。

(2)激光熔覆层裂纹控制。激光熔覆层裂纹涉及激光熔覆工艺、激光熔覆材料、基体材料和形状等多方面因素。在此,通过前预热和后缓冷、激光熔覆工艺优化、优化熔覆材料成分等多种措施,使得激光熔覆层中不存在裂纹。

(3)熔覆材料性能要求及熔覆材料与基体材料的工艺匹配性。为此,结合齿面服役性能要求,自主研发了 Fe-Mn-Cr-Mo-C 铁基合金粉末,既保证了再制造沉积金属与基体之间的良好相容性,又保证了沉积金属的良好成形性以及再制造齿面的硬度和耐磨性^[9]。

(4)基体材料中的热积累。激光熔覆再制造过程中,为了减少基体局部热积累量,在采用气体冷却的同时,设计了合理的齿面熔覆顺序,把 9 个齿按照顺时针(或逆时针)方向、每间隔两个齿标记 1~9 顺序,同侧齿面标记为 A 面或 B 面。熔覆时,先熔覆 9 个齿的 A 面,熔齿顺序为 1~9;然后再熔覆 B 面。这

样,有效减少了局部热积累,使得激光熔覆过程中热量对基体组织和性能的影响大大减小。

在解决以上问题的基础上,采用激光熔覆再制造技术成功再制造了该重载车辆主动齿轮轴失效齿面。并且,激光再制造的该类齿类件的齿面性能超过了新品零件^[10]。

5.2 齿端磨损修复

如图 1(b)所示,为某重载车辆的一个内齿型联接齿套。该类联接齿套为“间断啮合”齿类件,当需要传递动力或运动时,通过操纵系统使其与配合齿类件啮合,但是,在发生啮合时,其齿端不可避免遭受冲击载荷作用,造成齿端磨损。其实,其齿端磨损也主要是每个齿一端的两个齿棱磨损,在多次啮合联接操作后,齿棱逐步磨损成圆弧形(见图 1(b))或斜面(见图 3)。图 3 为某重载车辆的外齿型联接齿轮,其齿端棱磨损成了斜面。当齿端磨损到一定程度,啮合齿轮副就无法发生啮合,造成操纵失灵。激光再制造此类齿端磨损齿类零件,对保证机械系统操纵性能和运行平稳性具有重要意义。

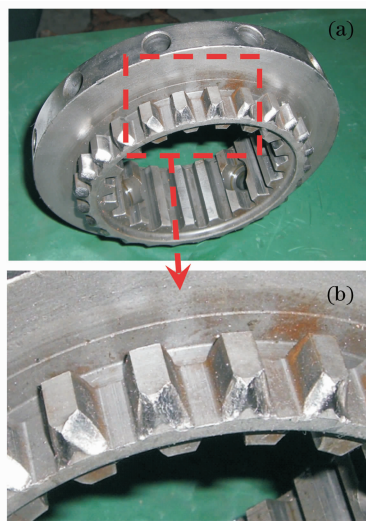


图 3 齿端磨损的外齿型联接齿轮

Fig. 3 Outer gear-tooth with worn gear-ends

(a) photo of the gear; (b) worn gear-ends

采用激光熔覆再制造该类磨损齿时,其关键技术问题主要包括如下几方面。

(1)齿端形状和尺寸控制。为了保证可以恢复到设计的尺寸和形状,在激光再制造时进行了多道搭接、多层堆积熔覆,以便留出足够的机械后加工余量。同时,为了减少加工余量、提高生产效率,在激光熔覆再制造过程中,需要不断调整激光束的方向或零件的位姿,合理设计与控制各沉积层的熔覆道数。

(2)激光熔覆再制造材料选择。该类零件的齿端

是关键功能部位,在选择激光熔覆材料时,除了保证材料的激光熔覆成形工艺性外,本研究从沉积层性能及其与基体匹配性要求出发,选择了 Fe90 等铁基合金粉末完成了该类齿类件齿端的激光再制造。

(3) 齿端再制造沉积层结合界面控制。

界面控制也是保证齿端磨损再制造部位服役性能的重要保障。良好的界面结合有效避免再制造齿端在服役过程中由于冲击作用而发生局部脱落或掉块。本研究在材料匹配性和工艺参数优化的基础上,其界面控制主要从基体齿端表面预清洗、控制基体热积累等方面实现了良好的界面结合。

5.3 断齿再生

图 1(c)为某断齿部位经过预加工处理后的零件照片。在激光再制造齿体出现裂纹或断裂的齿类件时,一般需要首先对损伤齿体进行机械预加工出规则的形状,以便为后续的激光扫描路径规划提供方便。激光熔覆再制造该类损伤齿件的齿体,类似于激光直接成形金属零件。图 4 给出了激光熔覆再制造再生齿的形貌(a)及其粗加工后齿轮件的照片(b)。

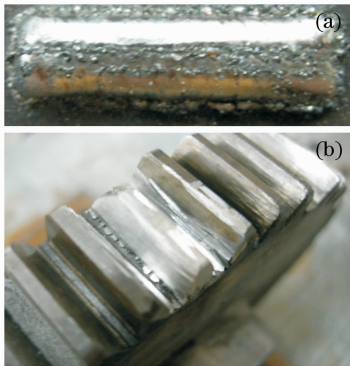


图 4 激光再制造再生齿

Fig. 4 Reproductive-tooth by laser remanufacturing. (a) morphology of the rebuilt tooth; (b) the gear with reproductive tooth after rough machining

6 结 论

激光再制造技术因其技术的先进性和再制造产品质量和性能的优越性,在各工业领域中的应用越来越广泛。齿类零件激光再制造技术实用性强,但是,技术含量高、成本较高,目前主要应用于贵重齿类件和关键齿类件的修复。随着激光器、先进材料、计算机等相关领域的发展,激光再制造齿类件技术正快速发展,原来采用大功率 CO₂ 激光器作业正在

向采用固体激光器和半导体激光器作业转变,技术成本逐步降低。鉴于齿类件激光再制造在节约原材料和零件优异性能等方面的优势,可以显著延长重要工业机械设备齿类件服役寿命,激光再制造齿类件必将引起更大重视,在经济建设和国防建设中发挥更大作用。

参 考 文 献

- 1 Shi Weijia, Wang Zongying, Yang Wenyan. Alloy electrode containing elements Ni, Cr, Mo and analysis of shielding gas influence on property of repaired gear layers [J]. *Mechanical Design and Manufacture*, 1997, **4**: 29~30
石维佳,王宗英,杨文元. 含 Ni、Cr、Mo 合金焊条及保护气对齿端修复层性能的影响分析[J]. *机械设计与制造*, 1997, **4**: 29~30
- 2 Zhang Lusong, Gao Yanjun, Pan Zhongmin. Repairing technology of metallurgical heavy-duty gears [J]. *Hu'an Metallurgy*, 2004, **32**(1): 40~44
张鲁松,高岩军,潘忠民. 冶金重载齿轮的修复技术[J]. *湖南冶金*, 2004, **32**(1): 40~44
- 3 Xu Binshi. Theory and Technology of Equipment Remanufacture Engineering [M]. Beijing: National Defence Press, 2007, 1~10
徐滨士. 装备再制造工程的理论与技术[M]. 北京:国防工业出版社,2007. 1~10
- 4 Xu Binshi, Liu Shican, Wang Haidou. Developing remanufacturing, constructing cycle economy and building saving-oriented society [J]. *J. Central S. U. Technol.* 2005, **12** (S2): 1~6
- 5 Chen Lie, Xie Peilin. Study on processing of anti-collapsing of the edges during laser cladding gear-tooth surface [J]. *Laser Technology*, 2007, **31**(5): 32~35
陈 列,谢沛霖. 齿面激光熔覆中的防边缘塌陷工艺研究[J]. *激光技术*, 2007, **31**(5): 32~35
- 6 Dong Shiyun, Xu Binshi, Liu Weihong et al.. Laser remanufacturing technology and its applications [C]. *SPIE*, 2008, **6825**: 68251N
- 7 Yang Xichen, Li Huishan. Laser remanufacturing technology and its industry application [J]. *China Surface Engineering*, 2003, **16**(4): 7~10
杨洗陈,李会山. 激光再制造技术及工业应用[J]. *中国表面工程*, 2003, **16**(4): 7~10
- 8 WuXinyue, Xie Peilin, Yang Shengguo. Study on laser cladding gear-tooth surface [J]. *China Mechanism Engineering*, 1998, **9**(7): 77~80
吴新跃,谢沛霖,杨胜国. 齿面激光熔覆技术研究[J]. *中国机械工程*, 1998, **9**(7): 77~80
- 9 Xu Binshi, Dong Shiyun, Ma Yunzhe. Laser cladding powder materials and repairing methods for carburized heavy-duty gear tooth surface [P]. Chinese Patent, CN 200710119899.9
徐滨士,董世运,马运哲. 渗碳类重载齿类件齿面激光熔覆粉末材料及修复方法[P]. 中国专利, CN 200710119899.9
- 10 Ma Yunzhe. Microstructure and Performance of Iron-Based Self-Strengthening Alloy Coatings Laser-Remanufactured on Tank Heavy-Duty Gear Surface [D]. Beijing: Academy of Armored Forces Engineering, Dissertation for the Master Degree in Engineering, 2007. 43~62
马运哲. 坦克重载齿面激光再制造铁基自强化合金层组织与性能研究[D]. 北京:装甲兵工程学院硕士学位论文,2007. 43~62