

工艺与材料

DOI:10.12374/j.issn.1001-4357.2023.02.012

连杆内孔喷丸工艺技术

王维东, 徐彦, 沈翔, 董云庆

(上海船用柴油机研究所, 上海 201108)

摘要: 为提高柴油机连杆的疲劳强度, 采用喷丸强化工艺对其内孔进行处理。在保证喷丸强度、覆盖率、粗糙度等要求的前提下, 制定合理的工艺参数, 对经喷丸强化工艺处理的区域进行参与应力测试, 测试结果表明: 连杆大小端内孔表面为残余压应力, 且残余压应力层较深, 可为后续进行实机验证提供数据支撑。

关键词: 喷丸; 疲劳; 工艺参数

中图分类号: TK426 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-4357(2023)02-0057-04

Shot Peening Technology for Connecting Rod Inner Hole

WANG Weidong, XU Yan, SHEN Xiang, DONG Yunqing

(Shanghai Marine Diesel Engine Research Institute, Shanghai 201108, China)

Abstract: In order to improve the fatigue strength of diesel engine connecting rods, shot peening strengthening technology was used to process their inner holes. On the premise of ensuring the requirements of shot peening strength, coverage rate, roughness, etc., reasonable process parameters were formulated to conduct stress tests on the areas processed by shot peening strengthening technology. The test results show that there is residual compressive stress on the surface of the inner holes at the large and small ends of the connecting rod, and the residual compressive stress layer is deep, which can provide data support for subsequent practical verification.

Key words: shot peening; fatigue; process parameter

0 引言

连杆承受着燃烧压力和活塞的往复惯性力, 是柴油机的关键构件之一。随着最高燃烧压力的提高, 连杆受到的燃烧气体压力越来越大, 且发动机紧凑型的设计理念要求连杆大小端孔的宽度不断减小, 高频的往复拉压动作对连杆疲劳强度提出较高的要求, 因此有必要对连杆内孔表面进行强化, 提高连杆的疲劳强度。由于连杆是不规则的形状, 采用中频淬火、滚压等表面处理方式对连杆内孔进行强化难度较大, 因此采用喷丸强

化工艺对连杆内孔进行强化。

1 喷丸强化机理

机械构件发生疲劳失效是经过足够多的循环次数后, 某个位置在扰动应力的作用下形成疲劳裂纹源, 并在局部区域内出现裂纹萌生和扩展^[1]。文献[2]进一步提出机械构件的表面疲劳极限和内部疲劳极限的数学表达模型, 证明机械构件的内部疲劳极限高于表面疲劳极限, 因此零件次表层内部的疲劳状态对机械构件的疲劳性能有着重要的影响。喷丸强化工艺的作用机制是利用高速

收稿日期: 2022-07-25; 修回日期: 2022-07-26

基金项目: 船舶与海洋工程特种装备和动力系统国家工程研究中心资助项目

丸粒冲击机械构件表面，在机械构件表层形成塑性变形并诱导出残余压应力层。

随着相关研究的深入开展，对喷丸强化工艺机理的认知也逐步完善。机械构件的疲劳性能不仅取决于其残余应力场的分布特征，还与材料改性层的微观组织结构密切相关。经喷丸强化工艺处理后的机械构件表层微观组织产生晶粒细化，随着微观结晶和亚晶界数目的增加，形成大量的位错迁移特征，进而提高构件的疲劳强度，改善机械构件的服役性能^[3-4]。不同深度的材料组织受到喷丸丸粒冲击后引起的应变和应变率存在差异，因此经喷丸强化工艺处理后机械构件表层材料的晶粒细化程度、位错密度等随着材料深度的变化呈现出明显的梯度分布特征。微观特性的差异导致机械构件的宏观性能不同。柴油机连杆材料经喷丸强化工艺处理后的截面组织如图1，可见连杆表层发生显著的塑性变形和组织细化现象。连杆晶粒细化程度的提高可改善连杆的疲劳强度及寿命。连杆内孔喷丸强化工艺作为连杆加工中的关键工序，有必要对喷丸工序进行研究及验证，制定合理的连杆内孔喷丸加工工艺。

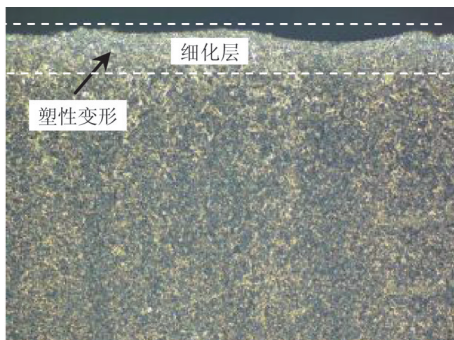


图1 连杆材料喷丸后截面组织

2 连杆内孔喷丸强化工艺技术要求

喷丸强度是喷丸强化工艺的重要参数之一。通常采用弧高值来表示喷丸强度，测试喷丸强度选取标准安敏（ALMEN）A型试片，见图2。经喷丸强化工艺处理后的试片在残余应力的影响下产生变形，此时试片的弧高值可表示喷丸强度的大小。



图2 喷丸试片工装

喷丸覆盖率是喷丸强化工艺的另一个重要参数。覆盖率表示喷丸弹坑面积与被喷零件表面面积的比值。根据喷丸强化的国家标准，当弹坑面积大于98%时，可认为覆盖率是100%，若要求试样的喷丸覆盖率为200%，则喷丸时间是覆盖率为100%时的2倍。本次连杆内孔喷丸的技术要求见表1。

表1 连杆内孔喷丸技术要求

技术要求	喷丸强度/mm	覆盖率/%	表面粗糙度（Ra）
指标	0.15~0.20	≥200	喷丸前1.6，喷丸后3.2

3 连杆喷丸工艺试验及验证

3.1 试验准备

因连杆杆身等处已经过喷丸强化处理，为了防止经过喷丸强化处理的表面受到内孔喷丸的影响，同时根据表1的喷丸技术要求，设计制作连杆内孔喷丸保护工装，以满足柴油机连杆的喷丸工艺要求，如图3所示。

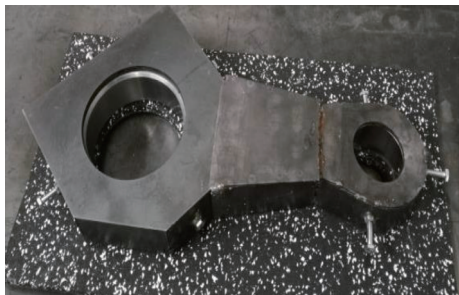


图3 连杆内孔喷丸保护工装

3.2 喷丸丸粒的选取

在柴油机连杆的喷丸强化试验中，喷丸丸粒的大小对喷丸强度值和连杆表面粗糙度均有一定的影响。选用钢球直径为0.3 mm的S110型喷丸丸粒，其显微硬度（洛氏硬度HRC）为50~55。

3.3 连杆内孔喷丸试验

柴油机连杆喷丸试验采用上海良时压送式自动喷丸机，通过控制喷丸压力、弹丸流量和喷丸时间等参数优化连杆内孔喷丸工艺。通过安敏A型试片进行喷丸强度测试。将试片装夹到专用的喷丸测试工装，调整试片到回转中心的位置，保证孔的半径与试片到回转中心的距离相同，对喷丸强度进行测试，如图4所示。本试验采用KXP-2525-P型机床，该喷丸机床可同时实现平台回转运动、喷嘴上下运动，如图5所示。喷丸后的弹丸能够快速排料，为减小弹丸反射的作用，喷枪与

内孔角度采用45°。该型喷丸机床可保证喷丸连续均匀，实现连杆内孔残余应力分布均匀，喷丸工艺稳定性较好。

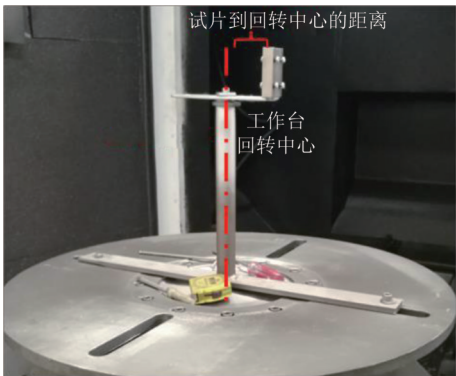


图4 喷丸强度测试工装

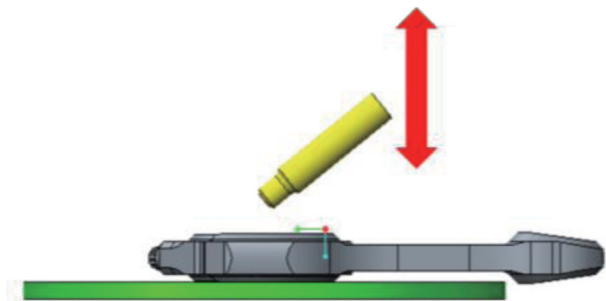


图5 喷丸机床运动方向

采用弧高检测仪检测喷丸弧高值，如图6所示。经多轮安敏A型试片强度测试，测得的弧高为0.17 mm，覆盖率大于100%。喷丸工艺参数见表2。



图6 弧高值检测仪

表2 喷丸工艺参数

技术要求	丸粒直径/mm	弹丸流量/(kg·min ⁻¹)	喷丸压力/MPa	时间/s
指标	0.3	5	0.2	60

一般在得到喷丸饱和强度值与100%覆盖率的喷丸参数后，降低进给速度，以保证覆盖率大于200%。对连杆大端内孔进行喷丸后，调转连杆杆身，以连杆小端内孔为回转中心线，喷嘴的进给速度降至原速度的一半，其他工艺参数保持不变，继续进行喷丸加工，保证喷丸强度与表面覆盖率。

4 喷丸后连杆残余应力及表面质量检测

为了保证经喷丸强化处理后的连杆内孔尺寸满足设计要求，以及为连杆内孔喷丸加工前尺寸提供参考，在进行喷丸强化工艺处理前后，须对连杆尺寸及形位公差进行检测。连杆内孔经喷丸强化工艺加工后，尺寸与加工前相差不大，内孔缩小量约为5 μm；连杆内孔圆柱度与大小端孔的平行度无变化；经喷丸强化工艺处理后的连杆内孔的表面粗糙度（Ra）为2.4，满足设计要求。连杆内孔喷丸工序见图7。

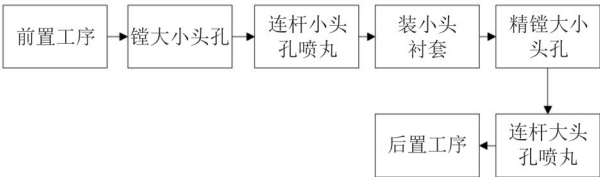


图7 连杆内孔喷丸工序

4.1 残余应力检测

经过喷丸强化工艺处理之后，对连杆内孔大小端内孔圆周方向的残余应力进行测试，见表3。对连杆大端孔近表面进行逐层解剖检测残余应力，见图8。

表3 连杆内孔表面残余应力 单位：MPa

项目	连杆大端孔	连杆小端孔
残余应力	-530.00	-572.50
	-517.00	-552.00
	-511.00	-574.50
	-467.00	-525.00
	-	-611.50
	-	-595.50
平均值	-506.25	-571.83

注：“-”代表未获得该参数。

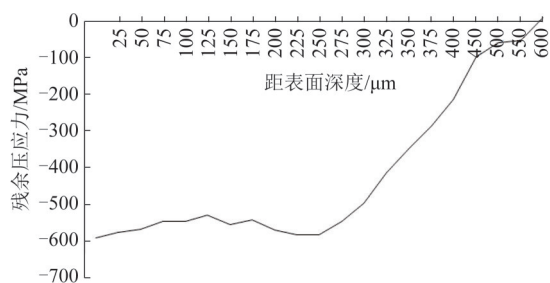


图8 连杆大端孔近表面残余应力检测结果

通过分析可知, 连杆大小端内孔喷丸均匀性较好, 连杆大端内孔残余压应力比小端内孔残余压应力大了约60 MPa。在对连杆小端内孔进行喷丸强化工艺处理时, 回转台转速与对大端内孔进行喷丸强化工艺处理时的转速相同, 喷丸的线速度较小, 单位面积喷丸的时间较长。由于孔径较小, 影响排料的速度, 造成短暂的磨料堆积和弹丸反弹干涉, 降低弹丸的能量, 造成连杆内孔喷丸残余应力较小。

4.2 表面质量

柴油机连杆经喷丸强化工艺处理前后的表面形貌如图9所示。在进行喷丸强化工艺处理前, 连杆表面规律性分布机械加工痕迹; 进行喷丸强化工艺处理后, 连杆表面机械加工痕迹消失, 表面产生喷丸弹坑和明显凸起特征, 表面形貌特征发生显著变化。由图9(a)可以看出, 连杆表面的凹坑与凸起的高度差约为7 μm 。由图9(b)可以看出, 连杆表面的凹坑与凸起的高度差约为46 μm 。经喷丸强化工艺处理后连杆的表面高度差明显, 进一步表明经喷丸强化工艺处理后连杆表层材料发生塑性变形。相关的研究^[5]也证明过大的喷丸强度可能会造成受喷零部件的表面损伤。因此, 选取合适的喷丸工艺对柴油机连杆的疲劳寿命具有重要的影响。

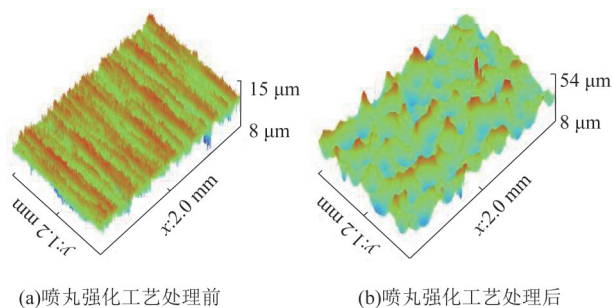


图9 柴油机连杆经喷丸强化工艺处理前后的表面形貌

5 结论

(1) 对连杆内孔进行强化喷丸处理, 优化喷丸强度、覆盖率、表面粗糙度, 非喷丸强化表面得到保护, 未影响杆身表面粗糙度。

(2) 优化后连杆的大小端喷丸加工工序对连杆的大小端尺寸影响较小。

(3) 喷丸后连杆大小端内孔表面有残余压应力且残余压应力层较深。

(4) 喷丸所形成的残余应力是提高零件疲劳强度的主要因素, 将喷丸强度及残余应力之间的关系作为今后的工艺研究方向。

参考文献

- [1] 陈传尧. 疲劳与断裂[M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2001.
- [2] 王仁智, 汝继来, 李向斌, 等. 疲劳裂纹萌生的微观过程与内部疲劳极限理论[J]. 金属热处理学报, 1995 (4): 26-34.
- [3] 王仁智, 汝继来. 喷丸强化的基本原理与调控正/切断裂模式的疲劳断裂抗力机制图[J]. 中国表面工程, 2016, 29 (4): 1-9.
- [4] 李金魁, 姚枚, 王仁智. 度量喷丸强度的新参量[J]. 航空材料学报, 1989, 9 (4): 38-45.
- [5] 方博武. 受控喷丸与残余应力理论[M]. 济南: 山东科学技术出版社, 1991.