

曲轴疲劳机理分析与圆角喷丸工艺技术研究

董云庆, 岳文, 张巧丽, 陆寅松

(七一一研究所, 上海 201108)

摘要: 曲轴过渡圆角为应力集中处, 在制造工艺过程中其表面会产生残余拉应力, 对疲劳强度极为不利。根据材料裂纹的微观机理, 对曲轴过渡圆角表面裂纹原因进行分析, 在此基础上采用喷丸工艺对圆角进行强化。试验验证表明: 喷丸强化能够使圆角表面形成残余压应力, 提高曲轴的疲劳强度。并指出: 目前喷丸工艺参数通过经验得到, 须进一步研究更适合的喷丸强度, 以及喷丸所形成的表面残余压应力和深度对曲轴疲劳强度的影响。

关键词: 曲轴; 过渡圆角; 喷丸工艺; 疲劳强度

中图分类号: TK426 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4357(2017)06-0043-04

Analysis of Crankshaft Fatigue Mechanism and Research on Shot Peening Technology of Transition Fillet

Dong Yunqing, Yue Wen, Zhang Qiaoli, Lu Yinsong

(Shanghai Marine Diesel Engine Research Institute, Shanghai 201108)

Abstract: There is a large stress concentration in the transition fillet, and during processing, residual tensile stress may generate on its surface, which has very bad effect on the fatigue strength of the crankshaft. According to the microscopic mechanism of crankshaft fatigue, the causes of the cracks occurred in the surface of the transition fillet was analyzed, and the transition fillet was strengthened by the shot peening process. Experimental results show that the existing shot peening parameters were set through experiences, and more rational shot peening strength should be studied, as well as the influence of surface residual tensile stress and depth on the fatigue strength of crankshaft.

Key words: crankshaft; transition fillet; shot peening; fatigue strength

0 引言

曲轴是柴油机的关键零部件, 曲轴过渡圆角是应力集中处。在曲轴制造工艺过程中, 中频淬火和表面切削等处理不可避免的使其表面产生残余拉应力, 对曲轴的疲劳强度有很大影响。并且船用柴油机曲轴要求服役寿命长, 对曲轴的疲劳强度提出了更高的要求。国外 MAN、Wärtsilä 等船用柴油机公司, 在进行曲轴研制时, 都要对曲轴单拐样件进行弯曲疲劳试验, 以测试曲轴的最小疲劳强度。在某型船用柴油机设计开发时, 同样制定了曲轴单拐疲

劳试验。为了提高单拐疲劳强度, 对曲轴做喷丸强化处理。

1 材料裂纹形成微观机理

在交变载荷作用下, 在材料表面或者次表面上某些晶体取向合适的薄弱晶粒中, 位错源首先开动并不断发生位错, 当位错源运动到晶界、亚晶界夹杂物或者次级相, 会因受阻而形成位错的塞积群, 并产生应力集中现象。当应力达到大于相邻晶粒的微观屈服点时, 发生应力松弛现象, 位错得以继续发生, 由此形成先屈服小区 PYR (Pre-Yield Re-

gion), 如图 1 所示, 这给裂纹的萌生奠定了基础。在某些 PYR 中, 可能会存在塑性变形阻力较小的区域, 在外载荷相同作用下, 成为形变集中微区 SCMR (Strain-Concentrated Micro Region)。材料承受着交变载荷, 在 SCMR 发生塑性变形。但在卸载后, 由于材料基体的弹性作用, 可能促使 PYR 和 SCMR 出现反向应力。当载荷的应力比 R 与材料的微观屈服应力水平达到一定程度后, 会出现反向屈服, 为裂纹的萌生创造了必要的条件。在交变载荷的反复作用下, 在 SCMR 形成初始的疲劳裂纹, 裂纹不断扩展之后最终导致材料断裂。

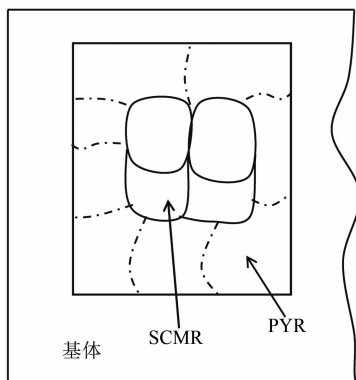


图 1 基体、SCMR 与 PYR 关系

2 曲轴过渡圆角表面裂纹形成分析

由材料裂纹的微观机理可知, 裂纹容易出现在高应力区, 而曲轴过渡圆角为高应力区, 相对于材料内部, 裂纹较容易出现在圆角表面。如图 2 所示: 表面和次表面的 SCMR 中位错 S_s 、 S_i 放出, 并激发相邻晶粒位错 S'_s 、 S'_i 开动。

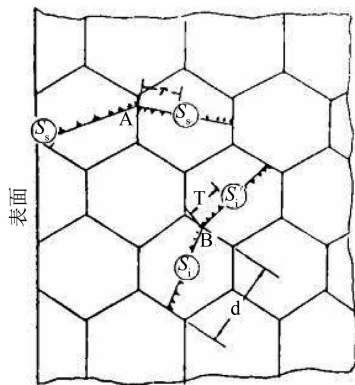


图 2 位错发生示意图

当表面产生位错 S_s , 由应变能相等原理, 相邻晶粒中新位错源 S'_s 开动 (即表面萌生疲劳源) 的临界应力 σ_c 条件为:

$$\sigma_c = (\sigma_{ws} - \sigma_{w0}) \left(\frac{d}{2r} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (1)$$

$$\text{令 } k_w = \sigma_c \sqrt{2r}$$

$$\text{则 } \sigma_{ws} = \sigma_{w0} + k_w d^{-\frac{1}{2}} \quad (2)$$

其中: σ_{ws} 为表面疲劳极限; σ_{w0} 为 SCMR 中薄弱晶粒内位错运动的晶格阻力; k_w 为与材料结构因素有关的常数; d 为晶粒直径; r 为相邻晶粒位错源距离。

次表面产生位错 S_i , 相邻晶粒中新位错源 S'_i 开动的临界应力条件 σ_c 为

$$\sigma_c = (\sigma_{wi} - \sigma_{w0}) \left(\frac{d/2}{2r} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (3)$$

$$\text{令 } k'_w = \sigma_c \sqrt{4r} = \sqrt{2} k_w$$

$$\text{则 } \sigma_{wi} = \sigma_{w0} + k'_w d^{-\frac{1}{2}} \quad (4)$$

其中: σ_{wi} 为内部疲劳极限。

由式 (2)、(4), 对于这两种裂纹萌生的条件, σ_{w0} 均相同, 且 σ_{w0} 的值一般不计, 这里假定 $\sigma_{w0} = 0$, 则

$$\sigma_{wi} / \sigma_{ws} = \sqrt{2} \quad (5)$$

由式 (5) 可得, 表面疲劳极限比内部疲劳极限低; 同时由于表面存在应力集中, 并受粗糙度、腐蚀等影响, 更容易出现裂纹。

由于疲劳裂纹更容易出现在材料表面, 因此有必要对曲轴过渡圆角进行表面强化处理, 使表面形成残余压应力层。当柴油机以额定转速运转时, 曲轴过渡圆角受到周期循环载荷, 循环载荷的应力幅 σ_a 是不变的, 即

$$\sigma_a = (\sigma_{\max} - \sigma_{\min}) / 2 = \sigma_e \quad (6)$$

其中: σ_e 恒定。

由平均应力 σ_m 与应力比 R 的关系式:

$$\sigma_m = (1 + R) \sigma_a / (1 - R) \quad (7)$$

当 R 增大时, σ_m 也增大, 当 R 减小时, σ_m 也减小。

令表面残余压应力为 σ_{re} , 且 $\sigma_{re} < 0$, 由式 (6) 可得有残余应力下的平均应力 σ'_m :

$$\begin{aligned} \sigma'_m &= [(\sigma_{\max} + \sigma_{re}) + (\sigma_{\min} + \sigma_{re})] / 2 \\ &= \sigma_m + \sigma_{re} < \sigma_m \end{aligned} \quad (8)$$

由式 (8) 可知: 当表面存在残余压应力时, 平均应力减小。平均应力对 $S-N$ 曲线影响的一般趋势如图 3 所示。可见, 在相同的应力幅下, 平均应力越小, 循环次数越多, 寿命越长。因此通常采用滚压、喷丸、氮化等方式在过渡圆角高应力区制造残余压应力, 以降低平均应力, 以此提高曲轴的疲劳强度。

3 曲轴圆角强化措施

由上文可知, 曲轴残余压应力对曲轴疲劳强度

是有益的，因此，曲轴圆角强化措施的目的是使圆角表面形成压应力层，降低交变载荷的平均应力，提高曲轴的疲劳强度。目前，曲轴过渡圆角强化的方式主要有：中频淬火、滚压、喷丸、氮化。这几种表面强化方式各有优点，但也存在局限性，要根据曲轴本身的结构形式选择合理的强化方式。

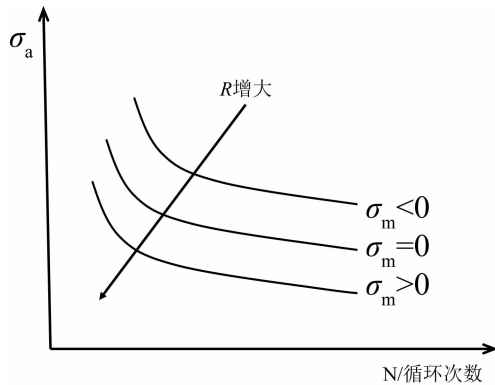


图3 平均应力对 S-N 曲线影响的一般趋势

在中频淬火强化圆角过程中，为了能够在圆角处获得有效的硬化层深度，在感应加热周期内，圆角区要比轴颈处施加更高的热量，电流较大。但是由于圆角处于曲柄的尖角，散热较慢，很容易将尖角烧熔。因此中频淬火一般用在轴颈处，极少用在圆角处。圆角滚压也是一种较好的方式，但是由于轴颈较大，所以所需的滚压压力也较大，难以控制曲轴的变形。氮化也经常用于曲轴圆角强化，但是由于在整轴氮化时，变形难以控制，因此不考虑单拐的氮化强化。

喷丸强化是利用高速运动的弹丸连续向零件表面喷射，零件经高速弹丸打击后，表面产生强烈的塑性变形，产生一定厚度的塑性应变层，具有一定的残余压应力。喷丸强度达到一定强度即饱和强度之后，继续喷丸，强度也不会再发生变化，因此其强度较容易控制，同时对曲轴的变形没有任何影响。综上所述，本次单拐疲劳样件采用喷丸强化的方式。

4 曲轴单拐喷丸

4.1 喷丸技术要求

根据类似型号的曲轴喷丸强度，确定本次单拐的疲劳样件的喷丸强度为 A 型 Alman 试片，弧高值为 0.5 ± 0.05 mm，表面覆盖率为 200%。主要的试验包括两部分：首先利用试片确定喷丸工艺参数；其次利用 X 射线残余应力仪在曲轴单拐喷丸工序前后，即喷丸前、喷丸后以及圆角抛光后进行圆角的应力测试，验证喷丸工序的合理性。

4.2 喷丸工艺参数

通过专用喷丸试验工装进行喷丸强度试验，采用不同喷丸压力、不同丸粒流量以及不同喷丸时间进行测试，通过喷丸试片测定其弧高值以及覆盖率，绘制喷丸饱和曲线，得出达到技术要求的最佳喷丸工艺参数。试验在专门的试验轴上进行，利用专门的工装将试片固定在试验轴上，如图 4 所示。

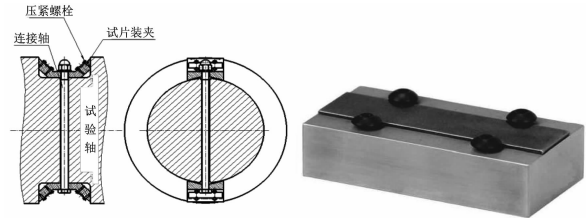


图4 喷丸试验工装

综合考虑以往经验以及设备的能力，采用的空气压力为 0.15 ~ 0.25 MPa，喷丸流量为 4 ~ 6 ($\text{kg} \cdot \text{min}^{-1}$)，喷丸时间可通过控制曲轴在喷丸过程中的喷丸圈数确定。表 1 为在不同喷丸圈数下的弧高值以及覆盖率。

表 1 不同喷丸圈数下的弧高值以及覆盖率

圈数	1	2	3	4
弧高值/mm	0.48	0.52	0.54	0.56
覆盖率	70%	/	/	/

由表 1 绘制喷丸饱和曲线，如图 5 所示。

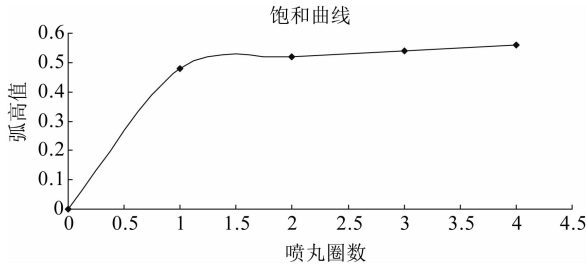


图5 喷丸饱和曲线

由国家标准 GB/T23576-2009，在弧高曲线上找出经一定时间抛喷后的准饱和点，当喷丸时间延长一倍，弧高值增加量小于 10% 时，此准饱和点即为饱和喷丸点。因本次技术要求中的覆盖率为 200%，因此用喷丸时间即喷丸的圈数计算覆盖率。

通过饱和曲线绘制可知，喷丸饱和强度为 0.49 mm，符合技术要求。同时通过 10 倍放大镜检测覆盖率，一次喷丸结束后，表面覆盖率为 70%。根据上述试验结果，确定喷丸圈数为 3 圈，喷丸弧高值为 0.54 mm，覆盖率达到 200%，喷丸试验结果符合单拐疲劳样件的技术要求。

4.3 曲轴单拐喷丸及残余应力测试

喷丸工序安排在精磨轴颈之后, 抛光之前。因此喷丸之前应对轴颈做保护, 防止弹丸溅射轴颈。设置好上述的喷丸工艺参数, 利用曲轴喷丸机自动喷丸, 如图 6 所示。

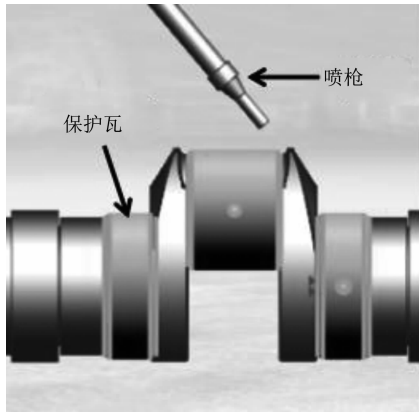


图 6 曲轴单拐喷丸

在喷丸前后和抛光后进行残余应力测试。根据曲轴结构, 选择轴颈底端为测量点。由于残余应力仪探头与曲轴曲柄发生干涉, 无法进行圆角内部测量, 只能测试连杆颈底部以及主轴颈与曲柄板底部。残余应力测试点分布如图 7 所示, 测试点在曲柄端面向内圆角延伸 7.5 mm 处。从应力测试结果可以看出: 喷丸前所有圆角表面为拉压力; 经过喷丸后圆角表面为压应力; 经过抛光后, 圆角表面压应力有所下降, 但最终表面应力为压应力, 具体数据见表 2。

表 2 喷丸前后和抛光后圆角表面残余应力

检测位置	检测点编号	喷丸前/MPa	喷丸后/MPa	抛光后/MPa
主轴颈 1	1	+572.78	-593.66	-223.37
	2	+532.22	-553.96	-233.71
	3	+535.05	-529.78	-188.54
主轴颈 2	1	+295.84	-602.94	-396.68
	2	+328.36	-653.02	-402.32
	3	+322.71	-580.98	-380.74
连杆颈 1	1	+445.15	-628.47	-228.32
	2	+499.80	-503.05	-179.65
	3	+317.57	-609.20	-251.03
连杆颈 2	1	+298.16	-642.55	-241.67
	2	+328.23	-684.21	-263.21
	3	+250.34	-590.17	-278.86

本次疲劳试验的单拐在轴颈处采用中频淬火强化轴颈。中频淬火时, 存在热影响区, 使圆角表面

产生拉应力, 这对曲轴的疲劳是非常不利的。经喷丸之后, 表面拉应力转化为压应力; 但是由于抛光, 将一层塑性应变层去除, 导致表面压应力有所降低。抛光后圆角表面残余压应力虽有所降低, 但与喷丸处理前表面残余应力相比, 残余压应力有明显提高, 可起到提高单拐疲劳强度的作用。

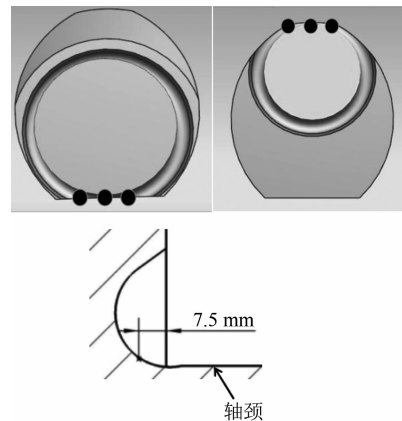


图 7 残余应力测量点

5 结 论

基于材料裂纹的微观机理对曲轴过渡圆角表面裂纹原因进行分析, 并提出采用喷丸对圆角进行强化, 提高疲劳强度。通过圆角喷丸强化处理, 圆角表面形成残余压应力, 提高了其疲劳强度。但是喷丸所形成的粗糙度并不能达到曲轴单拐圆角表面粗糙度要求, 须要最后抛光才能到达技术要求中的粗糙度要求, 而抛光处理后表面残余压应力有所下降。

目前喷丸强度是通过经验值得到, 须进一步研究最合适的喷丸强度, 以及喷丸在表面所形成的残余压应力和深度对曲轴疲劳强度的影响。

参考文献

- [1] 王仁智, 汝继来, 李向斌, 等. 疲劳裂纹萌生的微细观过程与内部疲劳极限理论 [J]. 金属热处理学报, 1995 (4): 26-34.
- [2] 安云鹏. 发动机曲轴的表面强化 [J]. 现代零部件, 2012 (3): 59.
- [3] GAO Y K, WU X R, LU F, et al. Influence of shot peening on fatigue properties in ultra-high strength steels [J]. Materials Science Forum, 2005, 519 (490).
- [4] 陈传尧. 疲劳与断裂 [M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2001.