

A-100 钢开缝衬套孔挤压强化残余应力场

王 强¹, 陈雪梅², 张文光², 王 欣¹

(1. 北京航空材料研究院, 北京 100095; 2. 成都飞机工业(集团)有限责任公司, 成都 610092)

摘 要: 为研究 A-100 钢开缝衬套挤压工艺, 提高孔的抗疲劳性能, 使用 X 射线衍射方法和中间开孔的板状试样, 研究开缝衬套挤压过盈量、挤后铰削量和保温温度对残余压应力场的影响。研究表明, 由于孔受挤压发生弹塑性变形而引入切向残余压应力(σ_h), σ_h 值随开缝衬套挤压过盈量(I_{ce})增加而显著增大, 当 I_{ce} 为 0.4 mm 时, σ_h 值可达 -500 MPa 以上。未铰削的挤压试样, 孔边缘残余压应力最大, 可达到 -680 MPa, 随着铰削量(R)的增大, σ_h 降低, 而当铰削量达到 0.7 mm 时, σ_h 仅剩余 28%。保温 10 h 后, 各点 σ_h 值均明显降低, 350 °C 下孔边缘 σ_h 仅存 14%。

关键词: 开缝衬套挤压; 残余应力; 过盈量; 应力松弛

中图分类号: Q343.6

文献标识码: A

文章编号: 1007-9289(2011)05-0064-04

Residual Stress Induced by Cold Expansion With Sleeve Process of A-100 Steel

Wang Qiang¹, CHEN Xue-mei², ZHANG Wen-guang², WANG Xin¹

(1. Beijing Institute of Aeronautical Material, Beijing 100095; 2. Chengdu Aircraft Industry Corporation, Chengdu 610092)

Abstract: In order to investigate cold expansion with sleeve process (CESP) of A-100 steel and improve the fatigue property of hole, the sample with a hole was prepared, on which the residual stress inducing by CESP was studied by XRD. The influence of interference value of CESP, the amount of material removal and holding temperature on the distribution of residual stress was studied. The results showed that, as the mandrel with sleeve removed from the hole, surrounding of hole generated elastically and plastically deformation, this resulted in a zone around the hole containing residual compressive hoop stress(σ_h). With the increasing of interference value (I_{ce}) of CESP, σ_h became higher observably. When I_{ce} reach 0.4 mm, σ_h could reach more than -500 MPa. It had the highest σ_h on the edge of hole without material removal, the value was -680 MPa. In contrast, σ_h could remain only 28% when the amount of material removal was 0.7 mm. σ_h would have a significant reduction after both 200 °C and 350 °C holding for 10 hours. When the temperature was 350 °C, σ_h could remain only 14%.

Key words: CESP; residual stress; interference value; relaxing of stress

0 引 言

由于 A-100 钢具有超高强度、高的断裂韧度和很好的塑性和抗应力腐蚀开裂等优良性能, 而在国内外得到了广泛的关注并倍受设计师和工程师的青睐, 已在航空工业广泛用于制造飞机重要承力构件, 如飞机起落架主承力构件(外筒、活塞杆和轮轴)、发动机轴和螺栓等。

开缝衬套冷挤压技术的原理是将开缝衬套装在一根具有过盈量的锥形挤压棒上, 使挤压芯棒强行通过零件内孔, 挤压力通过开缝衬套均匀

传递到零件的内孔壁上, 孔壁发生弹塑性变形, 在一定深度内产生残余压应力。残余压应力降低了构件工作时所受的拉应力, 延缓了初始裂纹的产生和裂纹的扩展速度, 从而提高了构件的使用寿命^[1-5]。

1 试验材料与方法

试验材料为超高强度 A-100 钢锻件, 尺寸为 120 mm(宽) × 30 mm(厚), 其试样制备过程分为: 预备热处理、粗加工、最终热处理和精加工。其中预备热处理制度为: 900 °C 保温 1~3h, 空冷, 680 °C 保温 16h, 空冷; 试样粗加工到一定尺寸; 最终热处理制度为: 885 °C 保温 1.5 h, 油冷,

-73 ℃保温 1.5 h, 空气回到室温, 482 ℃保温 5 h, 空冷, 482 ℃保温 1 h, 空冷; 试样外表面磨削加工, 小孔铰削加工到最终尺寸。最终热处理状态下 A-100 钢材料室温拉伸性能如表 1 所示。

表 1 A-100 钢的拉伸性能

Table 1 Tensile properties of A-100 steel

拉伸强度	屈服强度	伸长率	断面收缩率
σ_b /MPa	$\sigma_{0.2}$ /MPa	δ_5 /%	ψ /%
1970	1650	15	69.5

文献关于喷丸强化残余应力场研究的报道较多, 使用的方法主要是 X 射线衍射测定表面残余应力值, 结合电解抛光逐层去除, 测定残余应力值沿深度方向分布。但是, X 射线无法直接照射到小孔表面, 且孔壁表面曲率较大, 影响残余应力测试精度, 所以文中采用测定试样表面距孔边不同距离位置处的残余应力值, 为尽量避免机械加工对表面残余应力测试结果的影响, 在测试前对试样表面进行电解抛光处理。文中采用的 X 光束斑尺寸直径为 1.0 mm, CrK α 辐射对 Fe 的穿透深度为 5.4 μ m, 如图 1 所示, 根据 X 射线残余应力测试原理, 所得结果为 $\phi 1$ mm \times 5.4 μ m 圆柱体内的平均残余应力值, 如图 2 所示。

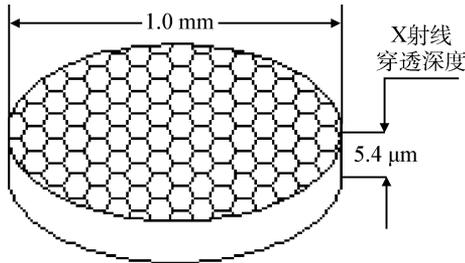


图 1 X 射线辐射区域示意图

Fig. 1 Radiation area sketch of X ray

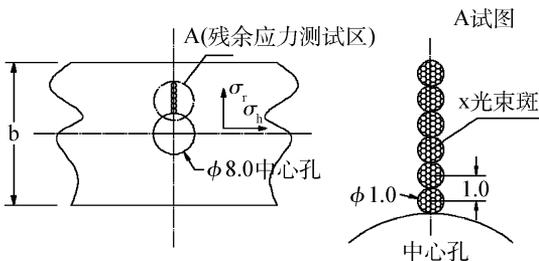


图 2 残余应力测试点分布图

Fig. 2 Test points distribution of residual stress

试样是中间开孔为 $\phi 8$ mm, 孔边径比 $\delta = 1$, 厚度为 4 mm 的板状试样。使用 FTI 孔挤压强化设备对孔进行开缝衬套挤压处理。对试样表面进行电解抛光处理, 电解液为高氯酸和甲醇 (其体积分数比为 1 : 4); 电解电压为 8 V; 电流 4 A, 电解时间 2 min; 使用 X-3000 X 射线衍射应力测定仪, 测定电解抛光后试样表面残余应力, 测试的条件为: CrK α 靶材, (211) 衍射晶面, 交相关定峰法, 准直管直径为 $\phi 1.0$ mm, 管电流 6.67 mA, 电压 30 kV。

2 试验结果与讨论

2.1 挤压过盈量对残余应力的影响

表 2 和表 3 分别为不同挤压过盈量下的切向残余应力 (σ_h) 和径向残余应力 (σ_r), 图 3 为不同挤压过盈量试样的切向残余应力分布。其中未挤压强化试样残余应力绝对值小于 100 MPa, 开缝衬套挤压后, σ_h 值较大, 过盈量为 0.4 mm 时, σ_h 值可达 -500 MPa 以上, 最大 σ_h 值往往位于被挤压孔壁的次表层, 而过盈量越大, σ_h 值越大。开缝衬套挤压对孔的 σ_r 值影响不大。

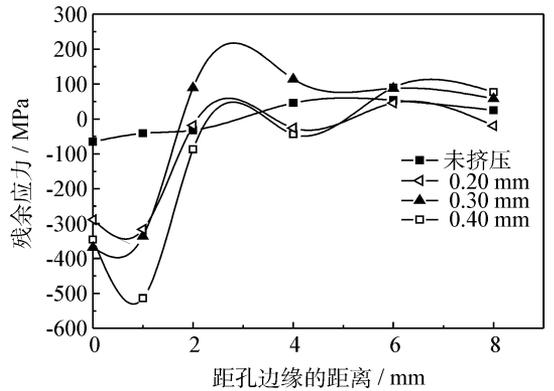


图 3 不同挤压过盈量的切向残余应力分布

Fig. 3 Residual compressive radius stress distribution of different interference value

表 2 开缝衬套挤压切向残余应力 (σ_h)
Table 2 Residual compressive hoop stress (σ_h)

过盈量/mm	边缘残余应力 /MPa	最大残余应力 /MPa
未强化	-65.5	-65.5
0.20	-288.6	-316.4
0.30	-368.4	-368.4
0.40	-345.6	-513.8

开缝衬套挤压过盈量定义为:芯棒直径+衬套厚度 $\times 2$ -孔径。在开缝衬套挤压过程中,当具有一定过盈量挤压工具(芯棒加衬套)强行进入小孔,孔局部产生弹塑性变形,孔径膨胀至与芯棒加衬套尺寸相当;当挤压工具去除后,孔壁弹性变形恢复,造成在一定深度内引入切向残余压应力场,其根本原因是在不同深度处弹塑性变形的不均匀性,因此随着挤压过盈量的增加,残余压应力值将随之增大。

表3 开缝衬套挤压径向残余压应力 (σ_r)

Table 3 Residual compressive radius stress induced by CESP (σ_r)

过盈量/mm	孔边缘残余应力 /MPa	最大残余压应力值 /MPa
未强化	-75.5	-82.1
0.20	-53.2	-109.1
0.30	-85.6	-85.4
0.40	-124.9	-124.9

由图4可知,由于 σ_h 的引入,当孔受到外加轴向往复循环载荷时,有效的应力将显著降低,此时材料发生累积疲劳损伤所需的外加载荷增大,或者是所需时间延长,因此挤压引入的残余压应力场能够有效提高孔的疲劳强度,延长其疲劳寿命。

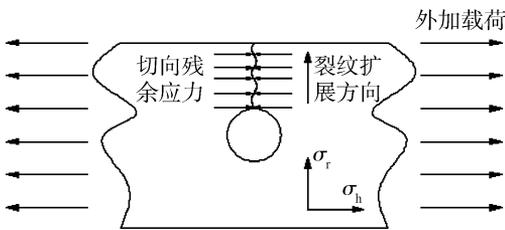


图4 残余应力对疲劳性能影响示意图

Fig. 4 Sketch of the influence of residual stress on fatigue property

2.2 挤后铰削量对残余应力的影响

与常规的芯棒挤压技术不同,由于挤压过程中,材料发生塑性流动,进入衬套上的缝隙,因此开缝衬套挤压过后,往往会在孔壁上残留一个凸台,考虑到装配的需要和凸台对疲劳性能的负面影响,挤压后需要对孔壁进行铰削,在此过程中,残余应力场将进行重构。表4和图5为挤压后

不同孔壁铰削去除量下的残余应力场分布,对于未铰削的试样,孔边缘残余压应力最大,可达到-686 MPa,最大残余压应力位于孔边缘位置。随着铰削量的增大,残余压应力值降低,当单边铰削量为0.3 mm时,最大残余应力剩余50%,而当铰削量达到0.7 mm时,残余压应力仅剩余28%。对孔壁进行铰削后,由于高压应力层部分被去除,所以孔边缘和表层残余压应力值降低,并且由于铰削过程中孔壁表层发生塑性变形,挤压引入的残余压应力部分松弛,所以最大残余压应力位置对位于次表层。

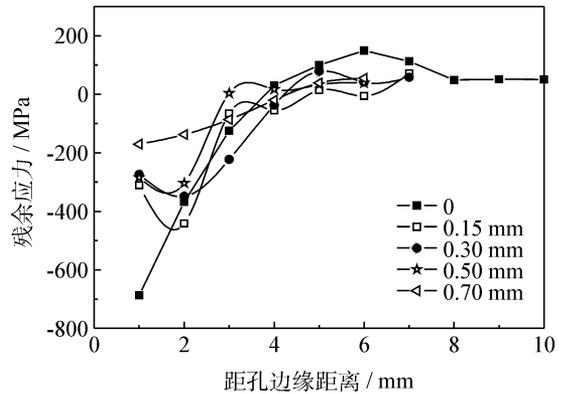


图5 不同铰削量的切向残余应力分布

Fig. 5 Residual compressive radius stress distribution of different material removal

表4 开缝衬套挤压切向残余压应力 (σ_h)

Table 4 Residual compressive hoop stress induced by CESP (σ_h)

单边铰削量/mm	孔边缘残余应力 /MPa	最大残余压应力值 /MPa
0	-686.6	-686.6
0.15	-310.8	-441.7
0.30	-274.2	-349.1
0.50	-284.5	-303.8
0.70	-170.6	-170.4

2.3 挤压残余应力的高温松弛行为

残余压应力对改善材料疲劳性能非常有效,但其在温度的作用下,会发生松弛。温度对应力松弛速率的影响依赖于材料的热强性,即依赖于金属材料晶粒内和晶界上的原子扩散、位错运动和晶体滑移的难易程度。温度处于金属原子扩散速率很低的温度范围内或在远低于金属材料

再结晶温度时,应力松弛的最大速率发生在保温的最初阶段,与温度相比,应力松弛的时间依赖性较低^[6]。保温过程是一种热力学过程,通过材料局部区域塑性流变而使能量降低。由于高应力区的能量高,加热后其能量降低即应力降低的幅度就越明显,最终使材料整体残余应力降低并趋于均匀化。从表 5 和图 6 不难看出,保温 10 h 后,残余压应力值均显著降低,特别是表面残余应力 350 ℃ 下仅存 14%,200 ℃ 下可保留 65%,可见 200~350 ℃ 是 A-100 钢的应力松弛门槛温度值,低于此温度,则温度对残余应力松弛作用较弱,高于此温度则可视为残余应力松弛。

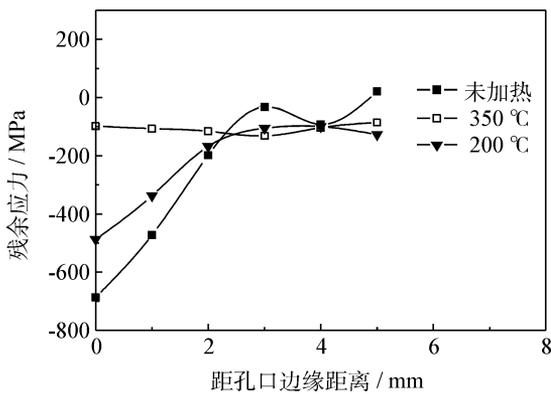


图 6 不同保温温度下的切向残余应力分布

Fig. 6 Residual compressive radius stress distribution of different holding temperature

表 5 保温 10 h 后挤压切向残余压应力的松弛

Table 5 Relaxation of residual stress after holding 10 hours

温度/℃	孔边缘残余应力 /MPa	最大残余压应力 /MPa
室温	-686.6	-686.6
200	-440.1	-440.1
350	-98.5	-182.3

3 结 论

(1) 开缝衬套挤压后,引入较大的 σ_h ,当过盈量为 0.4 mm 时, σ_h 值可达 -500 MPa 以上,而开缝衬套挤压对孔的 σ_r 值影响不大。

(2) 开缝衬套挤压强化后,残余压应力值随铰削量增大而减小,当单边铰削量为 0.3 mm 时,最大残余应力剩余 50%,而当铰削量达到 0.7 mm 时,残余压应力仅剩余 28%。

(3) 350 ℃ 保温 10 h 后,残余压应力值释放

80%以上,保温温度低于 200 ℃ 时,残余应力释放不明显。

参 考 文 献

[1] 米谷茂. 残余应力的产生和对策[M]. 朱荆璞,邵会孟译. 北京:机械工业出版社,1983.

[2] Chakherlou N, Vogwell L, A novel method of cold expansion which creates near-uniform compressive tangential residual stress around a fastener hole[J]. Fatigue and Fracture of Engineering Materials, 2004,27(5): 343-351.

[3] Rufin A C. Extending the fatigue life of aircraft engine components by hole cold expansion technology [J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 1993, 115(1):7-15.

[4] O'Brien E W. Beneficial residual stress from the cold expansion of large holes in thick light alloy plate. The Journal of Strain Analysis for Engineering Design, 2000, 35(4):261-276.

[5] 高玉魁. 孔挤压强化对 23Co14Ni12Cr3MoE 钢疲劳性能的影响[J]. 金属热处理,2007, 32(11): 34-36.

[6] 高玉魁. TC18 超高强度钛合金喷丸残余压应力场的研究[J]. 稀有金属材料与工程,2004, 33(7): 1209-1212.

作者地址:北京市 81 信箱 5 分箱 100095
北京航空材料研究院
Tel: (010) 62496450
E-mail: akqiangwang@yahoo.com.cn

• 学术动态 •

中国机械工程学会第十次全国会员代表大会将于 11 月在武汉召开

2011 年 11 月 15~16 日,中国机械工程学会第十次全国会员代表大会将在湖北武汉召开。

会议将围绕审议第九届理事会工作报告、选举第十届理事会理事、表彰奖励工作成果和先进个人等有关事宜展开。于 15 日在华中科技大学举行第十次全国会员代表大会;16 日在洪山礼堂召开 2011 年中国机械工程学会年会主旨报告会及颁奖仪式。

(陈茜 供稿)