

PFI 汽油机喷油器喷孔板焊接疲劳强度研究

莫福广,梁军,王洪勃,林嘉,梁源飞

(上汽通用五菱汽车股份有限公司,广西 柳州 545007)

摘要:对几何尺寸相同的 SS444 和 SS302 两种不锈钢材料 PFI 汽油机喷油器喷孔板的疲劳强度进行研究。运用 ANSYS 软件对两种材料喷孔板焊缝区域的等效力进行 CAE 仿真。分析得出:在相同焊接参数条件下,SS444 残留应力更小,焊接性更好。设计了专门的高加速寿命测试试验,测试不同材料喷孔板的喷油器在最优焊接参数下焊缝的疲劳曲线,并使用 Weibull++ 和 ALTA 软件拟合试验结果。结果表明:在相同测试压力下,SS444 比 SS302 的疲劳寿命有显著提升,与 ANSYS 仿真结果有较好的一致性。

关键词:喷油器;喷孔板;焊接;疲劳强度;高加速寿命测试;疲劳曲线

中图分类号:TK41 **文献标志码:**B **文章编号:**1671-5276(2021)04-0064-04

Study on Welding Fatigue Strength of PFI Gasoline Engine Injector Orifice Disc

MO Fuguang, LIANG Jun, WANG Hongbo, LIN Jia, LIANG Yuanfei

(SAIC GM Wuling Automobile Co., Ltd., Liuzhou 545007, China)

Abstract: The welding fatigue strength of the PFI gasoline engine injector orifice disc of SS444 and SS302 stainless steel of the same geometry size and equivalent stress were studied and simulated with CAE by ANSYS software. The analysis result showed that SS444 had a lower residual stress with better weldability under the same welding parameters. The highly accelerated life test was designed to test the fatigue curve of the orifice disc samples under the optimal welding parameters, and the Weibull++ and ALTA software were used to fit the test. The results indicate that the fatigue life of SS444 sample is remarkably longer than the SS302 sample under the same test pressure and its test is in good accordance with the ANSYS simulation results.

Keywords: injector; orifice disc; welding; fatigue strength; HALT; fatigue curve

0 引言

随着国家法规对汽车尾气中有害物质排放限值的严控,对发动机的燃烧、排放要求也越来越高。缸内直喷(GDI)发动机由于喷油压力高,燃油雾化好,燃烧效率高,能有效降低未燃碳氢和 CO 排放^[1],正逐渐成为轻型汽油发动机的主流^[2-3]。但 GDI 汽油机的 NO_x 及颗粒排放比 PFI 汽油机及带颗粒捕集器的柴油机大幅增加^[4-5],需要增加额外的控制措施。同时,GDI 喷射系统相比 PFI 喷射系统价格也更昂贵,导致整机成本上升。各个主机厂为了在满足排放法规、动力输出的同时,兼顾成本,仍将大量、长期使用 PFI 汽油机。

喷孔板是通过激光焊接在喷油器末端超薄不锈钢钢板,厚度一般在 100~200 μm 之间,主要应用在 PFI 汽油机上,见图 1。喷孔板的几何尺寸决定着喷油器束喷射状态,对发动机的排放性能起关键性作用^[6-7]。在 PFI 汽油机运行过程中,喷孔板不断地承受着 380 kPa 的高压燃油均布载荷的作用,见图 2 椭圆 A 区域,这对喷孔板的焊接及材料本身强度要求增加。在某款发动机试验过程中,就发现因喷孔板强度不足,导致喷孔板疲劳断裂,喷油器功能丧失。

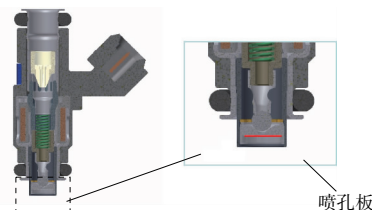


图 1 喷孔板的位置

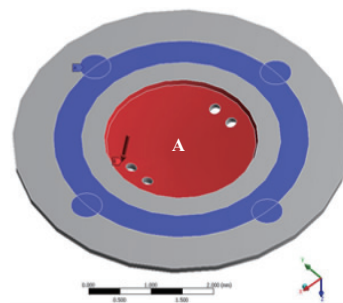


图 2 喷孔板受力情况

近年,国内外学者主要的研究重点为 GDI 汽油机喷油器结构对喷油器性能的影响,如 SEQUINO L、

JIANG C Z、姚春德等都都对喷嘴某些几何参数对喷雾特性的影响进行了研究^[8-10],郭世龙等研究了针阀偶件间隙、柱塞偶件间隙、针阀升程、衔铁升程等对喷油器喷油一致性的影响^[11]。在喷油器加工工艺方面,崔厚学等研究了喷油器焊接工序^[12]。

在超薄不锈钢焊接方面,余世航研究了 0.7 mm 的 SS302 不锈钢工艺参数优化^[13],宫唤春研究了 SS302 不锈钢处于持续大功率光纤激光焊接时的焊缝宽度变化情况^[14],而对 SS444 不锈钢的研究主要集中在其耐腐蚀性能^[15-16]。行业内对≤0.2 mm 的 SS302、SS444 超薄不锈钢的激光焊接应力及强度的研究很少。

本文首先使用有限元软件 ANSYS 对 0.152 mm 厚度、孔板直径 φ7.18 mm、焊缝直径 φ3.1 mm 的 SS302、SS444 两种非线性超薄不锈钢材料喷孔板焊接处范式等效应力 (von mises stress) 分布进行静态模拟分析,评估不同材料在不同焊接工艺参数下焊缝处等效应力情况。然后设计专门的 HALT (highly accelerated life test) 测试,制成样件 (图 3),使用 ReliaSoft 公司的 ALTA、Weibull++ 软件拟合样件测试结果的疲劳曲线及 Weibull 分布,研究了不同材料喷孔板的疲劳寿命。

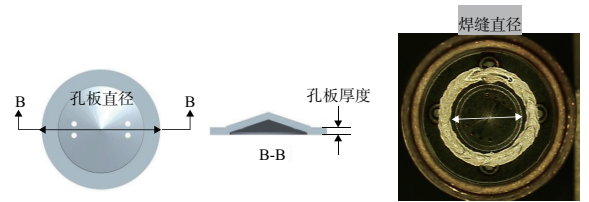


图 3 喷孔板几何尺寸

1 焊接过程分析

1.1 焊接过程 CAE 分析

使用 ANSYS 软件对 SSS302 和 SSS444 两种非线性材料喷孔板的焊接过程进行 CAE 分析。分析喷孔板和阀座从不同温度冷却到室温 22℃ 时,3 种不同焊接工艺方案 (表 1) 下喷孔板焊缝处的等效应力状态见图 4~图 6。

表 1 焊接工艺方案

方案	喷孔板温度/℃	阀座温度/℃	备注
A	700	22	最初假设
B	400	210	单圈焊接热分析结果
C	500	350	双圈焊接热分析结果 (焊接+应力消除)

方案 A:喷孔板温度为 700℃,阀座温度为 22℃。

在模拟条件下,SS302 的焊缝处应力为 318.26 MPa,SS444 的焊缝处应力为 385.83 MPa,都产生了屈服现象,如图 4 所示。(此 SS302 不锈钢屈服强度为 241 MPa,SS444 不锈钢屈服强度为 360 MPa。)

方案 B:喷孔板温度为 400℃,阀座温度为 210℃。

SS302 喷孔板在焊缝处应力为 249.29 MPa,产生屈

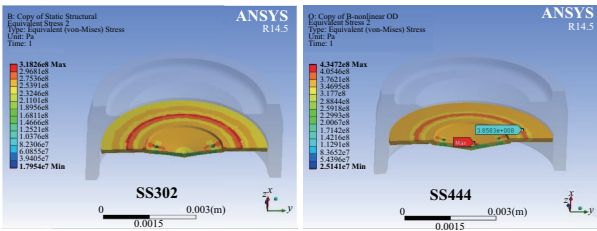


图 4 方案 A 应力分布图

服;但 SS444 喷孔板焊缝应力在 46.701 MPa,未发生屈服现象,如图 5 所示。

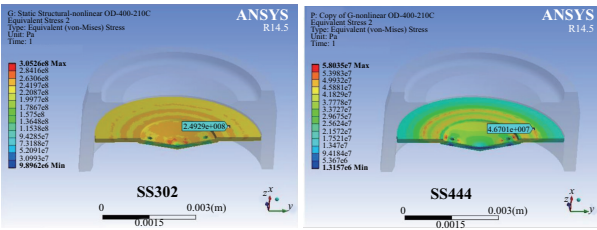


图 5 方案 B 应力分布图

方案 C:喷孔板温度为 500℃,阀座温度为 350℃。

SS302 喷孔板在焊缝处应力为 248.8 MPa,产生屈服;SS444 喷孔板焊缝应力为 68.08 MPa 未发生屈服现象,如图 6 所示。

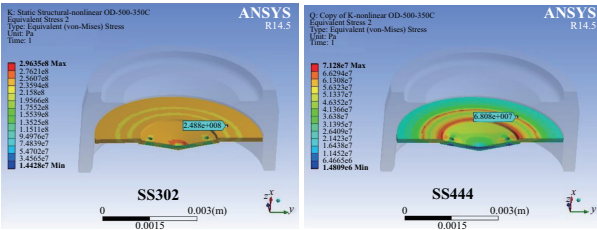


图 6 方案 C 应力分布图

上述分析表明,3 种焊接方案 SS302 材料喷孔板均在焊缝处发生了屈服现象;而 SS444 材料喷孔板在方案 A 时出现屈服,而方案 B、方案 C 未发生屈服现象。上述 3 种焊接方案焊缝处最大等效应力 CAE 分析结果见表 2,方案 B 的 SS444 喷孔板的焊缝处应力最小,故选择用于实际生产。

表 2 焊缝处最大等效应力 CAE 分析结果

方案	喷孔板温度/℃	阀座温度/℃	焊缝处最大应力/MPa	
			SS302	SS444
A	700	22	318.26	385.83
B	400	210	249.29	46.701
C	500	350	248.80	68.08

1.2 焊接尺寸

按照方案 B 制成样件,测量喷孔板焊接在阀座上的焊接尺寸,见图 7。结果均在要求范围内,未见明显差别,见图 8。

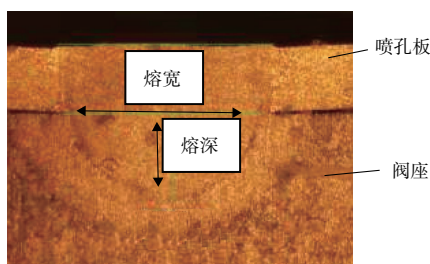


图7 焊接尺寸示意图

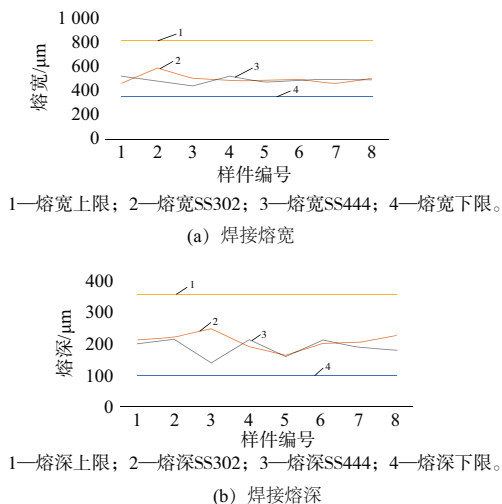


图8 焊接尺寸结果

2 HALT 验证

2.1 疲劳曲线

基于材料力学性能,对 CAE 分析方案 B 制成的样件进行高加速寿命试验,得出疲劳寿命与疲劳应力的关系(图9);随着疲劳应力的降低,疲劳寿命逐渐增加,当疲劳应力小于某个临界值时,疲劳寿命将无限增加。图9中横坐标为疲劳断裂的循环次数 N ,纵坐标为疲劳应力 σ 。

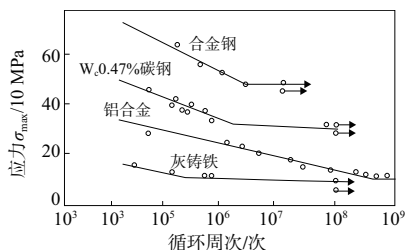


图9 几种常见材料的疲劳曲线

2.2 HALT 设计

试验台设计:HALT 试验台由高压燃油供给系统、高压喷油器、试验样件工装、探测流量计等组成,如图10所示。

试验参数设计:

a) 测试条件:内部压力疲劳试验在室温进行,测试媒介为 DOT4 刹车液,均带频率为 15 Hz 恒定的正弦负载,压力比一定。

b) 测试方法:SS302 喷孔板试验样件分别进行 3 MPa、3.5 MPa、4 MPa 压力下的 HALT,SS444 喷孔板试验样件分别进行 7 MPa、7.5 MPa、8 MPa 压力下的 HALT。

试验过程:

1) 将喷孔板焊接在接杆上制成试验样件,试验样件安装在疲劳循环试验台上;

2) 通过高压喷油器开启/关闭系统,控制作用于喷孔板的压力,通过流量计来探测喷孔板是否发生疲劳断裂,通过循环累加器显示测试循环次数;

3) 如果流量计的流量显著增加,则判定为喷孔板发生了疲劳断裂,停止循环累加器计算。

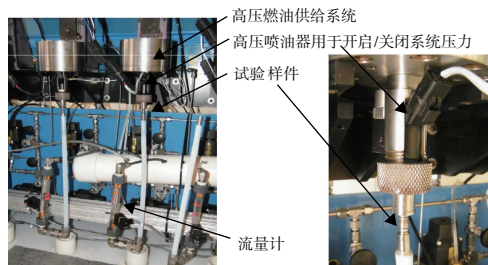


图10 疲劳循环试验台

3 HALT 数据分析

3.1 HALT 数据分析

使用 ReliaSoft 公司的 Weibull++ 和 ALTA 软件处理实验数据,拟合图形如图 11。其中:

a) 横坐标 Stress 为通过测试压力拟合转换的应力,纵坐标 Life 为试验循环次数;

b) 直线 1 为 SS302 材料样件 3 个不同测试压力的平均失效时间线(mean time to failure),即平均失效寿命线;

c) 直线 2 为 SS444 材料样件 3 个不同测试压力的平均失效寿命线;

d) 虚线为 SS444 材料样件 3 个不同测试压力的峰值失效时间线(mode time to failure),即峰值失效寿命线。

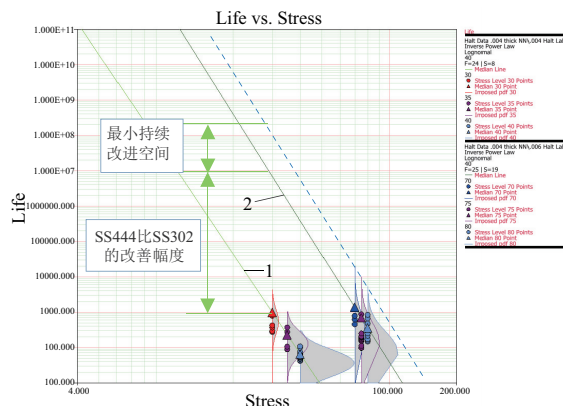


图11 不同材料的 HALT 结果

试验结果表明:

1) 在相同测试压力下,SS444 材料样件疲劳寿命比 SS302 材料样件从 1×10^3 提升到 1×10^7 ,提升 1×10^4 倍(按中位数计算);

2) SS444 有更进一步从 1×10^7 提升到 2×10^8 的最小提升空间;

3) 随着应力的增加,两种材料喷孔板的循环寿命下降速度变化不大;

4) HALT 导致喷孔板的失效属于高周疲劳失效。

3.2 喷孔板材料对喷油器性能的影响

对 SS444 和 SS302 喷孔板材料的喷油器总成进行性能试验,结果表明:两种喷孔板材料试验样件的喷射雾锥角度、双雾锥夹角、SMD、流量等性能参数均在要求范围内,都满足喷油器性能要求,如图 12 所示。

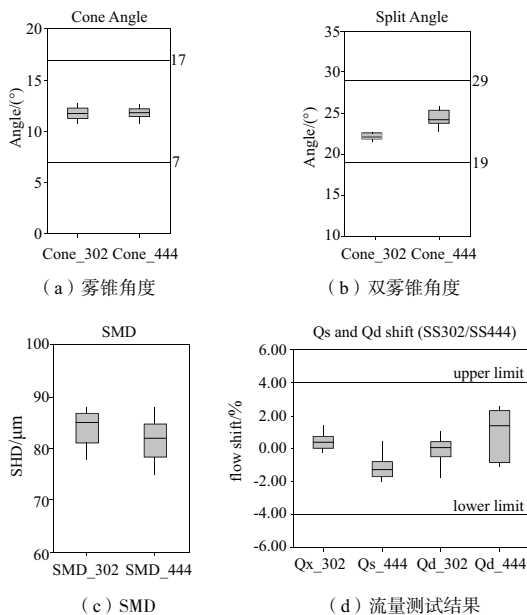


图 12 性能测试结果

4 结语

经过 CAE 仿真及分析制成样件的 HALT 结果,得出以下结论:

1) 在相同焊接参数条件下,SS444 比 SS302 具有更好的焊接性;

2) 在相同测试压力下,SS444 材料样件比 SS302 材料样件疲劳寿命有显著提高,与 ANSYS 仿真结果有较好的一致性;

3) SS444 材料样件疲劳寿命有进一步提升的空间。

参考文献:

- [1] 宋运通,高强,周磊,等. 不同喷油压力对汽油压燃中高负荷性能试验研究[J]. 内燃机工程,2020,41(3):56-62.
- [2] MUÑOZ M, HAAG R, HONEGGER P, et al. Co-formation and co-release of genotoxic PAHs, alkyl-PAHs and soot nanoparticles from gasoline direct injection vehicles [J]. Atmospheric Environment, 2018, 178: 242-254.
- [3] 付海超,李昕晏,王建华,等. GDI 与 PFI 汽油车微粒排放特性的试验研究[J]. 汽车工程,2014,36(10):1163-1170.
- [4] MARTINET S, LIU Y, LOUIS C, et al. Euro 6 unregulated pollutant characterization and statistical analysis of after-treatment device and driving-condition impact on recent passenger-car emissions [J]. Environmental Science & Technology, 2017, 51(10):5847-5855.
- [5] 樊筱筱,蒋靖坤,张强,等. 轻型汽油车排放颗粒物数浓度和粒径分布特征[J]. 环境科学,2016,37(10):3743-3749.
- [6] 邵利民,常汉宝,周加东,等. 喷嘴结构对多孔喷油器喷射特性影响的研究[J]. 内燃机工程,2010,31(6):43-48.
- [7] 钟玉洁,曾东建,韩伟强. 喷油器特性参数对 YC4 F50 柴油机排放特性的影响[J]. 西华大学学报(自然科学版),2014,33(2):48-52.
- [8] SEQUINO L, BELGIORNO G, DI BLASIO G, et al. Assessment of the new features of a prototype high-pressure "hollow cone spray" diesel injector by means of engine performance characterization and spray visualization [C]//SAE Technical Paper Series. 400 Commonwealth Drive, Warrendale, PA, United States: SAE International, 2018.
- [9] JIANG C Z, PARKER M C, HELIE J, et al. Impact of gasoline direct injection fuel injector hole geometry on spray characteristics under flash boiling and ambient conditions[J]. Fuel, 2019, 241: 71-82.
- [10] 姚春德,耿培林,银增辉,等. 喷嘴结构对喷雾特性的影响[J]. 内燃机学报,2016,34(1):41-47.
- [11] 郭世龙,梅卫江,倪向东,等. 喷油器结构参数与喷油一致性相关关系的试验研究[J]. 车用发动机,2020(3):25-35.
- [12] 崔厚学,胡伦骥,余圣甫. 轿车喷油器结构与焊接工序研究[J]. 电焊机,2010,40(4):91-94.
- [13] 余世航. YAG 激光焊接不锈钢薄板的技术研究[D]. 长春: 长春理工大学,2013.
- [14] 宫唤春. 视觉传感技术在大功率光纤激光焊接焊缝宽度特征提取的应用[J]. 激光杂志,2019,40(4):158-160.
- [15] GUILHERME L H, DELLA ROVERE C A, KURI S E, et al. Corrosion behaviour of a dissimilar joint TIG weld between austenitic AISI 316L and ferritic AISI 444 stainless steels[J]. Welding International, 2016, 30(4):268-276.
- [16] 但佳永,周和荣,刘鹏洋. 冷凝液硫含量对 SUS444 铁素体不锈钢腐蚀行为的影响[J]. 武汉科技大学学报(自然科学版),2019,42(1):13-21.

收稿日期:2020-08-11