

强化研磨喷射压力对轴承表面残余应力的影响

陶建华,黎达成,张杰,吴庭筠,刘晓初

广州大学

摘要: 为研究强化研磨加工与轴承工件强度之间的关系,首先从理论上分析表面残余压应力对轴承工件裂纹扩展速率的影响,并通过实验验证强化研磨对提高轴承表面残余应力具有显著效果。结果表明,在保证工件粗糙度的情况下,要提高轴承表面残余应力,在强化研磨加工中喷射压力最好控制在 0.4-0.6MPa。

关键词: 强化研磨;轴承;套圈;残余应力;裂纹

中图分类号: TG580.692;TH133

文献标志码: A

Effect of Jet Pressure on Bearings Surface Residual Stress of Workpiece in Strengthening and Polishing Process

Tao Jianhua, Li Dacheng, Zhang Jie, Wu Tingjun, Liu Xiaochu

Abstract: In order to discuss the relationship between strengthening and polishing process and the surface residual stress of bearings, this paper first analyzes the effect upon the bearings crack growth rate on the surface residual compressive stress theoretically. Through the experimental verification, strengthening and polishing process to improve the surface residual stress has a significant effect. The results show that, under the conditions that can ensure the bearings roughness, in order to improve the surface residual stress, the injection pressure is preferably controlled at 0.4-0.6MPa in the strengthening and polishing process.

Keywords: strengthening and polishing; bearing; rings; residual stress; crack

1 引言

强化研磨技术是一种集强化塑性加工和研磨微切削为一体的金属表面冷加工方法^[1],可实现金属材料表面强化、抗疲劳、抗腐蚀、抗磨损等多种功能,对提高零件疲劳寿命具有显著的效果。其工作原理与喷丸中的湿喷砂相类似,如图 1 所示,使用压缩机压缩空气提供动力,将高强度钢丸和研磨液高速喷射到工件表面,冲击工件实现强化效果。工件表层

在喷射下产生塑性变形形成强化层,同时产生残余压应力提高工件强度。若研磨液中加入适量钢砂,钢砂在高压喷射下与工件表面发生横向切削力,还可改善工件表面粗糙度^[2]。

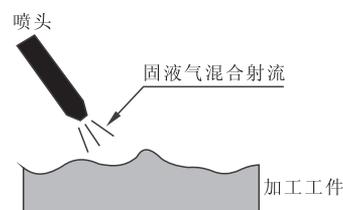


图 1 强化研磨物理模型

强化研磨是一种复合工件加工技术,本文旨在对理论上分析参与压应力对工件强度的影响,同时

基金项目: 国家自然科学基金“基于可控强化研磨加工的工业机器人轴承套圈设计与制造基础研究”(U1601204)

收稿日期: 2017年5月

[12] 施剑林. 固相烧结——I 气孔显微结构模型及其热力学稳定性致密化方程[J]. 硅酸盐学报, 1997, 25(5): 499-513.

[13] W D Kingery, M Berg. Study of the initial stages of sintering solids by viscous flow, evaporation condensation and self-diffusion[J]. Journal of Applied Physics, 1955, 26(10): 1205-1212.

[14] Kellet B J, Lange F F. Thermodynamics of densification, part I, sintering of simple particle arrays, equilibrium configuration, pore stability and shrinkage[J]. Journal of the American Ceramic Society, 2010, 72(5): 725-734.

第一作者: 牌君君, 硕士研究生, 齐鲁工业大学机械与汽车工程学院, 250353 济南市

First Author: Pai Junjun, Postgraduate, School of Mechanical and Automotive Engineering, Qilu University of Technology, Jinan 250353, China

通信作者: 方斌, 教授, 齐鲁工业大学机械与汽车工程学院, 250353 济南市

Corresponding Author: Fang Bin, Professor, School of Mechanical and Automotive Engineering, Qilu University of Technology, Jinan 250353, China

从实验上研究强化研磨工艺在不同喷射压力下对轴承套圈表面加工所产生的残余应力的影响。

2 残余应力对工件表面的影响

2.1 工件裂纹与残余压应力分析

金属材料中的一切缺陷,包括微裂纹、小孔及杂质集中的地方、组织松散的地方等都可能成为裂纹的来源和起因,这些能够引起裂纹的缺陷称为裂纹源^[3]。在循环交变载荷情况下,金属工件将以裂纹源为基础开始扩展,从而降低工件疲劳破损寿命。疲劳裂纹扩展速率公式——福尔曼(Forman)公式^[4]为

$$\frac{da}{dN} = \frac{C(\Delta K)^m}{(1-R)K_c - \Delta K} \quad (1)$$

式中, $\frac{da}{dN}$ 为裂纹扩展速率; C 、 m 为材料常数,环境因素、加载频率等隐含在常数中,可由试验数据拟合得到; R 为应力循环特性值, $R = K_{\max}/K_{\min}$; K_c 为材料的断裂韧性; ΔK 为应力强度因子幅值差。其计算公式为

$$\Delta K = K_{\max} - K_{\min} \quad (2)$$

式中, K_{\max} 、 K_{\min} 分别为工件在循环载荷过程中产生裂纹处应力强度因子的最大值和最小值。

依据线弹性裂纹判据,有

$$K = f\sigma \sqrt{\pi a_c} \quad (3)$$

式中, f 为工件几何与裂纹尺寸的函数; σ 为工件在循环载荷下的瞬时应力; a_c 为工件发生断裂时的临界裂纹尺寸。

由此可知,应力强度因子幅值差为

$$\Delta K = f[\sigma_{\max} - \sigma_{\min}] \sqrt{\pi a_c} = f\Delta\sigma \sqrt{\pi a_c}$$

式中,最大应力差 $\Delta\sigma = \sigma_{\max} - \sigma_{\min}$ 。

当工件表面存在残余压应力 σ_r 时,在裂纹尖端处,外加应力差为

$$(\Delta\sigma)_r = (\sigma_{\max} - \sigma_r) - (\sigma_{\min} - \sigma_r) = \Delta\sigma \quad (4)$$

由式(4)可知,应力强度因子幅值差 $(\Delta K)_r = \Delta K$ 。

此时循环载荷强度因子与残余应力强度因子相互作用后,循环特性值为

$$R_r = \frac{K_{\min} - K_r}{K_{\max} - K_r} < \frac{K_{\min}}{K_{\max}} = R \quad (5)$$

此时裂纹扩展速率为

$$\left(\frac{da}{dN}\right)_r = \frac{C(\Delta K_r)^m}{(1-R_r)K_c - \Delta K} < \frac{C(\Delta K)^m}{(1-R)K_c - \Delta K} = \frac{da}{dN} \quad (6)$$

由式(6)可知,工件表面存在残余压应力时,材

料表面的疲劳裂纹扩展速率低于无残余应力的疲劳裂纹扩展速率,疲劳裂纹扩展速率更低,缺口敏感性降低^[5]。故此应用残余压应力可以提升工件强度,从而提升工件使用寿命。

2.2 残余应力测量原理

目前残余应力的测试方法很多,按其是否对工件具有破坏性可分为有损测试和无损测试两类。因为无损测试法不会对工件造成损坏,在工程使用中较为广泛,测试方法主要有 X 射线衍射法、中子衍射法、超声波法、磁性法等。应用 X 射线衍射法对试验工件进行残余应力测试。

X 射线衍射法测量残余应力的基本原理是测量衍射线位移作为原始数据,所测得结果实际上是残余应变,通过胡克定律计算出残余应力^[5]。其基本机理是:当工件在残余应力作用下,晶面间距发生变化,发生布拉格衍射时,产生的衍射峰也发生移动,其移动距离和应力大小相关^[6]。

X 射线衍射法的测试原理是依据 X 射线衍射出的晶面间距 d 的变化和布拉格公式;其中衍射角 2θ 、晶面间距 d 和 X 射线波长 λ 满足布拉格公式

$$2d\sin\theta = n\lambda \quad (7)$$

根据布拉格定律和弹性理论,则可以推导出待测残余应力值为

$$\sigma = K \frac{\partial(2\theta)}{\partial\sin^2\psi} \quad (8)$$

式中, ψ 为晶面方位角; K 为被测材料的应力常数,查表可得 $K = -318\text{MPa}\cdot\text{度}$ 。

实验采用 Rigaku D/MAX-RC 型 X 射线衍射仪,用铜靶作为 X 射线的靶材,测角精度为 0.02° 。测量方法为侧倾固定 ψ 法, ψ 角为 0° 、 45° ,采用式子 $\sin^2\psi$ 计算后,代入式(8)进而得出残余应力值。

3 对轴承表面的强化研磨加工实验

3.1 实验设备及实验条件

实验的基础设备是新型轴承无心强化研磨机,主要由电磁无心夹具、控制系统和高压喷射系统组成。电磁无心夹具采用电磁效应将轴承套圈固定的同时带动套圈旋转,使加工均匀;控制系统采用 PLC 作为控制核心,控制轴承套圈在加工过程中的转速以及加工过程中的喷射压力;高压喷射系统实现强化研磨料的高压喷射。

加工工件为经过热处理和精加工后的角接触球轴承的套圈,材料为 GCr15 轴承钢,外圈的外径直径为 72mm,硬度可达 60-62HRC,其力学性能见表 1。

表1 GCr15 轴承钢机械性能

密度 (kg/m ³)	弹性模量 (GPa)	泊松比	屈服极限 (MPa)	抗拉强度 (MPa)
7850	217	0.3	1744	2352

喷射强化研磨料采用铸钢丸、轴承钢丸、棕刚玉、乙二醇氨溶液、洗洁精和水组成,其配比见表2。

表2 强化研磨料配比

材料	型号(mm)	配比(g)	材料	型号	配比(g)
铸钢丸	φ0.2	200	棕刚玉	80#	200
	φ0.3	400		100#	300
	φ0.5	400		120#	300
轴承钢丸	φ1	200	乙二醇氨溶液		400
	φ2	200	洗洁精		200
	φ3	400	水		600
	φ4	400			

3.2 实验方案

取11个轴承套圈进行强化研磨加工对比,编号分别为0-10,0号工件作为对比样品不进行加工,1-10号工件相应的喷射压力为0.1、0.2、0.3...0.9、1.0MPa,工件加工的其他工艺参数均相同,采用以下参数:套圈工件转速100r/min,喷嘴与套圈表面距离45mm,加工时间5min,喷嘴孔径8mm;然后将1-10号工件在相同环境下进行强化研磨加工;最后将11个工件清洗后进行残余应力测试。

3.3 实验结果与分析

除喷射压力不同外,其他测试条件相同的情况下,得到的每个套圈的轴向残余应力,实验结果见表3,运用MATLAB进行实验结果分析可获取趋势变化图(见图2)。

表3 喷射压力与表面残余压应力对应表

轴承套圈编号	0	1	2	3	4	5
喷射压力(MPa)	0.0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5
残余应力(MPa)	-510	-570	-620	-670	-710	-760
轴承套圈编号	6	7	8	9	10	
喷射压力(MPa)	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0	
残余应力(MPa)	-820	-840	-860	-870	-875	

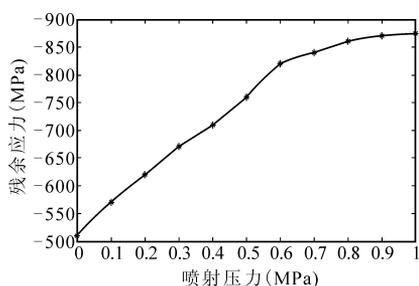


图2 喷射压力与表面残余压应力关系曲线

由表3和图2可知:

(1)在强化研磨加工实验中,随着喷射压力的增

加,轴承套圈表面残余压应力逐渐增大,这是因为随着喷射压力的逐渐增加,喷丸对工件表面冲击所产生的表面硬质层逐渐增厚,产生的弹性形变和塑性形变也相应增加,因此工件表面残余应力呈上升趋势。

(2)当喷射压力增大到0.6MPa后,残余应力并不会随着喷射压力的增加而显著增加,这是由于随着表面硬质层的增加增厚,塑性形变无法保持线性的增长速度,即表面硬质层的增加速度在逐渐变缓。

(3)喷射压力在0.9-1MPa之间时,喷射压力对工件表面的残余应力影响很小,残余应力处于平衡状态。

4 结语

实验结果表明,强化研磨加工技术能够提高轴承套圈表面的残余应力,是一种高效且成本低廉的加工工艺。要提高工件的表面残余应力可采用较大的喷射压力,但是轴承套圈作为一种需要高精度加工的工件,单纯使用大的喷射压力会造成套圈的粗糙度无法达到合格要求。在相同工艺条件下,喷射压力控制在0.4MPa左右时工件粗糙度最小^[1],因此为使套圈满足精度和强化的最佳效果,喷射压力应控制在0.4-0.6MPa之间。

参考文献

- [1]陶建华,包佑文,刘华,等.强化研磨加工中喷射压力对工件表面粗糙度的影响[J].轴承,2013(11):30-33.
- [2]栾伟玲,涂善东.喷丸表面改性技术的研究进展[J].中国机械工程,2005,15:1405-1409.
- [3]陈志斌,刘晓初,李文雄,等.轴承套圈强化研磨表面残余应力试验研究[J].机电工程技术,2013(12):76-78.
- [4]倪向贵,李新亮,王秀喜.疲劳裂纹扩展规律Paris公式的一般修正及应用[J].压力容器,2006(12):8-15,19.
- [5]马昌训,吴运新,郭俊康.X射线衍射法测量铝合金残余应力及误差分析[J].热加工工艺,2010,24:5-8.
- [6]杨帆,费维栋,蒋建清.X射线衍射技术在薄膜残余应力测量中的应用[J].功能材料,2007(11):1745-1749.

第一作者:陶建华,硕士,副教授,广州大学机械与电气工程学院,510006广州市

First Author: Tao Jianhua, Master, Associate Professor, Guangzhou University School of Mechanical and Electrical Engineering, Guangzhou 510006, China

通信作者:刘晓初,博士,教授,广州大学机械与电气工程学院,510006广州市

Corresponding Author: Liu Xiaochu, Doctor, Professor, Guangzhou University School of Mechanical and Electrical Engineering, Guangzhou 510006, China