



高玉魁 GAO Yukui

同济大学航空航天与力学学院
教授

Professor, School of Aerospace Engineering and Applied Mechanics, Tongji University

教授、博导。主要研究方向为材料力学行为、表层改性工艺、结构完整性评价、表面完整性分析、残余应力、疲劳断裂、航空航天飞行器关键件的寿命预测与延寿技术等。曾在航材院从事航空航天零部件的表面强化与表面完整性研究12年，并于2010年4月~2011年2月和2014年6月~9月两次到丹麦科技大学(DTU)Risø校区风能实验室进行访问学习。曾2次被中国工程院聘为国家咨询项目和国家重大咨询项目专家。在国家出版基金资助下出版了1部专著《表面完整性理论与应用》，以第一作者和通讯作者发表学术论文50余篇，编写了航空工业标准1部(HB/Z26-2011)，以第一发明人获批国家发明专利2项，获得省部级科技成果奖3次，获得了热处理学会“周志宏”青年科技成就奖和中俄先进材料与制造工艺国际会议杰出青年奖。

表层改性技术，机械制造的“内科”

——访表面改性技术专家，同济大学教授高玉魁

Surface Layer Modification Technology, Internal Medicine of Mechanical Manufacturing

本刊记者 李丹

☞：电子束加工技术是近年发展起来的一种先进制造技术，在材料表层改性、打孔、焊接等方面已成为不可缺少的特种加工手段之一。然而这只是其应用的一部分，还有巨大的潜力待挖掘。您近年来发表的论文中采用电子束对TC21钛合金进行表层改性并取得了较好的效果。

请简单为我们介绍一下，电子束表层改性的应用优势及其应用领域。

高玉魁：表层改性近年来得以重视，一方面是因为表层加工质量不仅影响制造加工尺寸精度、纹理度、粗糙度和光洁度，而且还直接决定了零部件的抗疲劳、耐腐蚀及磨损等使用性能。这里谈表层改性，主要是体

现出改性层的深度和梯度特性。近年来电子束表层改性技术因能量利用率高、真空下无氧化或污染、便于精确控制等而被重视得以研发并逐渐应用到以下领域：

(1) 抛光与净化。绝大多数零部件失效是由于其表层失效造成的，提高材料的表层性能，是延长零部件


使用寿命、合理配置性能、保障系统安全稳定服役的关键。而抛光处理是材料表面加工的关键工序,所以各工业发达国家均深入地开展了这方面的研究。目前,对材料表面抛光的主要方法有机械抛光、电解抛光、化学机械抛光、化学抛光、激光抛光等。机械抛光是目前工业生产中应用最广泛的加工方法,并将在很长一段时间内占据主导地位,但其速率较低且成本高,此外机械抛光产生的热量和振动会导致工件形成加工硬化形变层及残余拉应力。电解抛光可以增加工件表面抗腐蚀性且成本低廉,主要应用于原始表面粗糙度较低金属制品,但电解抛光质量与电解液及电流电压的规范有关,需要经过大量试验获得,所以难以广泛应用。化学机械抛光引起的冲击与振动有时会使工件受损。激光抛光易在表层形成氧化或造成某些相的脆化,难以大量投入实际生产。电子束抛光技术是21世纪出现的新型材料表层改性技术,它是用高密度能量的电子通过聚焦形成电子束轰击材料表面,而使其表层熔化或蒸发从而获得粗糙度较低、杂质较少且力学性能较好的加工技术。传统抛光主要针对形状简单的平面进行,电子束抛光可以应用于曲面、轴承甚至一些孔的抛光,是一种很有应用前景的新型材料表面加工技术。当然,事物均具有两面性,电子束抛光和净化改性也有其短板,抽真空,零部件不宜太大等,对于电子束抛光与净化的表层改性仍然需要进一步的不断深入研究才能加强其工程应用。

(2)修复与表层再制造。电子束能量密度高、控制灵活、重复性好,能够精确控制表面温度和穿透深度,在真空条件下,对金属保护好,是较好的表面修复方法。当表面出现微小裂纹时,用电子束对工件表面进行加热,使其表面在瞬间处于熔化状态,可实现裂纹愈合和损伤得以修复,根

据裂纹深度来控制电子束的穿透深度,可实现对工件损伤表面的局部修复。而且在金属构件的维修过程中,不破坏材料的整体性能。此外电子束还可对涂层、镀层或覆层进行封孔致密化及二次熔融的再制造加工,这可以改善涂镀覆层的使用性能。

(3)杀菌消毒。在食品、医疗领域的杀菌加工处理中,电子束灭菌的应用尤为活跃,很有希望取代从20世纪30年代以来延续至今的 γ 射线杀菌及环氧乙烷杀菌技术。

电子束加工技术的应用领域将随着研究的深入而不断拓宽,前景值得期待。


:金属材料疲劳失效逐渐被人们所了解之前经历了怎样的过程?目前还有哪些问题需引起重视?

高玉魁:20世纪60年代到90年代发生的14起航空发动机重大事故中,13起源自关键构件发生疲劳失效。20世纪80年代,机翼主梁疲劳裂纹故障导致3000架飞机停飞。飞行器事故和故障的分析表明,疲劳破坏大都起源于工作应力高、形状复杂、工作条件恶劣的零部件表面或接近表面的部位。这个问题起先并未被人们所认识,设计和修理人员只是单纯地选择高强度的材料或增加零件的断面面积。这样既提高了成本又增加了重量,还不能从根本上防止事故的发生。随着人们对表面完整性的认识,表层改性技术所体现出来的巨大价值逐渐为大家所认同。通过喷丸强化、激光冲击强化、滚压、挤压、三束高能改性、复合强化等工艺提高材料的抗疲劳性能,从而达到延寿的目的。

航天与航空在这个认知上还是有差别的,在以前,航天中的产品大多为一次性的,不存在疲劳失效这样的问题,但是随着空间站等项目的进行,零部件的使用寿命问题被列入关键技术点,在不增加重量的情况下提高零部件的使用性能,尤其是服役寿命,那

么表层改性技术就成为了首选。


如果材料本身没有问题,疲劳其实说到底就是表面层的加工问题和装配时的连接问题,当前还有一个突出的问题是缺少相应的行业标准或规范,对工艺的检测结果也缺少判断依据和参考体系,需要制定相关标准来规范和约束制造工艺和流程,这样有了要求才能指导零部件的设计和生

:您多次提到行业标准制定的重要性和紧迫性,有关材料加工工艺参数和工序的优化及标准化在工程应用中体现了怎样的价值?

高玉魁:一个著名公司的核心竞争力一方面是体现在专利技术的创新上,另一方面就是该公司制定的产品标准或规范的水平。一个加工工艺往往由多道工序构成,生产中要进行细化并逐一规范,既要充分考虑材料自身的加工特点,也要结合零部件的结构和生产条件,这样才能充分发挥材料自身优势,加工出具有预期使用性能的高端装备。如航空工业大量采用的钛合金,强度高、密度小、机械性能、韧性和抗蚀性能好,但工艺性能差、切削加工困难,尤其是导热系数小,在加工过程中很容易破坏材料的完整性。钛的导热系数为 $15.24\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$,仅为镍的 $1/4$ 、铁的 $1/5$ 、铝的 $1/14$,因此其加工过程中产生的热不易传出,往往集中在某些较小区域内,导致局部温度很高,造成 α 相脆化或烧伤。钛合金的烧伤与钢的烧伤有所不同,钢烧伤表面会有裂纹和表层脱碳硬度减低,便于检测,而钛合金烧伤无法通过肉眼从表面观察到,也无法通过硬度来判断。有一个很典型的案例是某工厂为加快钛合金构件制造进度,增加了对钛合金的切削速度,致使加工区域温度升高,使钛合金叶片表层出现烧伤,产生 α 相脆化,但检测过程中形状尺寸是没有异常的,继而对此批钛合金构件进行喷丸强化处理,当施加疲


劳载荷时发生了提前断裂而报废,在分析其断裂原因时曾怀疑是喷丸强化参数不当所造成的,但进一步通过扫描电镜观察分析发现,造成其断裂的原因是表面烧伤 α 相脆化导致的裂纹。从这个案例可以看出,虽然有时投入大量的人力、财力、物力来加工产品,但最后却没有达到预期的使用性能,这就说明了一个问题:对关键工艺参数域的控制没有引起足够的重视,也缺少从工程应用角度对材料加工的系统研究,对于某些材料或结构,加工时该慢的时候就需要慢下来,不能浮躁地只追求进度。

为使材料充分发挥其性能,在加工过程中,必须重视对重要构件关键工艺参数域的控制。尤其是疲劳关键件,采用表层强化处理,对疲劳强度的提高可达40%,这比更换新材料要更有意义。因为即使投入大量财力物力和人力来发明一种新材料,其疲劳强度比已有性能提高10%都很困难,从某种意义上说工艺的改进对材料性能的提高远比研发新材料要容易得多。国外发达国家之所以能够生产高端产品都得益于重视制造技术和不断提高工艺水平,制造造就实业,美国近年来也提出了回归制造强国的规划。

: 您目前主持的科研项目有哪些? 科研过程中有哪些感受?

高玉魁: 现主持的主要科研项目有国家自然科学基金面上项目“激光冲击作用下金属材料残余应力场的响应规律和强化效应”、国家冷轧板带制备及工艺工程技术研究中心开放课题“TWIP钢轧制过程组织及残余应力演化规律研究”、中央高校基本业务费专项资金资助项目“航空高强度结构材料的表面强化理论和试验验证”、“高强度钛合金和铝锂合金的表面强化与残余应力研究”、“航空钛合金材料喷丸及孔挤压强化处理”、“航空高强钢强化处理及强化层残余应力研究”等。做科研和工

程应用是相辅相成的,高校不能投入大笔经费去做实践研究,而企业有现成的资源;有时候在企业困扰他们很久的问题,有可能在高校这只是一个案例,碰撞才能产生火花。由于以前的工作经历,我与企业工程技术人员之间的交流较多,经常的探讨有助于尽快解决问题,在专业深度上共同进步,通过这些项目的研究,越来越意识到表面完整性及表层改性技术的重要性,它是高端装备实现服役寿命和性能的可靠保障,也是实现我国制造强国梦的途径。

: 您在北京航空材料研究院从事航空航天零部件的表面强化与表面完整性研究12年,然后再加入同济大学,这不同的经历对您的教育观点有什么影响?

高玉魁: 教学相长,不同的经历、科研的成果及积累的经验对教学很有帮助,同时教学时思考的全面性、系统性,对学生问题的梳理,一些教学方面的进展也对提高科研水平大有益处。我主要从以下谈谈不同的经历给我带来的一点启发:

(1) 大学的教学模式必须从填鸭式教育转变为引导式教育。大学之所以是大学,这就说明大学教育是与中小学教育有着重要区别。大学教育对学生更多的是引导他们去思考,发现知识点,探索问题并分析原因以解决问题和形成自己的知识体系,而不是像中小学教育来填鸭和灌输知识。我在给学生讲授《飞机的疲劳与断裂》课程时,会把学生分成小组,让他们大量查阅资料和阅读文献,查找飞机疲劳失效事故案例,分析原因并提出看法,这样一方面是充分调动学生学习的主动性、积极性和激发大家思考问题,另一方面也让学生通过调研的图片视频资料增加对疲劳失效的认识,理论与实践相结合,不断引导学生去发现问题、思考问题,虽然学生不一定都能提出正确的解决问题的方法,但是这种团队钻

研的精神和探索讨论分析问题的能力是应该具备的。

(2) 教育和科研都不能完全照搬书本上的理论,要相信书本但也要跳出课本,对实际问题实际分析。如单晶叶片的喷丸问题,曾因担心其再结晶而一度不被采用。其实单晶叶片榫头部位与涡轮盘榫齿相连接,即使喷丸强化处理因其使用温度低于再结晶温度,所以榫头的喷丸强化不仅不会发生再结晶,还会提升它的疲劳性能。最终通过研究,我把喷丸应用到了单晶叶片零部件上,提高了航空发动机叶片的微动疲劳抗力。

(3) 师徒制存在的必要性。目前我感到师傅带徒弟这种关系的存在对于提升我国的制造水平非常必要。师傅带徒弟这种关系尤其是优秀的师徒,将是一种技术的传承,师傅如将积累了数十年的还未转换成科学数据的经验技术传授给徒弟,相应也是对刚入行年轻人的一种指导和帮助,更是年轻人提高的重要途径。年轻人总不缺乏探索精神(笑),但缺少吃苦精神也不愿吃亏,有时也没有团队意识。通过师徒制在工厂公司的推行,不仅激励师傅精益求精加强制造技术的提升,也将培养一代青年人才,让他们热爱制造,乐于探索,成为制造大师或工匠。

我目前也在积极学习和探索国外航空航天专业的课程设置与学科内容,发现一些与国内课程设置的不同之处,如国外教材对兴趣培养非常重视,而且多数是深入浅出,教育就是广取精华,这样在人才培养方案上才能更趋合理。科研是一种深入探索,教育培养下一代也需要像科研一样去不断探索,这不仅体现在航空航天的高技术领域,而且对整个制造行业的教育来说都非常重要。去年我非常有幸参与编写了教育部的《制造业人才发展规划(2016~2020年)》并最终在北京通过了国家制造强国领导小组的审批。(责编 叶枫)