

喷丸强化对 A ISI 420 不锈钢固体粒子冲蚀行为的影响

奚运涛^{1,2}, 刘道新¹, 韩 栋¹

(1 西北工业大学 航空学院, 西安 710072; 2 中国石油长庆油田分公司油气工艺研究院, 西安 710021)

摘要: 研究了喷丸强化 (SP) 对 A ISI 420 马氏体不锈钢抗固体粒子冲蚀 (SPE) 行为的影响, 探讨了喷丸引起的表面残余压应力, 表面粗糙度增大和表面加工硬化等三因素对 SPE 抗力的作用机制。结果表明: SP 处理对 A ISI 420 不锈钢在 30° 攻角下的 SPE 抗力无明显影响, 但却降低了该钢在 90° 攻角下的 SPE 抗力。SP 处理后进行表面抛光, 则使该钢在两种攻角下的 SPE 抗力均得以提高。SP 三因素对 SPE 抗力的作用机制主要有: 表面粗糙化增大了试样表面对冲蚀粒子的有效暴露面积, 因而降低了不锈钢在两种攻角下的 SPE 抗力; 表面残余压应力能够有效抑制疲劳裂纹萌生和早期扩展, 因而能有效提高 A ISI 420 不锈钢的 SPE 抗力, 特别是对 90° 垂直冲击条件下 SPE 抗力的提高作用更为明显; 表面加工硬化提高了材料表面的微犁削抗力, 因而对提高 A ISI 420 钢在 30° 攻角下的 SPE 抗力有贡献, 但是表面加工硬化层的抗多冲疲劳性能差, 却不利于 A ISI 420 钢在 90° 攻角下抗 SPE 性能的改善。

关键词: 喷丸强化; 固体粒子冲蚀; 不锈钢; 加工硬化; 表面粗糙度; 残余压应力

中图分类号: TG178

文献标识码: A

文章编号: 1005-5053(2008)06-0027-05

A ISI 420 马氏体不锈钢由于具有良好的机械性能和较好的耐蚀性能而成为动力装置中叶片 (如航空发动机叶片、透平风机叶片) 零部件的重要材料。然而, 由于不锈钢硬度低、耐磨性能差, 叶片运转时很容易受到气流中的粉尘、砂砾或工业介质的固体粒子冲蚀 (Solid Particle Erosion, SPE) 损伤。影响材料 SPE 行为的因素较多, 并且冲蚀机制在小攻角 (或小冲击角度) 下以微切削为主, 在大攻角 (接近垂直冲击) 下则以多冲型疲劳破坏为主, 由此导致典型塑性材料 (如纯金属和合金) 的最大冲蚀破坏出现在 15°~30° 攻角内, 而典型脆性材料 (陶瓷和玻璃) 则出现在 90° 攻角左右, 即大小两种攻角下抗 SPE 所需要的材料表面性能是不一致的, 从而使得难以同时有效地控制金属材料在两种攻角下的冲蚀破坏^[1,2]。因此, 改善不锈钢叶片抗 SPE 性能已成为开发高可靠性、长寿命航空发动机和工业风机等动力装置的研究热点^[3,4]。

喷丸形变强化 (Shot Peening SP) 能够显著提高金属材料的疲劳抗力, 因而在转子叶片表面处理上得到了重要应用^[5]。然而, 很少见关于喷丸强化能

否有效地改善不锈钢等金属材料的抗 SPE 性能的研究报道。SP 处理会导致材料表面产生三种主要变化, 即: 在金属材料表面层引入残余压应力, 造成表面加工硬化, 引起表面粗糙度增大, 此即 SP 三因素^[6]。关于这些因素对固体粒子冲蚀行为的影响和作用机制的研究尚未见开展。基于上述背景, 本文拟探讨喷丸强化因素对 A ISI 420 马氏体不锈钢 SPE 抗力的作用规律和机制, 旨在提高叶片零部件的服役性能。

1 试验材料及方法

1.1 试验材料与试样

试验用 A ISI 420 不锈钢的化学成分 (w%) 为: C 0.19, Si 0.28, Mn 0.20, S 0.007, P 0.028, Cr 12.65, Cu 0.11, N 0.12, 余量为 Fe。锻件毛坯热处理工艺为: 860°C × 4h 退火、970°C × 3h 油淬、670°C × 6h 炉冷回火。加工成 $\phi 30\text{mm} \times 10\text{mm}$ 的冲蚀试样。

参照发动机生产实际, 选择了 A ISI 420 不锈钢试样的喷丸工艺参数: 弹丸 S110; 喷丸强度 0.20A; 覆盖率 200%; 喷射角度 90°; 气压 0.15MPa; 喷嘴 130mm; 喷枪速度 60mm/m_s。

1.2 喷丸强化因素的分离方法

喷丸因素分离参考已有研究工作基础^[6]进行:

收稿日期: 2007-10-27; 修订日期: 2008-03-04

作者简介: 奚运涛 (1978—), 男, 博士研究生, (E-mail) sdxyt1978@163.com。

通讯作者: 刘道新, 教授, (E-mail) liudaox@nwpu.edu.cn

(1) SP + P (polished): 用 1000 水砂纸轻微打磨 SP 试样表面, 然后抛光至丸坑基本消失, 用千分尺测量去除表层的厚度, 约为 10 μ m。再用 HNO₃ + HCl 溶液轻微浸蚀, 消除打磨对表层的影响。该处理可以降低 SP 表面的粗糙度 R_a

(2) SP+ A (annealed): 将 SP 试样在 200 $^{\circ}$ C 退火 20h 后用 HNO₃ + HCl 溶液轻微浸蚀, 去除氧化膜的影响。该处理拟消除 SP 试样表面的残余压应力, 并尽可能不影响表面粗糙度 R_a 及加工硬化的作用。

(3) SP+ A + P: 将 SP 试样在 200 $^{\circ}$ C 退火 20h 后再采用抛光和弱腐蚀的方法, 以去除表面残余压应力和粗糙度增大的影响, 只保留 SP 的加工硬化作用。

1.3 冲蚀方法及装置

固体粒子冲蚀试验在自行研制的喷射式粒子冲蚀试验机上进行, 该试验机参照 ASTM-G76-04 标准^[7]设计制造, 其工作原理如图 1 所示。通过一个振动漏斗将磨粒输送到混合腔内的空气流中, 供给量由流量计控制, 通过控制进气压力阀调节气流速度, 气流携带粒子被加速腔加速后经喷嘴冲击到试样表面, 通过旋转试样夹具控制冲击角度。加速腔由内壁光滑、圆度高的 SiC 陶瓷管制成, 长径比大于 25: 1, 以保证气流速度与固体粒子运动速度相当, 采用“双盘法”测量固体颗粒的入射速度^[8]。

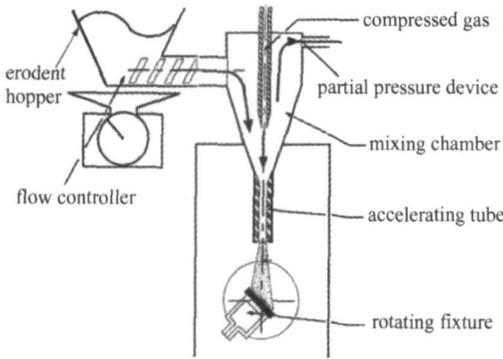


图 1 固体粒子冲蚀装置示意图

Fig 1 Schematic diagram of the sand-blast type of erosion

冲蚀试验在室温下进行, 选用天然刚玉 (Al₂O₃) 作为磨粒 (粒度范围 120~ 160 μ m, 多棱形, HV 为 2000~ 2300kg/mm²), 粒子平均冲击速度 V = 70m/s, 粒子流量为 80 g/min, 喷嘴内径 d = 4mm, 喷嘴到试样的距离为 20mm, 冲击攻角分别为 30 $^{\circ}$ 和 90 $^{\circ}$, 冲蚀时间为 5min。冲蚀前后的试样均须经丙酮超声波清洗, 待干燥后用 SHIMADZU-AUW 220D 型电子分析天平 (精度 0.01 mg) 称量其质量损失。

用 HITACHI S-570 型扫描电子显微镜 (SEM) 对冲蚀后的试样进行形貌观察和分析。试样的表面粗糙度 R_a 由 TAYLOR-HOBSON 表面轮廓仪测定, 表面加工硬化以 X 射线衍射峰半高宽度 H 表示, 残余压应力 σ_r 由 D/max-2200 型 X 射线应力测定仪测定。

2 试验结果与讨论

2.1 喷丸强化因素的分离结果

图 2 对比了 BM (未进行表面处理), SP, SP + P, SP + A, SP + A + P 等五种表面状态试样的残余应力、粗糙度和加工硬化情况。可以看到, 采用上述几种表面处理, 基本上可以将 SP 三因素分离开。

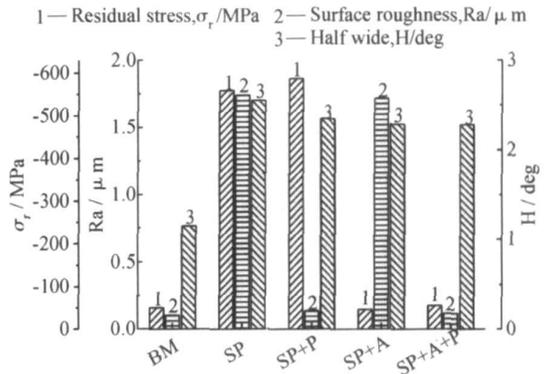


图 2 不同表面处理试样表面残余应力、粗糙度和加工硬化情况比较

Fig 2 Effects of surface treatment on surface roughness, residual stress and half width of XRD profile

2.2 A ISI 420 不锈钢的冲蚀行为与喷丸强化的影响

图 3 所示为不同表面处理状态的 A ISI 420 不锈钢试样在 30 $^{\circ}$ 和 90 $^{\circ}$ 攻角下的冲蚀率测试结果。冲蚀率是冲击到靶体表面的单位质量磨料 (或冲蚀粒子) 所磨蚀掉的靶体 (即被冲蚀物) 材料的质量 (用 E 表示, 单位 mg/g)。图 3 表明, 30 $^{\circ}$ 攻角下试样的冲蚀率明显高于 90 $^{\circ}$ 攻角下的冲蚀率, 这是塑性材料的冲蚀特征。另外, 在 30 $^{\circ}$ 攻角下, 喷丸试样与基材试样的冲蚀率基本一致; 而在 90 $^{\circ}$ 攻角下, 喷丸试样的冲蚀率却略高于基材。将喷丸因素分离后, 冲蚀率也表现出不同程度的变化, 由此说明在不同攻角下喷丸因素对冲蚀行为的影响是不一样的。

图 4 为 A ISI 420 不锈钢基材试样在 30 $^{\circ}$ 和 90 $^{\circ}$ 攻角下的冲蚀形貌。由图 4a 可见 30 $^{\circ}$ 攻角下冲蚀形貌以犁沟和唇片为主, 试样表面有清晰的犁削痕迹和未全脱落的片屑。图 4b 为攻角 90 $^{\circ}$ 时的冲

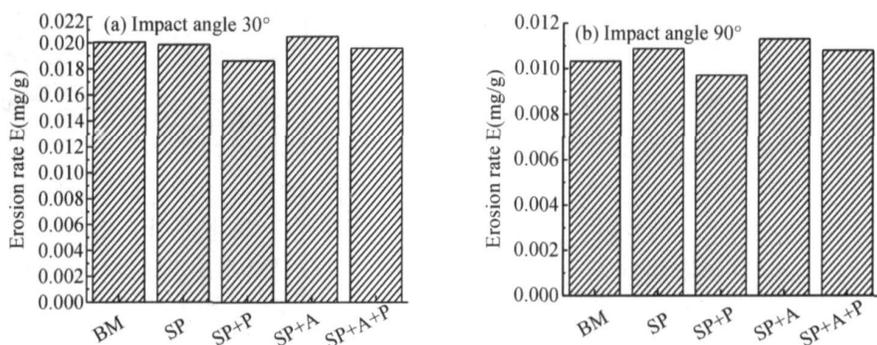


图 3 不同表面处理试样的冲蚀速率对比 (a) 30° 攻角; (b) 90° 攻角

Fig. 3 Erosion weight loss rate of samples using different surface treatment (a) 30°; (b) 90°

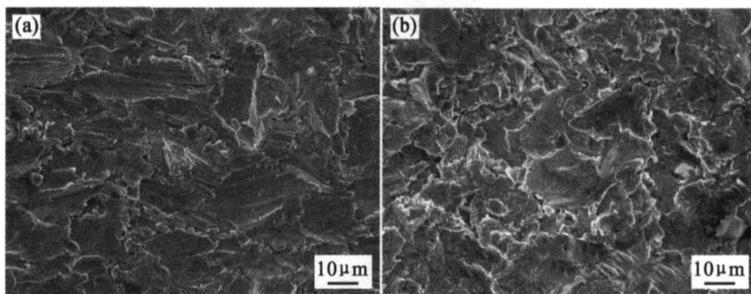


图 4 AISI 420 不锈钢试样固体粒子冲蚀形貌 (a) 30° 攻角 (b) 90° 攻角

Fig. 4 SPE morphology of AISI 420 stainless steel at different impact angles (a) 30° (b) 90°

蚀形貌, 损伤形式为带挤压唇的凹坑, 挤压层层叠交错, 凹坑周围存在有材料的塑性流变及其它变形特征。AISI 420 不锈钢试样在粒子的冲击下产生严重塑性变形后, 在高的应变下断裂, 呈片屑状脱落。

图 5 为 AISI 420 马氏体不锈钢喷丸试样在 30° 和 90° 攻角下冲蚀初期的 SEM 形貌, 其中图 5a 和 c 为二次电子像 (SEI); 图 5b 和 d 分别为图 5a 和 c 对应的背散射电子像 (BES)。由图可以看出在 30° 攻

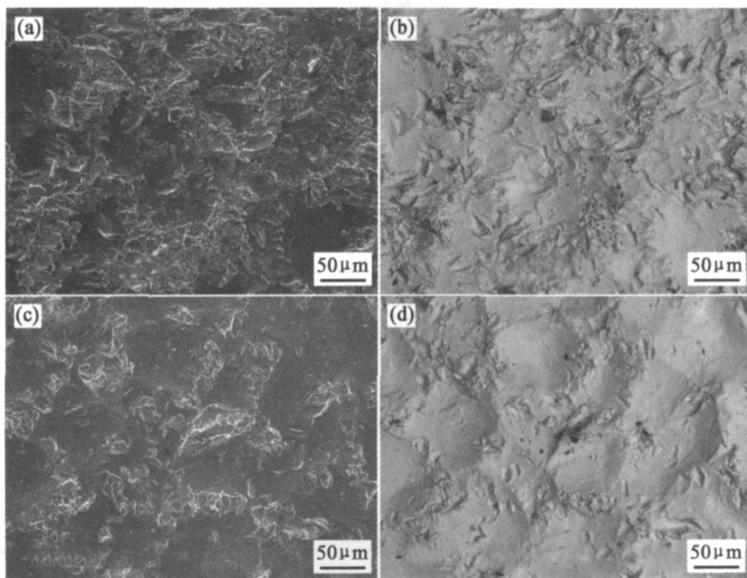


图 5 AISI 420 不锈钢喷丸试样的冲蚀形貌 (a) 30° 攻角的二次电子像;

(b) 30° 攻角的背散射电子像; (c) 90° 攻角的二次电子像; (d) 90° 攻角的背散射电子像

Fig 5 SPE morphology of shot-peened AISI 420 samples at different impact angle

(a) 30° SEI (b) 30° BES (c) 90° SEI (d) 90° BES

角下, 试样的冲蚀抗力较差, 冲蚀痕迹较为明显, 喷丸凹坑的边缘凸起区犁沟较多, 而凹坑内部犁沟少而浅。在 90°攻角下, 试样的冲蚀损伤明显小于 30°攻角, 损伤主要发生在喷丸凹坑的边缘凸起区, 而喷丸凹坑内冲蚀痕迹较轻。

2.3 表面粗糙度 R_a 对冲蚀抗力的作用

比较图 3 中 30°和 90°两种攻角下 SP, SP+P 和 SP+A, SP+A+P 两组试样的冲蚀试验结果可以看到, 喷丸试样抛光处理后由于粗糙度 R_a 的降低, 其冲蚀抗力得到提高。这主要是由于喷丸试样表面存在大量喷丸凹坑和边缘凸起区, 导致粗糙度明显高于抛光试样, 粗糙度的增加使得暴露在冲蚀粒子束下的有效接触面积增加。另外, 由于凸起区所受表层约束较小、塑性变容易和受固体粒子冲击的概率高等原因很容易受到外界粒子的损伤, 造成材料的塑性变形和片状脱离母体, 使试样的冲蚀率增加, 所以 SP 试样表面粗糙度的增大降低了材料的 SPE 抗力。

2.4 残余压应力对冲蚀抗力的作用

从图 3 中 SP, SP+A 和 SP+P, SP+A+P 两组试样的冲蚀试验结果对比可知, 表面残余压应力的引入在大小两种攻角下均可以明显增加试样表面的冲蚀抗力。同时可以看到, 在 90°攻角下, E_{SP+A+P} 较 E_{SP+P} 增大 11.3%, 而 30°攻角下仅增大 5.2%, 即喷丸强化引入的表面残余压应力对大攻角冲蚀抗力的提高作用更为显著。此外, 由图 5(d) 还可看到在 90°攻角下, 喷丸凹坑内由于残余压应力高于边缘凸起区, 冲蚀初期损伤明显低于边缘凸起区。90°攻角下表面残余压应力提高不锈钢 SPE 抗力的作用大于 30°攻角, 其主要原因: 喷丸试样表层一定深度内存在的较高的残余压应力场, 有利于增加裂纹闭合力抑制疲劳裂纹早期扩展^[6,9], 而固体粒子在大攻角下冲击靶材造成冲蚀的破坏机制以低周疲劳为主, 小攻角时则以犁削为主, 因此, 喷丸强化引入的表面残余压应力更能够有效地增加大攻角下固体粒子的冲蚀孕育期, 提高该条件下的固体粒子冲蚀抗力。

2.5 加工硬化对冲蚀抗力的作用

比较图 3 中 BM 和 SP+A+P 两种试样的冲蚀试验结果可知, 在 30°攻角下加工硬化因素稍微降低了试样的冲蚀率, 而在 90°攻角下加工硬化因素却使试样的冲蚀率稍微增大。由于 SPE 在 30°攻角下冲蚀机制以微切削为主, 加工硬化的存在提高了试样的表面硬度^[10], 从而增加了微切削抗力, 使得冲蚀率有所降低。然而, 在 90°攻角下冲蚀机制以

多冲型疲劳破坏为主, 并且属于低周应变疲劳破坏, 裂纹扩展为控制过程, 加工硬化虽然有利于提高裂纹萌生抗力, 但是却会降低裂纹的扩展阻力^[11], 从而使试样的冲蚀率稍微增大。

由上述分析看到, 喷丸强化引入的表面残余压应力对 90°攻角下的 SPE 抗力有较明显的提高作用; 喷丸强化造成的表面加工硬化则对 30°攻角下的 SPE 抗力有提高作用; 喷丸强化引起的表面粗糙度增大对 30°攻角和 90°攻角下的固体粒子冲蚀抗力均是不利的。因此喷丸强化对 A ISI 420 不锈钢在 30°攻角下的 SPE 抗力虽无明显影响, 但对 90°攻角下的 SPE 抗力却有所降低。此外, 喷丸处理后进行表面抛光, 则使 A ISI 420 不锈钢在两种攻角下的 SPE 抗力均得以提高。

3 结论

(1) SP 对 30°攻角下 A ISI 420 不锈钢的 SPE 抗力无明显改变, 但在 90°攻角下反而有所降低。SP 后进行抛光则使该钢在两种攻角下的 SPE 抗力均得以提高。

(2) SP 造成的表面粗糙度增大, 提高了表面被冲蚀的概率, 因而降低了两种攻角下 A ISI 420 马氏体不锈钢的 SPE 抗力。SP 引入的表面残余压应力能够有效地抑制裂纹的萌生与早期扩展, 因而对提高 A ISI 420 不锈钢在 90°攻角下的 SPE 抗力起到了主要作用。SP 导致的表面加工硬化, 增加了表面微切削抗力, 因而对提高 A ISI 420 不锈钢在 30°攻角下的 SPE 抗力起到了主要作用; 但在 90°攻角下由于表面加工硬化降低了裂纹扩展阻力, 使得该钢的 SPE 抗力有所下降。

参考文献:

- [1] KULU Priit, HUSSA NOVA Irina, VENTHAL Renno. Solid particle erosion of thermal sprayed coatings [J]. *Wear*, 2005, 258: 488-496.
- [2] 陶春虎, 钟培道, 王仁智, 等. 航空发动机转动部件的失效与预防 [M]. 国防出版社, 北京: 2001. 2: 35-101.
- [3] 吴小梅, 李伟光, 陆峰. 固体颗粒冲蚀对钛合金 Zn 膜层抗冲蚀性能的影响 [J]. *航空材料学报*, 2006, 26(6): 26-29.
- [4] GACHON Y, IENNY P, FORNER A, et al. Erosion by solid particles of W-N multilayer coatings obtained by PVD process [J]. *Surface and Coatings Technology*, 1999, 113: 140-148.

- [5] 刘道新, 陈华, 何家文, 等. 离子渗氮与喷丸强化复合改进钛合金抗微动损伤性能 [J]. 材料热处理学报, 2001, 22(3): 49- 54
- [6] 张晓化, 刘道新, 高广睿. 喷丸强化因素对 T 811 合金高温微动疲劳抗力的影响 [J]. 稀有金属材料与工程, 2005, 34(12): 1985- 1989
- [7] ASTM G 76-04. Standard test method for conducting erosion tests by solid particle impingement using gas jets [S].
- [8] YANG Q, SEO D Y, ZHAO L R, *et al*. Erosion resistance performance of magnetron sputtering deposited TiN coating [J]. Surface and Coatings Technology, 2004, 188-189, 168- 173.
- [9] SONG P S, WEN C C. Crack closure and crack growth behaviour in shot peened fatigued specimen [J]. Engineering Fracture Mechanics, 1999, 63: 295- 304
- [10] 高玉魁, 殷源发, 李向斌. 表面完整性对马氏体不锈钢疲劳性能的影响 [J]. 金属热处理, 2002, 8(22): 30- 32
- [11] FATHALLAH R, LAAMOURIA, SIDHOM H, *et al*. High cycle fatigue behavior prediction of shot-peened parts [J]. International Journal of Fatigue, 2004, 26: 1053- 1067.

Effect of Shot Peening on Solid Particle Erosion Behavior of A ISI420 Stainless Steel

XI Yuntao^{1, 2}, LU Daoxin¹, HAN Dong¹

(1. Aviation College, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China; 2. Oil and Gas Technology Research Institute, Petro China Changqing Oilfield Company, Xi'an 710021, China)

Abstract The aim of this paper is to study the effect of shot peening (SP) on solid particle erosion (SPE) behavior of A ISI420 stainless steel. The mechanisms of three factors of SP, i.e., compressive residual stress (CRS), surface roughness (SR) and work-hardening on SPE resistance were investigated. The results show that the SPE resistance of the shot peened specimen is decreased at 90° impingement angle, while it is hardly affected at 30° impingement angle. However, with polishing treatment to the shot peened specimen, the SPE resistance can be improved obviously at both impingement angles. These results can be explained by follow. The high SR increases the effective area under the bunch of solid particles, so it decreases the SPE resistance of the shot peened specimen. The CRS induced by SP can increase crack closure and retard crack propagation, so it improves effectively the SPE resistance, especially at 90° impingement angle. The work-hardening improves obviously the SPE resistance of the shot peened specimen at 30° impingement angle because the micro-cutting resistance of the surface is increased. However, the work-hardening decreases the resistance of SPE at 90° impingement angle due to the poor multi-in-pact fatigue property of the hardened surface.

Key words shot peening; solid particle erosion; stainless steel; work-hardening; surface roughness; compressive residual stress