

# 可锻铸铁多段热处理工艺研究

邹安全<sup>1</sup>, 邓沛然<sup>2</sup>, 邓芬燕<sup>1</sup>, 邓俊彦<sup>3</sup>, 陈革英<sup>3</sup>

(1. 湖南科技大学机械设备健康维护湖南省重点实验室, 湖南湘潭 411201;

2. 上海交通大学材料科学与工程学院, 上海 200030; 3. 暨南大学, 广州 510630)

**[摘要]** 基于可锻铸铁的特点, 成功开发了可锻铸铁多段加热热处理工艺。该工艺可使可锻铸铁铸件石墨化退火时间节约 50% 左右, 获得了石墨核心多晶粒细小均匀分布, 碳化物消除彻底的显微组织; 产品综合力学性能超过了现行国际标准的性能指标, 在现行国际及 ISO5922-81《可锻铸铁》标准的基础上可增加 KTH400-12 和 KTZ750-02 两个牌号; 经该工艺处理的线路工具、铁路管件、汽车发动机活塞等产品性能良好、质量可靠。

**[关键词]** 可锻铸铁; 渗碳体; 多段热处理; 石墨化退火

**[中图分类号]** TG143 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1009-1742(2005)12-0074-04

可锻铸铁是高质量铸铁的一种, 它是依靠白口铸铁的坯件, 经适当的热处理而获得的, 根据白口铸铁的热处理特点, 可分为石墨化的可锻铸铁和脱碳的可锻铸铁<sup>[1]</sup>。石墨化的可锻铸铁在热处理过程中的主要现象是白口铸铁中渗碳体(一次渗碳体、二次渗碳体和共析渗碳体)进行石墨化。而析出的石墨呈团絮状、基体为铁素体的可锻铸铁; 当在一次渗碳体和二次渗碳体石墨化后采用较快的冷却速度使共析渗碳体来不及分解, 而获得珠光体为基体的可锻铸铁、黑心可锻铸铁的石墨化退火工艺。人们经历了长期的研究和实践, 退火周期由约 150 h<sup>[2]</sup>到上世纪七八十年代缩短到 80~90 h, 其特点是完成石墨化时间长, 石墨核心少, 由于第一阶段石墨化高温时间过长, 因此石墨粗大, 当石墨化不充分时仍有较多的自由渗碳体存在, 从而严重影响工件的组织 and 性能, 且能源的消耗大也是个严重问题。基于此, 开展缩短可锻铸铁石墨化退火时间的工艺研究就具有十分重要的意义。

## 1 黑心可锻铸铁石墨化退火工艺的试验研究

### 1.1 可锻铸铁热处理工艺的研究

可锻铸铁自 16 世纪问世以来, 人们对可锻铸铁如何进行石墨化退火开展了大量研究, 但到上世纪七八十年代可锻铸铁石墨化退火时间仍在 80~90 h, 世界先进水平也为 50~60 h。根据黑心可锻铸铁退火周期长、石墨粗大、碳化物消除不彻底、退火工件机械性能低和使用寿命短的现状, 在充分调查研究, 掌握大量技术资料 and 试验数据的基础上, 笔者进行了铁素体、珠光体可锻铸铁热处理工艺的研究, 采取的方法如下:

1) 铁素体可锻铸铁工艺。特定低温阶段→特定中温阶段→(920℃~980℃)→750℃→700℃→650℃→空冷。

2) 珠光体可锻铸铁工艺。特定低温阶段→特定中温阶段→(920℃~980℃)→(860℃~900℃)→并经(620℃~700℃)高温回火→空冷。

实践结果表明, 按上述工艺处理的可锻铸铁煤炉石墨化退火时间由原工艺的 70 h 缩短到 40 h, 电炉石墨化退火时间由原工艺的 72 h 缩短到 30 h。

### 1.2 可锻铸铁热处理前后显微组织比较

1.2.1 铸件铸态断口及显微组织(细珠光体+共晶莱氏体及少量二次碳化物) 分别如图 1、图 2 所示。

[收稿日期] 2004-12-05; 修回日期 2005-05-09

[作者简介] 邹安全(1964-), 男, 湖南浏阳县人, 在职博士, 湖南科技大学副教授

1.2.2 铸件热处理过程的显微组织如图 3~图 8 所示。

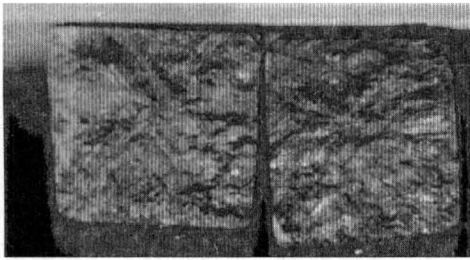


图 1 铸件铸态断口 (4×)

Fig.1 Fracture of production in cast

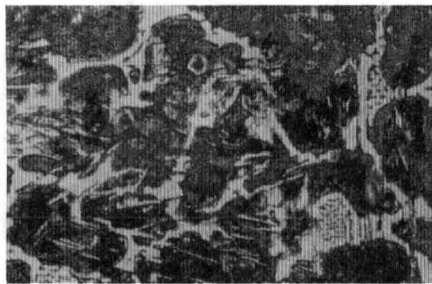


图 2 铸件显微组织 (400×)

Fig.2 Cast microstructure

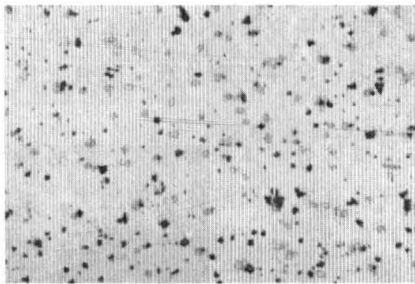


图 3 铸件石墨化退火低温段石墨形态 (100×)

Fig.3 Morphology of graphite for cast after annealing at lower temperature

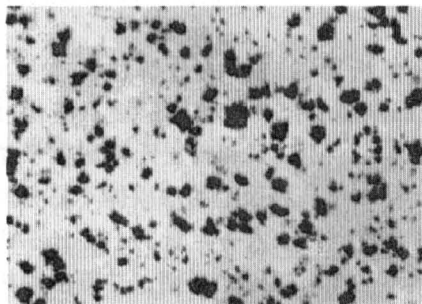


图 4 铸件经特定低中温处理后石墨特征 (100×)

Fig.4 Morphology of graphite for cast after specific lower-middle temperature

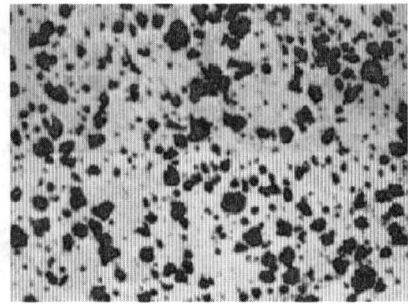


图 5 铁素体可锻铸铁最终热处理后石墨特征 (100×)

Fig.5 Morphology of graphite for ferrite malleable iron after finally heat treatment

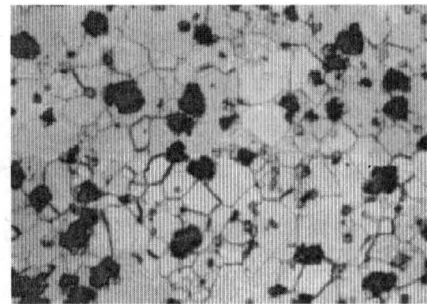


图 6 铁素体可锻铸铁最终热处理后组织 (200×)

Fig.6 Microstructure for ferrite malleable iron after finally heat treatment



图 7 珠光体可锻铸铁最终热处理后显微组组织 (400×)

Fig.7 Microstructure for pearlite malleable iron after finally heat treatment

### 1.3 可锻铸铁热处理工艺力学性能

图 9 为铁素体可锻铸铁抗弯试验特征；表 1 所示为铁素体可锻铸铁新工艺处理后力学性能；表 2 所示为新工艺处理的珠光体可锻铸铁正火状态力学性能；新工艺处理后正火高温回火状态珠光体可锻铸铁力学性能如表 3 所示。

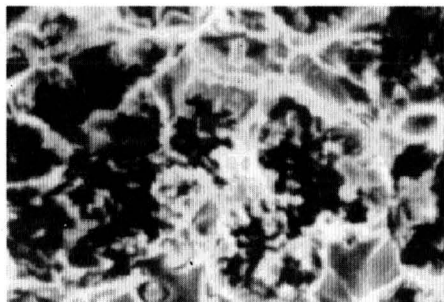


图8 铁素体可锻铸铁最终热处理后电子扫描微观特征 (1 500×)

Fig.8 SEM microstructure for ferrite malleable iron after finally heat treatment

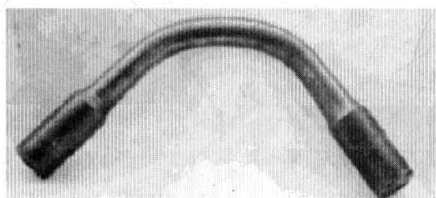


图9 铁素体可锻铸铁最终热处理后抗弯试验效果 (1/2×)

Fig.9 Test characteristic of bending resistance for ferrite malleable iron after finally heat treatment

表1 铁素体可锻铸铁最终机械性能

Table 1 Final mechanics performances for ferrite malleable iron

序号	$\sigma_b$ /MPa	$\delta$ /%	HB	序号	$\sigma_b$ /MPa	$\delta$ /%	HB
1	431.2	15.0	157	6	438.1	14.9	157
2	426.3	15.1	154	7	426.3	15.1	154
3	436.1	14.8	157	8	431.2	15.0	154
4	421.4	15.4	154	9	426.3	15.0	154
5	436.1	15.0	157	10	426.3	15.1	154

表2 新工艺退火后正火状态机械性能

Table 2 Mechanics performances in normalization state after annealing by new process

序号	$\sigma_b$ /MPa	$\delta$ /%	HB
1	779.1	2.08	273
2	779.1	2.08	273
3	774.2	2.1	209
4	779.1	2.1	273

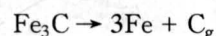
表3 珠光体可锻铸铁性能

Table 3 Performances of pearlite malleable iron by new process

序号	$\sigma_b$ /MPa	$\delta$ /%	HB	序号	$\sigma_b$ /MPa	$\delta$ /%	HB
1	725.5	5.0	240	6	716.5	5.3	229
2	715.4	5.1	234	7	715.4	5.4	229
3	720.3	4.08	237	8	720.3	5.0	237
4	730.1	4.6	24	9	715.5	5.1	229
5	715.4	5.2	237	10	716.4	5.1	237

## 2 结果讨论

可锻铸铁热处理就是将已获得白口铸铁组织中的渗碳体进行石墨化即固态石墨化过程。当 Si 量增加时初生渗碳体和共晶渗碳体数量增加<sup>[3]</sup>。从热力学角度看, 不论在室温或高温下都是不稳定的, 会自发进行分解, 即具有以下反应的可能性:



但在室温下分解极为微弱, 根本感觉不出来; 在加热状态下, 渗碳体以显著的速度自发进行分解, 其分解速度随温度升高而加速。在研究渗碳体分解的可能性时, 除了研究渗碳体分解本身的自由能变化外, 还要考虑相变弹性能及表面能有变化, 即考虑动力学条件。

首先渗碳体分解体积要胀大, 就必须消耗部分能量克服周围介质(固溶体)的阻力, 也就是说石墨化要对外做功; 其次由于体积的变化, 相界面的面积要减少, 因此产生了表面能的改变。随着温度升高, 金属的密度降低, 奥氏体的塑性增大, 自由渗碳体的数量减少, 石墨晶核增多和铁原子自扩散及碳原子扩散速度加快等因素, 加速了渗碳体的分解。这就充分说明渗碳体的分解速度是随温度升高而加快的。

成分偏析对渗碳体的分解往往有很大影响, Mo, Cr 都能形成合金渗碳体延缓石墨化过程。另外, 由于 Mn, Mg, P 和稀土元素富集于晶团界面上, 因此存在于晶界面上的渗碳体不易分解。若调整 C, Si 含量, 并加入一定量的 Bi, B, Al 变质处理, 这样不但能缩短退火周期, 并能得到机械性能好而稳定的铸件<sup>[4]</sup>, 特别是利用纯 Al 脱氧、脱氢, 生成高度弥散的反应产物, 增加石墨核心, 缩短第一阶段退火周期<sup>[5]</sup>。由此可见, 若化学成分相同, 而偏析不同, 渗碳体的分解速度也是不同的。还有

渗碳体的形态对分解速度也是有影响的, 相对来说共晶渗碳体最易分解, 块状渗碳体次之, 针状渗碳体最难分解。

从加速渗碳体分解速度, 增加石墨核心以利短程扩散的考虑, 研究了可锻铸铁多段加热石墨化退火热处理工艺。

低温阶段: 由于铸件的原材料以及在熔炼、浇铸过程中不可避免地要吸收氢气。经低温处理后, 可以使铸件中的氢释放出来, 生成甲烷, 造成一定应力, 有利于共晶渗碳体骨架的松动和分解, 同时渗碳体分解过程中析出铁素体, 有利于增加相界面面积, 亦有助于加速石墨化的进程。也有人认为, 铸件中的 Al 和 N 结合成 AlN 化合物, 同样会产生应力的。这种种认为的共同点是使可锻铸铁石墨化退火过程, 经低温处理增加了如图 3 所示的大量石墨核心, 加速了石墨化过程。

中温阶段: 试验研究发现, 可锻铸铁石墨化退火在经低温处理增加大量石墨核心的基础上, 随即升温至靠近临界温度的中温阶段, 显微组织发生很大变化, 碳化物骨架全部打乱, 分解速度加快, 原子扩散系数随温度升高激活, 在中温阶段保温的条件下, 具有较高的激活, 可使碳原子越过一定的势垒进行扩散分解, 因而渗碳体在临界温度上下均匀分解, 在此温度区间保温, 增加石墨核心数目的同时, 由于石墨附近的碳原子吸附能力很强, 因而沿石墨基面 [0001] 方长大速度快, 明显可见石墨合并团球化趋势 (如图 4 所示)。但中温阶段碳化物分解是有限的, 要碳化物继续分解势必提高加热温度, 可锻铸铁经低、中温分段加热, 大大缩短了高温石墨化时间, 十分明显地改善了石墨形态和基体组织, 全面提高了综合力学性能 (如表 1~3 所示)。

由于试验研究较好地控制了这个过程, 从而研制成功了可锻铸铁多段加热处理新工艺, 经此工艺处理的线路工具、柔性接口管联接螺栓、铁路管

件、汽车发动机活塞等, 石墨化退火时间减少 50% 左右, 且显微组织石墨核心多、晶粒细均匀、碳化物消除彻底、性能指标达铁素体型 KTH400-12 和珠光体型 KTZ750-02 标准。由于采用该工艺处理的可锻铸铁件综合力学性能高, 产品质量可靠, 深受用户欢迎。

### 3 结论

1) 可锻铸铁热处理新工艺, 在加热阶段采用多段连续等温方式, 使石墨核心多, 大大缩短了石墨化退火时间 (节煤约 42%, 节电约 58%), 节约了能源, 是可锻铸铁热处理工艺的一大突破。

2) 用该工艺处理的可锻铸铁件具有石墨核心多, 晶粒细小均匀, 碳化物消除彻底的显微组织及良好的综合力学性能的铁素体可锻铸铁  $\sigma_b$  不低于 421.4 MPa,  $\delta$  不低于 15%。珠光体可锻铸铁  $\sigma_b$  不低于 715.4 MPa,  $\delta$  不低于 5% 或  $\sigma_b$  不低于 750 MPa,  $\delta$  不低于 2%。

3) 由于该工艺处理的产品质量稳定, 产品综合性能超过了国际强度指标, 可增加 KTH400-12 和 KTZ750-2 两个牌号。时间短, 节约能源, 降低可锻铸铁的热处理成本, 其可靠性, 适用性和经济性具有重大实际意义, 并有良好的推广使用前景。

#### 参考文献

- [1] 姜振雄. 铸铁热处理 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1978. 153
- [2] 古里亚耶夫. 金属学 [M]. 石霖译. 北京: 机械工业出版社, 1959. 159
- [3] 江燕云, 江海燕, 黄明富, 等. 低铬白口铸铁腐蚀磨损特性研究热处理 [J]. 2003, (4): 18
- [4] 大连工学院金属材料及热处理编写小组. 金属学及热处理 [M]. 北京: 科技出版社, 1977. 527~528
- [5] 机械工程及电机工程手册 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1982. 139~187

## Study on Technology of Multistage Heat Treatment for Malleable iron

Zou Anquan<sup>1</sup>, Deng Peiran<sup>2</sup>, Deng Fenyan<sup>1</sup>, Deng Junyan<sup>3</sup>, Chen Geyang<sup>3</sup>

(1. Hunan University of Science and Technology, Hunan Provincial Key Laboratory of Health

Maintenance for Mechanical Equipment, Xiangtan, Hunan 411201, Chian;

2. School of Materials Science and Engineering, SJTU Shanghai 200030, Chian;

3. Jinan University, Guangzhou, 510630, Chian)

(cont. on p.82)

动数据接入手段,但是作为一种新的公共宽带移动数据接入业务,它的广泛应用还面临着巨大的挑战,同时也为PWLAN技术和业务的发展提出了要求,带来了机遇。EAP-FAST作为PWLAN接入认证中采取的一种身份认证协议,是一个可扩展的构架,它允许使用预先公布的密钥来建立一个受保护的隧道,以用于相互间的认证。在研究FAST认证协议的特点与实现技术基础上,已在PWLAN综合实验平台上调试并运行成功,为下一步面向校园的安全无线网络试点的开设提供了一种关键身份认证技术。

#### 参考文献

[1] IEEE Standard 802.1x-2001 Standard for Port based

Network Access Control [S]. <http://standards.ieee.org/getieee802/download/802.1X-2001.pdf>, 2001

[2] Blunk L. PPP Extensible Authentication Protocol (EAP), RFC2284 [S]. <http://www.ietf.org/rfc/rfc2284.txt?number=2284>, 1998

[3] Cam-Winget N, McGrew D, Salowey J, Zhou H. EAP Flexible Authentication via Secure Tunneling (EAP-FAST), Internet Draft [S]. <http://www.ietf.org/internet-drafts/draft-cam-winget-eap-fast-01.txt>, 2004-02-09

[4] Dierks T, Allen C. The TLS Protocol RFC2246 [S]. <http://www.ietf.org/rfc/rfc2246.txt>, 1999

[5] Rivest R. The MD5 Message-Digest Algorithm, RFC1321 [S]. <http://www.ietf.org/rfc/rfc1321.txt>, 1992

## The Research and Implementation of EAP-FAST Protocol in Public Wireless Local Area Network

Cao Ping, Pei Wenjiang

(Department of Radio Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China)

[Abstract] Since the LEAP wireless authentication protocol is vulnerable to dictionary attacks, the flexible authentication via secure tunneling (EAP-FAST) was introduced by Cisco Corporation in 2004, which establishes a mutually authenticated protected tunnel to protect the authentication data. This friendly and easily deployable network access solution will be widely used in WLAN. The authors research and design this protocol in public wireless local area network, and implement the function of EAP-FAST peer, authenticator and FAST server in PWLAN integrate experimentation flat.

[Key words] public wireless local area network; port based network access control (802.1x); flexible authentication via secure tunneling (EAP-FAST)

(cont. from p.77)

[Abstract] Based on the characteristic of malleable iron, the technology of multistage heat treatment for malleable iron was investigated successfully. Compared with the present technology, the time of graphitizing annealing using new process was saved about 50%. The microstructure, with uniform distribution of fine polycrystal of graphite nuclei and full elimination of carbide, was obtained. Comprehensive mechanics performance of product exceeded that of present international standard. Two brands of KTH400-12 and KTZ750-02 can be added on the base of present international and "malleable iron" standards. Those products, such as line tool, pipe fitting for railway, engine piston of car etc, with better performances and credible qualities treated by the technology, were welcomed by users.

[Key words] malleable iron; cementite; multistage heat treatment; graphitizing annealing