

# 熱疲勞測試對熱作模具鋼殘留應力之影響

## Thermal Fatigue Effect on the Residual Stress of Hot Work Steel

葉亞維<sup>1</sup> 邱六合<sup>1</sup> 楊震宇<sup>1</sup> 蘇洋右<sup>1</sup> 葉元仁<sup>2</sup> 谷高弘將<sup>3</sup>

<sup>1</sup>大同大學 材料工程學系 <sup>2</sup>力貫國際股份有限公司 <sup>3</sup>PULSTEC 工業株式會社

### 摘要：

JIS SKD 61 應用於熱作模具，淬火時表面產生壓應力，模具受反覆冷熱作動時會造成破裂，主要因為表面產生大量張應力所導致。本研究係探討高週波加熱冷卻循環對熱作工具鋼熱疲勞後殘留應力之影響。利用永大 DAC 熱作工具鋼經真空熱處理調質至 47HRC，利用 400kHz，30kW 真空管式高週波機，使試片進行 2.5 秒加熱及 2 秒冷卻之 500-4000 次熱疲勞循環。以 100 倍光學顯微鏡進行裂痕觀察，及橫截面裂紋深度及密度觀察，利用表面裂痕型態標準圖譜的比對以及損傷因子的計算量化排序。殘留應力量測方面則利用 X-ray 方式且用 cos 法進行計算殘留應力。由殘留應力量測發現收料組織之鋼棒延著軋軋方向呈現張應力，而徑向形成壓應力，經過淬火回火後，軸向與徑向皆呈現-340MPa 之壓應力，經過 500 次熱疲勞後表面壓應力開始降低至-70MPa。

**關鍵詞：**熱疲勞、高週波加工機、熱作工具鋼、殘留應力

### ABSTRACT

Thermal fatigue cracking is one of the most important failure mechanisms in hot work die steels. This study investigates thermal fatigue effect on the residual stress of hot work steel. A novel method using induction heating equipment was employed to investigate the thermal fatigue behaviors of hot-work steel, SKD 61(DAC), vacuum hardened treated to 47 HRC. Microstructure, X-ray diffraction and thermal fatigue tests were conducted. Residual stress were

calculated by a cos method developed by PULSTEC company using X-ray devices. The results show that tensile stress existed in the rolled direction and compressive stress existed in the radial direction of the received specimen. The compressive stress of quench and temper specimen was -340 MPa. The residual stress of 500 cycles thermal fatigue tested specimen was decreased to -70 MPa from -340MPa.

**KEYWORDS:** thermal fatigue, induction heating, hot work steel, residual stress

### 1. 前言

熱作模具鋼廣泛應用於壓鑄模、擠製模、注塑模、熱壓模和鍛造模，除應具有高的硬度、強度、紅硬性、耐磨性和韌性外，還應具有良好的高溫強度、熱疲勞穩定性、導熱性和耐蝕性。對於壓鑄模用鋼，還應具有表面層經反覆加熱和冷卻不產生裂紋，以及經受液態金屬流的沖擊和侵蝕的性能 [1-2]。

經檢索得知國外有很多文獻著重理論分析探討熱作模具鋼的耐熱疲勞性 [3-8]，熱疲勞 (Thermal fatigue) 破壞是指金屬材料反覆在具有較大溫度梯度之惡劣工作環境下工作，因承受熱漲冷縮造成彈性及塑性變形之熱應力與高溫氧化，隨著週期數及熱應力增加，最後導致破裂。Persson [3] 等人以不同熱作工具鋼探討表面處理後對其耐熱疲勞性的影響，利用高週波加熱並利用 60°C 的循環矽油與高壓氫氣同步進行試片內部及外部冷卻，使試片在 170°C 至 700°C 之間進行 5000 及 10000 次熱疲勞循環，觀察耐熱疲勞性。Hu [4] 等人亦有研究碳化物  $M_{23}C_6$  在經過時效或熱疲勞時的

粗化行為對 AISI H13 熱作模具鋼的影響，說明在熱疲勞試驗的  $M_{23}C_6$  碳化物的粗化速率約為 H13 鋼在  $700^{\circ}\text{C}$  時效的 300 倍，但添加 0.07wt%Nb 可有效抑制  $M_{23}C_6$  的粗化速率。

本研究中，參考周小平[9]等人進行熱疲勞試驗的方式，利用高週波加熱及噴水冷卻的方式，於  $700^{\circ}\text{C} \sim 20^{\circ}\text{C}$  兩溫度反覆五百次，模擬壓鑄模具在作業過程所受之熱疲勞應，觀察試片表面裂紋的產生及傳遞情形，以評估材料的耐熱疲勞性。針對 JIS SKD61 標準型鋼(大同 DAC)，進行真空熱處理調質至 47 HRC 及進行熱疲勞實驗，探討殘留應力對熱疲勞性之影響。

## 2. 實驗步驟

### 2.1 試片製備

本實驗所使用鋼料為大同 DAC 熱作工具鋼，真空熱處理後進行熱疲勞實驗，探討表面殘留應力變化之影響；並利用高週波機進行熱疲勞試驗等以評估模具材料高溫特性變化。實驗試片尺寸如 Fig 1。

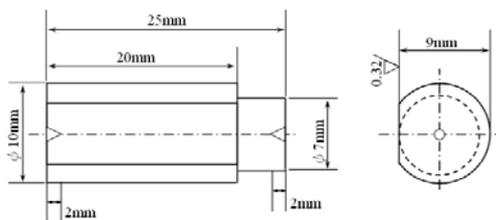


Fig. 1 圓棒變形試片

### 2.2 熱處理流程

真空熱處理採用臻龍公司設計製造之兩腔式真空熱處理爐進行淬火及回火，如 Fig. 2 所示。試片熱處理條件為於  $550^{\circ}\text{C}$  及  $800^{\circ}\text{C}$  進行均溫預熱，持溫分別為 50 及 25 分鐘，接著升溫至  $1020^{\circ}\text{C}$  進行沃斯田體化持溫，然後移到外腔噴入氮氣 ( $2\text{kg}/\text{cm}^2$ ) 冷卻，冷到大約  $70\sim 80^{\circ}\text{C}$  後取出，於  $610^{\circ}\text{C}$  回火，持溫 1 小時兩次，處理後硬度為 47-48 HRC。

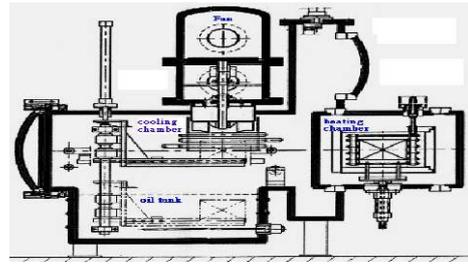


Fig. 2 真空熱處理爐外觀及結構圖。

## 2.3 微觀結構與性質量測

### 2.3.1 微觀組織觀察

將淬火回火及熱疲勞試驗完成的試片以砂輪切割機截取一部分鑲埋作為金相觀察，試片依次以碳化矽砂紙逐步研磨至 1200 號後，再以  $0.05\mu\text{m}$  氧化鋁粉在 300 rpm 的轉速下進行拋光，以 Nital (100ml 酒精+1~5ml 硝酸) 作為化學腐蝕液，並以 Nikon OPTIHOT-100 光學顯微鏡觀察其滲碳層的金相組織；原沃斯田體晶粒觀察則以  $60^{\circ}\text{C}$  之苦味酸水溶液對試片腐蝕 3~5 分鐘，再經短時間拋光即進行金相觀察。

### 2.3.2 熱疲勞試驗

本研究試驗裝置是利用高週波加熱及噴水冷卻的方式進行試驗，試片從室溫加熱 2.5 秒後，試片經 2 秒噴水冷卻到室溫，溫度測量是以熱電偶線焊接試片平面上進行，高週波加熱範圍約 3mm。由 Fig 1 熱疲勞試驗之試棒直徑為 10mm 之圓棒試片銑出一軸向平面，可進行平面及圓面之裂紋形貌觀察，利用高週波加熱及噴水冷卻的方式，進行 500 至 4000 次後，利用 50 倍顯微鏡來觀察試片表面裂紋的產生及傳遞情形，其中裂紋形貌之比對標準是參照中華人民共和國國家標準 GB/T 15824 [10]，來評估材料的耐熱疲勞性。

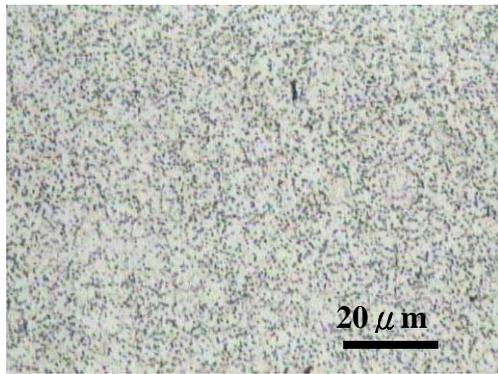
### 2.3.3 殘留應力量測

利用 PULSTEC  $\mu$ -X360 之 X 光分析儀來進行殘留應力量測，此殘留應力量測利用德拜環來進行計算。X 光量測殘留應力利用固定入射角度，改變試片角度來進行量測及計算，但利用德拜環來計算殘留應力[11]。

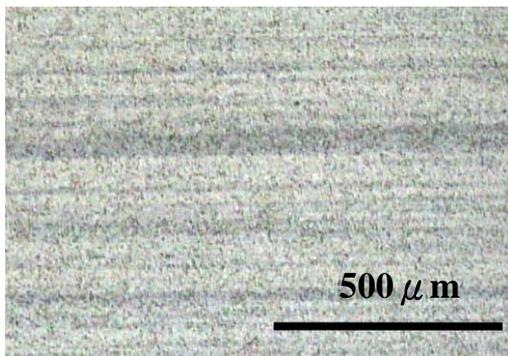
### 3. 結果與討論

#### 3.1 微觀結構

SKD 61 收料組織為球狀碳化物散佈於肥粒體基地中，Fig. 3 為收料組織之金相，由橫向觀察發現碳化物均勻分佈之中，由縱向觀察則可發現樣品經過軋軋，碳化物依造軋軋方向有所排列。



(a)



(b)

Fig. 3 SKD 61 之收料組織 (a)橫向，(b)縱向

試片經過 1020°C 沃斯田體化淬火及 610°C 兩次回火後，得到回火麻田散體組織，如 Fig. 4 所示，其硬度為 47 HRC。

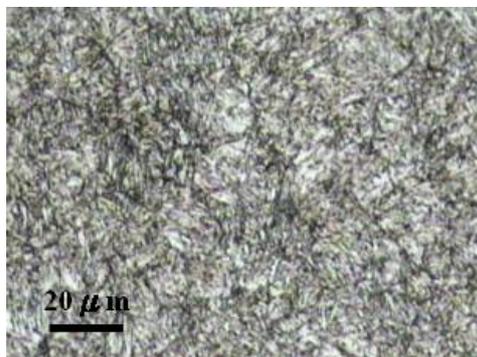


Fig. 4 DAC 淬火回火之金相組織

#### 3.2 熱疲勞測試

##### 3.2.1 溫度測量

本實驗使用之熱疲勞試驗裝置為 300kHz, 40kW 真空管式高週波加工機。溫度測量部份，是將熱電偶點焊在 SKD61 試片平面上進行，而高週波加熱範圍約 3mm。Fig. 5 為加熱時間 2.5 秒、噴水冷卻 2 秒之溫度測量結果，SKD 61 試片加熱兩秒後溫度可達  $700 \pm 10^\circ\text{C}$ ，噴水冷卻 2 秒後溫度回到室溫，測試反覆多次後溫度趨勢相同。運用此種方式來進行熱疲勞實驗，反覆次數為 500-4000 次。

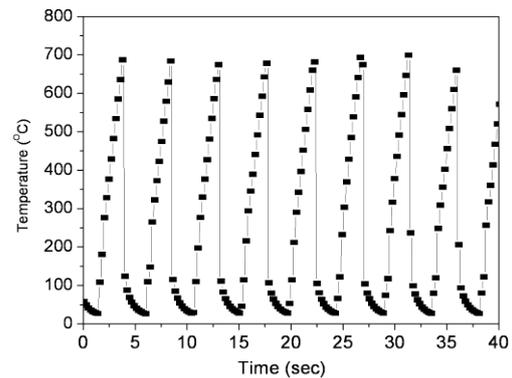
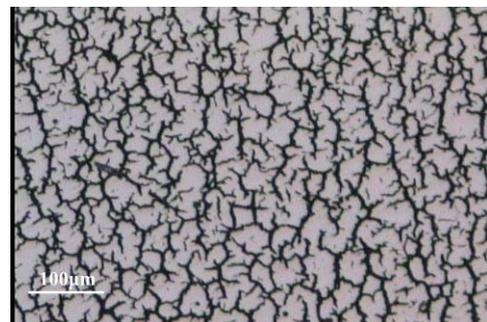


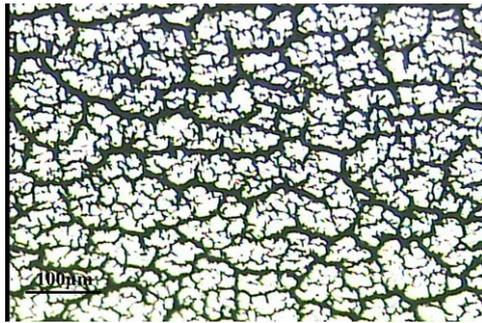
Fig. 5 加熱時間 2.5 秒及噴水冷卻 2 秒之溫度測量曲線。

##### 3.2.2 熱疲勞測試結果

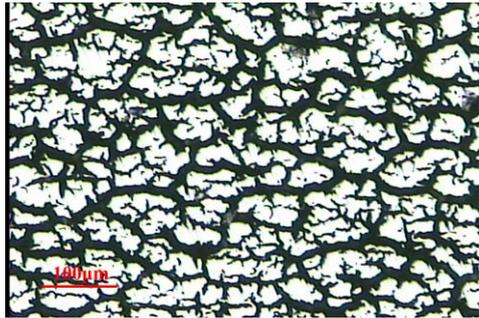
DAC 試片經沃斯田體化持溫，然後移到外腔噴入氮氣冷卻，並於回火 1 小時兩次，硬度分別控制在 47 HRC，隨後進行熱疲勞試驗。熱疲勞試驗選用 1.5 秒加熱及 2 秒噴水冷卻條件，分別執行 500 至 4000 次循環進行熱疲勞測試，試驗結束後再進行表面及橫截面裂紋形貌觀察。試片表面利用拋光的方式將氧化鏽皮去除，隨後在利用 100 倍光學顯微鏡進行表面裂紋形貌觀察。如 Fig 6 所示。



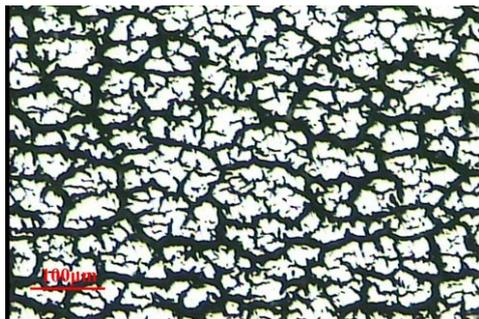
(a)



(b)



(c)



(d)

Fig 6 DAC 試片經不同循環熱疲勞試驗後之表面網狀裂紋形貌。(a)500、(b)1000、(c)2000、(d)4000 次

進行完表面裂紋形貌觀察後，利用砂輪切割機將熱疲勞試片對切，經研磨及拋光後利用光學顯微鏡觀察橫截面裂紋形貌，計算各參數之損傷因子(裂紋寬度 × 裂紋深度)並進行比序[9]。損傷因子隨著熱疲勞抗性增加而下降，顯示裂紋形成之後其寬度及長度因承受疲勞熱應力而成長。DAC 試片觀察裂紋寬度及深度來計算損傷因子，如 Table 1 所示，可觀察出受到熱疲勞之破壞，比對 Fig. 6 表面裂痕觀察，500 次熱疲勞測試後，表面開始產生裂紋，但主要以細小裂紋為主，損傷因子最低，經過 1000 次測試後，已發現有主裂紋存在，表面裂痕寬度開始增加，導致損傷因子急劇增加；經過

2000 次測試後，裂紋寬度增加，但損傷因子卻未明顯增加，表示裂痕僅寬度增加，但裂痕深度則無明顯改變，經過 4000 次後，損傷因子大幅提高，表示以遭受嚴重熱疲勞破壞，但比較 Fig. 6(c)與(d)之表面裂痕外貌差異不大，但損傷因子差異很多，表示從 2000 次至 4000 次時，主要破壞是裂痕深度的傳遞為主。

Table 1 DAC 試片經不同熱疲勞測試次數之損傷因子

疲勞次數	損傷因子
500	32.2
1000	252.7
2000	324.8
4000	1203.6

### 3.3 殘留應力量測

試片經過 PULSTEC  $\mu$ -X360 之 X 光分析儀量測後結果如 Table 2 所示。DAC 收料組織為球化退火之鋼棒，但由 Table 2 可發現收料鋼棒縱向為張應力(134 MPa)，橫向則為壓應力(-174 MPa)。DAC 之收料組織為滾軋後之鋼棒，由 Fig.3(b)縱向觀察發現樣品碳化物排列之方向為滾軋方向，鋼棒從較大直徑經滾軋成小直徑之鋼棒，縱向受到拉長力量所得是張應力，但橫向直徑變小受到壓應力。DAC 試片經過淬火及回火後，試片表面產生壓應力縱向及橫向皆為-340MPa 左右，但收料組織之縱向及橫向應力差異消失，因淬火時加熱至沃斯田體化後殘留張應力已消除。DAC 試片經過 500 次熱循環處理後，表面受到冷熱差異之應力開始產生破裂，表面應力縱向及橫向之殘留應力分別為-170 及-70 MPa，可發現橫向之壓應力降低較大，主要原因係裂痕會沿著滾軋方向破裂，裂痕張開方向為橫向，因此橫向之殘留壓應力降低較大。

Table 2 DAC 試片經不同處理之殘留應力結果 (MPa)

試片	縱向量測	橫向量測
收料組織	134	-174
淬火回火	-323	-340
500 次熱疲勞	-170	-70

#### 4. 結論

DAC 試片經過反覆熱疲勞試驗後，表面開始產生裂痕，由損傷因子及表面裂紋形貌狀態，可發現 500 次測試後表面開始產生微小裂紋，1000 次後主裂紋開始出現，2000 次後裂紋開始變寬，3000 次後裂紋寬度無明顯變化，但裂紋深度開始傳遞。

由殘留應力量測可以發現收料組織會因軋軋方向造成縱向及橫向之應力有所變化，縱向產生張應力，橫向產生壓應力。經過高溫淬火及回火後縱向及橫向皆產生壓應力(約-330MPa)，但經 500 次熱疲勞後縱向及橫向因裂紋方向有所差異，導致兩個方向之殘留應力有所差異，分別為-170 MPa 及 -70 MPa。

#### 5. 致謝

感謝大同大學提供經費進行此研究，計畫編號為 B101-T07-011 及力貫國際股份有限公司提供 PULSTEC  $\mu$ -X360 量測殘留應力。

#### 參考文獻

1. L. L. G. Silva, M. Ueda, R. Z. Nakazato, Enhanced corrosion resistance of AISI H13 steel treated by nitrogen plasma immersion ion implantation, *Surface & Coatings Technology* 201 (2007) 8291.
2. S. H. Chang, T. P. Tang, K. T. Huan, Improvement of Aluminum Erosion Behavior and Corrosion Resistance of AISI H13 Tool Steel by Oxidation Treatment, *ISIJ International* 50 (2010) 569.
3. A. Persson, S. Hogmark, J. Bergstrom, Thermal fatigue cracking of surface engineered hot work tool steels, *Surface & Coatings Technology* 191 (2005) 216.
4. X. Hu, L. Li, X. Wu, M. Zhang, Coarsening behavior of  $M_{23}C_6$  carbides after ageing or thermal fatigue in AISI H13 steel with niobium, *International Journal of Fatigue* 28 (2006) 175.
5. V. V. Ivanov, W. G. Ferguson, I. R. Paine, Study of Thermal Fatigue of H13 Die Steel with Various Surface Treatments, *International Journal of Modern Physics* 17(8 & 9) (2003) 1671.
6. A. Persson, S. Hogmark, J. Bergstrom, Thermal fatigue cracking of surface engineered hot work tool steels, *Surface & Coatings Technology* 191 (2005) 216.
7. D. Klobcar, J. Tusek, B. Taljat, Thermal fatigue of materials for die-casting tooling, *Materials Science and Engineering* 472 (2008) 198.
8. C. Wang, H. Zhou, P. Y. Lin, N. Sun, Q. Guo, P. Zhang, J. Yu, Y. Liu, M. Wang, L. Ren, The thermal fatigue resistance of vermicular cast iron coupling with H13 steel units by cast-in process, *Materials and Design* 31 (2010) 3442.
9. 周小平，胡心彬及江鋒，新型熱作模具鋼德的熱疲勞性能，*金屬熱處理* 36(1) (2011) 107。
10. 熱作模具鋼熱疲勞試驗方法，中華人民共和國國家標準，GB/T 15824，2008