

QPQ 处理对合金灰铸铁凸轮轴耐磨性的影响

沈保罗¹, 高 见², 王艳戎³, 李 莉⁴, 岳昌林⁴,
高致文⁴, 阳 强⁴, 付子学⁴, 曾 勇⁴, 沈晓海⁴

(1.四川大学 材料科学与工程学院, 四川 成都 610064; 2.成都工研科技股份有限公司, 四川 成都 610051; 3.泸州职业技术学院, 四川 泸州 646005; 4.成都金顶凸轮轴铸造有限公司, 四川 郫县 611732)

摘要:研究了 QPQ 处理对合金灰铁耐磨性的影响。合金灰铁试样预先进行不同工艺的正火和回火处理以获得不同体积分数的铁素体, 然后进行 QPQ 处理, 工艺为: 在 580 ℃氮化 3 h 后再在 370 ℃氧化 30 min。金相检查表明, QPQ 处理后的渗层主要由 Fe₂N 和 Fe₃O₄ 组成; 随着合金灰铁中铁素体体积分数的增加, 其渗层厚度增加。磨损试验表明, 经过 QPQ 处理的合金灰铁试样的耐磨性显著高于淬火加低温回火试样的耐磨性; 有氧化层的合金灰铁的耐磨性比仅有氮化层的耐磨性更高。

关键词: QPQ 处理; 合金灰铁; 氮化层; 氧化层; 耐磨性

中图分类号: TG156.8+2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-8345(2008)03-0074-04

Influence of QPQ Composite Salt Bath Treating on Wear Resistance of Alloyed Gray Iron for Camshaft

SHEN Bao-luo¹, GAO Jian², WANG Yan-rong³, LI Li⁴, YUE Chang-lin⁴,
GAO Zhi-wen⁴, YANG Qiang⁴, FU Zi-xue⁴, ZENG Yong⁴, SHEN Xiao-hai⁴

(1.College of Materials Science and Engineering, Sichuan University, Chengdu 610064, China; 2.Gongyan Science and Technology Co.Ltd., Chengdu 610051, China; 3.Luzhou Professional Technology Institute, Luzhou 646005, China; 4. Jinding Camshaft Casting Co. Ltd., Pixian 611732, China)

Abstract: The influence of QPQ composite salt bath treating on wear resistance of alloyed gray iron was investigated. At first the alloyed gray iron specimens were pretreated with different normalizing and tempering processes in order to obtain different content of ferrite, then treated in the QPQ composite salt bath according to the following process: nitrided at 580 ℃ for 3 h, then oxidated at 370 ℃ for 30 min. Microstructure examination showed that, after having been treated in QPQ composite salt bath, the penetrated layer of the specimen consisted mainly of Fe₂N and Fe₃O₄; thickness of the penetrated layer increased with increasing of the ferrite content. The wear resistance test exhibited that the wear resistance of the specimens which had been treated in the QPQ composite salt bath were obviously higher than that of the specimens which had been quenched and temperature at low temperature; and the wear resistance of alloyed gray iron specimens having oxidated layer was further higher than that of specimens having only nitrided layer.

Key words: QPQ composite salt bath treating; alloyed gray iron; nitrided layer; oxidated layer; wear resistance

收稿日期: 2007-10-18

修定日期: 2008-02-03

作者简介: 沈保罗(1945.2-), 男, 四川大学教授, 博士生导师, 从事金属材料及其表面处理研究工作, 在国内外学术期上发表文章 200 余篇。

凸轮轴的主要失效方式是凸轮的磨损^[1-4]。为了提高铸造凸轮轴的使用寿命, 国内外材料科学工作者普遍采用凸轮感应淬火、离子氮化、硫氮化^[5]、凸轮钨极氩弧重熔^[6]、激光表面淬火^[7]等表面

的原因, 根据气孔的目视特征、分布规律、气孔废品增加速度, 结合实际生产的配料比例、工艺方法、原材料来源, 判断缺陷种类, 熟练掌握并善于应用各种工艺侦查手段, 在实践中不断积累经验、吸取教训, 完善铸件生产工艺, 气孔缺陷造成的损失就会降到最低程度。

参 考 文 献

- [1] 陈国桢, 肖柯则, 姜不居, 编. 铸件缺陷和对策手册[M]. 北京: 机械工业出版社, 1996: 75-131.
- [2] 袁东洲, 铝对活塞环铸件形成皮下气孔的影响 [J]. 内燃机配件, 2001, (2): 16-17.

(编辑: 杨 杨, E-mail: xdzt_yy@fawfc.com)

热处理工艺。最近, Ipeka R 等人研究了通过渗 B 提高凸轮耐磨性的方法^[8]。众所周知, 氮化是一种低温化学热处理工艺, 不但可以改善钢铁零件的耐磨性和耐腐蚀性, 而且具有零件处理后变形小的特点。最近几年国外的研究表明^[9-10], 氮化以后再进行氧化处理还可以进一步提高钢铁零件的耐磨性和耐腐蚀性。QPQ 处理就是一种氮化加氧化的复合盐浴处理工艺, 而且 QPQ 处理已经在汽车和摩托车行业得到应用^[11]。根据国外报道, 大约在十多年前国外 QPQ 技术在汽车行业的应用就达到了相当规模, 几种重要汽车零件 1999 年的年产量为: 曲轴 230 万件, 凸轮轴 575 万件, 气门 34 500 万件, 气门弹簧 6 900 万件, 扭转盘 7 500 万件^[12-13]。笔者对凸轮轴用合金灰铸铁经过 QPQ 处理后, 基体、氮化层和氧化层的耐磨性进行了研究, 以便对 QPQ 处理工艺有更深入的了解。

1 试验方法

1.1 合金熔炼

采用 500 kg 中频感应电炉熔炼合金灰铸铁, 炉衬材料为石英砂; 用四川 VTi 生铁、废钢、碳素 CrFe、碳素 MnFe、75SiFe、MoFe、电解 Ni 和石墨增 C 剂等调整化学成分。熔炼温度为 1 460~1 480 ℃, 铁液出炉温度为 1 420~1 440 ℃。孕育在 60 kg 的浇包内进行, 75SiFe 孕育剂加入量约 0.25%。

1.2 凸轮轴铸造

在四周充填铁丸的树脂砂壳型中浇注可淬硬 Cr-Ni-Mo 系合金铸铁凸轮轴, 浇注温度为 1 340~1 360 ℃。浇注 1 h 后打箱(凸轮轴温度约 200 ℃)。

1.3 试样制备

用线切割的方法将合金灰铸铁凸轮轴切割成 11 mm×11 mm×11 mm 的立方块试样, 以备热处理用。

1.4 合金灰铸铁的预处理

将所有合金灰铸铁试样加热到 900 ℃, 然后取一些试样保温 1 h 空冷到室温; 其余试样随炉冷却到 680 ℃并分别保温 1~3 h 以获得不同含量的铁素体。

1.5 合金灰铸铁的 QPQ 处理

将该合金灰铸铁试样浸入 580 ℃的碳氮共

渗盐浴(CNO-浓度为 32%)中保温 3 h 后在 370 ℃氧化盐浴中保温 30 min。

1.6 金相分析

用日本 Olympus 光学显微镜观察 QPQ 处理试样的组织形貌并使用光学显微镜上的测微尺测量渗 B 层厚度。用菲利普 X 射线衍射仪(Cu K α 射线, 40 kV, 40 mA)分析 QPQ 处理试样的相组成。

1.7 磨损试验

在 M200 型块环滑动磨损试验机上进行磨损试验, 上试样为 QPQ 处理试样, 对磨副下试样为淬火并回火到硬度为 60 HRC 的 $\phi 50$ mm 的 GCr15 钢圆环(其表面在磨床上磨光), 圆环的转速为 200 r/min, 所加载荷 30 N, 磨损时间为 1 h。用感量为 0.1 mg 的 TG328A 型电光分析天平测试每个试样磨损前后的质量, 用失重法评价耐磨性。

2 试验结果与讨论

2.1 合金灰铸铁的化学成分

$w(C)$ 3.34%, $w(Si)$ 2.06%, $w(Mn)$ 0.56%, $w(Cr)$ 0.78%, $w(Ni)$ 0.25%, $w(Mo)$ 0.32%, $w(V)$ 0.03%, $w(Ti)$ 0.12%, $w(P)$ 0.07%, $w(S)$ 0.03%。

2.2 合金灰铸铁的预处理工艺及显微组织

合金灰铸铁的预处理工艺及其铁素体体积分数见表 1, 其中 H62 试样的金相组织见图 1。

2.3 QPQ 处理后合金灰铸铁的组织

经过 QPQ 处理后, 渗层中的化合物层(白亮层)厚度见表 2。值得注意的是, QPQ 处理前, 试样中的铁素体体积分数越多的, 处理后化合物的厚度越厚。这是因为, QPQ 是在铁素体温度区域进行的热处理, 试样中珠光体的片状渗碳体会妨碍 N 的扩散使渗层深度减薄。具有代表性的 H63 试样的金相组织形貌见图 2。由图 2 可见, 经过

表 1 合金灰铸铁各种预处理后的铁素体体积分数

Tab.1 Ferrite contents of gray iron specimens after different pretreating

编号	预处理工艺	铁素体体积分数(%)
H91	加热到 900 ℃保温 1 h 后空冷到室温	2.5
H61	加热到 900 ℃保温 1 h 后炉冷至 680 ℃, 再保温 1 h 后空冷到室温	5.6
H62	加热到 900 ℃保温 1 h 后炉冷至 680 ℃, 再保温 2 h 后空冷到室温	9.8
H63	加热到 900 ℃保温 1 h 后炉冷至 680 ℃, 再保温 3 h 后空冷到室温	12.6

QPQ 处理后, H63 试样表面有大约 $14\ \mu\text{m}$ 厚的白亮层; 其 X 衍射曲线见图 3, 由 X 衍射曲线可以看出, 白亮层组织主要由 Fe_2N 和 Fe_3O_4 组成。由于氮化处理在前、氧化处理在后, 因此极表面层是 Fe_3O_4 , 而亚表层是 Fe_2N 。

2.4 各种处理铸铁试样的磨损失重

经过各种处理的合金灰铸铁试样的磨损失重见表 3。由表 3 可见, 该铸铁经过 $900\ ^\circ\text{C}$ 淬火加 $200\ ^\circ\text{C}$ 回火后的磨损失重是最高的。不管采用何种预处理工艺, 合金灰铸铁经过 QPQ 处理后, 其表面有氧化层的磨损失重最低; 用金相砂纸磨去氧化层后 (仅存在氮化层) 再进行磨损试验, 其

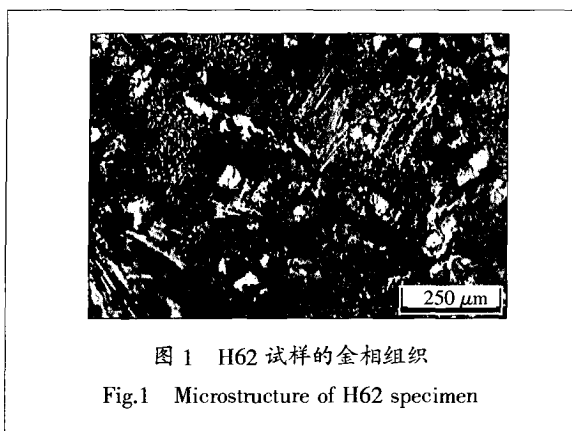


图 1 H62 试样的金相组织

Fig.1 Microstructure of H62 specimen

表 2 经过 QPQ 处理后各试样的化合物层厚度

Tab.2 Compound layer thickness of specimens treated in QPQ composite salt bath

试样编号	化合物层厚度/ μm
H91	8
H61	10
H62	12
H63	14

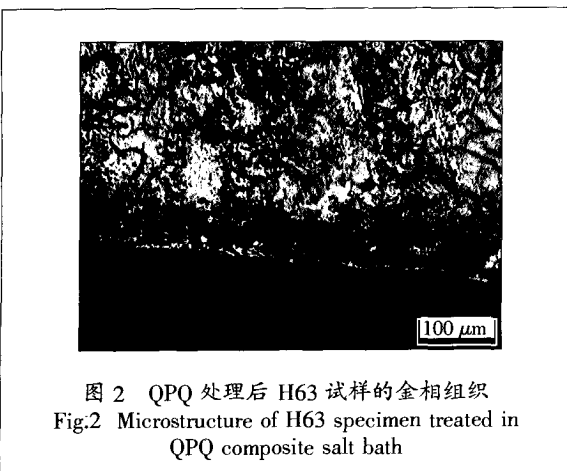


图 2 QPQ 处理后 H63 试样的金相组织

Fig.2 Microstructure of H63 specimen treated in QPQ composite salt bath

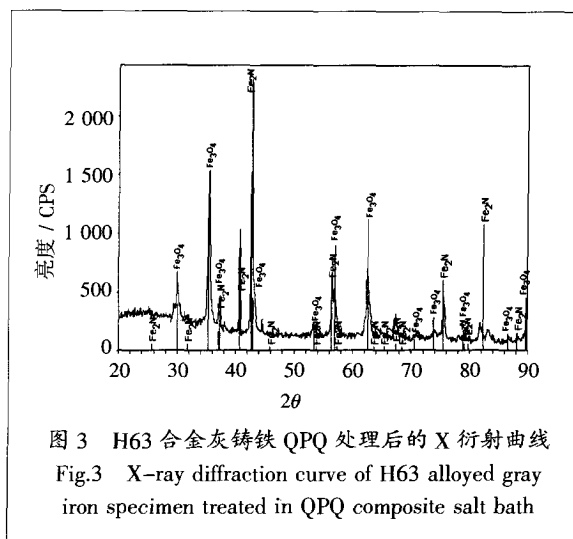


图 3 H63 合金灰铸铁 QPQ 处理后的 X 衍射曲线

Fig.3 X-ray diffraction curve of H63 alloyed gray iron specimen treated in QPQ composite salt bath

表 3 各种处理合金灰铸铁磨损的失重

Tab.3 Wear caused weight loss of gray iron specimens treated with different processes

处理工艺	H91	H61	H62	H63
淬火加低温回火试样失重/mg	10.5	10.5	10.5	10.5
QPQ 处理无氧化层试样失重/mg	0.6	0.4	0.4	0.8
QPQ 处理有氧化层试样失重/mg	0.3	0.2	0.2	0.2

磨损失重明显高于有氧化层的磨损失重。此现象说明, 合金灰铸铁经过 QPQ 处理形成的氧化层更耐磨。

2.5 有关磨损的讨论

磨损形貌观察表明, 淬火加低温回火合金灰铸铁试样的滑动摩擦磨损机制主要是低应力擦伤磨损; 众所周知, 对于擦伤式摩擦磨损而言, 材料的硬度是决定其耐磨性的最根本因素, 提高材料的硬度也就可以提高材料的耐磨性。渗 C、渗 B 以及氮化等化学热处理工艺都可以提高钢铁零件的硬度, 因而有利于提高其耐磨性。显微硬度测定表明, 合金灰铸铁经过 QPQ 处理后, 渗层的显微硬度在 $1\ 245\sim 1\ 465\ \text{HV}$ 之间, 比其经过 $900\ ^\circ\text{C}$ 淬火加 $200\ ^\circ\text{C}$ 回火的试样硬度 ($57.6\ \text{HRC}$) 要高得多, 这可能是 QPQ 处理试样比淬火加低温回火试样耐磨性高得多的主要原因。与氮化层相比, Fe_3O_4 氧化层更有利于降低摩擦系数和提高磨损抗力^[9-10], 可见, Fe_3O_4 氧化层的这种作用也会对减少滑动摩擦磨损中的粘着磨损有利。因而, 在氮化层的表面有氧化物时耐磨性会更高。



华铸软件

华中科技大学华铸软件中心

3 结论

(1)合金灰铸铁经过正火加回火的预处理,可以改变基体组织中的铁素体体积分数,回火时间延长,其铁素体量越多。

(2)预处理合金灰铸铁经过 QPQ 处理后,其表面都形成 Fe_2N 和 Fe_3O_4 复合渗层。合金灰铸铁中的铁素体量越多,渗层越厚。

(3)合金灰铸铁经过 QPQ 处理后,其滑动摩擦磨损耐磨性较淬火加低温回火铸铁显著提高;在氮化层表面有氧化层的合金灰铸铁的耐磨性比仅有氮化层合金灰铸铁的耐磨性更高。

参 考 文 献

- [1]李平,魏伯康,万仁芳,等.富康轿车凸轮轴国产化生产技术[J].现代铸铁,2002,(1):33-36.
- [2]李平,蔡启舟,魏伯康,等.凸轮轴激冷面气孔成因及防止方法的探讨[J].现代铸铁,2002,(4):35-38.
- [3]李平,魏伯康,蔡启舟,等.工艺因素稳定性对冷硬铸铁凸轮轴质量的影响[J].现代铸铁,2004,(1):41-44.
- [4]李莉,沈保罗,岳昌林,等.一种高强度 D 型石墨合金灰铸铁凸轮轴的生产和应用[J].现代铸铁,2007,(1):56-59.
- [5]J Michalski, J Marszalek, K Kubiak. An experimental study of diesel engine cam and follower wear with particular reference to the properties of the materials[J]. Wear, 2000, 240: 168-179.
- [6]A W Orowicz, A Trytek. Effect of rapid solidification on sliding wear of iron castings[J]. Wear, 2003, 254: 154-163.
- [7]王云山,杨洗陈,李会山,等.479Q 型凸轮轴激光淬火工艺研究[J].天津工业大学学报,2003,22(5):66-68.
- [8]R Ipeka, B Selcuk, B M Karamisc, et al. An evaluation of the possibilities of using borided GG25 cast iron instead of chilled GG25 cast iron (surface properties) [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2000, 105: 73-79.
- [9]R Ramesh, T R Gnanamoorthy. Effect of post oxidation on the fretting wear behavior of liquid nitrided En 24 steel [J]. Surface & Coatings Technology, 2006, 200: 3926-3932.
- [10]A Alsaran, H Altun, M Karakan, et al. Effect of post-oxidizing on tribological and corrosion behaviour of plasma nitrided AISI 5140 steel [J]. Surface and Coatings Technology, 2004, 176: 344-348.
- [11]李惠友,罗德福. QPQ 技术的实际应用-QPQ 盐浴复合处理技术之五[J].机械工人·热加工, 1999, (12): 26-27.
- [12]罗德福,李惠友. QPQ 技术的现状和展望 [J]. 金属热处理, 2004, (1): 39-43.
- [13]C Dawes. Nitrocarburising and its Influence in the Automatic Sector [J]. Heat Treatment of Metals, 1991, (1): 51-63. MCI

(编辑:王 峰, E-mail: xdz_t_wf@fawfc.com)

华中科技大学华铸软件中心拥有一支由 40 多位教授、博士、硕士组成的研究团队,专门从事铸造行业计算机应用技术的研发,开发了华铸 CAE 等系列华铸软件产品,致力于为国内外铸造企业提供完整的计算机数字化、信息化解决方案。

华铸 CAE-铸造工艺分析系统

经二十多年的改进和完善,已成为能协助技术人员完成铸件工艺优化的成熟应用工具。该软件对铸件充型过程、凝固过程进行计算机模拟,预测铸造过程中可能产生的卷气、夹渣、冲砂、浇不足、冷隔、缩孔、缩松等缺陷。在提高产品质量、降低废品、减少消耗、缩短试制周期、赢得外商订单等方面为用户创造了显著的经济效益,在行业内享有广泛的声誉和信誉。目前国内外用户累计已超过 260 家,企业装机数已超过 700 套;30 多所高校使用本软件进行教学科研,高校装机数已超过 1000 个节点;已推出英文版并销往多个国家。据所收集的用户反馈信息,截止到 2007 年底,本软件在部分用户生产应用中取得的效益累计已超过 15 亿元。

华铸 FCS-铸造炉料配比软件系统

为华铸软件中心最新推出产品。主要功能有自动配比、手动配比、炉前配比和最小成本配比;分铸钢、铸铁、铸铜、铸铝等模块。30 多家企业应用实践表明,采用该系统既保证了铸件合金成分,又实现了成本最小化。

华铸 ERP-铸造企业管理信息系统

是一套完整的基于局域网/因特网相结合的铸造企业管理信息系统,该系统已在榆次液压件厂、天津中机雄风、杭州宏达等单位应用。包含订单管理、销售管理、生产管理、铸件管理、库存管理、设备管理、人事工资和客户管理等模块。

华铸 CAD-铸造工艺计算机辅助设计系统

实用的铸造工艺设计软件,分基于 AutoCAD 的二维铸造工艺 CAD(华铸 CAD-2D)和基于 UG 的三维铸造工艺 CAD(华铸 CAD-3D)。上述系统已在宝鸡石油机械、上海通用东岳动力等单位应用,实践表明采用华铸 CAD 可以规范工艺管理、提高工作效率。

华中科技大学华铸软件中心

地址:武汉市珞喻路 1037 号华中科技大学材料学院
邮编:430074

联系人:周建新 廖敦明 陈立亮 刘瑞祥

电话:(027) 87541922、87557494 传真:(027) 87541922

网址:www.intecast.com

E-mail: intecast@163.com ngmn@mail.hust.edu.cn