

文章编号:1000-582X(2002)07-0084-04

不同基体组织的 Cu - Mo - Ni 合金球铁热疲劳性能*

李远睿

(重庆大学材料科学与工程学院,重庆 400044)

摘要:将同炉熔制并同时浇铸的,名义成分为 0.8% Cu - 0.4% Mo - 0.7% Ni 的合金球铁楔形试块粗加工后将其基体热处理成下贝氏体、奥-贝组织、细片状珠光体和粒状珠光体 4 种不同组织后,再精加工成 $\phi 20 \text{ mm} \times 20 \text{ mm}$ 等直圆柱试样。对样品进行了 $(600 \pm 10) \text{ }^\circ\text{C}$ (盐浴) ~ $(70 \pm 30) \text{ }^\circ\text{C}$ (油) 和 $650 \pm 10 \text{ }^\circ\text{C}$ (盐浴) ~ $(25 \pm 5) \text{ }^\circ\text{C}$ (水) 的 2 种热循环试验,得到了一致的结果:该合金球铁的基体组织不同,其热疲劳性能有很大的差异。此项性能由好到差依次为:下贝氏体基体 → 调质(粒状珠光体)基体 → 正火(片状珠光体)基体 → 奥-贝基体。笔者结合不同基体组织的强度和 A_{c1} 点以下的温度范围内组织的热力学稳定性等因素对热疲劳性能的影响,说明了产生上述试验结果的原因。

关键词:铜-钼-镍合金;球铁;热疲劳

中图分类号: TG143.5

文献标识码: A

10L207 机车发动机活塞原用材料是含约 0.7% Ni 的合金球铁,其最终热处理为调质态(580 $^\circ\text{C}$ 回火)。

该种活塞在使用过程中,型腔内是 50 ~ 100 $^\circ\text{C}$ 热油循环冷却,而燃油喷射面的最高温度近 550 $^\circ\text{C}$,且该面还受燃气和脉冲爆发气压作用。其失效方式有燃油喷射面穿孔并沿孔开裂及热疲劳两类。

燃油喷射面穿孔通常是由铸造时产生的黑渣、缩孔、疏松等缺陷而探伤时又未查出所致。热疲劳裂纹呈龟裂网状,此项性能取决于材料和工作条件。对于前者,靠提高铸造质量解决;而对后者,应设法提高材料本身的热疲劳性能。

根据文献[1]介绍,为省镍并稳定奥氏体及提高淬透性等,在原成分基础上添加约 0.8% Cu 和 0.4% Mo,熔制并球化和孕育处理后以同炉铁合金浇铸成一批楔形试样。将它们的基体处理成不同组织后再加工成 $\phi 20 \text{ mm} \times 20 \text{ mm}$ 的等直圆柱形试样进行热疲劳试验。试验结果表明:下贝氏体基体的热疲劳性能最好,调质态基体组织次之,而奥-贝基体球铁的热疲劳性能最差。为验证此结果,恶化条件后进行了重复试验,得到一致的情况。

分析讨论后认为:基体的强度和组织的稳定性是影响该种合金球铁热疲劳性能的两个关键因素。

1 样品准备

1.1 熔制

用 500 kg 的中频感应炉熔炼 Cu - Mo - Ni 合金球铁,于 $(1400 \pm 20) \text{ }^\circ\text{C}$ 浇铸。用稀土镁球化剂球化处理后,用硅铁孕育。在浇铸活塞时,同时浇铸楔形试块 20 块。把得到的楔形试块下端刨切成 $40 \text{ mm} \times 25 \text{ mm} \times 200 \text{ mm}$ 的长方体铸条,用以进行分析和试样加工等。

1.2 成分

对长方体铸条进行了化学成分分析,得到样品的实际化学成分如表 1 所示。

表 1 Cu - Mo - Ni 合金球铁的化学成分 %

成分	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cu	Mo
Cu - Mo - Ni 合金球铁	3.61	2.63	0.54	0.030	0.020	0.73	0.79	0.39

1.3 铸造组织

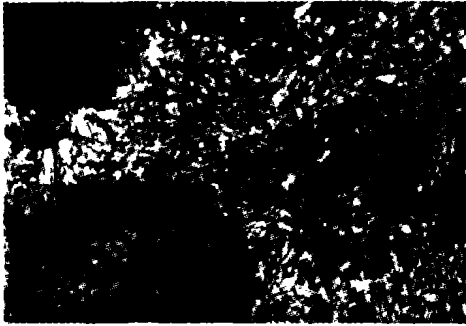
从长方体铸条上用线切割截取金相试样,制备后观察并拍得铸态组织如图 1 所示。其基体是珠光体 + 少量的、一般沿石墨周围分布的铁素体,石墨球化较好,无游离碳化物。

参照 JB1802 - 76《稀土镁球墨铸铁金相标准》,在放大 100 倍的显微镜下用比较法评定出样品的球化级

* 收稿日期:2002 - 03 - 18

基金项目:成都铁路局资助项目

作者简介:李远睿(1946 -),男,重庆人,重庆大学副教授。从事金属材料研究。

图 1 Cu-Mo-Ni 合金球铁的铸态组织 $\times 400$

别为 2~3 级。

1.4 热处理

将 12 块长方体铸条粗加工成 22 mm 的圆柱棒,置于 $(900 \pm 10)^\circ\text{C}$ 的箱式炉内加热并保温 1.5 h 后随炉冷却到 $(850 \pm 10)^\circ\text{C}$,在此温度下再保温 0.5 h。随后以不同方式冷却:

1) 3 件散开空冷(正火);2) 3 件淬入油内(淬火),然后 $(580 \pm 10)^\circ\text{C}$ 回火 3.5 h;3) 参照 C3.95%、Si2.6%、Mn0.71%、Mo0.41%、Cu0.92%、S0.018%、P0.08% 成分的 Cu-Mo 合金球铁过冷奥氏体等温转变动力学曲线并考虑到 Ni 的影响^[2],在 $(260 \pm 5)^\circ\text{C}$ 硝盐内等温 1.5 h 空冷后于 $(280 \pm 5)^\circ\text{C}$ 下回火 3.5 h;4) 3 件置于 $(350 \pm 5)^\circ\text{C}$ 硝盐槽内等温 1.5 h 后空冷。

然后将它们精加工成 $\phi 20 \text{ mm} \times 20 \text{ mm}$ 的圆柱形试样,先用磁粉表面探伤,再用 γ 射线进行内部缺陷检验,选出作热疲劳试验的试样。

1.5 金相组织

处理成不同基体组织的热疲劳试样的金相组织如图 2 至图 6 所示。

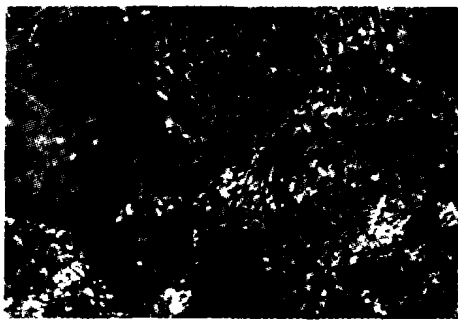
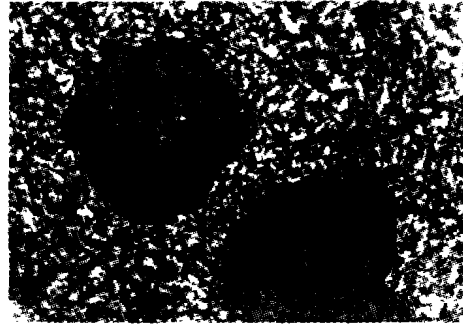
图 2 细片状珠光体 + 少量铁素体基体 $\times 400$

图 2 为基体是细片状珠光体 + 少量主要分布于石墨球周围的铁素体;而图 3 的基体是粒状珠光体 + 少量主要分布于石墨球周围的铁素体。

图 4 是先经 260°C 等温 90 min 后再于 280°C 回火 3.5 h 的组织,得到了下贝氏体基体的合金球铁。图 5 是经 350°C 等温 90 min 空冷后的金相组织,基体为上贝

图 3 粒状珠光体 + 少量铁素体基体 $\times 400$ 图 4 下贝氏体基体的合金球铁组织 $\times 1000$ 图 5 上贝氏体 + 残余奥氏体基体球铁 $\times 1000$

氏体 + 残余奥氏体,此种组织的球铁称为奥-贝球铁。

1.6 硬度测定

测定出上述 4 种基体组织的 Cu-Mo-Ni 合金球铁的硬度值并列于表 2 内。

表 2 四种不同基体的 Cu-Mo-Ni 合金球铁的硬度值

热处理条件	基体组织	硬度(HRC)
油淬火 + 580°C 回火	粒状 P + 少量 F	29.5、29.0、29.3
正火	细片状 P + 少量 F	26.4、26.2、25.8
260°C 等温 90 min + 280°C 回火 3.5 h	B_T + 少量 $A_{残}$	48.8、49.2、49.0
350°C 等温 90 min	奥-贝基体	37.8、38.2、37.6

2 热疲劳试验

使用比例为 NaCl:KCl:BaCl₂ = 2:3:5 的混合盐于坩锅盐炉内加热试样。盐浴温度控制在 $600 \pm 10^\circ\text{C}$,冷却油温控制在 $70 \pm 30^\circ\text{C}$ 范围。

取 4 种不同基体组织的 $\phi 20 \text{ mm} \times 20 \text{ mm}$ 热疲劳试

样各 3 个,置于铁丝网容器内,放在盐浴内加热 10 min 后,取出立即浸入油内冷却 2 min。用棉纱擦去样品表面的油后,又以相同的方法再次加热和冷却试样。如此循环下去,直至基体组织相同的 3 个试样中只要有一个出现了表面微裂纹(通常是试样的圆柱面与顶圆面交界处最先出现),便记下循环次数,视为发生了热疲劳破坏,并停止该种基体试样的试验工作。对尚未出现裂纹的其它基体的试样则继续试验下去,直到其中有一个试样出现了微裂纹为止。

为验证前面热疲劳试验结果的可靠性,四种基体组织的 Cu-Mo-Ni 合金球铁热疲劳试样重新各取 3 个,进行(650±10)℃的盐浴加热 10 min,(25±5)℃的水冷却 1.5 min 后提出并甩去水,烘烤 0.5 min 又重新加热和冷却。以和油冷相同的方法计算循环次数,将 2 次试验结果列入表 3 内。

表 3 不同基体组织的 Cu-Mo-Ni 合金球铁热疲劳试验结果

基体组织	盐浴-油循环次数	盐浴-水循环次数
片状珠光体	2 154	285
粒状珠光体+少量铁素体	2 568	344
奥-贝组织	1 837	253
下贝氏体	3 266	437

显然,基体组织不同时具有不同的热疲劳性能:以下贝氏体为基体时的热疲劳性能最好,回火索氏体+少量铁素体基体次之,细片状珠光体+少量铁素体基体再次之,而奥-贝基体的球铁热疲劳性能最差。由表 3 知,试验结果重现性很好,两种试验条件下得到的该种合金球铁在基体组织不同时的热疲劳性能的规律是完全一致的。

3 试验后的金相组织

取在油中循环冷却试验后的试样各 1 件,从圆柱高度方向切去 3 mm 制成金相试样并拍得金相照片如图 6 至图 9 所示。

显然,经过多次反复间断加热和冷却后,试样的基体组织发生了显著变化:组织趋于一致,发生了严重脱碳,基本上成为铁素体。在累计长时间的加热过程中,原正火组织中的细片状 Fe_3C 和调质组织中的粒状 Fe_3C 均发生了分解: $Fe_3C \rightarrow 3Fe + C$ (石墨),但球状 Fe_3C 的分解过程因其热力学稳定性更好而较慢,故阻碍了基体(F)的长大,使其热疲劳试验后铁素体晶粒较正火者的晶粒更小(比较图 6 和图 7);而原奥-

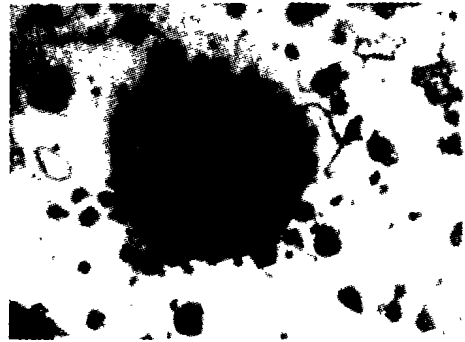


图 6 原正火基体的合金球铁热疲劳试验后的金相组织, F+石墨×400

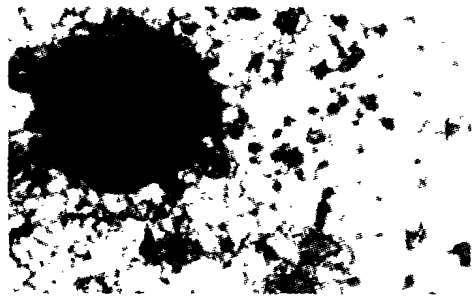


图 7 原调质(580℃回火)基体合金球铁热疲劳试验后的金相组织, F+石墨×400

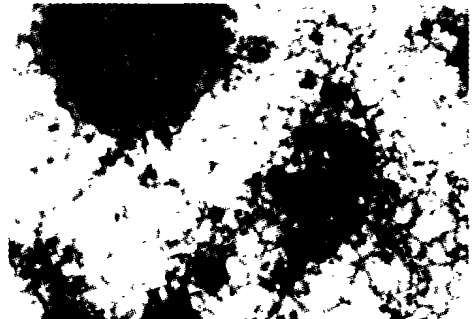


图 8 原奥-贝基体合金球铁热疲劳试验后的金相组织, F+石墨×400



图 9 原下贝氏体基体合金球铁热疲劳试验后的金相组织, F+石墨×400

- 贝基体和下贝氏体基体在反复加热和冷却过程中不稳定的组织均发生了分解,亦产生了严重脱碳现象。

其共同特点是组织趋于转变成 600 °C 下热力学上最稳定的状态。

4 讨论

我们知道,影响材料热疲劳性能的外因是:加热及冷却速度,加热和冷却之间的温度差。对此,因不同基体组织的热疲劳试样在试验时的外部条件相同可以排除。而内因有:材料组织的稳定性、抗氧化能力、导热系数、弹性模量、高温及室温强度等。材料的弹性模量低、导热率高、室温及高温强度高、抗氧化能力强,以及基体组织稳定性好时,其热疲劳性能就高。

和其它铸铁相比,球铁弹性模量较高,导热性能也较差,但它有更高的室温及高温强度,热疲劳性能优于其它铸铁^[3]。球铁也是所有铸铁中抗氧化性能最好的一种。且石墨越圆整,则热疲劳性能愈好,故规定球铁活塞的球化级别在 4 级以内^[2],因化学成分相同的球铁在球化级别也相同的前提下,基体组织变化时对其的弹性模量和导热系数的影响并不明显。这样,无论是何种基体的 Cu-Mo-Ni 合金球铁,其热疲劳性能的好与差,在试验条件和球化级别均相同的情况下,就只取决于基体组织的热力学稳定性和强度两个因素了。

从过冷奥氏体在 A_{c1} 点温度以下等温转变的产物看,在 A_{c1} 以下的温度范围内,基体组织的热力学稳定性从高到低依次为:珠光体(其中碳化物呈球状的粒状珠光体因球状碳化物具有比片状碳化物更低的表面能而更为稳定)→上贝氏体→下贝氏体→马氏体。组织中的残余奥氏体稳定性最差,在适当的冷却条件下和析出了碳及合金元素之后冷却时会发生分解。因此,仅从热力学稳定性上讲,调质态基体具有最好的热疲劳性能。但从强度方面看,则为相反的情况:基体组织是马氏体时具有最高的强度和硬度,珠光体组织的强度和硬度最低。于是认为,基体组织的热力学稳定性和强度两者的综合就决定了合金球铁的热疲劳性能。

奥-贝球铁热疲劳性能最差的原因是:组织中的残余奥氏体在反复加热和冷却过程中会愈来愈不稳定,加热时其内的碳及合金元素渐渐析出而逐步贫化,使其 M_s 点渐渐上升,冷却时会不断分解;而上贝氏体中的过饱和铁素体在反复加热过程中也会有碳及合金元素的析出,铁素体会发生回复及再结晶;另外,在形成上贝氏体时其平行的铁素体条束间的细小碳化物点亦会聚集长大,长时间加热后 Fe_3C 还会发生分解。故使该种基体组织在所试验的条件下最不稳定。尽管奥-贝基体球铁强度较高,热疲劳性能却最差,这是组织的热力学稳定因素为主导所致^[4]。

基体是细片状珠光体的球铁,强度和硬度最低。在反复加热过程中,组织中的片状碳化物会渐渐趋于球化^[5],长时间加热后还会发生分解。铁素体基体再结晶后晶粒长大并使晶界渐渐发生多边形化。因而,这种基体组织的球铁热疲劳性能较差。

球铁经调质处理后,基体组织为回火索氏体,碳化物呈细粒状,在 650 °C 以下其组织的热力学稳定性较其它基体组织更好,且强度和硬度也较高,因而热疲劳性能较好。

下贝氏体基体的合金球铁,应当说其高温稳定性是 4 种基体中最差的,组织中的少量残余奥氏体虽于 280 °C 下较长时间回火后被陈化稳定^[6],但在热疲劳试验过程中因反复加热和冷却,整个基体组织均会渐渐发生转变。由于每次加热和冷却的时间均短,但下贝氏体基体的强度和硬度是参与试验的基体组织中最高,韧性也较好,因而表现出最好的热疲劳性能,这是强度因素起主导作用所致。

具有下贝氏体基体的球铁硬度高,机加工困难。技术经济上可行的对策为:工艺上可先对铸件进行正火,粗加工后再进行下贝氏体等温淬火。因下贝氏体等温淬火变形很小,进行 280 °C 回火后改用陶瓷刀具精加工即可。

5 结论

1) 0.8% Cu - 0.4% Mo - 0.7% Ni 的合金球铁经 260 °C 等温淬火和 280 °C 回火后,具有下贝氏体基体组织时,在其 A_{c1} 温度以下反复加热和冷却过程中具有最好的热疲劳性能。

2) 影响 Cu-Mo-Ni 合金球铁热疲劳性能的主要因素是其基体的强度和基体组织的热力学稳定性。

参考文献:

- [1] 郝石坚. 现代球墨铸铁[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1989. 299.
- [2] 沈阳铸造研究所、大连工学院、上海科学技术学会合编. 球墨铸铁[M]. 北京: 机械工业出版社, 1982. 223 - 328.
- [3] 刘祥. 铸造合金的热力学及物理性能[M]. 北京: 机械工业出版社, 1986. 186.
- [4] HARDING R A, GOLBERT G N J. Why the Properties of Austempering Ductile Irons Should Interest Engineers [J]. Br Foundryman, 1986, 79(10): 243 - 250.
- [5] 安运铮. 热处理工艺学[M]. 北京: 机械工业出版社, 1982. 52 - 53.
- [6] 徐祖跃. 马氏体转变与马氏体[M]. 北京: 科学出版社, 1980. 61 - 66.

(下转第 95 页)

- 化设备,1999,19(2):34-36.
- [3] 孙德胜,郭志忠,王刚军,等. 配电自动化系统综述[J]. 继电器,1999,27(3):1-3.
- [4] 朱锡贵,国志宏,贾明泉. 有信道馈线故障处理技术[J]. 电力系统自动化,2000,24(10):33-35.
- [5] 陈永甫. 现代通信系统和信息网[M]. 北京:电子工业出版社,1999.
- [6] 梁玉泉. 配电网自动化通信方式的选取[J]. 电力系统通信,2000,(3):19-25.

Analysis on Communication Mode of Feeder Automation

LUO Jian, GU Cheng, WANG Guan-jie

(College of Electrical Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

Abstract: The paper mainly analyzes and studies mode of bus communication based on optical fiber at one-point to multiple-point and mode of point-to-point communication based on wireless at one-point to multiple-point. The advantages and disadvantages of two communication modes are given. Considering the demands on FA data communication, the paper presents transmitting data based on network mode and connection mode, implementing application protocol based on object oriented mode and international standard. Considering the requirements of FTU unit for data communication, the paper proposes the network inner operating system in FTU unit, which is indispensable. Data are transmitted on client/server mode, defined and organized on object oriented mode and transmitted on logical address.

Key words: distribution automation; feeder automation; data communication; feeder terminal unit

(责任编辑 李胜春)

(上接第 87 页)

Thermo - fatigue Behaviors of Cu - Mo - Ni Nodular Cast Iron with Different Matrix Microstructure

LI Yuan - rui

(College of Material Science and Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

Abstract: The wedge specimens of nodular cast iron containing 0.8% Cu - 0.4% Mo - 0.7% Ni were heat - treated to obtain lower bainite, austenite - bainite, fine lamellar pearlite structures, respectively. The specimens were tested under the conditions of two thermo - cyclic conditions: $(600 \pm 10)^\circ\text{C}$ (salt bath) $\sim (70 \pm 30)^\circ\text{C}$ (oil), and $(650 \pm 10)^\circ\text{C}$ (salt bath) $\sim (25 \pm 5)^\circ\text{C}$ (water). The results show that the thermo - fatigue behaviors are greatly dependent upon the matrix microstructures, and that they are improval in sequence of lower bainite matrix, tempered nodular pearlitic matrix, normalized lamellar pearlitic matrix and austenite - bainitic matrix. The reasons of these results are analyzed from the strength and the stability of matrix microstructure below the temperature of A_{c1} .

Key words: Cu - Mo - Ni alloy; nodular cast iron; thermo fatigue

(责任编辑 李胜春)