

一种超高强度钢构件抗疲劳实验研究

赵振业¹, 宋德玉¹, 李向斌¹, 杨树勋², 马新闻¹

(1. 北京航空材料研究院, 北京 100095; 2. 沈阳飞机设计研究所, 沈阳 110035)

[摘要] 提出了超高强度钢“无应力集中”抗疲劳概念。喷丸、孔挤压、螺纹滚压等表面层组织再造成性造成的残余压应力和高位错密度胞状结构将裂纹推移至亚表面萌生并阻滞其扩展, 回复不同应力集中处的疲劳强度至接近钢的固有疲劳强度, 形成“无应力集中”表面完整性状态。“无应力集中”抗疲劳概念表述为构件表面形成完整的接近于钢固有疲劳强度的等疲劳强度包络。

[关键词] 超高强度钢; 抗疲劳; 应力集中; 表面完整性

[中图分类号] TG135+.1; TG115.5 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1009-1742(2005)10-0051-05

如所周知, 构件上应力集中是不可避免的, 应力集中(缺口效应)是疲劳研究中的一个关键问题。因而, 研究和解决应力集中问题在机械制造中普遍而重要。应力集中(用应力集中系数 K_t 表示)主要来自结构设计、制造加工和使用中的环境作用。结构设计应力集中可通过局部细节设计缓和降低; 使用中环境作用产生的缺陷如腐蚀麻点应力集中可通过表面防护预防。制造加工刀痕、划伤等缺陷常可造成很高的应力集中, 留在构件表面给使用安全带来极大隐患。文献 [1] 指出, 材料硬度越高, 对应力集中越敏感, 加工缺陷造成的应力集中越严重, 一些高硬度构件上还可超过抗拉强度, 材料完全丧失抗疲劳能力。高强度构件疲劳失效中 80% 以上的裂纹从刀痕、划伤或夹杂物等缺陷处起始。为解决高强度构件应力集中敏感问题, 半个多世纪以来, 对表面完整性加工进行了大量研究^[2~8]。

起落架是飞机最重要的主承力构件, 直接关系飞机起降安全。起落架构件如外筒、活塞杆、轮轴等承受很高、很复杂的交变载荷和海洋、潮湿、冲刷腐蚀等环境, 并要求与飞机机体相同的长寿命。起落架构件采用安全寿命、损伤容限及耐久性设计, 用超高强度钢制造, 在构件全寿命中疲劳寿命

占主要部分。300M 钢是一种低合金超高强度钢, 具有超高强度和高韧性及较其他合金高得多的固有(光滑试样, $K_t = 1$) 疲劳强度。但与其他高强度 Al 合金、Ti 合金一样, 其疲劳强度对应力集中敏感, 使起落架构件的疲劳寿命受到极大制约, 并给可靠使用带来极大隐患。因此, 300 M 钢用作起落架必须首先解决疲劳性能对应力集中敏感问题。笔者提出一种“无应力集中”抗疲劳概念, 并进行了表面完整性实验研究, 对设计和获得长寿命构件有较大的参考价值。

1 理论模型

“无应力集中”抗疲劳概念理论模型如图 1 所示。其中 (a) 表示理论应力集中系数 $K_t = 1$, 即无应力集中状态, 构件实际疲劳强度 $\sigma_{a,f}$ 为 300 M 钢固有疲劳强度 σ_m , 高于设计疲劳强度 $\sigma_{d,f}$, 具有无限寿命; (b) 表示经结构设计和制造加工, 构件局部表面存在应力集中, $K_t \gg 1$, $\sigma_{a,f}$ 降低, 甚至远低于 $\sigma_{d,f}$, 导致过早失效; (c) 表示经表面层组织再造成性后, 构件局部表面应力集中仍然存在, 但 $\sigma_{a,f}$ 回复到接近 σ_m 而远高于 $\sigma_{d,f}$, 即“ $K_t \rightarrow 1$ ”, 呈现“无应力集中”状态。

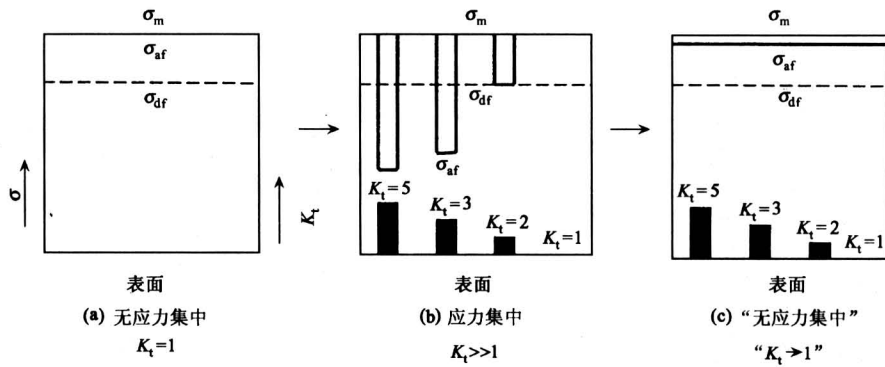


图 1 “无应力集中”抗疲劳概念理论模型

Fig.1 Theory model of “un-stress concentration” anti-fatigue conception

2 实验与结果

2.1 表面完整性机械加工

经机械加工优选实验，车削加工至表面粗糙度 R_a 为 6.3 时，试件表面压应力为 $-15 \sim -430$ MPa，磨削至 R_a 为 0.4 时，试件表面压应力为 $-435 \sim -584$ MPa。不同应力集中与疲劳试验结果列于表 1。 $K_t=2$ 时，旋转弯曲疲劳强度降低约 30%； $K_t=3$ 时，降低约 58%，拉-拉疲劳强度降低约 52%； $K_t=5$ 时，拉-拉疲劳强度降低约 74%。不同表面粗糙度与疲劳强度关系列于表 2。

表 1 应力集中系数与疲劳强度

Table 1 Relationship between K_t and fatigue limit

K_t 值	1	2	3	4	5
R_a 为 0.4 时, 旋转弯曲疲劳强度 / 10^7 MPa	870	610	365	-	-
R_a 为 0.4 时, 拉-拉疲劳强度 / 10^7 MPa	1156	-	560	-	300

表 2 表面粗糙度与疲劳强度

Table 2 Relationship between surface roughness and fatigue limit

$R_a / \mu\text{m}$	6.3	3.2	1.6	0.8	0.4
旋转弯曲疲劳强度 / 10^7 MPa	680	-	735	-	870

表面粗糙度 R_a 从 0.4 升至 1.6 时，旋转弯曲

疲劳强度降低约 15%，升至 6.3 时降低约 20%。扫描电镜 (SEM) 断口如图 3 (a)，疲劳断口呈现多源起始，主裂纹扩展导致断裂，疲劳裂纹源自表面磨削刀痕等特征。

2.2 表面喷丸强化

按实验优化工艺参数进行表面喷丸强化。喷丸强化对疲劳强度的影响示如表 3。 $K_t=1$ ， R_a 为 0.4 时喷丸强化提高疲劳强度约 16%， $K_t=3$ ， R_a 为 0.4 时提高约 25%。 $K_t=1$ ， R_a 为 6.3 时提高约 36%。喷丸强化表面层残余应力场结构如图 2 所示。SEM 分析结果如图 3 所示，其中 (b) 表示喷丸前车削表面有较深的切削刀痕；(c) 表示喷丸后刀痕被消除，表面变得平坦；(d) 表示喷丸后疲劳断口呈现单源起始、裂纹源自亚表面并扩展至断裂等特征。

表 3 表面强化与疲劳强度

Table 3 Influence of the surface strengthening on fatigue limit of 300 M steel

强化方法	试样状况	疲劳强度 σ / MPa		升高率 / %
		强化前	强化后	
喷丸	$K_t=1, R_a=0.4$	870	1030	16
	$K_t=1, R_a=6.3$	680	930	36
	等温处理, 旋转弯曲疲劳 $K_t=3, R_a=0.4$,	374	477	28
孔挤压	耳片穿芯棒, 拉-拉疲劳 $K_t=2.16, R_a=1.6$	260	320	24
	螺栓拉-拉疲劳 $K_t=3.5, R_a=3.2$	250	448	79

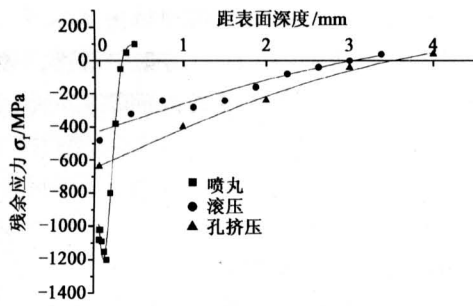
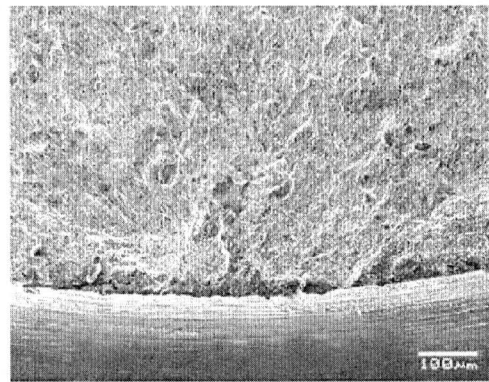
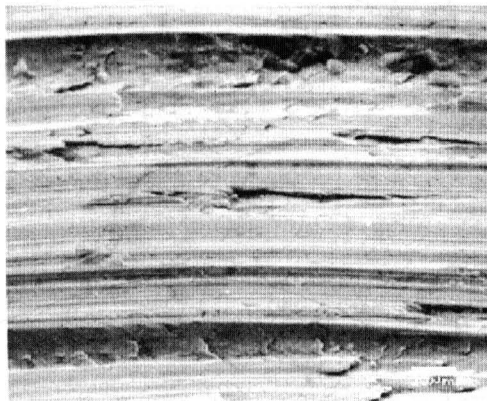


图 2 强化表面层残余应力场结构

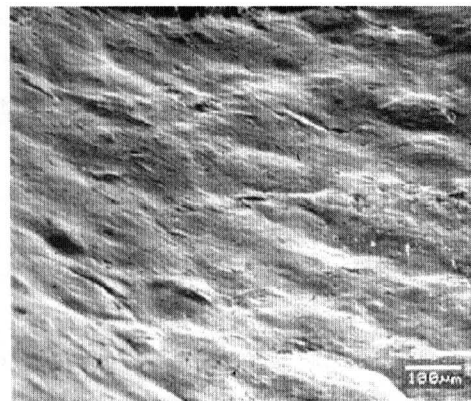
Fig.2 Retained stress construction of surface case strengthened



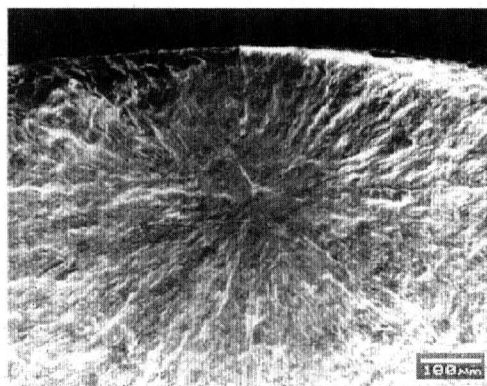
(a) 喷丸前 (磨削) 疲劳断口



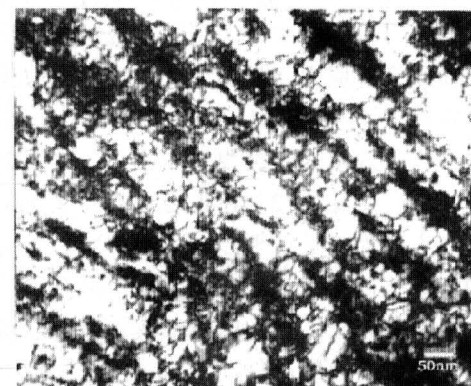
(b) 喷丸前车削表面



(c) 喷丸表面



(d) 喷丸强化疲劳断口



(e) 滚压强化层组织

图 3 表面强化 SEM 疲劳断口与组织

Fig.3 SEM fatigue fracture surface and structure of strengthened surface

2.3 孔挤压强化

按实验优化工艺参数进行耳片试件孔内壁挤压强化, 强化前后耳片拉-拉疲劳试验结果列入表 3 中。耳片穿芯棒拉-拉疲劳试验时, 耳片为剪切失效, 疲劳强度值较低。强化表面层残余应力场结构

如图 2 所示。与喷丸强化相比, 因试件结构限制孔挤压强化层更深, 残余压应力值更低, 表面粗糙度显著降低, 疲劳断口仍呈现多源起始、主裂纹扩展至断裂、裂纹起始于切削刀痕特征。

2.4 螺纹滚压强化

按实验优化工艺参数进行试件螺纹根部滚压强化。强化前后拉-拉疲劳试验结果列入表 3 中。强化表面层残余应力场结构如图 2 所示。与喷丸强化相比，因试件结构限制强化层更深，残余压应力值更低。与孔挤压强化相比，强化层深度和残余压应力值较小。表面粗糙度由 R_a 3.2 降至 R_a 0.4。图 3 (e) 表示强化层组织为高位错密度胞状组态。疲劳断口仍呈现多源起始、主裂纹扩展至断裂、裂纹源自滚压痕迹或划伤等特征。

3 微观机理分析

表 1、表 2 的数据表明，缺口和表面粗糙度引起的应力集中使 300 M 钢试件的疲劳强度显著降低；图 3 (a) 表明加工刀痕造成的应力集中是试件过早失效的原因；300 M 钢疲劳强度对应力集中敏感；表面完整性磨削加工造成的残余压应力未能改变 300 M 钢的疲劳失效模式和断口基本特征。喷丸强化是一种常用的提高疲劳强度方法，已有很多研究和应用^[9~11]。早在上个世纪 60 年代初，Harris 就得出，一个 K_t 为 1.76 的构件疲劳强度降低到无缺口值的 60%，而经过喷丸处理后得到完全恢复。图 2 中曲线表明，300 M 钢喷丸强化后试件表面层形成很高的残余压应力，最高值达到 -1 200 MPa 以上。图 3 (b) 及 (c) 表明，喷丸强化消除了加工刀痕并形成高位错密度胞状细小形变组织。表面残余压应力与外加交变应力及应力集中相互叠加降低了疲劳平均应力幅，图 3 (d) 指出，喷丸改变了失效模式：裂纹自亚表面、单源起始并扩展至断裂。文献 [12] 还得出，裂纹萌生位置被挤到压应力值为零处。因此，如表 3 所示，喷丸后疲劳强度显著提高，而且高应力集中时升高更显著。实验证明，孔挤压强化明显降低孔壁表面粗糙度，降低加工刀痕的凹凸程度，表面层金属发生强烈变形，位错密度升高并形成胞状结构及形成图 2 中曲线所示的残余压应力，阻滞裂纹萌生和扩展，显著提高了试件疲劳强度。螺纹试件 K_t 值较高，滚压强化显著降低了螺纹根部粗糙度，表面层中形成如图 3 (e) 所示的高位错密度胞状结构和图 2 中曲线所示的残余压应力，阻滞裂纹萌生与扩展，疲劳强度的升高率最高达 79%。滚压强化后裂纹源自滚压刀痕或划伤处，低应力时裂纹源自亚表面^[13]。

从上述 4 种表面完整性实验结果得出 300 M

钢试件疲劳强度升高的微观机理如图 4 所示。图 4 表示，300 M 钢疲劳强度对应力集中敏感，表面完整性机械加工试件的失效模式和断口基本特征为多源、表面起始，主裂纹扩展至断裂。喷丸、孔挤压、螺纹滚压等表面层组织再造改性处理后，残余压应力、高位错密度胞状组织结构，将裂纹萌生位置从表面推移至亚表面并阻滞其扩展。

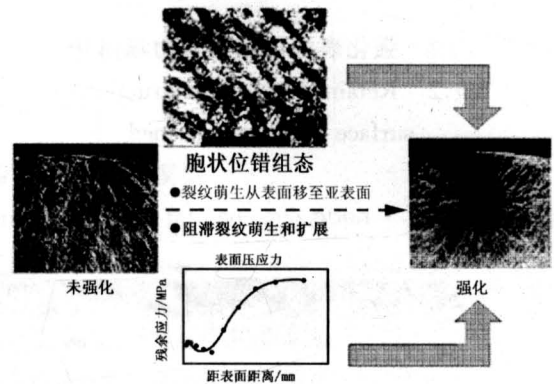


图 4 300 M 钢抗疲劳微观机理

Fig.4 Anti-fatigue micro-mechanism of 300 M steel

4 “无应力集中”抗疲劳概念与构件疲劳强度

从上述各种实验结果可见，喷丸、孔挤压、螺纹滚压等表面层组织再造改性显著提高了试件疲劳强度，试件 K_t 值越高，疲劳强度回复越大；表面粗糙度越高，疲劳强度回复也越大。尽管试件 K_t 值仍然保持不变，但各 K_t 值下的疲劳强度都回复到接近于 300 M 钢固有疲劳强度，形成“ $K_t \rightarrow 1$ ”“无应力集中”表面完整性状态，如图 5 所示。在

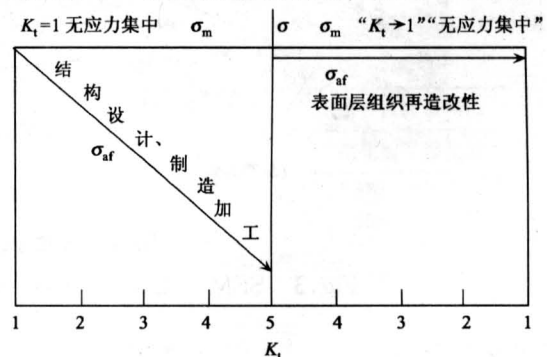


图 5 “无应力集中”表面完整性与构件疲劳强度关系

Fig.5 Influence of “un-stress concentration” surface integrity on fatigue limit of part

此状态下，应力集中变得无害。300 M 钢疲劳强度不再对应力集中敏感。“无应力集中”抗疲劳概念表述为构件表面造成完整的接近 300 M 钢固有疲劳强度的等疲劳强度包络。这一概念已被长寿命起落架构件应用所验证。

5 结论

1) 300 M 钢表面完整性机械加工试件具有多源、表面起始和主裂纹扩展至断裂疲劳失效模式。喷丸、孔挤压、螺纹滚压等表面层组织再造改性处理造成的残余压应力和高位错密度胞状结构将疲劳裂纹萌生推移至亚表面并阻滞其扩展，回复不同应力集中处的疲劳强度至接近钢的固有疲劳强度，造成一种“无应力集中”表面完整性状态。

2) “无应力集中”抗疲劳概念表述为构件表面形成完整的接近 300 M 钢的固有疲劳强度等疲劳强度包络。

参考文献

- [1] Davies D P. Duplex hardening: an advanced surface treatment [J]. Heat Treating, 1992, August: 38~46
- [2] Koster W P, Field M, Fritz L J, et al. Surface integrity of machined structural components [R]. AFML-TR-70-11
- [3] Sadat A B. Effect of high cutting speed on surface integrity of AISI4340 steel during turning [J]. Materials Science and Technology, 1990, 6 (April): 371~375
- [4] Neailey K. Surface integrity of machined components-microstructure aspects [J]. Metals and Materials, 1988, (Feb): 93~96
- [5] Neaily K. Surface integrity of machined components-residual stresses and fatigue [J]. Metals and Materials, 1988, (March): 141~145
- [6] 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
- [7] 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
- [8] Alexandre M A, David K A. The Surface integrity of turned and ground hardened bearing steel [J]. Wear, 1996, 196: 279~284
- [9] 邱 琼. 关于超高强度钢喷丸应变层特性与疲劳性能关系的研究 [D]. 北京航空材料研究院硕士论文, 1984
- [10] 李金魁. 金属喷丸强化理论 [D]. 哈尔滨工业大学博士学位论文, 1989
- [11] 王升平. 表面强化金属疲劳极限的研究 [D]. 哈尔滨工业大学博士学位论文, 1994
- [12] 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
- [13] 宋德玉, 高 文, 赵振业. 螺纹滚压强化对 300 M 钢螺纹疲劳强度的影响 [J]. 材料工程, 1993, 2: 17~19

Study on an Anti-fatigue

Conception of the Ultra-high Strength Steel Part

Zhao Zhenye¹, Song Deyu¹, Li Xiangbin¹, Yang Shuxun², Ma Xinwen¹

(1. Beijing Institute of Aeronautical Materials, Beijing 100095, China;

2. Shenyang Aircraft Design & Research Institute, Shenyang 110035, China)

[Abstract] A conception of “un-stressing concentration” anti-fatigue for ultra-high strength steel 300 M has been investigated. The compress stress field and cell structure with high density dislocation were formed in surface layer of specimens with the surface integrity machine, shot peening, hole extrusion and screw rolling strengthening, by which the crack initiation was changed to the subsurface from surface, crack propagation was thwarted, fatigue limit at the place of stress concentration were returned to a approximate to the innate fatigue limit of 300 M steel and “un-stressing concentration” surface integrity condition was resulted. This conception of “un-stressing concentration” anti-fatigue was described as a comprehensive equi-fatigue strength, which was equal approximately to the innate fatigue limit of 300M steel, encirclement on the constructure surface case.

[Key words] ultra-high strength steel; anti-fatigue; stress concentration; surface integrity