

曲轴喷丸工艺技术研究

葛平, 董云庆, 王维东, 程世昌

(七一一研究所, 上海 201108)

摘要: 介绍了喷丸强化的机理, 包括应力强化和组织强化。指出: 用 ALMEN 试片测试喷丸强度存在不合理性, 提出可采用有限元方法, 针对弹丸速度和弹丸直径这两个关键参数, 对具体的材料和具体的受力状态确定喷丸的工艺参数; 并分析了喷丸工艺参数与残余应力场之间的关系。特别说明: 在强化过程中由于组织强化, 导致材料的屈服强度不断提高, 在进行有限元残余应力计算时, 应不断对屈服强度进行修正。

关键词: 曲轴; 喷丸强化; 工艺参数; 残余应力

中图分类号: TK426 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4357(2018)06-0049-06

The Research on Shot Peening Technology for Crankshafts

Ge Ping, Dong Yunqing, Wang Weidong, Cheng Shichang

(Shanghai Marine Diesel Engine Research Institute, Shanghai 201108)

Abstract: The mechanism of shot peening is introduced, including stress and structure strengthening. It is pointed out that using the ALMEN strip to test the strength of shot peening is not reasonable, and FEM is proposed. Aiming at the two key parameters, the speed and diameter of the shots, the processing parameters of shot peening could be determined according to the material and stress. Moreover, the relations between shot peening parameters and residual stress are analyzed. It is also emphasized that because of the structure strengthening during the strengthening process, the yield strength of the material is increased, therefore, during the FEM calculation of residual stress, the yield strength should be revised constantly.

Key words: crankshaft; shot peening; processing parameter; residual stress

0 引言

曲轴是柴油机的关键零部件之一, 在其运行过程中, 过渡圆角处存在较大的应力集中和交变应力, 对疲劳强度极为不利。同时, 在曲轴的制造过程中, 由于受轴径中频淬火和表面切削等影响, 过渡圆角表面会存在残余拉应力, 也不利于曲轴的疲劳强度, 因此有必要对过渡圆角进行表面强化。目前比较常用的圆角强化技术有中频淬火、滚压、喷丸等, 其中喷丸技术对整轴的变形影响小, 且操作简便快捷, 因此在表面强化领域得到迅速发展。

1 过渡圆角表面疲劳与喷丸强化机理

所谓疲劳就是在某点或者某些点承受扰动应力, 且在足够多的循环扰动作用之后形成裂纹和完全断裂的材料中, 所发生的局部的、永久结构变化的发展过程^[1]。在文献[2]中, 王仁智提出了表面疲劳极限和内部疲劳极限的概念, 并用解析方法证明了表面疲劳极限低于内部疲劳极限。因此有必要对曲轴过渡圆角表面进行强化。

过渡圆角喷丸强化机理如下。

收稿日期: 2018-04-08; 修回日期: 2018-08-23

作者简介: 葛平(1960-), 男, 工程师, 主要研究方向为柴油机制造工艺, weigeping@163.com.

1.1 应力强化

在喷丸过程中,弹丸高速冲击材料表面,使材料表面形成残余压应力层。残余压应力具体分布如图1所示。其中:表面残余压应力、最大残余压应力、最大残余压应力层深度、残余压应力层深度是残余压应力层的关键参数。

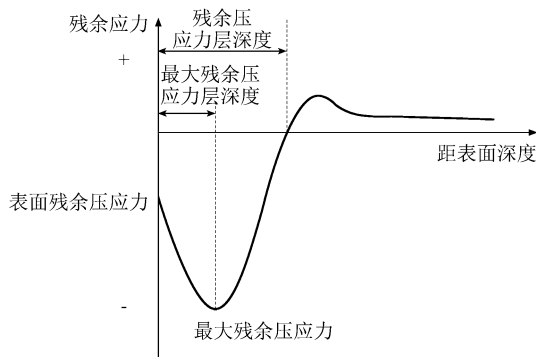


图1 残余应力分布

当柴油机以额定转速运转时,曲轴过渡圆角受到周期循环载荷作用。循环载荷的应力幅 σ_a 是不变的,即

$$\sigma_a = (\sigma_{\max} - \sigma_{\min}) / 2 = \sigma_e \quad (1)$$

σ_e 恒定。

由平均应力 σ_m 与应力比的关系式

$$\sigma_m = (1 + R) \sigma_a / (1 - R) \quad (2)$$

当 R 增大时, σ_m 也增大;当 R 减小时, σ_m 也减小。

令表面残余压应力为 σ_{re} , $\sigma_{re} < 0$, 由式(1)得:在具有残余应力下的平均应力 σ'_m 为

$$\begin{aligned} \sigma'_m &= [(\sigma_{\max} + \sigma_{re}) + (\sigma_{\min} + \sigma_{re})] / 2 \\ &= \sigma_m + \sigma_{re} < \sigma_m \end{aligned} \quad (3)$$

由式(3)可知:当表面存在残余压应力时,平均应力减小。平均应力对S-N曲线影响的一般趋势如图2所示。

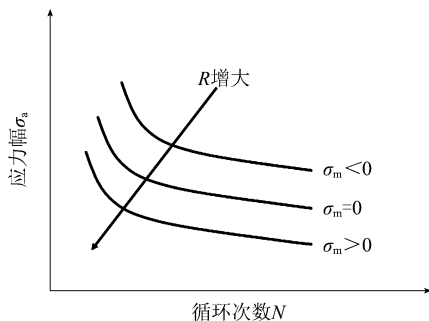


图2 平均应力对S-N曲线影响的一般趋势

可见,在相同的应力幅下,平均应力越小,循环次数越多,寿命越长。因此通常采用喷丸工艺,

使材料表面形成残余压应力,可有效降低平均应力,提高曲轴的疲劳强度。

残余应力的大小和分布特征受喷丸强化工艺类型、工艺参数以及材料自身属性等诸多因素影响。残余应力值主要取决于受喷材料自身的屈服强度、晶体结构以及加工硬化率的影响,受喷材料屈服强度越高,残余压应力值越大^[3]。

1.2 组织强化

近几年的研究表明:喷丸强化的机理不止是形成表面应力层,还有导致表面组织变化。目前AMS-S-13165和MIL-S-13165C^[4-7]等相类似的标准及规范,仅描述了“应力强化机制”,而无涉及“组织结构强化机制”。而应力强化和组织强化对材料的受力状态所起到的强化作用的大小是不同的^[8]。

在喷丸强化过程中,组织结构中的晶粒细化,晶界和亚晶界增多,并且存在大量的位错。表层材料和内部材料的应变和应变率是不同的,从材料组织表面到材料内部,晶粒细化程度、位错密度等呈梯度分布,如图3。晶粒组织细化、位错密度的增加,使材料的屈服强度提高,从而降低了交变应力的影响,提高了整个零件的疲劳强度。

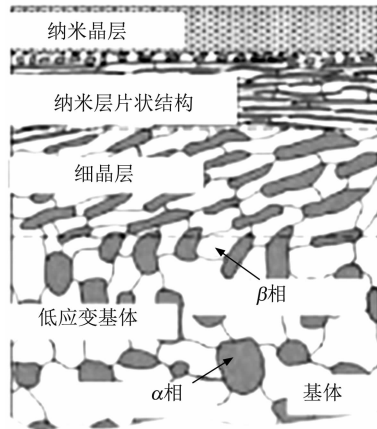


图3 组织结构、应变和应变率随材料深度的变化

2 喷丸工艺测试标准探讨

在实际生产过程中,通常采用国际通用的弧高度测试法来确定喷丸强度。测试喷丸强度的试片为标准化的ALMEN试片,分为N、A、C三种。采用专门的工装将试片固定进行喷丸,如图4;喷丸结束后,将试片从工装上拆解;经喷丸的试片表面存在残余压应力,受压应力的影响自动回弹,回弹的弧度即为喷丸强度,如图5。

这种喷丸强度的测试并不准确。王仁智^[9]、

方博武^[10]、Y. Miao^[11] 经多次试验证明：同一喷丸强度下喷射不同材料的工件，喷丸后的残余应力场显著不同，压应力层的深度也很难划一；控制不同的喷丸工艺参数而保持同一喷丸强度，则受喷工件材料即使一样，残余应力场仍有差别，即很难从喷丸强度来判断残余应力场，而残余应力场正是影响金属零部件疲劳性能的重要因素。因此，在对曲轴过渡圆角表面喷丸时，有必要确定喷丸所形成的残余应力场。一般情况下，先以一定的工艺参数对材料进行喷丸，喷丸之后用电解抛光的方法，利用 X 射线逐层测试材料表面的残余压应力，得到残余应力场。但喷丸的工艺参数较多，如速度、弹丸大小、弹丸材质等，且每个工艺参数覆盖范围较大，如弹丸的速度由最低 $20\text{ (m} \cdot \text{s}^{-1})$ 到 $100\text{ (m} \cdot \text{s}^{-1})$ ；弹丸的粒径从最小 0.01 mm 到 1.2 mm ^[12]。在选取合理的工艺参数时，因试样多，耗费的时间和资金较多。而喷丸的数值模拟具有耗费时间短和资金少的优点，是解决这类问题的较好办法。下文对喷丸工艺参数中弹丸的速度和大小进行有限元数值模拟，并得到其中的规律，为选用合适的工艺参数提供参考。

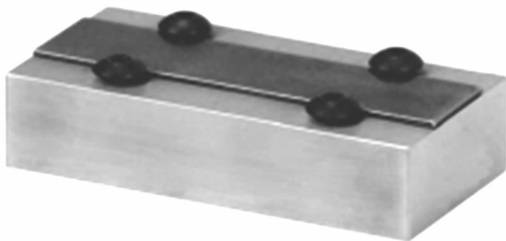


图 4 喷丸试片工装

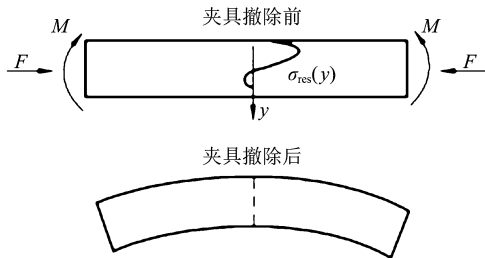


图 5 试片回弹产生的弧高

3 有限元模拟及分析

3.1 有限元模拟

为了能够清晰地表达喷丸工艺参数与残余应力层之间的关系，采用单粒弹丸对曲轴材料表面进行强化，此时的表面覆盖率为 100%。表 1 为曲轴和弹丸材料属性参数。

表 1 材料属性

材料	密度 ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	弹性模量/ GPa	泊松比	屈服强度/ MPa	抗拉强度/ MPa
曲轴	7 800	210	0.3	780	980
弹丸	7 800	210	0.3	/	/

在模拟中，不须要得到弹丸应力，只须要得到材料表面应力，因此将弹丸设置为刚体；弹丸与材料的摩擦为库伦摩擦，摩擦系数为 0.2。利用圆柱体模型模拟受喷材料，在弹丸撞击材料的局部区域进行网格密化，通常要求喷丸区内靶材单元尺寸小于弹丸直径的 1/10，其底边使用固定约束^[13]。弹丸单元类型采用 C3D4 线性四面体单元，受喷材料模型单元类型为 C3D8R 减缩积分六面体单元。

在弹丸撞击材料的过程中，材料发生弹塑性变形，因此在材料设置过程不只是弹性阶段，还有塑性屈服阶段。在材料单向拉伸试验中，当材料进入塑性阶段时，材料会发生流动，此时单拉试验中的试棒截面积是不断缩小的，其真应力和真应变大于单拉试验的工程应力和工程应变。在有限元软件，如 ABAQUS、ANSYS 中，传统的单拉试验的应力—应变关系并不正确，因此有必要对参数进行修正，将工程应力—应变转化为真应力—应变。图 6 为工程应变与真应变的关系，可由文献 [14] 将工程应力—应变转化为真应力—应变。对于喷丸这类动态非线性问题，一般采用动态显示进行分析。

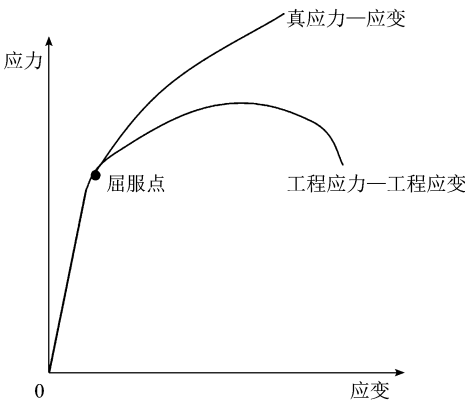


图 6 工程应力—应变与真应力—应变

依照以上参数，建立有限元模型，如图 7。

模拟试验分别模拟直径为 0.4、0.6、0.8 mm 的弹丸在 20、40、60、80、100 ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) 的速度下撞击材料表面，并研究所形成的残余应力场。

3.2 有限元模拟结果及分析

图 8 为有限元分析云图。为直观地展示残余应力分布状况，沿材料表面深度方向，提取表面残余

应力,如图9~图11。

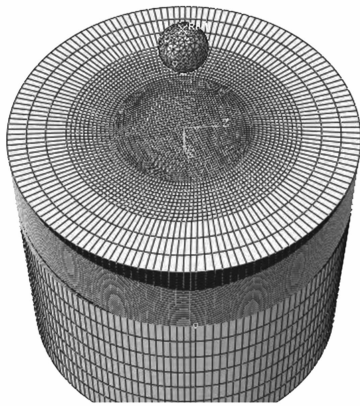


图7 喷丸有限元模型

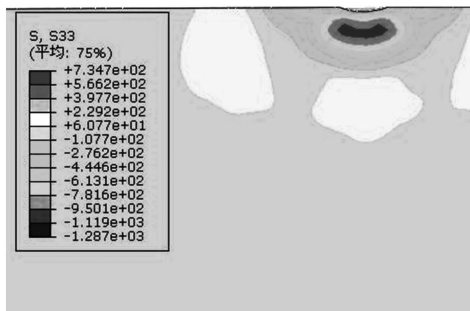


图8 有限元分析云图

以下对影响残余应力场的4个关键参数:表面残余应力、最大残余应力、最大残余应力深度和残余应力场深度进行分析。

3.2.1 残余应力场深度

从图9~图11可知:随着喷丸速度增大,材料表面所形成的残余应力层深度不断增加。这是因为弹丸撞击材料表面的过程是一个消耗弹丸能量而做功的过程,相同弹丸直径下,弹丸的速度越大,弹丸所具备的能量越大,因此在撞击材料表面时,所形成的残余应力层深度也越深。同理,当速度相同时,弹丸直径也会影响弹丸的动能,使残余应力场深度发生变化。图12显示速度为 $60\text{ (m} \cdot \text{s}^{-1})$ 时,三种弹丸直径形成的材料表面残余应力场。

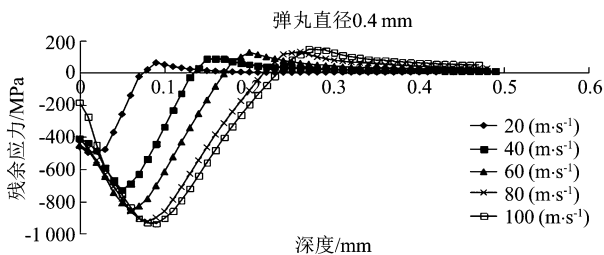


图9 弹丸直径为0.4 mm下的残余应力场

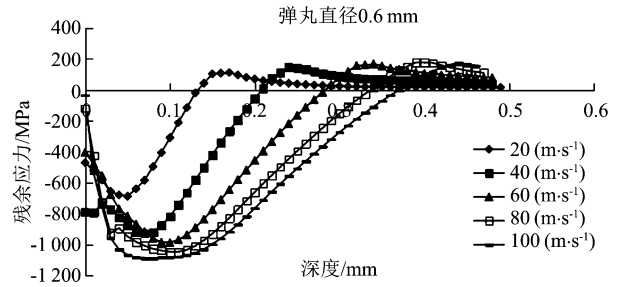


图10 弹丸直径为0.6 mm下的残余应力场

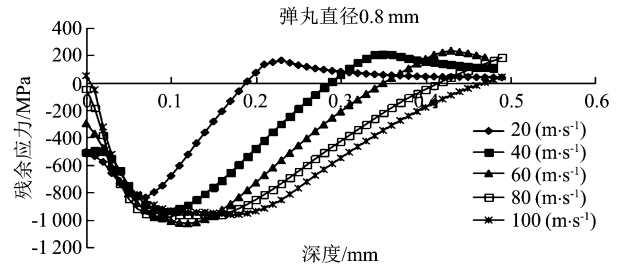


图11 弹丸直径为0.8 mm下的残余应力场

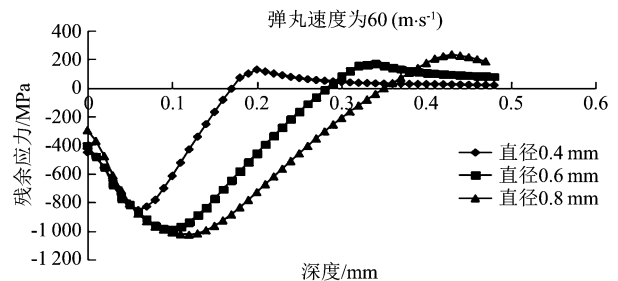


图12 速度为 $60\text{ (m} \cdot \text{s}^{-1})$ 下的残余应力场

3.2.2 表面残余应力

表2为不同试验参数下的表面残余应力。

表2 表面残余应力		单位: MPa				
速度/ $(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	直径/mm	20	40	60	80	100
	0.4	-460	-409	-450	-408	-184
	0.6	-471	-789	-404	-120	-36
	0.8	-505	-509	-295	-45	50

由表2可知:相同弹丸直径下,表面残余应力随喷丸速度的增大不断增大。因为喷丸速度增大,弹丸在材料表面所形成的弹坑变大,表面得到拉伸,残余压应力不断减小,导致表面出现残余拉应力。表中:当弹丸直径为0.8 mm、速度为 $100\text{ (m} \cdot \text{s}^{-1})$ 时,表面残余应力为拉应力,对材料表面的疲劳强度是十分不利的。因此,在实际喷丸中应避免表面出现残余拉应力。

3.2.3 最大残余应力层深度

表3为不同试验参数下的最大残余应力层

深度。

表 3 最大残余应力层深度 单位：mm

速度/ (m · s ⁻¹) 直径/mm	20	40	60	80	100
0.4	0.02	0.05	0.06	0.08	0.09
0.6	0.05	0.07	0.1	0.1	0.07
0.8	0.07	0.09	0.12	0.09	0.12

由表 3 可知：最大残余应力层深度随着喷丸速度和弹丸直径的增大都存在增大的趋势。但是部分数据存在异常，如当弹丸直径为 0.6 mm、0.8 mm，速度为 60 (m · s⁻¹) 以上时得到的数据，有待进一步研究。

3.2.4 最大残余应力

表 4 为不同试验参数下的最大残余应力。

表 4 最大残余应力 单位：MPa

速度/ (m · s ⁻¹) 直径/mm	20	40	60	80	100
0.4	-495	-730	-854	-923	-938
0.6	-688	-927	-987	-1 046	-1 089
0.8	-835	-938	-1 025	-969	-961

随着速度的增大，最大残余应力呈现不断增大的趋势；随着弹丸直径的增大，最大残余应力也呈现不断增大的趋势。由于在撞击过程中，实际发生的是一种能量转化，弹丸的动能转化为材料的变形能。采用公式 (4) 考察动能与最大残余应力的关系，为了方便计算，取消单位换算，用动能无量纲系数代替动能的计算方法。表 5 为动能无量纲系数。

$$W = \frac{1}{2}mv^2 = \frac{1}{2}\rho \frac{4}{3}\pi r^3 v^2 \tag{4}$$

式中： ρ 为弹性的密度， r 为弹丸半径， v 为弹丸的速度。

表 5 动能无量纲系数

速度/ (m · s ⁻¹) 直径/mm	20	40	60	80	100
0.4	25.6	102.4	230.4	409.6	640
0.6	86.4	345.6	777.6	1 382.4	2 160
0.8	204.8	819.2	1 843.2	3 276.8	5 120

用最小二乘法对散点图用对数关系进行拟合，结果显示：动能与最大残余应力有明显的对数关系，且相关系数达到 0.8，如图 13。

综上，通过有限元分析可以得到受喷材料沿深度方向的残余应力的分布。因此，可以根据材料在受力过程中沿深度方向的受力状态进行两个应力场

耦合，得到最小平均应力。

但在表面强化时也不能一味追求大的残余压应力，因在弹丸冲击过程中有可能造成表面脱碳、剥层等，降低材料的疲劳强度，同时可能形成剪应力裂纹^[15]，如图 14。

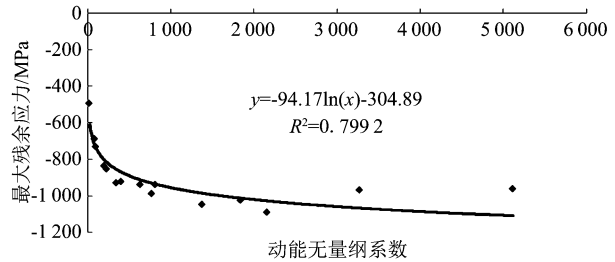


图 13 残余应力与动能无量纲系数关系

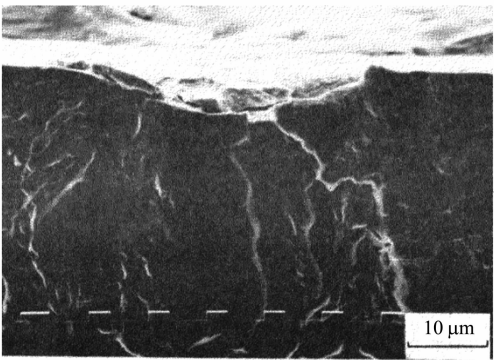


图 14 喷丸造成的初始剪应力裂纹

4 结 论

本文介绍了喷丸强化机理，包括应力强化和组织强化，并用解析验证的方法对应力强化提高材料疲劳强度进行了推导。指出：用 ALMEN 试片测试喷丸强度存在不合理性，提出：用有限元方法，针对弹丸速度和弹丸直径这两个关键参数，对具体的材料和具体的受力状态，确定喷丸的工艺参数。在此过程中还提出：残余应力场与喷丸工艺参数之间的相互关系还有待进一步深入探讨；在强化过程中组织强化导致材料的屈服强度不断提高，因此，在进行有限元残余应力计算时，屈服强度应不断进行修正。

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] LI R H, LIU D X, ZHANG W, et al. Influence of shot

- peening and surface integrity on the fatigue properties of 300M steel [J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2011, 30 (9): 1418-1423.
- [4] MIL-S-13165C, Military specification, Shot peening of metal parts [S]. 1989.
- [5] AMS-S-13165, Aerospace material specification, Shot peening of metal parts [S]. 1997.
- [6] NAVAIRINST 4870.2 AIR-536A, Shot peening of aircraft components [S]. 1990.
- [7] MIL-P-81985 (AS), Military specification, Peening of metals [S]. 1974.
- [8] 王仁智, 汝继来. 喷丸强化的基本原理与调控正/切断断裂模式的疲劳断裂抗力机制图 [J]. 中国表面工程, 2016 (4): 1-9.
- [9] 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 (4): 38-45.
- [10] 方博武. 受控喷丸与参与应力理论 [M]. 济南: 山东科学技术出版社, 1991.
- [11] MIAO H Y, LAROSE S, PERRON C, et al. An analytical approach to relate shot peening parameters to Almen intensity [J]. Surface & Coatings Technology, 2010: 2055-2066.
- [12] 张继旺, 鲁连涛, 张卫华. 微粒子喷丸中碳钢疲劳性能分析 [J]. 金属学报, 2009 (11): 1378-1383.
- [13] 郑林彬, 王建明, 何讯超. 2024 铝合金喷丸粗糙度试验与数值模拟 [J]. 山东大学学报 (工学版), 2017 (1): 84-89.
- [14] 李玉兰. 真应力-应变的定义及其力学特征 [J]. 重庆大学学报 (自然科学版), 2001 (3): 58-60.
- [15] ADACHI S. Fatigue strength of gear steels shot peened in extremely high intensity conditions [A]. The Forth International Conference of Shot Peening [C]. 363-372.

(上接第 26 页)

如图 8 所示: 在加装 SCR 系统之前, 原机燃油消耗率在 $177.31 \sim 186.02$ ($\text{kg} \cdot \text{kW}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$); 加装 SCR 系统后燃油消耗率为 $176.92 \sim 186.92$ ($\text{kg} \cdot \text{kW}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$)。各工况下, 两者的油耗基本相同。试验结果表明: 加装 SCR 系统对柴油机的燃油经济性几乎没有影响。

4 结 论

本文结合船用低速柴油机开展了低压 SCR 系统的设计, 并基于 6S35ME-B9.5 船用低速机开展了 E3 循环工况下 SCR 系统台架试验研究。试验结果表明: 低压 SCR 系统能够有效降低柴油机排气中的 NO_x 含量, 不同工况下 NH_3 的逃逸量均小于限值 20.5 ($\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$), 满足相关法规的要求; 柴油机加装 SCR 系统后产生的排气压损小于设计限值, 最大压损为 758 Pa, 满足柴油机稳定运行的要求; 柴油机加装 SCR 系统后燃油消耗率无明显变化,

表明 SCR 系统对柴油机运行经济性能无影响。

参考文献

- [1] 刘啸波, 任慧龙, 李陈峰, 等. 世界及我国船用低速柴油机行业发展研究 [J]. 船舶工程, 2013, 35 (1): 1-4.
- [2] 孙伟, 赵同宾, 范建新, 等. 船用柴油机陆上试验大气污染物排放标准现状分析 [J]. 柴油机, 2011, 33 (4): 34-38.
- [3] 吕炎, 张文涛, 赵超, 等. 船舶低速机低压 SCR 系统设计难点分析 [C]. 中国环境科学学会学术年会论文集 (第三卷), 2016: 3141-3146.
- [4] 周万利. 船用柴油机 SCR 系统的原理及辅助系统设计 [J]. 上海船舶运输科学研究所学报, 2017 (4).
- [5] 吴哲, 陈永艳, 曹林. 船舶柴油机 SCR 方案的关键技术分析 [J]. 柴油机, 2015, 37 (5): 20-23.
- [6] 陈宁, 张争鸣, 李玉, 等. 船用柴油机 SCR 反应器设计及系统试验研究 [J]. 江苏科技大学学报 (自然科学版), 2016, 30 (1): 33-38.