灰铸铁气缸套中残余应力的 产生和评估

董 陈^{1, 3},吴 优¹,徐远超¹,周宇航¹,马兰兰²,王正军^{1, 3}

(1. 淮阴工学院 机械与材料工程学院,江苏淮安 212003; 2. 淮阴工学院 应用技术学院,江苏淮安 212003;3. 淮阴工学院 江苏省先进制造技术重点实验室,江苏淮安 212003)

摘要:针对灰铸铁气缸套经粗加工、退火工艺后出现内应力不均匀及后续加工变形等问题,研究了其在制造过程中产生残余应力的主要原因,同时利用显微维氏硬度压痕对残余应力值进行了估算。结果表明,缸套内部存在较大的残余拉应力,其值约为70~130 MPa;气缸套的显微组织主要为铁素体+菊花状(B型)石墨,部分石墨有显著的粗化行为。气缸套的平均维氏硬度值约为HV 33。

关键词: 残余应力; 灰铸铁; 气缸套; 显微硬度

气缸套是柴油机主要零件之一,其工作环境非常恶劣。主要表现在其内表面常 常受到高温高压的燃气直接作用,同时还始终与活塞保持高速滑动摩擦,此外其外 表面还要与冷却水接触,因此会有较大的温差从而产生严重的热应力^[1]。

灰铸铁虽然强度较低,但柴油发动机通常对材料的抗拉强度要求不高,因此造价相对较低的灰铸铁通常作为气缸套生产的首选材料^[2-3]。虽然灰铸铁有较好的缺口敏感性、减振性和耐磨性,但由于石墨几乎没有强度,这使得金属基体在承受负荷时有效截面积减少,从而易造成应力集中现象。特别是若材料中存在较大的残余应力,则会加剧应力集中效应,造成工件发生变形甚至产生裂纹^[4-5]。本文针对灰铸铁气缸套经粗加工、退火工艺后出现的内应力不均匀、后续加工变形等问题开展研究,分析其在制造过程中产生残余应力的主要原因,为后续工艺改进提供理论支持。

1 试验材料与方法

试验材料为某厂生产的灰铸铁气缸套,采用中频感应电炉进行熔炼,熔炼温度 为1 500~1 550 ℃,铁液出炉后静置保温10 min,然后通过离心铸造成形。灰铸铁气 缸套的主要化学成分如表1所示。缸套经粗加工、退火工艺后,出现内应力不均匀, 后续加工变形等问题。为分析原因,对缸套变形区域进行取样,线切割制成10 mm ×10 mm×3.8 mm(壁厚)的试样进行显微组织和显微硬度的测试。

表1 试验灰铸铁的主要化学成分 Tab. 1 Main chemical composition of experimental gray cast iron w ₁										
С	Si	Mn	Cr	S	Р					
3.1	2.0	0.85	0.4	<0.1	<0.3					

将试样的横截面用砂纸打磨后进行机械抛光,随后用4%的硝酸酒精液进行腐蚀。使用Axio Imager AIM蔡司显微镜和Quanta 250 FEG场发射环境扫描电子显微镜进行组织观察和化学能谱分析。使用显微维氏硬度计测量不同区域的显微强度值,

作者简介:

董陈(1988-),男,副教 授,博士,主要研究方向 为耐热合金、耐磨钢和高 强钢等金属结构材料。电 话:18311048375,E-mail: dongchen@hyit.edu.cn

中图分类号:TG156.8 文献标识码:A 文章编号:1001-4977(2025) 03-0323-04

基金项目: 国家自然科学基金资助项 目(52104375); 江苏省 高等学校基础科学(自 然科学)研究重大项目 (22KJA460010)。 收稿日期: 2023-11-15收到初稿, 2024-02-27收到修订稿。 324 铸造 FOUNDRY 试验研究

随机选择5个以上不同区域进行硬度测量。

2 试验结果及讨论

2.1 显微硬度

对缸套变形较小和变形较大的区域进行显微硬度 测试,结果如图1所示。从图中可以看出,虽然变形较 小区域和变形较大区域的平均HV硬度值均为33.0,但 这两个区域的硬度分布都不均匀,硬度值波幅均大于 ±10%。相较而言,发生变形更大的区域拥有更严重的 显微硬度不均匀现象,这也反映出该区域的材料内部 有更大的残余应力。



图1 缸套变形较少区域和变形较多区域的随机显微硬度测试结果 Fig. 1 Random microhardness test results for areas with less and more deformations of cylinder liners



(a) 无应力

通过对显微硬度测试后的压痕观察,发现硬度值 较大时,压痕四周的边界较为平直,说明此处残余应 力几乎没有,如图2(a)所示。当硬度值较小时,发 现压痕四周的边界弯曲向内,说明此处有较大的残余 拉应力,如图2(b)所示。如果维氏硬度压痕四周的 边界弯曲向外,则说明此处有较大的残余压应力^[6]。通 过对压痕的观察,本研究中的残余应力均为拉应力。

Jang等人^[7]研究发现,残余拉应力*o*_R和维氏硬度压 痕的面积4满足下列关系:

$$\frac{A_{\text{free}}}{A_{\text{R}}} = \left(1 - \frac{\sigma_{\text{R}}}{H_{\text{N}}}\right) \tag{1}$$

式中: A_{free}为无残余应力状态维氏硬度的压痕面积, A_R 为在拉应力状态维氏硬度的压痕面积。H_N为无残余应 力状态下的纳米压痕硬度值,单位为GPa,和维氏硬度 的换算关系为1 GPa=HV 102.04。由于残余应力对压痕 面积的影响较小,为了方便估算残余应力,将A_{free}和A_R 都按照下列公式进行计算:

$$A = \frac{\overline{D}^2}{2} \tag{2}$$

式中: *D*为维氏硬度压痕对角线*D*₁和*D*₂的平均值。部分 残余应力的计算过程和结果如表2所示。通过表2可以 看出,缸套内部存在较大的残余拉应力,残余应力约 为70~130 MPa。



(b) 拉应力

图2 无应力和拉应力下的维氏硬度压痕 Fig. 2 Vickers hardness indentations under the conditions of stress free and tensile stress

表2 通过维氏硬度压痕计算残余应力及过程参数 Tab. 2 The residual stress and process parameters calculations through Vickers hardness indentations

应力状态	$D_1/\mu m$	$D_2/\mu m$	$\overline{D}/\mu m$	$A_{\rm free}/A_{\rm R}$	HV	$\sigma_{\rm R}/{ m MPa}$	
无应力压痕	64.02	69.42	66.72	1	41.7	0	
拉应力压痕1	78.87	82.92	80.895	0.680	28.3	130.67	
拉应力压痕2	73.69	73.02	73.355	0.827	34.5	70.58	
拉应力压痕3	74.14	74.82	74.48	0.802	33.4	80.72	
拉应力压痕4	74.37	78.87	76.62	0.758	31.6	98.78	

2.2 显微组织

采用金相显微镜和扫描电子显微镜拍摄的缸套截 面显微组织如图3和图4所示,可以发现图中的黑色线 条为片状石墨,其他部分为铁素体组织。石墨的形态 为典型的菊花状(B型)石墨,有些地方还出现了枝晶 片状(E型)石墨,石墨的形态对铸铁的力学性能有显 著的影响。传统理论认为A型石墨最好,B型石墨应避 免,不允许有E型石墨^[8]。E型石墨排列的方向性很强, 在较小的外力作用下,铸铁有可能沿石墨排列方向呈 带状脆断。石墨的不均匀分布会增加铸件在凝固过程 中的应力集中,容易产生热裂和冷裂等缺陷^[9]。



图3 灰铸铁气缸套的光学显微组织 Fig. 3 Optical microstructure of the gray cast iron cylinder liner

图5显示了缸套截面的能谱面扫描分析结果,可以 清晰地分辨出富C的石墨组织形态。图5(a)中左下处 可观察到石墨片连接成"几"字形状,且发生明显粗 化。此外在石墨中检测到有O元素的富集,如图5(c)



图4 灰铸铁气缸套的扫描电镜图 Fig. 4 SEM photo of the gray cast iron cylinder liner

所示。说明这些石墨处由于缝隙的产生,使氧原子容 易进入并发生氧化。

片状石墨对铸铁有割裂作用,石墨的形态和分布 情况对灰铸铁的力学性能具有重要影响^[10]。缸套铸件 凝固过程温度场分布不均匀等原因会导致凝固组织中 石墨和氧化物的分布不均匀,使金属基体各区域在机 械加工时承载的应力分布不均匀,从而使各区域的金 属基体发生不均匀塑性变形,因而产生较大的残余应 力。工件在粗加工阶段是在缸套的外表面进行加工, 外表面产生局部变形和温度升高,形成机械应力和热 应力。待加工完成后工件冷却至室温,缸套表面体积 收缩从而使缸套芯部产生残余拉应力,同时缸套表面 由于发生塑性变形产生加工硬化,这进一步地加剧了 芯部残余拉应力。

退火热处理通常作为消除或者降低材料残余应力 的手段,其机理是使铸件组织在内应力和高温条件的



Fig. 5 Microstructure photos of the gray cast iron cylinder liner captured by EDS area scan analysis

驱动下发生微观的塑性变形,从而使应力得到释放,尺 寸趋于稳定,在缓慢降至室温后获得低应力的铸件^[11]。

3 结论

(1) 粗加工且退火后的灰铸铁气缸套产生变形的

参考文献:

- [1] 徐强. 气缸套内应力的产生及消除 [J]. 金属加工(热加工), 2009(5): 65-68.
- [2] 于泳,王慧.不同退火工艺对HT250灰铸铁床身残余应力的影响 [J]. 热加工工艺,2017,46(10):246-249.
- [3] 侯泽北,夏山林,高建宇,等.不同热处理工艺对7003铝合金组织和性能的影响 [J]. 热加工工艺,2016,45(16):249-252.
- [4] 何家文,胡奈赛.残余应力集中及其对疲劳极限和短裂纹扩展的影响 [J].金属学报,1992,28(9):404-408.
- [5] 童思艺. 利用铸件余热减少铸造残余应力 [J]. 铸造, 2008, 57(5): 509-512.
- [6] 陈超,潘春旭,傅强.采用显微硬度压痕法测量微区残余应力 [J]. 机械工程材料,2007,31 (1):8-11.
- [7] JANG J L. Estimation of residual stress by instrumented indentation: a review [J]. Journal of Ceramic Processing Research, 2009, 10 (3): 391-400.
- [8] 陆文华. 铸造合金及熔炼 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1996.
- [9] 王敏毅, 黄颖, 林有希. 微量砷对灰铸铁组织和性能的影响 [J]. 铸造, 2012, 61(5): 533-538.
- [10] 辜祖勋. 对影响灰铸铁件质量的一些问题的探讨 [J]. 铸造, 2003, 52 (5): 356-360.
- [11] 王君卿. 铸造手册: 第5卷 铸造工艺 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2003.

Generation and Evaluation of Residual Stress in Gray Cast Iron Cylinder Liners

DONG Chen^{1,3}, WU You¹, XU Yuan-chao¹, ZHOU Yu-hang¹, MA Lan-lan², WANG Zhen-jun^{1,3}

(1. Faculty of Mechanical and Material Engineering, Huaiyin Institute of Technology, Huai'an 212003, Jiangsu, China; 2. Faculty of Applied Technology, Huaiyin Institute of Technology, Huai'an 212003, Jiangsu, China; 3. Jiangsu Key Laboratory of Advanced Manufacturing Technology, Huai'an 212003, Jiangsu, China; 212003, Jiangsu, China; 3. Jiangsu Key Laboratory of Advanced Manufacturing Technology, Huai'an 212003, Jiangsu, China; 3. Jiangsu Key Laboratory of Advanced Manufacturing Technology, Huai'an 212003, Jiangsu, China; 3. Jiangsu Key Laboratory of Advanced Manufacturing Technology, Huai'an 212003, Jiangsu, China; 3. Jiangsu Key Laboratory of Advanced Manufacturing Technology, Huai'an 212003, Jiangsu, China; 3. Jiangsu Key Laboratory of Advanced Manufacturing Technology, Huai'an 212003, Jiangsu, China; 3. Jiangsu Key Laboratory of Advanced Manufacturing Technology, Huai'an 212003, Jiangsu, China; 3. Jiangsu Key Laboratory of Advanced Manufacturing Technology, Huai'an 212003, Jiangsu, China; 3. Jiangsu Key Laboratory of Advanced Manufacturing Technology, Huai'an 212003, Jiangsu, China; 3. Jiangsu Key Laboratory of Advanced Manufacturing Technology, Huai'an 212003, Jiangsu, China; 3. Jiangsu Key Laboratory of Advanced Manufacturing Technology, Huai'an 212003, Jiangsu Key Laboratory of Advanced Manufacturing Technology, Huai'an 212003, Jiangsu Key Laboratory of Advanced Manufacturing Technology, Huai'an 212003, Jiangsu Key Laboratory of Advanced Manufacturing Technology, Huai'an 212003, Jiangsu Key Laboratory of Advanced Manufacturing Technology, Huai'an 212003, Jiangsu Key Laboratory of Advanced Manufacturing Technology, Huai'an 212003, Jiangsu Key Laboratory of Advanced Manufacturing Technology, Huai'an 212003, Jiangsu Key Laboratory of Advanced Manufacturing Technology, Huai'an 212003, Jiangsu Key Laboratory of Advanced Manufacturing Technology, Huai'an 212003, Jiangsu Key Laboratory of Advanced Manufacturing Technology, Huai'an 212003, Jiangsu Key Laboratory of Advanced Manufacturing Technology, Huai'an 2120

Abstract:

Directing toward the problems of uneven internal stresses, deformation during subsequent machining, and so on of gray cast iron cylinder liners appeared after rough machining and annealing treatment, main causes of the residual stresses produced in the manufacturing processes of them were investigated, and the residual stress values of them were estimated by using of micro Vickers hardness indentation at the same time. The results indicate that there are significant residual tensile stresses existed in the cylinder liners, with values of approximately 70-130 MPa. The microstructure of the cylinder liner is mainly composed of ferrite+chrysanthemum-shaped (B-type) graphite, and some graphite flakes present significant coarsening behaviors. The average Vickers hardness value of the cylinder liners is approximately HV 33.

Key words:

residual stress; gray cast iron; cylinder liner; microhardness

主要原因是由于材料内部有较大的残余拉应力,通过 维氏硬度压痕估算其残余应力值约为70~130 MPa。

(2) 气缸套的显微组织主要为铁素体+菊花状(B型) 石墨,部分石墨有显著的粗化行为。气缸套的平均维氏硬度约为33。