DOI:10.16410/j.issn1000-8365.2019.08.007

制动盘用灰铸铁热疲劳性能的研究

程建龙[1],张小雪[2]

(1. 安徽神剑科技股份有限公司,安徽 合肥 230022;2. 安徽三联学院 机械工程学院,安徽 合肥 230601)

摘　要:灰铸铁具有优良的导热性、良好的耐摩性,是制动盘的主要材质。对3种碳当量较高的灰铸铁组织及性能进行了测定和分析,采用板状带V型缺口试样,通过循环加热、冷却的方法研究热疲劳性能。结果表明:碳当量比较低、石墨数量少,即使强度和硬度比较高,抗热疲劳性能也较差;当基体以珠光体为主时,碳当量高且含有一定量D型石墨的灰铁抗热疲劳性能好。

关键词:灰铸铁;碳当量;制动盘;热疲劳

中图分类号:TG115　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-8365(2019)08-0783-04

Study on Thermal Fatigue Property of Gray Cast Iron Brake Disc

CHENG Jianlong[1], ZHANG Xiaoxue[2]

(1. Anhui Shenjian Technology Co., Ltd., Hefei 230022, China; 2. School of Mechanical Engineering, Anhui Sanlian University, Hefei 230601, China)

Abstract: Gray cast iron was the main materials of brake discs for its excellent thermal conductivity and wear resistance. Microstructure and properties of three kinds of gray cast iron with high carbon equivalent were measured and analyzed. Under the condition of cyclic heating and cooling, and plate type specimens with "V" notched was used, their thermal fatigue resistance was studied. The results show that if relatively low carbon equivalent, thus less graphite, even with high strength and hardness, thermal fatigue resistance is also poor. When the matrix is mainly pearlite, gray cast iron with high carbon equivalent and a certain amount of D-type graphite has good thermal fatigue property.

Key words: gray cast iron; carbon equivalent; brake disc; thermal fatigue

制动盘是车辆制动系统中的重要部件,在制动过程中制动盘承受着很大的载荷以及摩擦磨损,与此同时制动盘的温度由表及内急剧升高。制动解除之后旋转着的盘面温度很快降低。如此一来制动盘内会存在一定的温差,并产生热应力。车辆在行驶过程中,因路况原因可能频繁或较长时间的制动,使制动盘处在冷热交替过程中频繁产生热应力。若此应力大于材料的疲劳极限,则会诱发裂纹的萌生与扩展,裂纹长大并彼此连接,最终使铸件开裂,即产生热疲劳断裂。因此,制动盘在具备高的强度、良好的耐磨性的同时还需要具备良好导热性和耐热疲劳性。

汽车(尤其是乘用车)制动盘的材质主要是组织中含有片状石墨的灰铸铁。为了延长制动盘的使用寿命,提高或改善制动盘用灰铸铁的性能至关重要。对此,国内外的很多研究工作者在多个不同方面做了许多工作。主要体现在:研究合金化、改变Si/C比以及Mn/S比等方式提高灰铸铁的力学性能[1-4]、采用高的碳当量(CE)提高或改善材质的导热性[5-12]以及研究材质热物理性能和耐热疲劳性、研究制动盘以及所研发的灰铸铁材质的耐磨性[13-17]。

灰铸铁制动盘的组织由金属基体和片状石墨构成,材质的发展趋势是采用合金化的高碳当量灰铸铁,高的碳当量期望其组织中有一定量的导热性能好的片状石墨,这样有利于降低制动过程中制动盘的温度以及制动盘内外的温差;合金化是为了强化金属基体,保证材质有一定的力学性能和良好的耐磨性。

本文研究3组不同成分的高碳合金灰铸铁,并考察其力学性能和抗热疲劳性能,以便为灰铸铁制动盘的成分和性能的设计提供依据。

1　试验方法

1.1　合金制备

试验研究用材料有回炉料、硅铁、铬铁、锰铁、铜、锡等以及增碳剂,采用中频感应电炉熔炼。首先采用普通砂型铸造,浇注ϕ30 mm的圆形试棒,每组至少3根。然后利用圆形试棒加工成标准的拉伸试

收稿日期:2019-04-09

作者简介:程建龙(1964-),安徽来安人,高级工程师.主要从事铸造合金及工艺方面的工作.电话:13956057221,E-mail:720411chjl@sina.com

样并测定拉伸强度；在拉伸试棒断裂处附近取样制备金相试样做金相检查分析。

1.2 热疲劳试验

截取拉伸试样的夹持端，磨平后检测硬度。然后加工成如图 1 所示的板片状热疲劳试样[9]。为了缩短热疲劳试验的周期，在试样一端预制 V 型缺口，旨在 V 型缺口的尖端造成应力集中、成为疲劳裂纹产生的裂纹源。

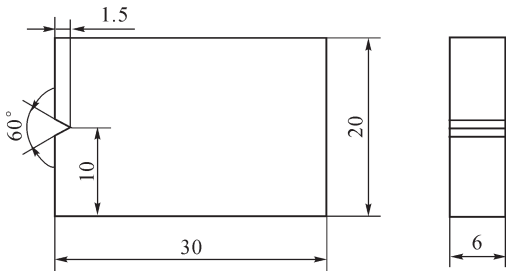


图 1 热疲劳试样的尺寸
Fig.1 The size of thermal fatigue specimens

热疲劳试验采取突然升温–保温–急剧降温并多次循环的方式进行。具体过程如下：采用箱式电阻炉作为加热装置，首先通电将炉膛温度升至 600 ℃，接着将试样置入炉内停留 10 min，保证在设定时间内将试样加热至 600 ℃；然后将试样取出放入 25 ℃的水中，如此完成一次循环过程；然后反复重复这个过程。当分别循环进行到 30 次、50 次、130 次、180 次、230 次、280 次后，用细砂纸将试样表面的氧化皮磨去，并进行粗抛光，借助金相显微镜观察是否有裂纹以及裂纹的发展情形，并对试样裂纹长度进行测量。为了确保试验数据的准确性，每一材质分别加工 3 片试样，取平均裂纹长度作为耐热疲劳性能的判据。

2 热疲劳保温温度的确定

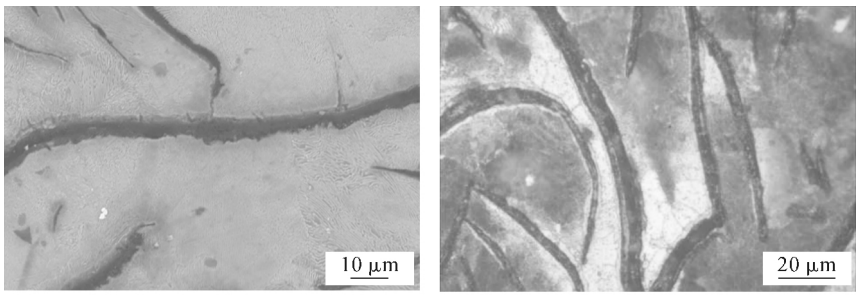
应用于乘用车的盘式制动在制动时制动盘的升温不超过 550 ℃。加热温度选择 600 ℃的目的是强化热疲劳进程，没有选择更高温度的原因是避免加热时组织发生变化。试验表明，热疲劳试样在 700 ℃保温 30 min 随后水冷后，组织发生了转变，如图 2 所示。可以看出，在 700 ℃保温前，基体组织为 100% 的珠光体；但 700 ℃保温 30 min 之后，在石墨周围出现了少量的铁素体。为了排除相变对热疲劳性能的影响，因此选择 600 ℃进行加热、保温 10 min。

3 试验结果与分析

3.1 灰铸铁的成分、组织和性能

表 1 为试验研究所用的 3 种灰铸铁的化学成分、抗拉强度以及硬度值。从化学成分方面来看，A、B、C 3 种灰铸铁试样都是多元合金化的灰铸铁，碳当量均比较高。从力学性能方面来看，A、B、C 3 种灰铸铁的性能分别对应于 HT200、HT250、HT300。

图 3 为 3 组灰铸铁试样的金相组织。可见，即使碳当量很高，由于合金添加了 Cr、Cu、Sn 元素，3 组铸铁试样的基体组织都是珠光体，但片状石墨有一定的差异。A 试样的碳当量（CE4.38）很高，属于过共晶；因成分中 Cr 含量高，Cr 属于中等强度的碳化物形成元素，抑制石墨的形成，从而在局部区域的组织中有非常细小的、类似于过冷片状石墨析出，见图 3



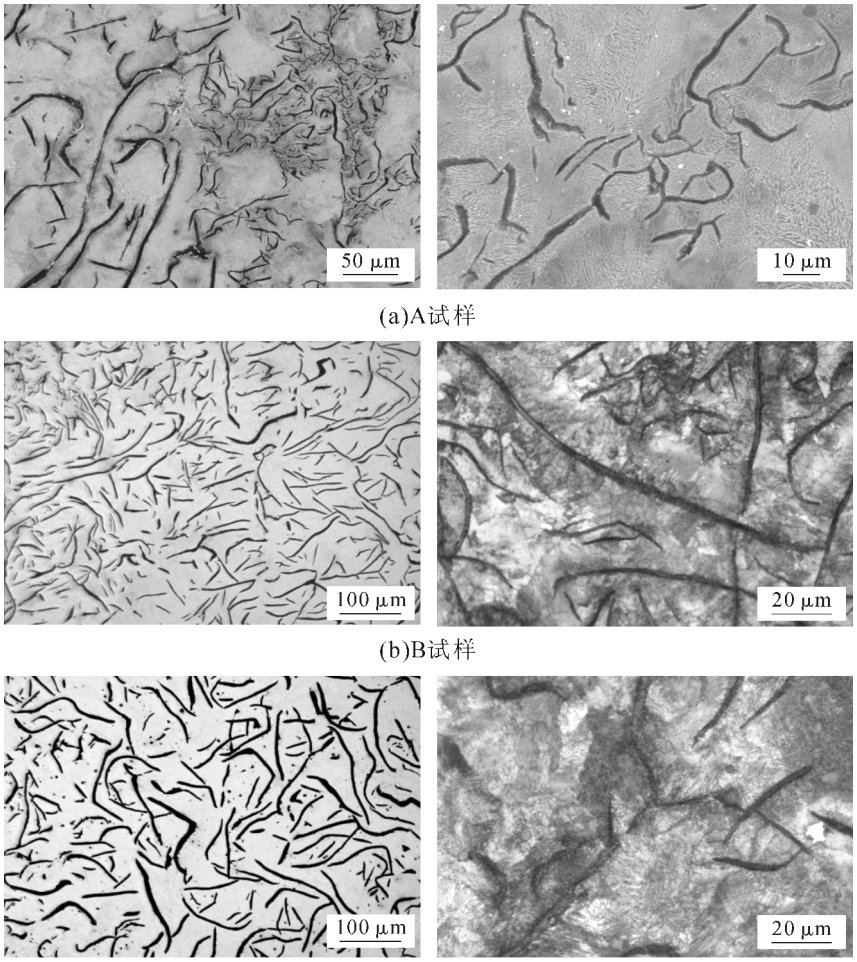
(a)铸态　　(b)700 ℃保温30 min

图 2 试样在 700 ℃保温 30 min 前后的组织
Fig.2 Microstructure of specimens before and after holding at 700 ℃ for 30 min

表 1 试验研究用灰铸铁的化学成分和力学性能
Tab.1 Chemical composition and mechanical properties of the gray cast iron

试样编号	元素含量 w (%)								碳当量	抗拉强度	硬度
	C	Si	Mn	S	Cr	Cu	Sn	Fe	CE (%)	/MPa	(HB)
A	3.68	2.10	0.97	0.08	0.51	0.32	0.019	余量	4.38	201	180
B	3.40	2.21	1.34	0.09	0.24	0.49	0.029	余量	4.14	246	208
C	3.45	1.30	0.60	0.09	0.31	0.52	0.027	余量	3.88	308	215

注：CE=%C+(1/3)% Si



(a)A试样

(b)B试样

(c)C试样

图 3　3 组灰铸铁试样的金相组织

Fig.3　Microstructure of 3 specimens of gray cast iron

(a)。B 试样的碳、硅含量比较适中，Mn 的含量稍高，组织中的石墨为大小适中、分布均匀的 A 型石墨，偶尔有稍大的片状石墨，见图 3(b)。C 试样的碳当量低，尤其是硅含量很低(仅有 1.3%)，石墨基本上是 A 型石墨，石墨数量相对较少，见图 3(c)。

3.2　灰铸铁的热疲劳曲线

疲劳破坏一般可分为 3 个阶段：裂纹萌生、裂纹扩展及裂纹的失稳扩展。不同试样抗热疲劳性能如图 4 所示。从图 4 可以看出，在加热、冷却的交替作用下，经过相同的较少次数的循环加热后，C 试样的裂纹最长，B 试样和 A 试样的裂纹长度相当。在随后的热循环过程中，C 试样的热裂纹扩展速度最快，热裂纹也最长。

C 试样的碳当量低、石墨含量相对少、强度最高，缺口敏感度最大；组织中石墨少、导热能力弱，所以制动时试样内外温差大，产生较大的热应力。这两方面共同造成了其裂纹扩展速度比较快。B 试样在循环次数 180 之前，裂纹扩展速率低于 A 试样的，但随后扩展速度超过 A 试样的。B 试样的碳当量低于 A 试样的碳当量，但高于 C 试样的碳当量。

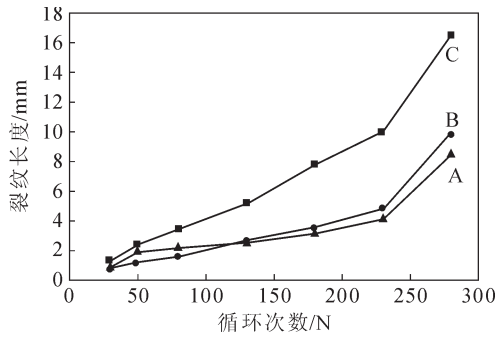


图 4　热循环次数–裂纹平均长度曲线

Fig.4　Curve of average crack length for number of thermal cycles

B 试样抗拉强度稍高于 A 试样的抗拉强度；但各试样的石墨类型不同，B 试样的石墨为 A 型，A 试样含有 A 型石墨和少量的 D 型过冷石墨。尽管 A 型石墨铸铁的导热能力大于 D 型石墨的铸铁导热能力[10]，但相对粗大的 A 型石墨有利于裂纹的扩展，导致冷热循环超过 180 次以后，B 试样的裂纹扩展速度快于 A 试样。

从图 4 还可以看出，热循环次数超过 230 次以后，所有试样的裂纹扩展速度明显增加。因为石墨在

灰铸铁中相当于缺陷，在热循环过程中各处石墨的尖端部都会出现裂纹；随着循环次数的增多，裂纹逐渐扩展；当裂纹扩展到一定程度之后，裂纹会聚集在一起，所以在热循环的后期，裂纹扩展速度明显增大。虽然 D 型石墨的导热能力低于 A 型石墨的导热能力，但 A 试样的碳当量很高（CE=4.31），而石墨的数量越多则导热能力越强。B 试样的石墨虽然是 A 型的，但是属于亚共晶（CE=4.14），石墨数量比 A 试样的少。综合起来考虑，B 试样和 A 试样的导热能力相似，引起的热应力也相当。在基体组织都是珠光体的条件下，A 试样的 D 型石墨区的抗拉强度高于 B 试样的抗拉强度，所以在试验条件下 A 试样抗疲劳性能在后期优于 B 试样的抗疲劳性能。

图 5 所示为 A 试样中裂纹的扩展情况。主裂纹首先从 V 型缺口尖端处的 A 型石墨处向内扩展，扩展方向是尽量绕过 D 型石墨，沿着 A 型石墨的方向进行扩展。D 型石墨比较细小，对基体的割裂作用比 A 型石墨小。随着热循环次数的增加，裂纹逐渐扩展后进入到 D 型石墨区。进入了 D 型石墨区后裂纹的扩展速度减缓。因此，热疲劳循环一定次数、即裂纹扩展一段时间后，含少量 D 型石墨的铸铁 A 试样中的裂纹扩展速度低于 B 试样的裂纹扩展速度。

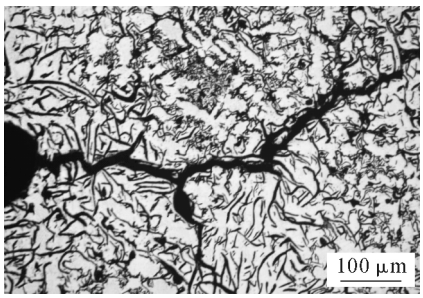


图 5 A 试样裂纹的扩展路径
Fig.5 Crack propagation characteristics of “A” specimen

图 6 为热疲劳试验之后试样的典型金相组织。可以看出基体组织并没有发生转变，仍为珠光体。但石墨周边不再光滑，分布着许多黑点。这可能是因为铸铁试样在高温下长时间且反复暴露于空气中被氧化的结果。

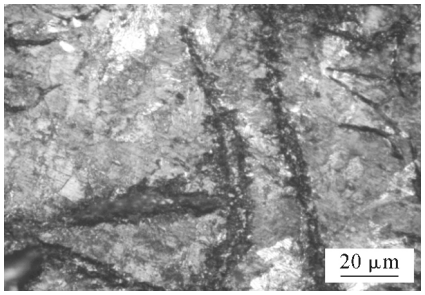


图 6 热疲劳试验后试样的金相组织
Fig.6 Metallographic structure after thermal fatigue test

4 结论

（1）灰铸铁的碳当量比较低、石墨数量少时，即使强度、硬度较大，其抗热疲劳性能也较差。

（2）基体为珠光体、碳当量高且含有少量的 D 型石墨的灰铸铁的抗热疲劳性能高。

（3）提高灰铸铁的碳当量、并添加促进珠光体基体形成的合金元素，提高基体的强度，可抑制热疲劳裂纹的发展。

参考文献：

[1] 李少南. 铌对灰铸铁性能的影响[J]. 铸造, 1999，48(11): 3-5.
[2] 周文彬, 征灯科，华勤，等. 制动盘用高碳当量灰铸铁的铌合金化[J]. 铸造, 2010, 59(3):323-326.
[3] 刘佑平. 锰、硫对灰铸铁力学性能的影响 [J]. 热加工工艺, 2001，30(2):52-53.
[4] 张小雪，刘兰俊，李永红. 微合金化对高碳当量灰铁组织的影响[J]. 铸造技术，2012，33（7）：768-770.
[5] Maluf O, Angeloni M, Castro D B V, et al. Effect of alloying elements on thermal diffusivity of gray cast iron used in automotive brake disks [J]. JMEPEG, 2009(18):980-984.
[6] 刘建峰，赵志宇，郑秉和. 如何满足国外对刹车盘材质的要求[J]. 中国铸造装备与技术，2006（4）：30-35.
[7] 周文彬，朱洪波. Nb 在高导热铸铁制动盘中的应用[J]. 现代铸铁，2011,2, 57-59.
[8] 朱洪波，闫永生，孙小亮，等. Nb 对灰铸铁热疲劳性能的影响[J]. 现代铸铁，2011（2）：45-48.
[9] 刘兴鹏，岳钟英，张伯明. 灰铸铁热疲劳性能的研究[J].铸造，1989，38(5):6-8.
[10] Hecht R L. The effect of graphite brake morphology on the thermal diffusivity of gray cast irons used for automotive brake discs [J]. Journal of materials science, 1999(34):4775-4781.
[11] Kim S W, Park K, Lee S H, et al. Thermophysical Properties of Automotive Metallic Brake Disk Materials [J]. Int J Thermophys. 2008（29）:2179-2188.
[12] 林玮静，杜焕军，崔慧萍. 车用制动盘热疲劳现象的研究及解决方法[J]. 山东交通科技 2011（5）：18-20.
[13] 陈跃，沈百令，张永振，等. 铸铁刹车盘 / 毂材料摩擦磨损特性研究[J]. 西安交通大学学报，2005,34（5）：80-83.
[14] 庄光山，王成国，王海庆，等. 制动盘对盘形制动摩擦性能的影响[J]. 材料科学与工程学报，2003,21（6）：890-893.
[15] Mohsen Mosleh, Peter J. Blau, Delia Dumitrescu. Characteristics and morphology of wear particles from laboratory testing of disk brake materials [J]. Wear, 2004 (256):1128-1134.
[16] Ferrer C，Pascual M，Busquets D，et al. Tribological study of Fe-Cu-Cr-graphite alloy and cast iron railway brake shoes by pin-on-disc technique [J]. Wear, 2010(268):784-789.
[17] Peter J. Blau, Brian C. Jolly, Jun Qu, et al. Tribological investigation of titanium-based materials for brakes [J]. Wear, 2007(263): 1202-1211.