

综述

高强度合金抗疲劳应用技术研究与发展

赵振业

(北京航空材料研究院, 北京 100095)

[摘要] 评述了超高强度钢、高强度 Al 合金和 Ti 合金表面完整性抗疲劳应用技术的研究和发展。高强度合金疲劳性能对应力集中敏感, 不适当的加工工艺和切削热等造成的表面损伤和高拉应力使其疲劳和应力腐蚀性能损失殆尽。先进的表面完整性加工尤其是表面改性可显著提高疲劳性能, 如激光冲击使 7475-T761 拉-拉疲劳寿命提高约 89%, 7075-T6 裂纹扩展速率降低到原来的 1/1500; 超声喷丸使超高强度钢低周疲劳强度提高约 50%, Ti7Al4Mo 合金高周疲劳强度提高约 15%; 表面超硬化可使 Vasco X-2M 齿轮钢接触疲劳寿命提高 30~35 倍等。

[关键词] 高强度合金; 表面完整性; 激光冲击; 表面超硬化

[中图分类号] TG135.1 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1009-1742(2005)03-0090-05

高强度 Al 合金、Ti 合金、超高强度钢等关键主承力构件在航空、航天、车辆、舰船和精密仪器等领域得到广泛应用, 使现代设计技术对构件高承载、轻重量、低成本、长寿命、抗恶劣环境和高可靠使用等要求, 将应用技术提升到前所未有的重要地位。高强度合金固有强度利用系数和构件长寿命不断增加的要求, 进一步加强了这一地位。因此, 为把先进设计、先进材料和其他技术转化为高性能产品, 各先进国家无不把注意力集中到研究、创新和开发先进应用技术上。其中高强度合金表面完整性抗疲劳应用技术占有核心和关键地位。

疲劳是一种动态性能, 高强度合金构件疲劳性能很大程度上取决于表面状态和性质, 即表面完整性。所谓表面完整性是指加工过程在构件表面造成的改变及其对服役性能影响的总概括。机械构件失效中疲劳失效占 50%~90%, 航空构件中疲劳失效占 80%以上^[1]。疲劳失效中 80%以上裂纹起始于表面缺陷, 如加工刀痕、划伤、冶金缺陷等局部应力集中处。大量数据表明^[2], 用作关键主承力构件的高强度 Al 合金、Ti 合金、超高强度钢等具

有很高的固有疲劳强度, 但对应力集中敏感。如 Al 合金 7050, 7475, Ti 合金 Ti1023, Ti6Al4V, 超高强度钢 300M 等, 当应力集中系数 $K_t = 3$ 时, 拉-拉疲劳强度降低约 50%, $K_t = 5$ 时降低约 80%。而且, 300M 钢和 30CrMnSiNi2A 钢疲劳裂纹起始 (0.2 mm) 寿命分别占总寿命的 85% 和 81%^[3]。可见, 不解决其应力集中敏感问题, 采用高强度合金既不可能减轻结构重量, 也不可能实现长寿命, 而且, 可能酿成灾难性后果。

20 世纪 50 年代前, 全世界军用飞机基本上采用静强度设计, 为建立和发展安全寿命设计技术, 美国从 1948 年起对超高强度钢 4340, Al 合金 2024, Ti 合金 Ti6Al4V, 耐热合金 In718 等构件进行机械加工表面完整性系统研究。1970 年美国空军材料实验室 (AFML) 提出了机械加工构件表面完整性 (surface integrity of machined components) 研究报告和指南^[4]。1971 年美国空军颁布军机安全寿命设计规范 MiL-A-008866A (USAF)。

把安全寿命设计作为满足空军各种飞机系统合同文件中规定使用寿命要求的基本方法。1974 年、

[收稿日期] 2004-04-17

[作者简介] 赵振业 (1937-), 男, 河南原阳县人, 北京航空材料研究院研究员

1975年先后颁布了损伤容限设计规范 MiL - A - 8344 (USAF) 和 MiL - A - 008866B (USAF) 等。我国也于1985年和1989年先后颁布军用飞机安全寿命和损伤容限设计规范。无论是安全寿命或是损伤容限设计, 应力集中都是影响高强度合金构件的疲劳性能的敏感问题。从1971年至今的30多年中, 表面完整性抗疲劳应用技术持续不断地研究^[5-19], 不仅包括加工工艺参数, 新工艺开发, 而且涉及工艺模拟和预测以及基本理论探索等。同时, 表面完整性评价内容已包括高低倍组织、微观裂纹、变形、各种腐蚀、元素贫化、显微硬度、残余应力、疲劳、应力腐蚀及其他力学性能等试验。检测采用扫描、透射、高分辨电镜及各种表面层组织、应力结构无损检测等现代技术。

1 高强度合金加工表面完整性与疲劳性能

机械加工主要是最终精加工(磨、铰、铣等)决定表面完整性。切削热、切削力和环境因素等在构件表面造成的损伤、表面层组织和残余应力场结构改变, 会严重危害材料的使用寿命和可靠性。

研究指出, 不适当的磨削工艺造成轴承钢 52100 表面层显微组织损伤和疲劳性能降低^[13,14]。图 1a 表面白亮层是温度超过 A_{c1} 点造成的再淬火马氏体, 相邻层是温度低于 A_{c1} 点造成的暗黑色过回火马氏体, 中心是未受损伤的原回火马氏体组织。再淬火马氏体层脆性大、残余拉应力高并导致微裂纹产生, 接触疲劳寿命急剧降低, 如图 1b。

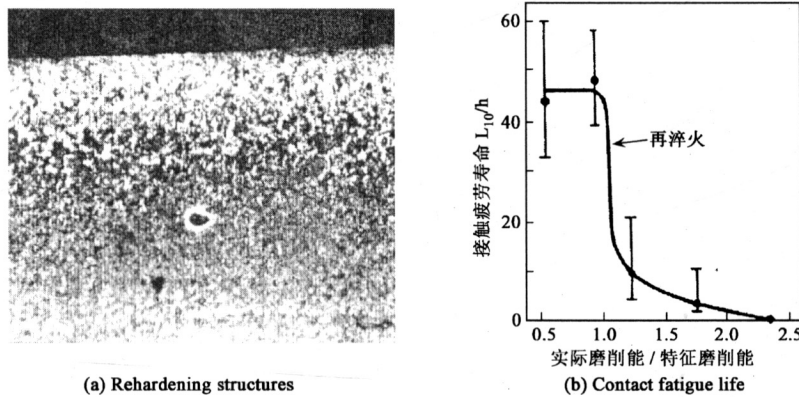


图 1 轴承钢磨削表面层组织与疲劳性能

Fig.1 Ground surface structures and contact fatigue behavior of 52100 steel

图 2 表明, 不适当的磨削工艺在超高强度钢 4340 构件表面造成的再淬火马氏体层具有很高的

残余拉应力, 疲劳强度和应力腐蚀性能也随之明显降低。即使去除再淬火马氏体层后, 过回火马氏体

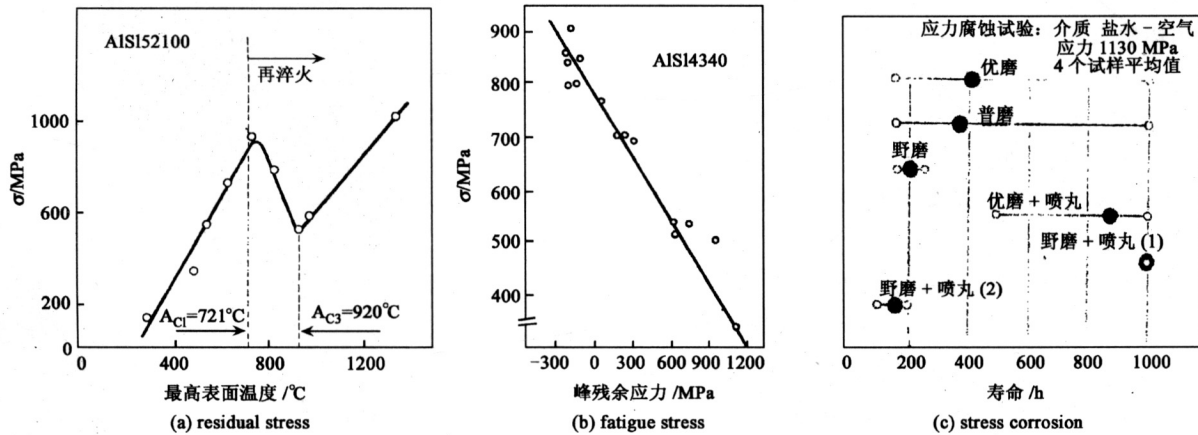


图 2 4340 钢磨削表面过热与其性能变化

Fig.2 Burned surface temperature vs residual stress, fatigue and stress corrosion behavior of 4340 steel

组织仍将疲劳强度降低约 30%。

Ti 合金导热性差, 更容易造成磨削表面温度高。如 Ti6Al4V 合金磨削时在构件表面层多种损伤, 一是形成硬脆富氧 α 相薄层造成微裂纹; 二是 α - β 复合组织转为马氏体和 β 条带组织如图 3a、图 3b 所示, 这一组织变化还不能通过热处理予以恢复; 三是磨粒还可被粘镶在构件表面, 或压入亚表面造成巨大的应力集中等。图 3c 中疲劳曲线表

明, 不适当的磨削工艺将 β 轧制的 Ti6Al4V 合金的悬臂弯曲疲劳极限从 430 MPa 剧降至 90 MPa。磨削热造成的表面拉应力还促进应力腐蚀开裂, 冷却液残存于表面加剧了应力腐蚀过程。

2024-T351Al 合金不当车削加工时表面出现宏观微观裂纹、沟槽、坑点和塑性变形等缺陷, 尽管表面可能存在压应力, 但疲劳性能仍明显低于高速车削加工。

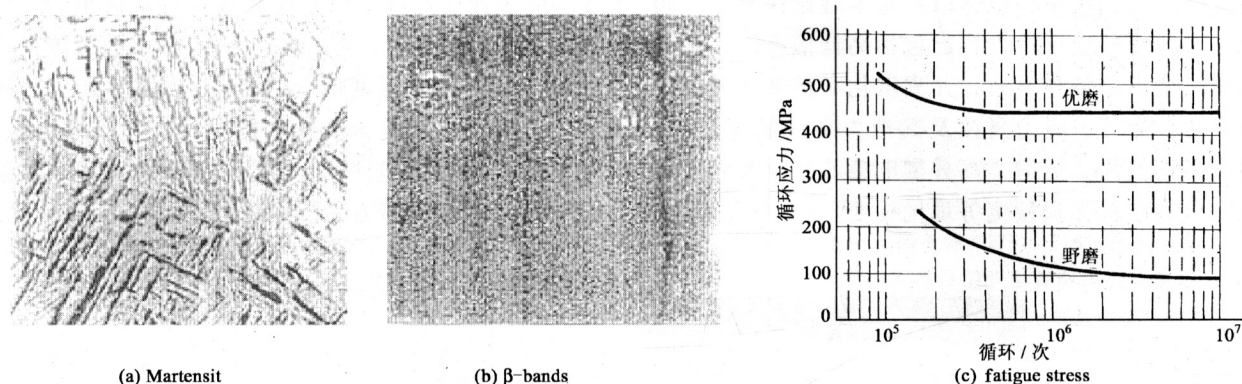


图 3 Ti6Al4V 磨削表面层组织与性能变化

Fig.3 Ground surface structures and fatigue behavior of Ti6Al4V alloy

2 高强度合金抗疲劳应用技术新发展

近些年来, 新工艺不断发展, 主要有高速铣削、车削、磨削, 低应力磨削、预拉应力磨削技术; 高能表面改性技术; 表面超硬化技术; 表面完整性评价和精密定量检测技术; 加工过程计算机模拟和预测等。研究发展的主要特点是材料技术融合制造、物理、化学、力学等, 形成一种多学科交叉的工程学科领域。

超声喷丸和激光冲击改性技术被誉为 20 世纪 80 年代以来最重要的应用技术, 其地位可与同期材料界中单晶合金和金属基复合材料相当。

激光冲击是一种高能量密度应力波使金属表面产生胁迫弹塑变形、增加位错密度、提高硬度和疲劳性能等的表面强化方法。研究指出, 激光冲击后 7475-T761, 30CrMnSiNi2A 的拉-拉疲劳寿命分别提高 89% 和 74%^[15]。图 4 是 7075-T651 激光冲击前后的显微组织, 表 1 表明, 微动磨损疲劳寿命提高 2 个数量级以上。裂纹扩展速率降低到原来的 1/1 500, 但其强化和抗疲劳机理尚不清楚。

研究指出, 300M 钢电镀 Cr 表面拉应力高达 +580 ~ +800 MPa, 并且延伸至基本金属表面,

拉应力达 +400 MPa, 旋转弯曲疲劳强度 (σ_{-1}) 由 786 MPa 剧降至 270 MPa^[16]。经表面喷丸改性后再镀 Cr, 表面压应力达 850 MPa, 疲劳强度达到 840 MPa, 略高于未电镀基体的疲劳强度。图 5 表示镀 Cr 和喷丸后镀 Cr 疲劳断口。可以看到, 镀 Cr 疲劳断口周边散布有 20 多个疲劳源, 侧面出现为数众多的扩展深度较浅的疲劳裂纹。经表面喷丸改性疲劳断口上, 只有一个萌生于亚表面的单一疲劳源。断口特征是两者疲劳强度显著差别的标志。

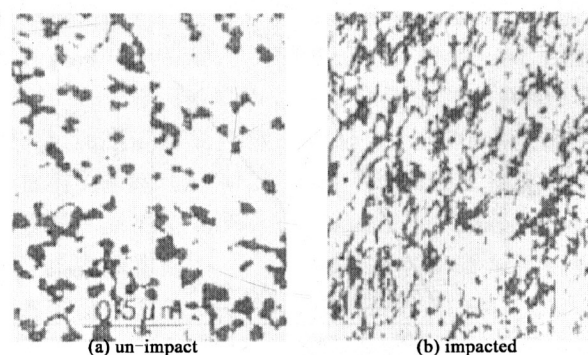


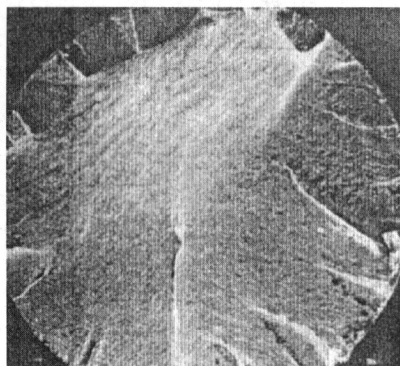
图 4 7075-T651 合金激光冲击前后显微组织

Fig.4 Structure change of laser-impacted 7451-T761 alloy

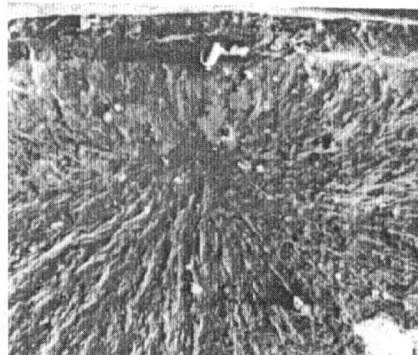
表1 激光冲击对7075-T6 Al合金微动磨损疲劳
($R=0.1$) 寿命的影响

Table 1 Effect of laser-impact on fretting wear behavior of 7075-T6 Al alloy

| 状态 | 应力/MPa | 寿命/次 | 总寿命/次 |
|------|--------|------------|------------|
| 未冲击 | 96.5 | 501 000 | |
| | 96.5 | 408 000 | |
| | 116 | 236 000 | |
| 激光冲击 | 96.5 | 32 090 000 | |
| | →106 | 16 300 000 | |
| | →116 | 259 800 | 48 649 800 |
| | 96.5 | 15 076 000 | |
| | →116 | 384 000 | 15 460 000 |



(a) Surface multi-initiations



(b) Subsurface single initiation

图5 电镀Cr疲劳断口

Fig.5 Fracture surface of 300 M steel plated Cr

3 高强度合金抗疲劳应用技术发展对策构想

长期以来超高强度钢、高强度Al合金、Ti合金抗疲劳应用中既缺乏基础理论,又缺乏技术体系,甚至缺乏基本工艺实验数据。落后的“成型”制造经验和零散的抗疲劳工艺支撑着构件制造,以致结构重量大、性能低、寿命短、可靠性差和成本高,成为其应用制约因素。

高强度合金抗疲劳应用技术发展应着重以下几个方面:

1) 针对高强度合金固有疲劳强度高、应力集中敏感和构件应用集中普遍存在等基本特点,从解决应力集中入手,开展抗疲劳工程科学理论研究,为发展抗疲劳应用技术奠定基础。

2) 基础实验是发展理论和工艺技术创新的基础。借助工艺过程计算机仿真和预测,开展工艺基础实验,建立数据库,优化工艺,为建立理论、创

新和优化应用技术奠定基础。超声喷丸是一种利用超声高能丸粒撞击表面改性技术。Ti6Al4V合金超声喷丸后表面粗糙度比传统喷丸降低了 $1/2\sim 1/3$ ^[17]。超高强度Hp-310钢超声喷丸后低周疲劳强度提高约50%,较传统喷丸强化提高约17%;超声喷丸强化后431马氏体不锈钢高周弯曲疲劳强度提高约25%,Ti7Al4Mo合金弯曲疲劳强度提高约15%。

表面超硬化是近年发展的一种高耐磨、高接触疲劳性能的表面浸渗硬化技术。表面超硬化可使VascoX-2M齿轮钢接触疲劳寿命提高30~35倍^[8]。

新和优化应用技术奠定基础。

3) 在工程科学理论和实验成果基础上,引入新思路、新概念,规范现有技术与创新先进技术相结合,先进工艺与先进的工艺装备相结合,建立抗疲劳应用技术体系,形成高性能合金与先进应用技术相互补充、相互驱动、协调发展的新机制。

参考文献

- [1] 赵少汴. 抗疲劳设计[M]. 北京: 机械工业出版社, 1994
- [2] 颜鸣皋, 刘伯操, 李金桂, 等. 中国航空材料手册(第1卷)[M]. 第2版, 北京: 中国标准出版社, 2002
- [3] 叶武俊, 张伟, 丁传富, 等. 两种超高强度钢的谱载疲劳行为及断口形貌的研究[J]. 材料工程, 1992, (2): 10~14
- [4] Koster W P, Field M, Fritz L J, et al. Surface integrity of machined structural components [R]. AFML-TR-70-11
- [5] Alexandre M A, David K A. The surface integrity of turned and ground hardened bearing steel [J]. Wear,

- 1996, 196: 279~284
- [6] Kruszynski B W, Luttermelt V. Prediction of temperature and surface integrity in gear grinding[J]. Int J Mach Tools manufact, 1994, 34(5):633~640
- [7] 王珉, Lau W S. 金属表面改性的预应力磨削机理研究[J]. 机械工程学报, 1992, 28(3):104~109
- [8] Bayoumi A E, Xue Qufei, Hamdan M N. Effect of cutting conditions on dynamic properties and surface integrity of work materials [J]. Wear, 1991, 146: 301~312
- [9] El-Khabeery M M, Saleh S M. Some observations of surface integrity of deep drilling holes [J]. Wear, 1991, 142: 331~349
- [10] Sadat A B. Effect of high cutting speed on surface integrity of AISI 4340 steel during turning [J]. Materials Science and Technology, 1990, 6 (April): 371~375
- [11] Jain K C, Kumar A N, Mittal R N, et al. Surface integrity of a hardened and ground low-alloy steel-study based on surface and subsurface damage [J]. Materials Science and Technology. 1986, 2(Aug.):856~864
- [12] Jeelani S, Musial M. Dependence of fatigue life on the surface integrity in the machining of 2024-T351 Aluminium alloy-unlubricated conditions [J]. J of Material Science, 1986, 21:150~160
- [13] Neailey K. Surface integrity of machined components—microstructure aspects [J]. Metals and Materials, 1988, (Feb):93~96
- [14] Neaily K. Surface integrity of machined components—residual stresses and fatigue [J]. Metals and Materials, 1988, (March): 141~145
- [15] Clauer A H, Fairand B P. Interaction of laser-induced stress waves with metals [A]. Appl of Lasers in Material Processing (Proceedings of Conference) [C]. Washington, DC, 1979, (Apr), 18~20
- [16] 李向斌, 王仁智, 殷源发. 一种新型超高强度钢喷丸强化的研究[J], 材料工程, 1991, (3):14~18
- [17] Zaretsky E V, Parker R J, Anderson W J. Effect of component differential hardness on rolling—contace fatigue and load capacity[R]. NASA TN-2640
- [18] Davies D P. Duplex hardening: an advanced surface treatment [J]. Heat Treating, 1992, (August):38~46

Investigation and Development Status of the Application Technology to Improve Fatigue Behavior of High Strength Alloys

Zhao Zhenye

(Beijing Institute of Aeronautical Materials, Beijing 100095, China)

[Abstract] Investigation and development status of the surface integrity application technology to improve fatigue behavior of high strength aluminium alloy, titanium alloy and ultra-high strength steels is reviewed. Fatigue behavior of the high strength alloys mentioned above is sensitive to surface stress concentration, as that in the case of a reduction in the surface integrity, their fatigue stress and stress corrosion property are reduced heavily by surface residual tensile stress and damage caused by abusive final mechanical processes such as grind, particularly the machining heat which occurs during machining practice. Some advanced mechanical treatments in surface integrity make an outstanding improvement on fatigue behavior of the high strength alloys. For example an increase of about 89%, in the tensile-tensile fatigue life for laser-shocked 7475-T761 specimens and an improvement in da/dN of about 1500 times for laser-shocked 7070-T76 specimens were obtained. Ultrasonic shot peening resulted in low-cycle fatigue strength increase of about 50% for HP-310 grade ultra-high strength steel and about 15% for Ti7Al4Mo in high-cycle. An advanced surface duplex hardening treatment caused also a 30 to 35-fold increase in contact fatigue life for vasco X-2 grade gear steel.

[Key words] high strength alloys; surface integrity; laser-shocking; surface duplex hardening