

# GH909 合金喷丸强化残余应力场的研究

Research on Residual Stress Field of  
GH909 Alloy by Shot Peening

高玉魁, 殷源发, 李向斌, 赵宇新 (北京航空材料研究院, 北京 100095)  
GAO Yu-kui, YIN Yuan-fa, LI Xiang-bin, ZHAO Yu-xin  
(Institute of Aeronautical Materials, Beijing 100095, China)

摘要: 研究了 GH909 合金不同喷丸强化工艺下的残余应力场和残余应力在 550 的松弛情况, 总结了喷丸强化所获得的残余应力场特性。结果表明, GH909 合金经适当喷丸强化后获得的有益残余压应力场可改善其疲劳性能。

关键词: GH909 合金; 喷丸; 残余应力

中图分类号: TG132.3<sup>+</sup>2; V261.93 文献标识码: A 文章编号: 1001-4381 (2002) 04-0040-03

**Abstract:** The characteristics of the residual stress field for GH909 alloy after different shot peening regimes at room temperature and relaxation of residual stress at 550 have been studied. The experimental results show that the fatigue properties can be improved by compressive residual stress obtained from due shot peening.

**Key words:** GH909 alloy; shot peening; residual stress

GH909 合金可通过添加 Nb 和 Ti 经热处理得以沉淀强化, 具有恒定的低热膨胀系数和较高的强度等优良特性, 是制造气轮机的良好材料。小膨胀率可保证更大功率的动力输出和误差的精密控制; 高强度可提高航空发动机的推重比, 因此在航空领域应用前途广阔。

喷丸强化由于节能省时、操作方便、成本低廉、效果显著、适应面广, 是工程上广泛应用的表面形变强化工艺<sup>[1]</sup>。目前在航空航天工业上主要利用喷丸强化来改善零件的疲劳性能和提高其应力腐蚀抗力, 从而提高飞机零部件的可靠性和耐久性<sup>[2]</sup>。

喷丸强化的主要强化机理是在表面层引入残余压应力场<sup>[3]</sup>。残余应力在制造过程中是产生变形和开裂等工艺缺陷的原因, 在加工成形后将影响构件的静强度、疲劳强度、抗应力腐蚀能力及形状尺寸的稳定性等<sup>[4]</sup>, 因此研究喷丸强化前后残余应力场的变化是非常重要的。

国内外对 GH909 合金的喷丸强化研究还比较少, 尤其是对喷丸强化后残余应力场的研究。本文通过研究 GH909 合金经不同喷丸工艺强化后的残余应力以及在 550 的松弛情况, 分析讨论了喷丸强化所获得的残余应力场对疲劳性能的影响。

## 1 试验方法和试验结果

GH909 合金的化学成分和拉伸性能分别如表 1 和表 2 所示。

表 1 合金的化学成分 (质量分数, %)

Table 1 Chemical compositions of  
GH909 alloy (mass fraction, %)

C	Si	Ni	Co	Nb	Ti	Al
0.010	0.42	38.41	13.08	4.76	1.41	< 0.10
Mn	Cr	Cu	S	P	B	Fe
< 0.20	< 0.050	< 0.10	0.004	< 0.010	0.006	余量

表 2 GH909 合金的拉伸性能

Table 2 Tensile properties of GH909 alloy

室温拉伸				650 拉伸			
$\sigma_b$ /MPa	$\sigma_{0.2}$ /MPa	$\delta_5$ /%	$\psi$ /%	$\sigma_b$ /MPa	$\sigma_{0.2}$ /MPa	$\delta_5$ /%	$\psi$ /%
1290	1030	16	47	1017	910	19	41

喷丸强化采取四种不同的规范, 分别记为 A, B, C 和 D, 喷丸强化前后的表面粗糙度和残余应力分别见表 3 和图 1。喷丸强化残余应力场特征 (表面残余应力  $\sigma_r$ 、最大残余应力  $\sigma_{max}$ 、 $\sigma_{max}$  距表面距离  $f$  和残余应力场  $\sigma_r$  的深度  $d$ ) 见表 4。残余应力的松弛见图 2。

用 X 射线应力仪测定喷丸强化前后的残余应力场, 靶材为 CrK $\alpha$ , 电压为 20kV, 电流为 0.5A, 半高法定峰, 电解抛光剥层。为比较喷丸强化前后的残余应力场的变化, 测定了未喷丸试样的残余应力场 (曲线 O), 见图 1。

表 3 合金喷丸强化前后的表面粗糙度  
Table 3 Surface roughness of GH909 alloy  
after shot peening ( $\mu\text{m}$ )

工艺	A	B	C	D
喷丸	$R_a$ 0.9 ~ 1.5	$R_a$ 1.35 ~ 1.6	$R_a$ 1.5 ~ 2.1	$R_z$ 18.70 ~ 21.25
不喷	$R_a$ 0.8 ~ 1.1			

表 4 GH909 合金喷丸强化残余应力场特性  
Table 4 The characteristics of residual stress  
field for GH909 alloy after shot peening

类别	$\sigma_r$ / MPa	$\sigma_{\max}$ / MPa	$f$ / $\mu\text{m}$	$d$ / $\mu\text{m}$	弹丸 材料	弹丸粒度 / mm
喷丸	A	- 924	- 1510	30	270	玻璃 $\phi$ 0.2
	B	- 924	- 1500	28	300	玻璃 $\phi$ 0.5
	C	- 714	- 1200	30	210	铸钢 $\phi$ 0.5
	D	- 1050	- 1470	70	300	铸钢 $\phi$ 0.8
	550	- 504	- 1100	40	210	玻璃 $\phi$ 0.2
	600	- 588	- 1300	60	190	玻璃 $\phi$ 0.2
未喷	- 630	- 630	0	55	-	-

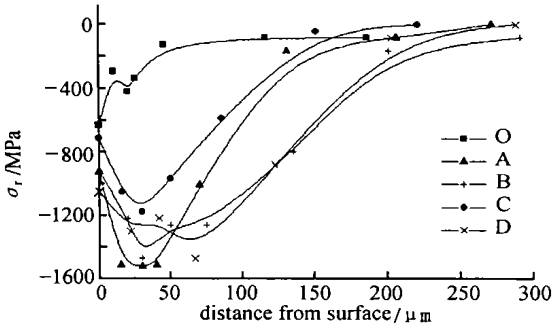


图 1 喷丸强化前后试样的残余应力场

Fig. 1 Residual stress distribution along distance from  
surface before/ after shot peening of GH909 alloy

为了研究合金高温时残余应力的松弛情况，将喷丸强化后的试样在 550℃ 保温 30min 后再测定其残余应力，如图 2 所示。另外还测定了室温经 A 规范喷丸强化的试样在 550℃ 温度下保持不同时间后的残余应力变化，在测定时先测定表面的残余应力，为了消除表面氧化皮的影响，去除表面氧化皮后再次进行测定，测定结果见表 5。

对喷丸强化的效果研究只进行了疲劳寿命对比，缺口试样 ( $K_t = 2$ ) 旋转弯曲疲劳试验表明在同一应力水平 ( $\sigma_a = 380\text{MPa}$ ) 下 550℃ 未喷丸试样的疲劳寿命为  $N_f = 2 \times 10^4$  次，喷丸强化后试样的寿命为  $N_f = 6.5 \times 10^6$  次，喷丸强化后寿命提高了两个数量级，有效改

善材料的疲劳性能。喷丸强化所产生的表面完整性对 GH909 合金疲劳性能的定量化研究有待深入研究。

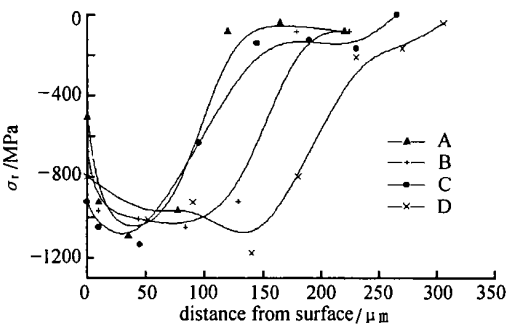


图 2 残余应力场在 550℃ 退火 30min 后的松弛

Fig. 2 Relaxation of residual stress of GH909 alloy  
after shot peening and aging at 550℃ for half an hour

表 5 550℃ 保持不同时间后表面残余应力的变化

Table 5 The residual stress change of GH909 alloy  
after aging at 500℃ for various times

保温时间/ min	3	5	10	20	40
表面未去除 氧化皮/ MPa	- 966	- 924	- 420	- 336	- 462
表面去除氧化皮 (10 $\mu\text{m}$ ) / MPa	- 1260	- 1092	- 924	- 630	- 882

2 分析和讨论

表 3 和表 4 中的数据表明了 GH909 合金喷丸处理前后粗糙度的变化，在磨加工达到粗糙度  $R_a = 0.8 \sim 1.1\mu\text{m}$  时，经过 4 种不同工艺处理后获得了不同的表面粗糙度，弹丸粒度小的得到的粗糙度低些，处在  $R_a = 0.9 \sim 1.5\mu\text{m}$  之间；弹丸粒度大的得到的粗糙度高， $R_z$  处在  $18.70 \sim 21.25\mu\text{m}$  之间。

由此可见，喷丸处理 GH909 合金时弹丸粒度对表面粗糙度的影响规律为表面粗糙度随着弹丸粒度的增加而增高。众所周知，疲劳性能与表面粗糙度有密切关系，材料经过机械加工-热处理-磨加工后，表面粗糙度  $R_a$  达到  $0.8 \sim 1.1\mu\text{m}$ ；喷丸强化后表面粗糙度增加会降低疲劳性能，但其所引入的表面层残余应力场对改善疲劳性能却是有益的。

图 1 曲线是 4 种工艺获得的残余应力与残余应力场，喷丸强化后材料的表面残余应力  $\sigma_r$  处于  $- 714 \sim - 1050\text{MPa}$  范围，而且在次表面层残余应力随着深度的增加而增大，在距表面一定距离处存在一个最大值  $\sigma_{\max}$ ，过此处后残余应力随着深度的增加而逐渐减小，最大残余应力  $\sigma_{\max}$  处于  $- 1200 \sim - 1510\text{MPa}$  范围，此处的深度为  $28 \sim 70\mu\text{m}$ ，而残余应力场深度约为  $200\mu\text{m}$ 。

由图1可见, 喷丸和未喷丸试样的残余应力场的主要差别在于喷丸强化处理后次表面存在最大残余压应力, 而未喷丸的不存在且残余压应力容易被疲劳应力抵消。未喷丸试样表面残余应力为 $-630\text{MPa}$ , 这是磨加工产生的应力, 其深度一般约为 $30\mu\text{m}$ , 而GH909合金达到 $55\mu\text{m}$ 。

由图2可知喷丸后高温退火处理 $\sigma_r$ 减小, 表面 $\sigma_r$ 由 $-900\text{MPa}$ 减小到 $-500\text{MPa} \sim -700\text{MPa}$ 。这表明经过550℃处理后, 虽然残余应力场发生了松弛, 但松弛程度较小, 仍然存在残余压应力场, 残余压应力仍可抵消一部分作用于材料的外加拉应力。

表面残余压应力可有效抑制疲劳裂纹源在表面萌生, 在交变应力的作用下, 裂纹源只有到表面层最薄弱的地方寻找几率, 一般只能产生在压应力场发生变化的地方, 如产生残余拉应力、有夹杂物、缺陷的地方。裂纹成核后虽然有外力继续作用, 但裂纹的扩展又受到压应力场的阻抑, 难以快速扩展, 要想扩展必须达到 $\sigma_a - \sigma_r - \sigma_f$ , 即交变的外力 $\sigma_a$ 要大于材料本身的抗力 $\sigma_f$ 与残余应力 $\sigma_r$ 之差。由此可见, GH909合金喷丸强化后获得的表面残余压应力和表面层应力场有助于改善该材料的抗疲劳断裂能力。

### 3 结论

(1) GH 909合金喷丸后, 表面可获得较大的残余压应力和表面层存在一定深度的残余压应力场。

(2) 喷丸强化后再经550℃热处理, 残余应力场有所松弛, 但表面层仍能存在有益的残余压应力场。

#### 参考文献

- [1] 高玉魁. 化学热处理对结构钢件表象疲劳极限影响的量化研究 [D]. 秦皇岛: 燕山大学硕士论文, 2000.
- [2] 刘锁. 金属材料的疲劳性能与喷丸强化工艺 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1977.
- [3] 姚枚, 王声平, 李金魁. 表面强化件的疲劳强度分析及金属的内部疲劳极限 [J]. 金属学报, 1993, 29 (11): A511.
- [4] 何崇智, 郝秀英, 孟庆恩等. X射线衍射实验技术 [M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1988: 364.
- [5] 航空材料喷丸强化手册 [M]. 航空航天部系统工程, 1988: 11

收稿日期: 2001-04-04; 修订日期: 2002-01-04

作者简介: 高玉魁 (1973-), 男, 助工, 从事金属材料或构件表面形变强化工艺、残余应力场的测定和模拟及疲劳裂纹萌生和扩展的微细观过程理论研究, 联系地址: 北京 81 信箱 5 分箱 (100095)。

(上接第 39 页)

作条件允许下, 尽可能采用较高的压力, 或者增加喷水的次数。

由于高压喷水脱芯是一种辅助方法, 其清除残芯效果与叶片前期脱芯的情况密切相关。从表1可以看到, 1号叶片和2号叶片在相同压力下喷水处理。结果1号叶片完全脱净的喷水次数比2号叶片少, 这可能是由于1号叶片在化学脱芯时温度和压力较高, 时间较长, 因此前期的型芯脱除和破坏较大, 有利于喷水脱芯。所以, 高压喷水处理前叶片的“前提条件”也是十分重要的。

综上所述, 高压喷水脱芯效果取决于该设备的作业参数, 尤其是喷水压力, 并取决于叶片前一工序即化学腐蚀脱芯的程度。

### 3 结论

(1) 在原有的化学腐蚀脱芯方法的基础上, 再采用专用的高压喷水设备进行处理, 可以有效地脱除内腔复杂的空心涡轮叶片内通道中的残芯。

(2) 喷水压力越大, 效果越好。次数越多, 脱芯程度越干净。

(3) 高压喷水脱芯的喷水压力大小与化学腐蚀脱芯程度密切相关。

#### 参考文献

- [1] 马德文. XD-1 定向空心叶片用陶瓷型芯 [J]. 航空制造工程, 1984, 2: 11.

收稿日期: 2001-03-22; 修订日期: 2001-11-13

作者简介: 顾国红 (1966-), 男, 工程师, 联系地址: 北京 81 信箱 1 分箱 (100095)。

\* \* \* \* \*

### 征文通知

为总结交流近两年来材料技术研究及其工程化应用成果, 并为“十五”发展打好基础, 中国航空学会材料工程专业分会定于2002年11月在广东珠海(航展期间)召开“第六届先进材料技术研讨会”。

征文范围: 1. 金属材料; 2. 非金属材料; 3. 新型材料; 4. 先进工艺技术; 5. 先进测试技术。

论文请寄: 北京 81 信箱 54 分箱 郑运荣 阮中慈  
邮编: 100095; 电话: (010) 62458039

2002年5月30日截稿, 论文格式参考《材料工程》杂志, 会前由《材料工程》杂志以增刊形式出版论文集。