

LC9 铝合金圆筒内壁挤压外表面喷丸综合强化对疲劳强度的影响

宋德玉

前言

飞机和发动机中有很多圆筒状或带内孔的零件。孔内壁和圆筒内外表面加工质量的好坏,对零件的使用性能影响很大。例如,表面的机械划伤、表面不光洁、表层的异金属夹杂、表面残余应力的性质和大小……等,都对零件的使用性能有影响,对疲劳性能的影响尤为突出。

带孔的零件和圆筒零件,例如起落架、螺栓孔等,在使用中产生疲劳裂纹的部位,多数位于孔的倒角或圆筒的内外表面具有上述缺陷的地方。过去由于起落架折断或机翼主梁螺栓孔断裂发生过灾难性事故。由此可见,如何提高孔内壁和圆筒内外表面的疲劳强度,是一项重要的研究课题。

提高航空零件疲劳强度有三种方法:改进设计;合理选材;加工工艺适当。当设计和选材确定之后,先进的加工工艺也可以大幅度地提高疲劳强度。例如,减少工作面的机械划痕、降低由于加工造成的拉应力、表面滚压强化、内孔挤压强化、喷丸强化……等,都是改进加工工艺的常用措施。其中,圆筒内壁挤压、外表面喷丸综合强化效果最好。这种强化工艺的优点是:工艺简单、效率高、成本低、效果显著,并且适应性广,可以用于航空工业,亦可用于汽车和拖拉机制造和修理等部门以提高零件的疲劳强度。

圆筒内壁挤压强化,是用直径比圆筒内径稍大的挤压器,按照一定的工艺参数,在挤压

床上一次或若干次旋过内孔,使内壁达到一定的精度、光度和强化程度。圆筒外表面喷丸强化,即高速弹丸流冲击圆筒外表面,产生强烈的塑性变形层。这一变形层称为加工硬化层或喷丸强化层。在强化层内产生与基体有很大区别的组织结构和应力状态。

本文总结了圆筒内壁挤压、外表面喷丸综合强化对LC9铝合金疲劳性能的影响,及强化机理的研究。

一、试验材料、工艺和方法

试验材料:LC9铝合金棒材(同一炉号的)。

化学成分, %: Zn5.6; Mg2.5; Cu1.6; Cr0.22; Mn<0.15; Fe<0.5; Si<0.5。

热处理制度:460℃水淬,105~115℃保温6~8小时,然后再于170~180℃下保温8~10小时。

热处理以后的棒材车削成圆筒状,而后磨成疲劳试样,其几何形状和尺寸见图1。

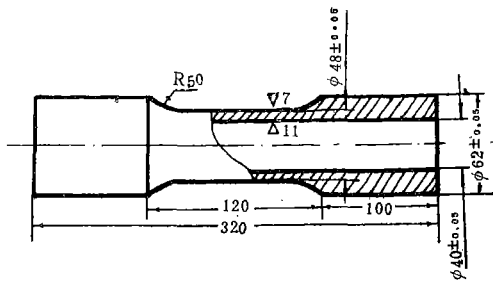


图1 LC9铝合金圆筒试样

圆筒内壁挤压强化，外表面喷丸强化的质量好坏与工艺参数的选择（如挤压器滚珠的尺寸、过盈量、挤压器的进给量、挤压力、挤压速度、行程次数、工件的原始尺寸、润滑剂、机床设备等）有很大关系。我们采用的挤压参数见表1。

喷丸强化工艺参数选择饱和喷丸强度，详见表2。

表 1 挤压工艺参数

材 料	过盈量 毫米	挤压器 进给量 毫米/转	挤压器 转 速 转/分	挤压器 行程次 数, 次	润 滑 剂	机 床 设 备
LC9 铝合金	0.12	0.19	260	1	煤油 + 机油	摇臂钻

表 2 喷丸强化工艺参数

材 料	玻璃丸 直径D 毫米	空气压 力P 公斤 厘米 ²	距离 1 毫米	喷嘴 角度 度	弹 丸 流 量 公斤/分	喷丸 时间 秒	试样 状态
LC9 铝合金	0.15 ~0.25	3	125	90	11	180	旋转

挤压强化层内的残余应力分布，是用理学电机2903型X射线应力应变仪测量的；从挤压和喷丸强化层内取金属薄膜，并在JEM-200型透射电子显微镜中，利用电子衍射法观察位错组态；在AMSLER50吨疲劳试验机上进行对比疲劳试验；还用丹东生产的X射线衍射仪摄取了挤压和喷丸强化层内的背反射花样。

二、 结果和讨论

LC9铝合金圆筒试样，分别经过以下四种方法处理后，再进行对比疲劳试验：（1）内壁挤压，外表面喷丸（试样状态Ⅰ）；（2）内壁不挤压，外表面喷丸（试样状态Ⅱ）；（3）内壁挤压，外表面不喷丸（试样状态Ⅲ）；（4）内壁不挤压，外表面不喷丸（试样状态Ⅳ）。试验结果列于表3。

拉-拉疲劳试验结果表明：LC9铝合金圆筒综合利用内壁挤压强化和外表面喷丸强化时，比不挤压不喷丸的疲劳寿命提高8~10倍；

比内壁不挤压外表面喷丸的疲劳寿命提高2倍；比内壁挤压外表面不喷丸的疲劳寿命提高3倍。这种大幅度提高疲劳寿命的事实与在强化层内产生很高的残余应力和组织结构的变化有密切关系，我们做了以下几个方面的试验研究并予以分析讨论。

表 3 疲劳试验结果

试样号	试 样 状 态	单 件 循 环 数 N	
		循 环 数	平 均
1	Ⅰ	5.052×10^5	5.594×10^5
2		6.473×10^5	
12		6.084×10^5	
13		5.910×10^5	
14	Ⅱ	4.452×10^5	2.879×10^5
5		5.248×10^5	
6		1.033×10^5	
7		2.367×10^5	
10	Ⅲ	3.063×10^5	1.805×10^5
11		2.502×10^5	
8		1.715×10^5	
9		1.896×10^5	
3	Ⅳ	8.570×10^4	5.805×10^4
4		3.040×10^4	

注：温度：室温；
K：0.5；
 σ_{max} ：27公斤/毫米²；
 σ_{min} ：2.7公斤/毫米²；
频率f：500次/分。

1. 残余应力对疲劳强度的影响

对试样表面进行逐层电解抛光，在2903型X射线应力应变仪上逐次测量残余应力，其强化层内的残余应力分布情况见图2。

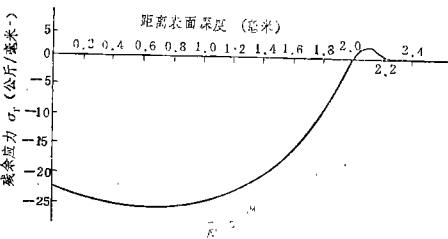


图 2 强化层内残余应力的分布

由强化层应力分布测量结果可以得出, 挤压强化层深度为1.8~2.0毫米。

在挤压强化过程中, 圆筒内壁在滚珠的压力作用下, 引起垂直于表面的压缩范性流变与表面切线方向的拉伸范性流变相伴发生。可是切线方向实际尺寸的改变却受到亚表面材料的限制, 这是引入压应力的结果, 以便伴生的弹性应变与范性应变相结合来保持总应变与亚表面应变相平衡, 这就是连续性的条件所要求的。亚表面材料相应地成弹性拉长而得到了亚表面拉伸应力^[1]。图2是强化层内的残余应力分布状态, 最高压力处于表面下稍深处。最大拉应力比最大压应力小得多, 并处于距离表面更深的部位。圆筒在拉-拉疲劳试验中, 内壁和外表面承受交变的拉伸应力作用, 如图3所示。

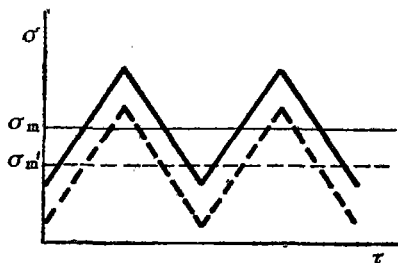


图 3 圆筒疲劳过程中受力波形

图 3 中实线应力波形为圆筒未挤压时所承受的应变载荷, 其平均应力为 σ_m 。当承受同样的交变载荷时, 由于孔内壁挤压强化, 在表面层造成很高的残余压应力, 抵消了一部分外加交变载荷中的拉应力, 应力波形变成了虚线部分。平均应力 σ_m 下降到 σ'_m 。由此, 使得圆筒的疲劳寿命得以延长。

2. 强化层内组织结构变化对疲劳强度的影响

在挤压强化和喷丸强化过程中, 强化层内造成与基体不同的组织结构、产生亚晶粒细化和位错密度增高。同时产生很高的内应力和强烈的弹塑性变形, 使X射线背反射线条变得宽而且漫散, 见图 4。

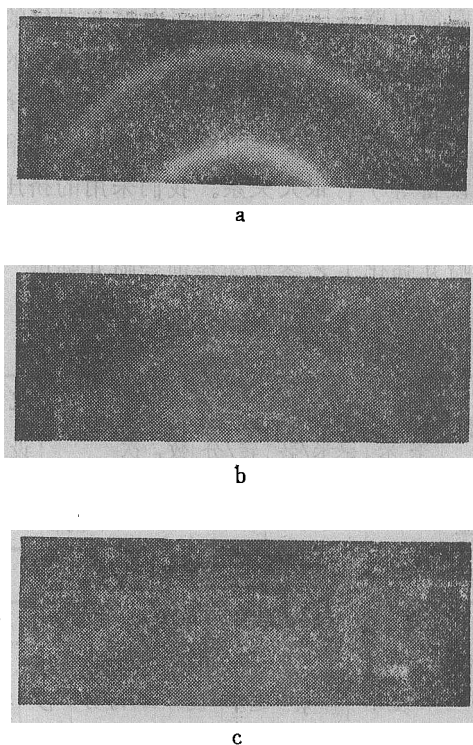


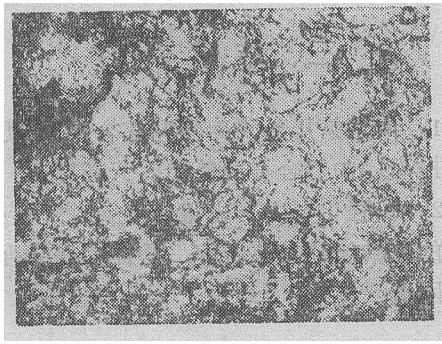
图 4 X射线背反射花样 (420)
CrK β 辐射

a 加工面 b 挤压面 c 喷丸面

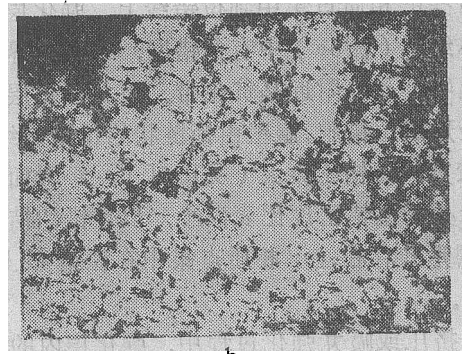
从图 4 可以看出: LC9 铝合金圆筒车削内表面的X射线的衍射谱线窄而清晰, 挤压或喷丸强化层内由于发生亚晶粒细化、位错密度增高和产生很高的内应力, 而衍射线条变得宽而弥散, 见图 4b、c。

强化层内切取金属薄膜, 在JEM-200型电子显微镜中, 用电子衍衬法观察位错组态的变化情况见图 5。

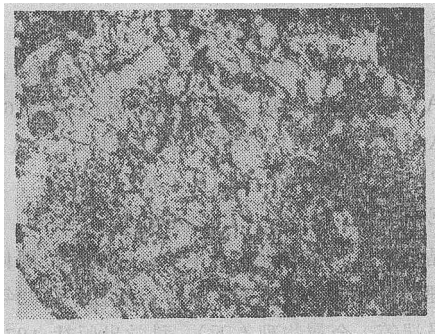
图 5 a 为挤压强化层最表面的位错组态, 位错胞较小, 胞壁位错密度大, 胞壁也比较宽, 胞内位错密度较小, η 相集中在位错胞壁内。图 5b 为距表面 0.25 毫米处的位错组态, 位错胞比表面的大, 胞壁比表面的窄, 位错密度也比表面的小。图 5 c 和图 5 d 为距表面 0.50~0.75 毫米处的位错组态, 胞状组织逐渐消失, 留下密度很大的位错网和位错纠结, η' 相分布比较均匀, 但



a



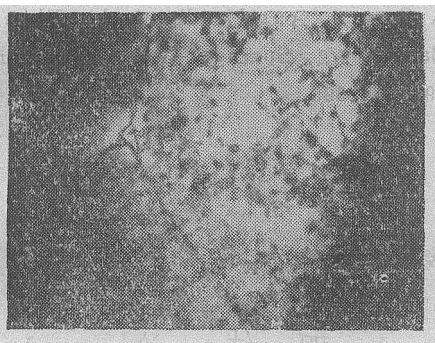
b



c



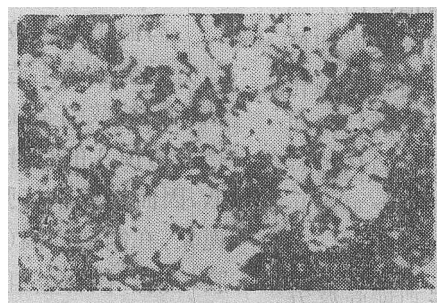
d



e



f



g

图 5 位错组态 40000 \times

是有些 η' 相质点集中到位错线上。强化层内的基体组织(图5e)中有位错网,三角晶界上有析出物,晶界附近是贫化带。喷丸强化层最表面处形成位错胞,胞壁由锁链状的位错网组成,比较宽,位错密度大(见图5f)。距表面0.25毫米处的位错密度比表面小,以位错纠结和位错网形式存在, η' 相质点集中在位错线上(图5g)。

挤压或喷丸强化过程中,强化层内的金属通过位错运动产生塑性变形,有一些位错滑移到金属表面,但多数位错没滑出去,而是由于同其他位错交互作用或由于晶界、相界、嵌镶界等处的阻碍被绊住在晶体以内^[3]。这些位错在晶界、嵌镶界或第二相质点附近塞积,各个塞积群之间产生很高的应力场(长程应力场),随着变形量的增加,位错线产生交滑移或攀移形成位错纠结和胞状组织,胞壁位错密度高。因此达到一种平衡状态,使位错不能继续产生和运动。要使位错重新开动,必须有比原来更高的应力才有可能,于是达到能够强化金属的作用。

对疲劳强度而言,金属承受外加交变载荷的作用,位错线也相应地作往复运动。位错线在晶体中作往复运动时受到的阻力有:(1)位错在完整晶体中受到的点阵阻力;(2)位错与其他缺陷的交换作用(空位、空隙原子、平行位错、林位错等);(3)位错与溶质原子或沉淀相的交互作用;(4)位错受到晶界、亚晶界的阻碍^[4]。但当疲劳试样某一局部应变集中达到很高时(例如划伤、沟槽、内外圆角、第二相质点等处),通过位错的反应和位错塞积产生疲劳裂纹源。当金属表面喷丸强化或挤压强化后,在强化层内形成大量的位错纠结和胞状结构^[5],它们之间形成很高的长程应力场、互相作用又互相钉扎,达到稳定平衡状态。位错不容易开动,要使它们重新运动,就必须施加更高的交变载荷,从而起到提高疲劳强度的作用。

三、结 论

1. 内壁挤压外表面喷丸综合强化可以大幅度提高LC9铝合金圆筒的疲劳强度。

2. 在强化层内形成很高的残余压应力和大量的位错纠结与位错胞,是提高疲劳强度的主要因素。

参 考 文 献

- [1] S.S.Manson, METAL FATIGUE DAMAGE—Mechanism, Detection, Avoidance and Repair, 1971, P.316.
- [2] A.H.Cottrell, DISLOCATIONS AND PLASTIC FLOW IN CRYSTALS, First Edition, 1953, PP395~399.
- [3] 晶体缺陷和金属强度(下), 1960年, 固体物理理论学习报告汇编, 科学出版社, 1962年.
- [4] 冯端等, 金属物理(下), 科学出版社, 1975, PP1115~1120.
- [5] A.Seeger, Aus Handbuch der Physik Band VIII/2, Springer-Verlag, Berlin, 1958, P.595.

~ ~ ~ ~

(上接第16页)

四、结 论

高温下氟橡胶与钢、钛合金粘接的破坏主要由于金属氧化造成。空气中的氧不断地透过粘接层扩散到金属表面使其氧化。这层氧化物(锈蚀)的自身强度以及与其基体结合力都很低,因而造成粘接强度急剧降低。为了防止上述现象,在制造高温(250℃以上)环境使用的氟橡胶-钢、钛合金组合零件时,应使金属骨架嵌入橡胶内或选用耐高温氧化的合金材料。