

行政院國家科學委員會專題研究計畫成果報告

石墨型態及基地組織對於耐熱鑄鐵之耐熱性質影響研究(2/2)

Effects of Graphite Morphology and Matrix Structure on the Heat Resistance Property of Heat Resistant Cast Irons (2/2)

計畫編號：NSC90-2216-E-002-026

執行期限：90 年 8 月 1 日至 91 年 7 月 31 日

主持人：潘永寧 國立台灣大學機械工程學系

計畫參與人員：鍾明祥 國立台灣大學機械工程研究所

中文摘要

本研究探討合金元素、石墨形態及基地組織對於石墨鑄鐵之拘束型熱疲勞（298K 及 1073K）性質之影響。實驗結果指出，石墨形態、合金成分及基地組織對於熱疲勞壽命均有很大之影響。石墨形態對於鑄鐵之耐熱疲勞能力為球墨鑄鐵>縮墨鑄鐵>片墨鑄鐵；添加合金成分之效果以 Ni+Cr+Cu 之試片最佳，其次為添加 Mo+Sn+Cu 試片，再其次為僅添加 Mo 之試片，不添加合金試片之耐熱疲勞能力最差。對於鑄態基地組織之耐熱疲勞能力而言，沃斯田鐵最佳，波來鐵次之，肥粒鐵之耐熱疲勞能力最差。

關鍵字：鑄鐵，熱疲勞，合金元素

ABSTRACT

This research studied the effects of alloy additions, graphite morphology and matrix structure on the thermal fatigue life of cast irons tested under a constrained condition with the cyclic temperature between 298K and 1073K.

The results indicate that raising the Si content from 3.0% to about 4.5% shows only slight improvement in fatigue life. However, the thermal fatigue life of cast irons has been substantially increased by a factor of 2 to 3 through the introduction of 0.3%-0.5%Mo to alloys. Regarding the effect of as-cast matrix structure, the results indicate that an austenitic matrix exhibited a much better thermal fatigue life than pearlitic matrix, which in turn was better than a ferritic matrix. In addition, for the same alloy condition, cast irons with a spheroidal graphite show the best thermal fatigue performance, which is followed by cast irons with a compacted graphite, and then flaky graphite.

The changes in the matrix structure during the cyclic thermal process for various alloy designs had been thoroughly analyzed, and how they affect the thermal fatigue property has also been discussed. Finally, the initiation and propagation of cracks in the test specimens in the course of cyclic thermal process had been observed, and the observations were related to the metallurgical parameters studied herein.

Keywords：Cast Irons, Thermal fatigue, Alloying elements

一. 前言

灰鑄鐵具低成本、鑄造性佳及切削加工性優良等優點。添加鎂元素後，會形成強韌性更佳之球墨鑄鐵。隨著鑄鐵在高溫下應用，一般鑄鐵常溫之性能已不能滿足工業上

之需求，所以耐熱鑄鐵之相關研究應運而生，而通常改善高溫性能便是添加有利之合金元素。工業上使用於高溫環境之耐熱鑄鐵很多，諸如引擎汽缸頭、排氣歧管、剎車

鼓、熱交換器及熱處理爐等。

當使用溫度愈高時，鑄件之表面氧化會愈嚴重，再加上鑄件本身結構或外在拘束，誘發熱應變及熱應力。另一方面，若溫度超過臨界溫度時，組織會發生相變態而造成體積膨脹或收縮，其所伴隨之熱應力、變形及破裂情形會更嚴重。

本研究探討不同合金成分（Si、Mo、Sn、Cu、Cr、Ni）、基地組織（肥粒鐵、波來鐵、沃斯田鐵）及石墨形態（片墨、縮墨、球墨）對於鑄鐵熱疲勞壽命之影響。研究結果可作為實際應用之參考。

二. 實驗方法

2.1 合金設計

本研究探討 Si、Mo、Sn、Cu、Cr、Ni 等合金元素、基地組織以及石墨形態等對於鑄鐵抗熱疲勞性質的影響。合金設計如表 1 所示，而實際成分分析如表 2 所示。片墨、縮墨及球墨鑄鐵之石墨形態及鑄態基地組織分別示於表 3、表 4 和表 5。

2.2 熱疲勞試片

熱疲勞性質試驗所採用的試片取自 Y-block，每一爐次澆注二個 Y-block。試片之形狀及尺寸如圖 1 所示。

2.3 實驗方法

本實驗採用之儀器為週波感應加熱器，如圖 2 所示。將熱疲勞試片(110mm×20mm×6mm)固定在試片載架上，並置於感應加熱線圈下方，調整加熱器之輸出功率，試片在 60sec 內昇溫至 1073~1123K 之間，隨即迅速淬火入一循環水槽中約 10 sec，再將淬火後之試片以高壓空氣將水滴吹掉後再重新加熱，加熱至冷卻的過程為一個熱循環，反覆以上實驗步驟並記錄試片受熱疲勞至破斷所需的循環數。每一成分進行兩次熱疲勞試驗，取其平均值做為實際破斷之循環次數。

三. 結果與討論

3.1 合金組成與石墨形態對於熱疲勞壽命之影響

就片墨鑄鐵而言，由圖 3 可知熱疲勞壽命之高低依下列順序排列：試片 TF-5>TF-4>TF-3>TF-1>TF-2。圖 4 顯示縮墨鑄鐵之熱疲勞試驗結果，熱疲勞壽命之高低順序如下：試片 TC-5>TC-4>TC-3>TC-2>TC-1。此結果與前述片墨鑄鐵大致相同，唯一不同之處在於試片 TC-2 之熱疲勞性優於試片 TC-1。球墨鑄鐵之熱疲勞試驗結果示於圖 5，試片 TD-5>TD-4>TD-3>TD-2>TD-1。此結果與前述縮墨鑄鐵相同。

〈1〉 Si 含量之影響（圖 6）

對於片墨鑄鐵而言，含 3% Si 之試片 (TF-1) 其鑄態基地組織為 5% 肥粒鐵 + 95% 波來鐵，含 4.5% Si 之試片 (TF-2) 其鑄態基地組織為 100% 肥粒鐵。熱疲勞壽命隨 Si 含量增加由 31 次反而降至 22 次 (-29%)。對於縮墨鑄鐵而言，含 3% Si 之試片 (TC-1) 及 4.5% Si 之試片 (TC-2) 其鑄態基地組織分別為 95% 肥粒鐵 + 5% 波來鐵和 100% 肥粒鐵。當 Si 由 3% 增至 4.5% 時，熱疲勞壽命由 29 次增至 31 次 (+6.9%)。對於球墨鑄鐵而言，試片 TD-1 及 TD-2 之鑄態基地組織分別為 95% 肥粒鐵 + 5% 波來鐵和 100% 肥粒鐵。熱疲勞壽命由 73 次增至 78 次 (+6.8%)。

由實驗結果可知，Si 之影響與鑄態之基地組織有密切關係。對於鑄態組織已接近完全肥粒鐵 (3% Si 之試片 TC-1 及 TD-1) 而言，由於 Si 的固溶強化肥粒鐵作用，提高 Si 含量 (4.5% Si 之試片 TC-2 及 TD-2) 時，強度亦提高。但研究報告指出^(1,2)，在高溫時，提高 Si 含量之強化作用對於抵抗高溫應力鬆弛之效果不大，因此提高 Si 含量對於提升熱疲勞效果不大 (6.8~6.9%)。對於鑄態組織主要為波來鐵 (3% Si 之試片 TF-1) 時，提高

Si 含量(4.5%Si 之試片 TF-2)會促進肥粒鐵的析出，使得強度降低，熱疲勞壽命因而降低 29%。

(2) 添加 Mo 之影響 (圖 7)

對於片墨鑄鐵而言，Mo 由 0%(TF-1)增至 0.5%(TF-3)時，熱疲勞壽命由 31 次增加至 69 次(+122.6%)。對於縮墨鑄鐵而言，Mo 由 0%(TC-1)增至 0.5%(TC-3)時，熱疲勞壽命由 29 次增至 96 次(+231%)。對於球墨鑄鐵而言，添加 0.5%Mo，熱疲勞壽命由 73 次增至 128 次(+75.3%)。

由實驗結果得知，增加 Mo 含量，各種石墨形態鑄鐵之熱疲勞壽命均有顯著的提升。Mo 會促進肥粒鐵的形成，但對於基地組織之影響不大。添加 Mo 可顯著提高鑄鐵之高溫強度，而提升抑制高溫應力鬆弛之作用，以降低熱循環冷卻過程中所產生之拉應力⁽¹⁻⁵⁾，因此對於提升熱疲勞性質有明顯增進。

(3) 添加 Mo、Sn 及 Cu 之影響 (圖 8)

試片 (TF-4、TC-4 及 TD-4) 為添加 0.3%Mo + 0.05%Sn + 0.6%Cu，試片 (TF-3、TC-3 及 TD-3) 為添加 0.5%Mo。以 TF-1、TC-1 及 TD-1 之熱疲勞壽命為基準來比較，TF-4 較 TF-3 提高 32.2% (=154.8% - 122.6%)；TC-4 較 TC-3 提高 20.7% (=251.7% - 231%)；TD-4 較 TD-3 提高 19.2% (=94.5% - 75.3%)。

試片 TF-4 之鑄態基地組織為 100%波來鐵；試片 TF-3 之鑄態基地組織為 70%肥粒鐵及 30%波來鐵。由實驗結果得知，試片 TF-4 相較於試片 TF-3 而言，熱疲勞壽命略為提升。雖然添加 Cu 之作用對於提升高溫抗拉強度之效果不大⁽⁵⁾，但由於同時添加 Mo、Sn 可明顯提升高溫強度^(3,4)，且 100%波來鐵强度高，所以含 100%波來鐵之 0.3%Mo + 0.05%Sn + 0.6%Cu(TF-4)試片其耐熱疲勞壽

命略高於 0.5%Mo(TF-3)。

(4) 添加 Cu、Cr 及 Ni 之影響 (圖 9)

由實驗結果得知，鑄態基地組織為沃斯田鐵之試片 TF-5、TC-5 及 TD-5 其熱疲勞壽命均較其他合金組成有明顯之提升。添加 14%Ni 會形成沃斯田鐵，在高溫時仍十分安定，因此基地組織不發生變化，亦即不產生變態應力^(6,7)。此外添加 Cr 可提升高溫強度，且沃斯田鐵之韌性佳，所以裂紋較不易萌生。

(5) 石墨形態之影響

由圖 6~圖 9 之結果可知，對於任一合金組成而言，不同石墨形態鑄鐵之熱疲勞壽命高低順序如下：球墨鑄鐵 > 縮墨鑄鐵 > 片墨鑄鐵，惟對於含 3%Si 之片墨、縮墨及球墨鑄鐵而言，結果顯示試片 TD-1 > TF-1 > TC-1，此乃因試片 TF-1 之基地組織為 95%波來鐵，而試片 TC-1 及 TD-1 為 95%肥粒鐵，由於片墨鑄鐵之基地組織強度明顯較縮墨鑄鐵為高，故使得片墨鑄鐵 TF-1 之疲勞壽命反而較縮墨鑄鐵 TC-1 稍高。

3.2 拘束型熱循環之裂紋生長機構

圖 10(a)為鑄態基地為肥粒鐵試片在熱循環過程中之裂紋生長示意圖，鑄態肥粒鐵在加熱過程中由於試片二端固定而承受一壓應力，在 V 形凹槽處產生變形。隨著熱循環次數增加，V 形凹槽逐漸變窄，底面會有外凸之現象。圖 10(b)為鑄態波來鐵之試片在熱循環過程中之裂紋生長示意圖，鑄態波來鐵在加熱過程中由於試片固定而承受一壓應力，在 V 形凹槽處產生變形。由於波來鐵變態形成沃斯田鐵比例較肥粒鐵多，變態拉應力較大而能抵消部份壓應力，水冷至常溫時沃斯田鐵變態成麻田散鐵所形成之變態壓應力亦能抵消冷卻後之殘留拉應力，因此鑄態

波來鐵熱循環次數較鑄態肥粒鐵多。隨著熱循環次數增加，變形量亦增加，因此鑄態波來鐵試片之變形量(底部翹曲)比鑄態肥粒鐵之試片明顯。圖 10(c)為鑄態沃斯田鐵試片在熱循環過程中之裂紋生長示意圖，沃斯田鐵在整個熱循環過程中不會發生相變態，組織安定且其高溫韌性佳，試片無明顯變形，但試片有許多裂紋分佈。由上可知波來鐵之變形量最多，肥粒鐵次之，沃斯田鐵則無明顯變形。沃斯田鐵由於其延韌性較佳，因此其主裂紋較曲折，周圍之裂紋數目最多。波來鐵及肥粒鐵之主裂紋較為筆直，兩者之裂紋數目較沃斯田鐵少。

圖 11 為鑄態組織為肥粒鐵之各種不同石墨形態試片(TF-2, TC-2, TD-2)之裂紋生長情形。熱循環到達 1/3 階段時，片墨、縮墨及球墨鑄鐵之基地組織仍為肥粒鐵。A 處為裂紋沿片墨與肥粒鐵基地之界面延伸；B 處為裂紋沿片墨基面與基面之間(A 軸方向)延伸。C 處可見裂紋沿縮墨與肥粒鐵基地界面延伸。D 處為裂紋沿球墨與肥粒鐵界面延伸。由試片 TD-2 之金相照片可知，球墨與肥粒鐵基地發生剝離會產生微裂紋，V 形凹槽所產生之主裂紋會與微裂紋結合形成更大之裂紋。

圖 12 為鑄態組織為波來鐵之各種不同石墨形態試片(TF-4, TC-4, TD-4)裂紋生長之情形。熱循環到達 1/3 階段時，片墨、縮墨及球墨鑄鐵基地組織大都已形成回火麻田散鐵。觀察金相照片可知，在 V 形槽及主裂紋附近有碳燒失之現象，而形成肥粒鐵。由試片 TF-4 之金相照片可看到微裂紋沿片墨與回火麻田散鐵界面延伸(E 處)，該處附近之回火麻田散鐵之碳並未發生氧化燒失之現象。當主裂紋向前延伸，且微裂紋擴大時，氧氣繼續進入微裂紋，而與周圍之碳氧化。由試片 TC-4 之金相照片 F 處可觀察到微裂紋沿縮墨與回火麻田散鐵界面延伸。由試片

TD-4 之金相照片 G 處可觀察到微裂紋沿球墨與回火麻田散鐵界面延伸。在靠近 V 形凹槽之 G 處，已發生碳燒失之現象，因此在球墨周圍可發現已有白色肥粒鐵形成。

圖 13 為鑄態組織為沃斯田鐵之各種不同石墨形態試片(TF-5, TC-5, TD-5)之裂紋生長情形。熱循環到達 1/3 階段時，片墨、縮墨及球墨鑄鐵基地組織仍為沃斯田鐵。由試片 TF-5 之金相照片 H 處可觀察到片墨碳原子層間有微裂紋；而片墨尖端(I 處)受到塑性變形而產生裂紋，此裂紋將兩片墨連結；J 處可看到裂紋由片墨尖端朝沃斯田鐵基地生長。由試片 TC-5 之金相照片 K 處可觀察到裂紋沿球墨與沃斯田鐵基地界面延伸。L 處則為裂紋由球墨往基地生長。由試片 TD-5 之金相照片 M 處可觀察到裂紋沿球墨與沃斯田鐵基地界面延伸。

由圖 11~圖 13 可知，裂紋主要是經由石墨延伸，在裂紋周圍有氧化層。對於鑄態肥粒鐵及波來鐵而言，裂紋附近之基地會形成肥粒鐵。而沃斯田鐵組織其裂紋在石墨之周圍形成且會由石墨往基地延伸，而形成網狀裂紋。

4. 結論

針對拘束型熱疲勞試驗結果可知：

〈1〉Si 對於增加耐熱疲勞之效果不大。

〈2〉Mo 可明顯提升耐熱疲勞性質，為極有效之元素。

〈3〉Sn、Cu 為波來鐵促進元素，亦能提升耐熱疲勞性質。

〈4〉添加適當之 Ni 含量可得到沃斯田鐵基地，對於提升耐熱疲勞性質具有極佳之效果。

〈5〉石墨形態以球墨對於延遲裂紋生長之效果最佳，縮墨次之，而片墨最差。

參考文獻：

1. Y. J. Park, R. B. Gundlach, R. G. Thomas and, "Thermal Fatigue Resistance of Gray and Compacted Graphite Irons", AFS Trans., vol.93, pp.415~422, 1985.
2. Y. J. Park, R. B. Gundlach and J. F. Janowak, "Effects of Molybdenum on Thermal Fatigue Resistance of Ductile and Compacted Graphite Irons", AFS Trans., vol.95, pp.267~272, 1987.
3. R.B.Gundlach, "Elevated-Temperature Properties of Alloyed Gray Irons for Diesel Engine Components", AFS Trans., vol.86, pp55~64, 1978.
4. R. B. Gundlach, "Thermal Fatigue Resistance of Alloyed Gray Irons for Diesel Engine Components", AFS Trans., vol.87, pp.551~560, 1979.
5. A. M. Sage and J. V. Dawson, "A High-Carbon, V-Mo, High-Strength Gray Cast Iron for Casting Subjected to Thermal Fatigue", AFS Trans., vol.100, pp.253~263, 1992.
6. 楊榮顯；“工程材料學”，全華科技圖書股份有限公司，1977。
7. 日本鑄造技術講座編集委員會編；“特殊鑄物”，復漢出版社，1977。

Table 1 Alloy design for thermal-fatigue test

Specimen No.	C,%	Si,%	Mo,%	Sn,%	Cu,%	Cr,%	Ni,%
TF-1	3.0	3.0					
TC-1, TD-1	3.0	3.3					
TF-2	3.0	4.5					
TC-2, TD-2	3.0	4.5					
TF-3	3.0	3.0	0.5				
TC-3, TD-3	3.4	3.3	0.5				
TF-4	3.0	3.0	0.3	0.05	0.6		
TC-4, TD-4	3.4	3.3	0.3	0.05	0.6		
TF-5	3.0	2.0			6.0	3.0	14.0
TC-5, TD-5	3.4	2.0			6.0	3.0	14.0

Table 2 Chemical analyses of thermal-fatigue specimens.

Specimen	C,%	Si,%	Mo,%	Sn,%	Cu,%	Cr,%	Ni,%
TF-1	3.11	2.97					
TC-1	3.07	3.49					
TD-1	3.09	3.31					
TF-2	2.98	4.83					
TC-2	3.07	4.59					
TD-2	3.31	4.35					
TF-3	2.99	3.08	0.46				
TC-3	3.40	3.19	0.45				
TD-3	3.24	3.54	0.40				
TF-4	2.95	3.20	0.29	0.07	0.61		
TC-4	3.46	3.35	0.28	0.05	0.62		
TD-4	3.35	3.32	0.30	0.07	0.63		
TF-5*	3.00	2.00			6.00	3.00	14.0
TC-5*	3.00	2.00			6.00	3.00	14.0
TD-5*	3.00	2.00			6.00	3.00	14.0

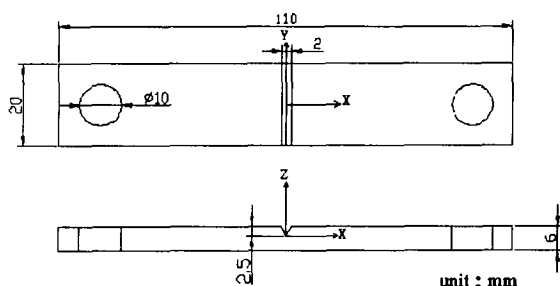


Table 3 The graphite type and matrix structure of flaky graphite cat irons .

Specimen	Graphite Type	Matrix Structure
TF-1	Type A	5%Ferrite + 95%Pearlite
TF-2	Type B	100%Ferrite
TF-3	Type C	70%Ferrite + 30%Pearlite
TF-4	Type A	100%Pearlite
TF-5	Type C	Austenite + Carbide(<1%)

Table 4 The compacted graphite rate and matrix structure of compacted graphite cat irons.

Specimen No.	Compacted graphite Rate	Matrix Structure
TC-1	90%	95%Ferrite + 5%Pearlite
TC-2	85%	100%Ferrite
TC-3	75%	85%Ferrite + 15%Pearlite
TC-4	80%	85%Ferrite + 15%Pearlite
TC-5	70%	Austenite + Carbide(<1%)

Table 5 The nodularity and matrix structure of spheroidal graphite cast irons.

Specimen No.	Nodularity	Matrix Structure
TD-1	90%	95%Ferrite + 5%Pearlite
TD-2	90%	100%Ferrite
TD-3	75%	85%Ferrite + 15%Pearlite
TD-4	80%	100%Pearlite
TD-5	90%	Austenite + Carbide(<1%)

Fig. 3.2 The configuration and dimensions of thermal-fatigue test specimen.

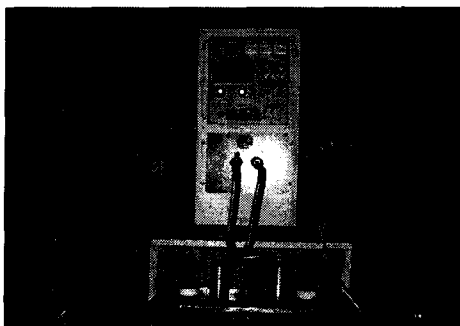


Fig. 2 The photo of thermal-fatigue test apparatus.

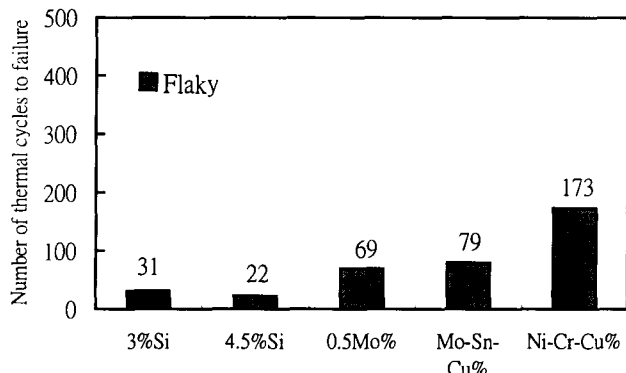


Fig. 3 Effect of alloy additions on thermal fatigue life of flaky graphite cast irons.

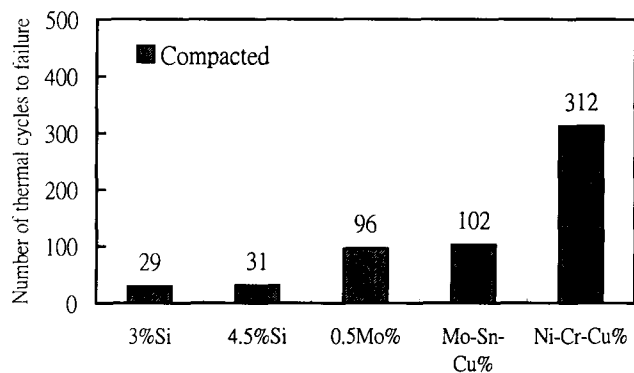


Fig. 4 Effect of alloy additions on thermal fatigue life of compacted graphite cast irons.

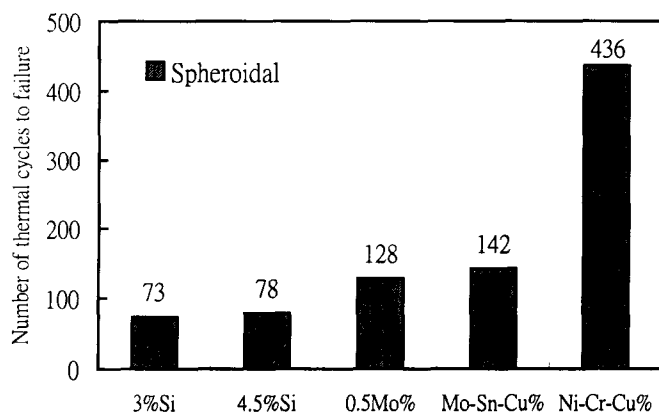


Fig. 5 Effect of alloy additions on thermal fatigue life of spheroidal graphite cast irons.

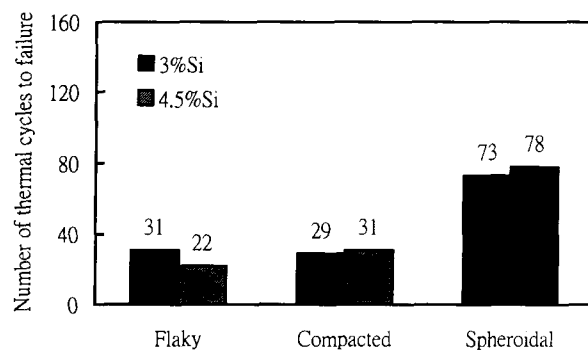


Fig. 6 Effect of silicon content on thermal fatigue life for various graphite cast irons.

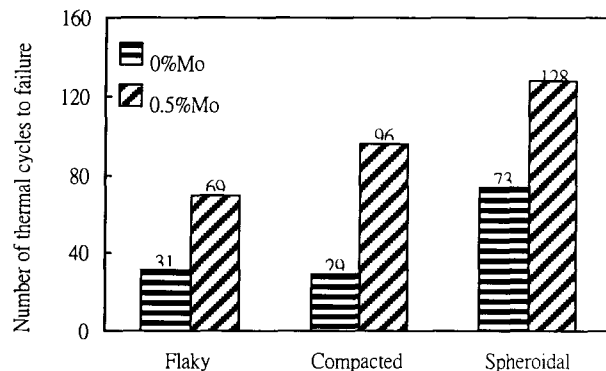


Fig. 7 Effect of molybdenum content on thermal fatigue life for various graphite cast irons.

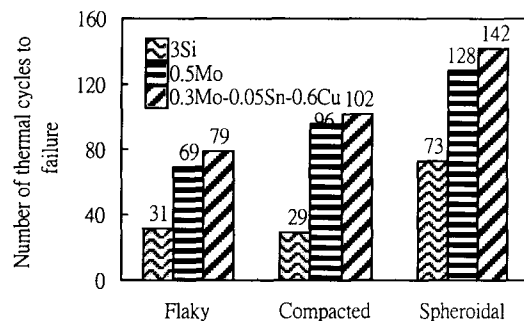


Fig. 8 Effect of molybdenum content on thermal fatigue life for various graphite cast irons.

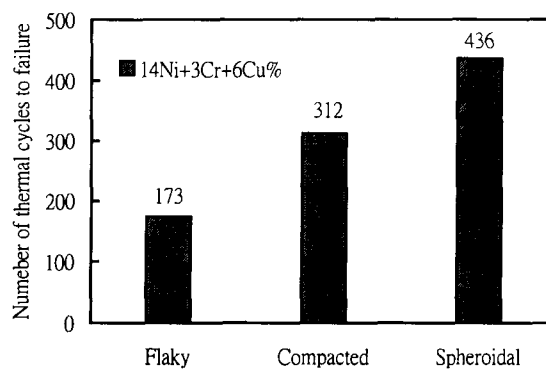


Fig. 9 A Comparison of thermal fatigue life for various graphite cast irons containing 14%Ni-3%Cr-6%Cu.

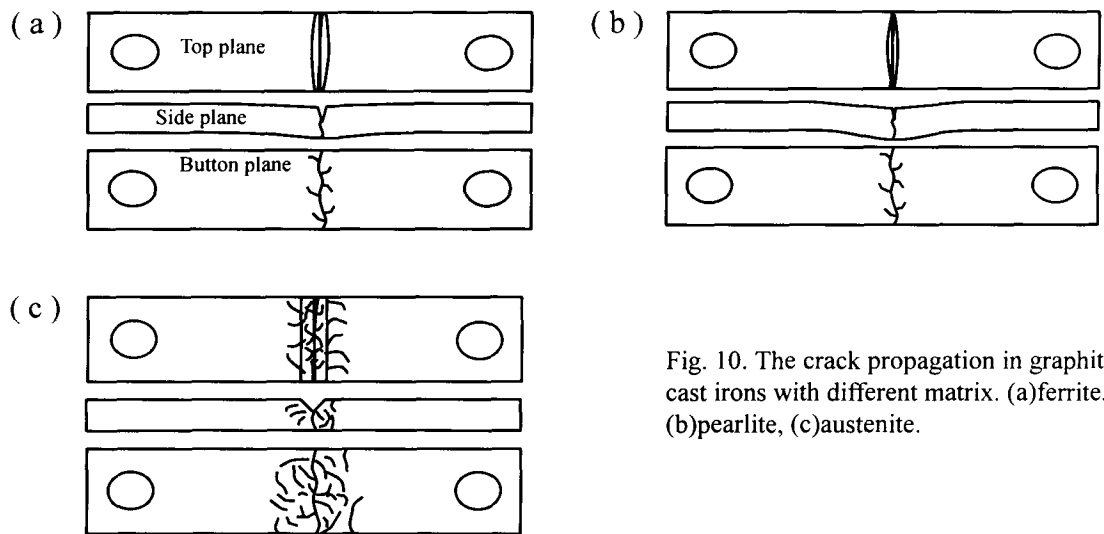


Fig. 10. The crack propagation in graphite cast irons with different matrix. (a)ferrite, (b)pearlite, (c)austenite.

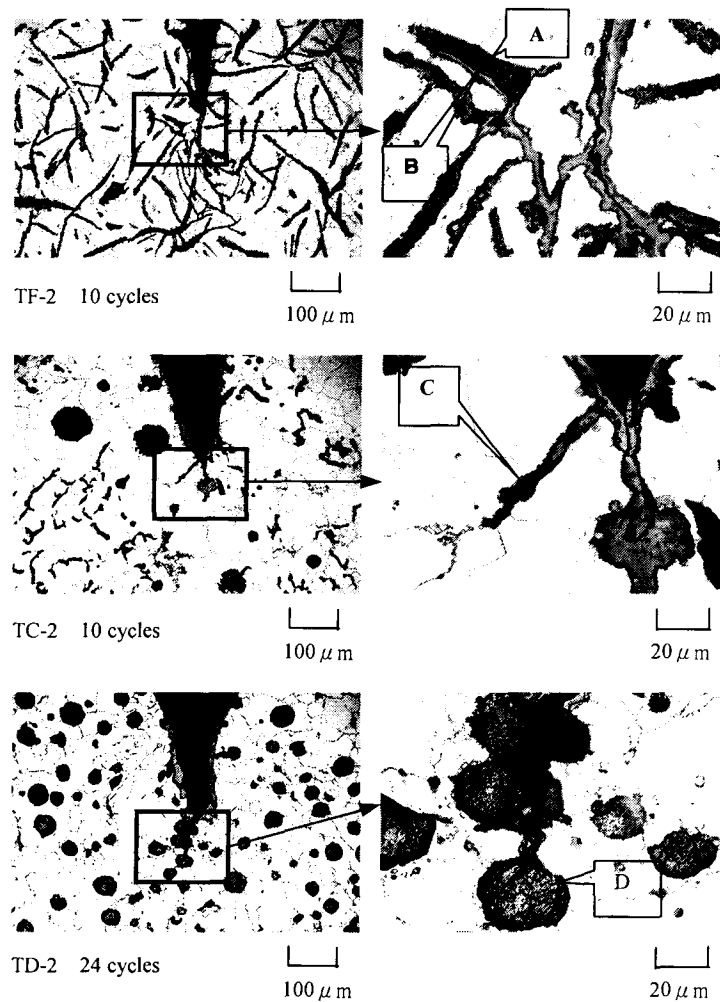


Fig. 11. The micrographs of thermal-fatigue specimens with various graphite shapes (TF-2, TC-2 and TD-2).

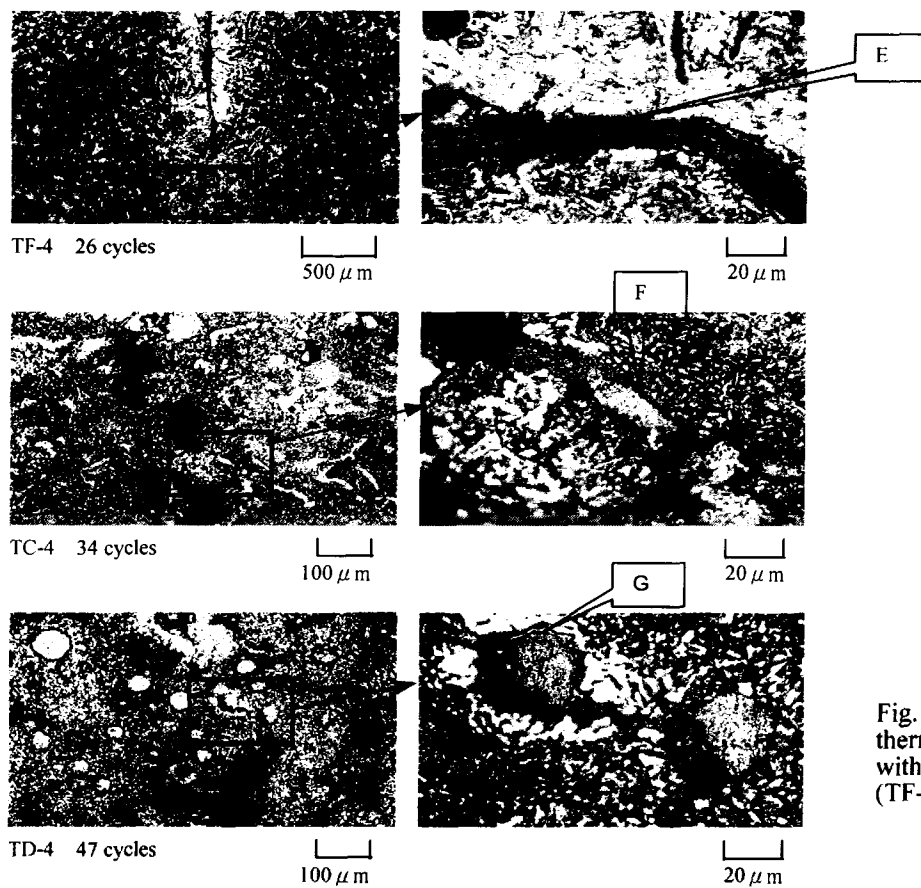


Fig. 12. The micrographs of thermal-fatigue specimens with various graphite shapes (TF-4, TC-4 and TD-4).

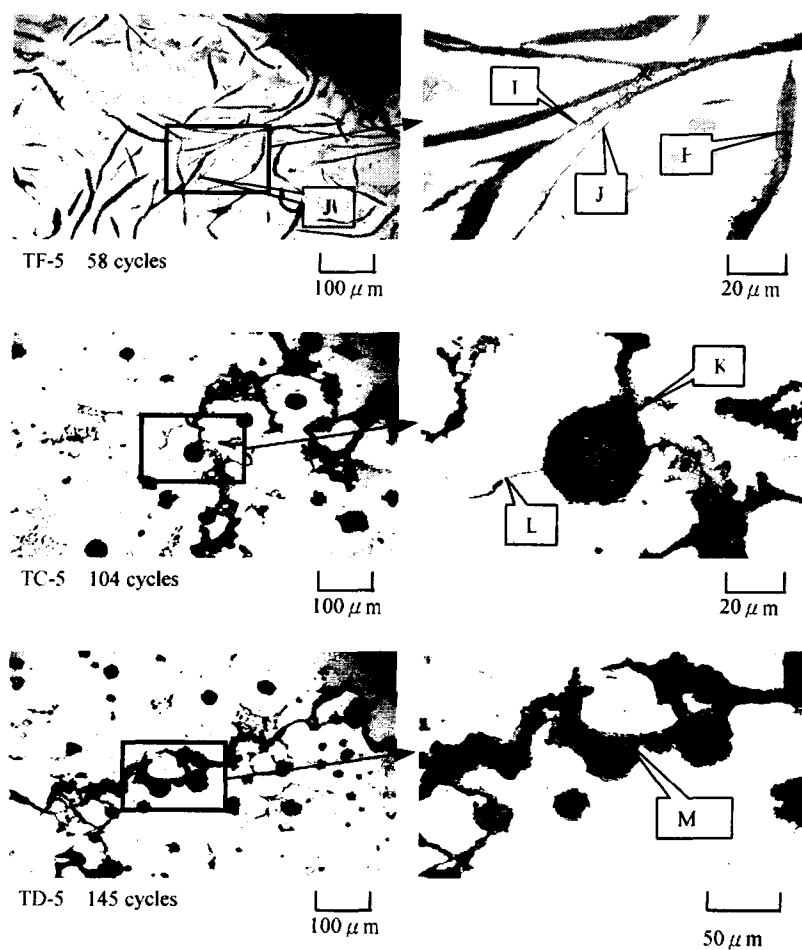


Fig. 13. The micrographs of thermal-fatigue specimens with various graphite shapes (TF-5, TC-5 and TD-5).