

# 以高週波設備比較不同鋼種之熱疲勞行為

## Thermal Fatigue Behavior Investigation of Steels by Induction Facility

楊震宇<sup>1</sup> 邱六合<sup>1</sup> 葉書宏<sup>1</sup> 林守杞<sup>2</sup> 潘永村<sup>2</sup>

Jhen-Yu Yang<sup>1</sup> Liu-Ho Chiu<sup>1</sup> Shu-Hung Yeh<sup>1</sup> Shou-Chi Lin<sup>2</sup> Yeong-Tsuen Pan<sup>2</sup>

1 大同大學 材料工程學系 2 中國鋼鐵股份有限公司

### 摘要：

本研究以高週波設備比較不同種類之鋼料的熱疲勞性質。選用硬度 22HRC 之 S45C 收料鋼棒，以及 SKD61 及 SKH51 經淬火回火至 47 及 64HRC 為比較材料，研磨並拋光至粗糙度 Ra=0.03 $\mu$ m，接著利用 150kHz, 12kW 晶體震盪式高週波專用機以 1.5 秒加熱及 2 秒冷卻為一加熱冷卻循環，進行 500 熱疲勞循環試驗。將進行完熱疲勞循環之試片，置入添加抑制劑之 15% HCl 水溶液浸泡 15 分鐘去氧化鏽皮，接著取出拋光，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，並以損傷因子(裂紋寬度\*裂紋深度)計算進行量化排序。實驗結果顯示，熱作工具鋼之 SKD61 鋼料經高週波加熱冷卻循環後有較低的裂痕深度以及裂痕密度，具有最佳的熱疲勞抗性。再來是延性最佳的 S45C，最後則是硬度最高的 SKH51 鋼料。

**關鍵詞：**熱疲勞、高週波加工機、工具鋼

### Abstract

Cyclic thermal stress arisen during the die filling of die casting process will lead to plastic deformation and cause further heat crack initiation. Thermal fatigue cracking is the most common failure behavior in hot-worked die damage mechanisms. A higher level of resistance, thermal shock resistance and excellent high temperature strength are required in hot work die steel. A novel method using induction heating equipment was employed to investigate the thermal fatigue behaviors of three steels including JIS S45C, SKD61 and SKH51 steel. The thermal fatigue

testing equipment was based on cyclic induction heating referring the GB/T 15824 standard. Microstructure, microhardness and thermal fatigue tests were conducted. The results show that the thermal fatigue properties of the 625°C tempered SKD61 specimen were better than those of other treated steels. The reason is that the hardened and tempered processes would give the combination of high strength and toughness, which improved thermal fatigue resistance of the SKD61 tool steel.

**Keywords:** thermal fatigue, induction heating equipment, steel

### 1. 前言

隨著產業發展，需要再現性高的生產模式，其中一次成形的加工製程，不論是塑膠材的射出成形、金屬材的壓鑄成形、鍛造成形等需要高溫操作環境的製程，或是衝壓加工的剪切模、彎折模以及粉末冶金壓製生胚等冷作的製程，均需使用高品質的模具，模具鋼是一個龐大的市場，不但帶動國內模具鋼的用量，鋼種之規格也帶動對品質等各方向需求的提高。在工業生產中，模具使用壽命和製造零件的精度，除與模具的設計、製造精度及加工和操作有關外，正確的選用模具材料和熱處理技術也是相當重要的課題。

熱作模具使用除承受巨大機械應力外，另需承受因反覆加熱和冷卻作用誘發熱應力之嚴苛環境下作業，使得熱疲勞破裂成為模具最常見的破損原因，模具也常因熱疲勞損壞而須頻繁修整及更換，

增加生產成本。因此必須採用耐熱疲勞性較佳的模具用料為提高國內產業的競爭力，首先必須針對不同鋼種進行特性評估，參酌國內外現有熱疲勞檢測方法擬用參酌 Persson[1]之熱疲勞測試方法及國家標準 GB/T 15824[9]，在實驗室利用高週波機進行不同鋼種的熱疲勞性能測試，並比較各鋼種特性。

## 2. 實驗步驟

### 2.1 實驗材料

本實驗使用 JIS SKD61 (AISI H13)熱作鋼鋼料、SKH51 高速鋼及 S45C 中碳鋼三種鋼棒，經光譜成分分析儀(Optical Emission Spectrometer, OES)分析如 Table 1 所示。

Table 1 實驗鋼材之化學成分(wt%)。

wt%	C	Si	Mn	Mo	Cr	V	Ni	W
SKD61	0.403	1.090	0.384	1.05	4.80	0.910	0.124	-
SKH51	0.830	0.320	0.250	4.91	4.22	1.810	0.250	6.15
S45C	0.440	0.200	0.810	-	0.15	-	0.120	-

### 2.2 熱處理設備

如 Fig.1 所示，SKD61 及 SKH51 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。將試片放入加熱腔(heating chamber)進行升溫到沃斯田體化持溫然後使用可移動軌道將試片帶入冷卻腔(cooling chamber)以  $2\text{kg}/\text{cm}^2$  氮氣壓力進行氣淬，SKD61、SKH51 分別淬火回火以得到 47 及 64HRC 硬度。

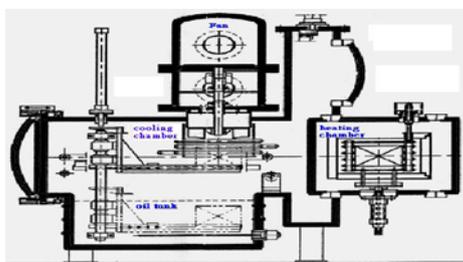


Fig. 1 真空熱處理爐外觀及結構圖。

### 2.3 微觀組織觀察

經淬火回火完成的試片以砂輪切割機截取一部分鑲埋作為金相觀察之用，試片依次以碳化矽水砂紙逐步研磨至 1200 號後，再以  $1\mu\text{m}$  氧化鋁粉在 300 rpm 的轉速下進行拋光，以 Nital (95ml 酒精 + 5ml 硝酸) 作為化學腐蝕液，並以 Nikon OPTIHOT-100 光學顯微鏡觀察其金相組織。

### 2.4 熱疲勞試驗

試驗裝置是參照中華人民共和國國家標準 GB/T

15824 [9]，利用高週波加熱及噴水冷卻的方式進行試驗，試片經 1.5 秒內由室溫升溫至  $700^\circ\text{C}$ ，隨後試片經 2 秒噴水冷卻到室溫，其中溫度測量是以熱電偶在試片平面上進行。而高週波加熱範圍約 3mm。由 Fig 2 熱疲勞試驗之試棒直徑為 10mm 之圓棒試片銑出一軸向平面，可同時進行平面及圓面之裂紋形貌觀察，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 [9]。利用高週波加熱及噴水冷卻的方式，於  $700^\circ\text{C} \sim 20^\circ\text{C}$  兩溫度反覆為一次，進行 500 次後，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。

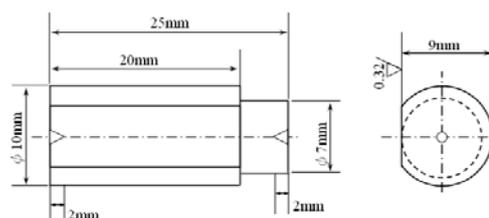


Fig 2 熱疲勞試驗之試棒尺寸。

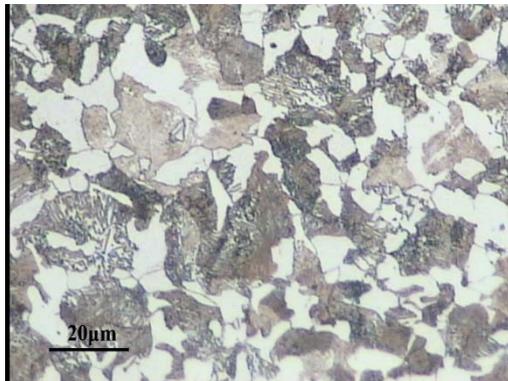
### 2.5 硬度量測

將進行完熱疲勞試驗試片之橫截面的微硬度測試是使用維克氏 (Vickers) 微硬度試驗機，選用 100 克的荷重作微硬度試驗，量測範圍由試片表面至心部每 0.05 mm 量測一點硬度值，直到硬度值下降至基材硬度不再變化為止，藉此觀察硬度變化。

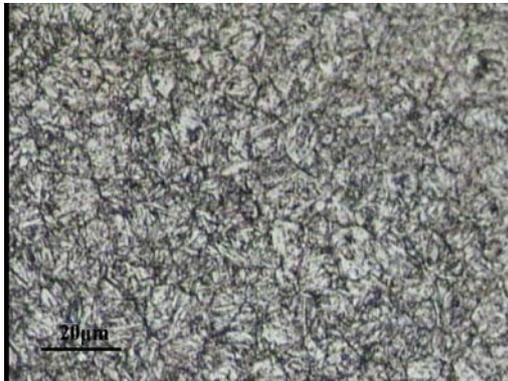
### 3.結果與討論

#### 3.1 微觀結構觀察

S45C 之收料材料，經 Nital (95ml 酒精+5ml 硝酸) 腐蝕後之微觀組織如 Fig. 3(a)所示。由圖可以看出 S45C 之收料組織為波來鐵散佈在肥粒鐵基地。Fig. 3(b)及(c)為 SKD61 與 SKH51 經沃斯田體化後以氬氣氣淬，再分別以兩次 1 小時回火處理並經 Nital 腐蝕後之微觀組織，可發現 JIS SKD61 及 SKH51 組織為典型的回火麻田散體組織以及球狀碳化物散佈在回火麻田散鐵基地。其中以 SKH51 白色共晶碳化物顆粒較多。



(a)



(b)



(c)

Fig. 3(a) S45C 收料微觀組織，(b)SKD61 淬火

回火組織及(c)SKH51 淬火回火組織。

#### 3.2 熱疲勞試驗

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。壓鑄模具，以具有三次元的複雜形狀之「工具」，擔負製品製造的重要任務。對壓鑄來講，經過加工具有複雜形狀的模具，被要求須具高精度的形狀轉寫性能，因此，所使用的模具的品質和表面安定性的良否，對鑄造製品的品質直接發生很大影響。壓鑄模具表面，在作業過程(射出一凝固保持一取出—脫模劑塗布)會反覆受急加熱-急冷卻的熱循環。此時，在模具表面會發生伴隨熱疲勞所引起的熱疲勞龜裂。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°C~ 20°C 兩溫度間反覆操作，模擬壓鑄模具在作業過程所受之熱疲勞應力，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。

##### 3.2.1 溫度測量

使用熱疲勞試驗裝置為 150kHz, 12kW 晶體振盪式高週波加工機。溫度測量部份，是將熱電偶點焊在 SKD61 試片平面上進行。Fig 4 為高週波機輸出功率 78%、加熱時間 1.5 秒及噴水冷卻 2 秒之溫度測量結果可以看到受高週波加熱區的溫度在 670±20°C，此溫度可以模擬鋁壓鑄模使用條件。另外以 S45C 中碳鋼進行試驗，試驗後以表面巨觀照片觀察及橫截面微觀組織確認溫度變化情形。Fig 5 為收料 S45C 經 1.5 秒加熱及噴水冷卻 2 秒並進行 25 循環試驗後之表面巨觀照片，圖中 1.5 秒進行熱試片表面並無觀察到明顯開裂現象。

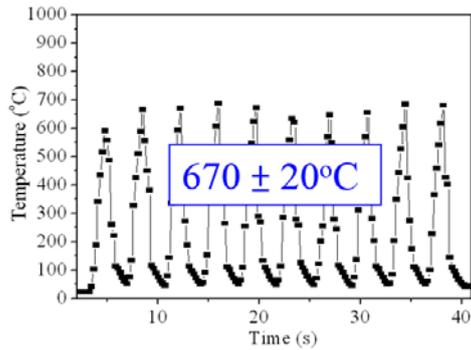


Fig 4 加熱時間 1.5 秒及噴水冷卻 2 秒之溫度測量曲線。



Fig 5 S45C 經 25 循環加熱時間 1.5 秒及噴水冷卻 2 秒後之表面巨觀照片。

Fig 6 為收料 S45C 經 1.5 秒加熱及噴水冷卻 2 秒並進行 25 循環試驗後之橫截面微觀組織。由橫截面微觀組織可看出，以 1.5 秒進行加熱試片，表面沒有觀察到有明顯麻田散鐵相形成，且表面硬度 254HV 與心部 198HV 差異不大，只有些微的增加，研判表面最高溫約為 700°C 左右，確認產生溫度並未高於 A<sub>1</sub> 線而使冷卻時產生麻田散體變化。

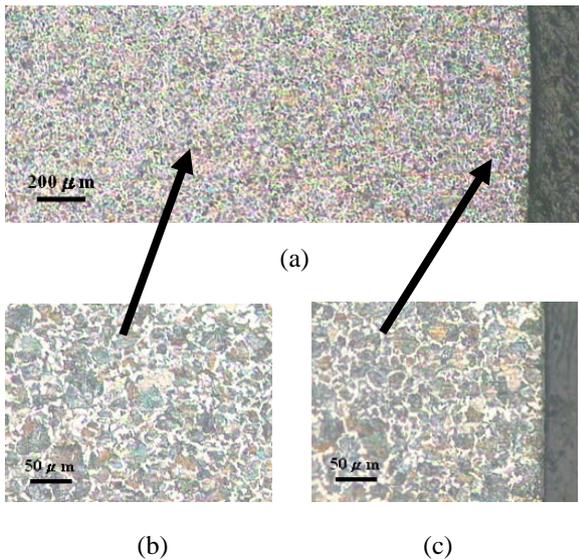
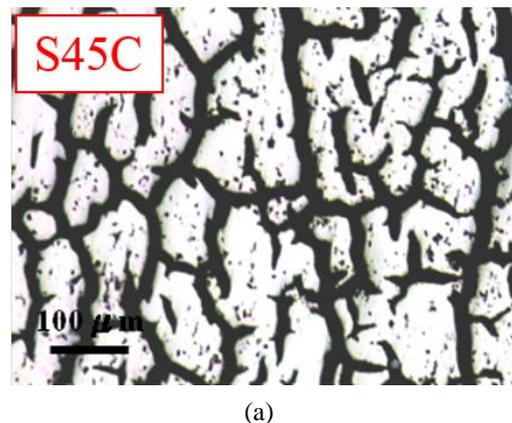
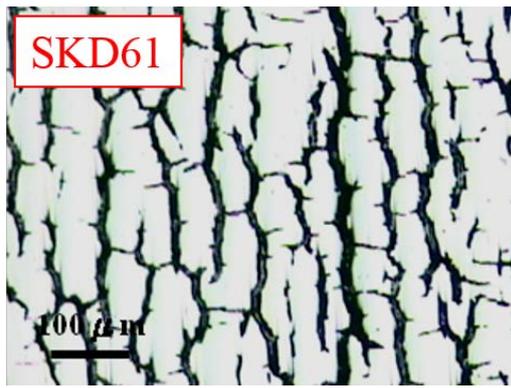


Fig 6 經加熱時間 1.5 秒及噴水冷卻 2 秒加熱循環 25 次之 S45C 橫截面微觀組織。

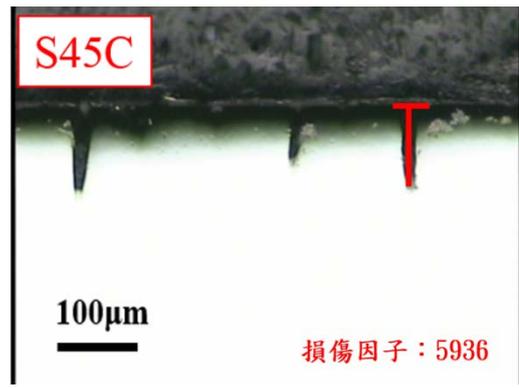
### 3.2.2 熱疲勞測試

由葉書宏等人於熱作模具鋼熱疲勞性能測試設備及方法之建置研究[11]結果顯示 500 循環能夠有效比較不同鋼種之這疲勞性能差異。SKD61 及 SKH51 試片經沃斯田體化持溫，然後移到外腔噴入 2kg/cm<sup>2</sup>(2bar)氮氣冷卻，分別以回火 1 小時兩次，硬度分別控制在 47 以及 64HRC，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 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，並以中華人民共和國國家標準 GB/T 15824 熱裂紋等級做為評定標準，該標準分為網狀裂紋(A)及主裂紋(B)兩種，各有十個等級的區分，區分標準在於裂紋所佔之面積比例。S45C、SKD61 以及 SKH51 試片經 500 循環熱疲勞試驗後之表面裂紋形貌如 Fig 7 所示，圖中顯示 S45C 試片在進行 500 循環熱疲勞試驗後，試片表面已有明顯網狀裂紋，整體裂紋面積占總面積 41.1%，屬 GB A-8 等級，而主裂紋則是屬 GB B-2 等級，SKD61 試片中裂紋占總面積 24.1%具有較佳的耐熱疲勞特性，網狀裂紋屬 GB A-5 等級，主裂紋屬 GB B-1 等級，SKH51 試片中裂紋占總面積 29.6%，網狀裂紋密而細屬 GB A-5 等級，SKH51 之特別明顯主裂紋屬 GB B-7 等級。

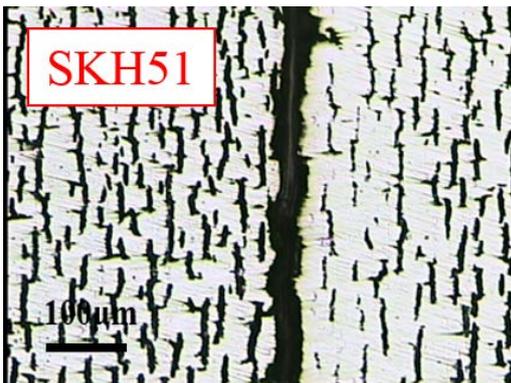




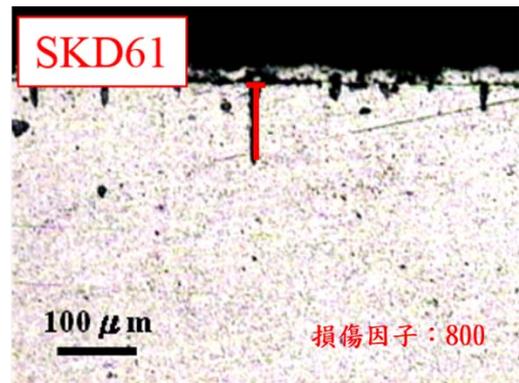
(b)



(a)



(c)



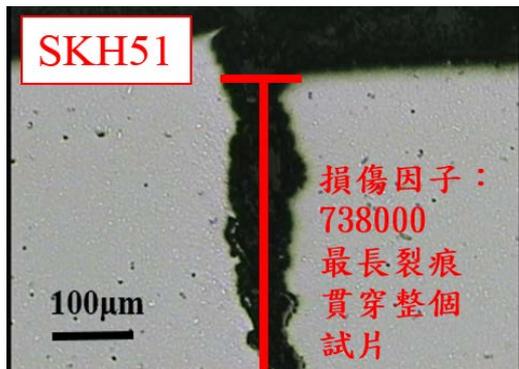
(b)

Fig 7 不同鋼種試片在 1.5 秒加熱時間及 2 秒噴水冷卻條件下經 500 循環次數後之表面裂紋照片

(a)S45C, (b)SKD61 及(c)SKH51。

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]。

Fig 8 為 S45C、SKD61 及 SKH51 試片經 500 循環熱疲勞試驗後之平面裂紋形貌，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由 Fig 8(b) 看到 SKD61 損傷因子只有  $800\mu\text{m}^2$  相較 S45C(5936)和 SKH51(738,800)都少，因此得知 SKD61 有較好之熱疲勞抗性。



(c)

Fig 8 不同鋼種試片經 500 循環熱疲勞試驗後之平面處橫截面裂紋形貌(a)S45C, (b)SKD61 及(c)SKH51。

### 3.3 硬度量測

將熱疲勞試驗後進行由表面至心部之微硬度量測如 Fig 9, 強度最高之 SKH51 表面微硬度 460HV 和心部 793HV 很明顯少了 42%，強度不錯之 SKD61 表面微硬度 345HV 和心部 470HV 少了 27%，進而發現較硬之材料，在進行熱疲勞試驗之後，硬度下降幅度較多，表示受到熱應力而疲勞軟化的程度較嚴重。雖然，收料 S45C 經過熱疲勞試驗後強度沒有改變，但是，整體強度不足，無法有良好的應用。

此外，SKD61 經淬火及在 680°C 回火硬度約為 33HRC [12]，和經熱疲勞試驗後之 SKD61 硬度值 345HV (33.9HRC) 相近，故再次確認熱疲勞測試最高溫度約為 680°C。

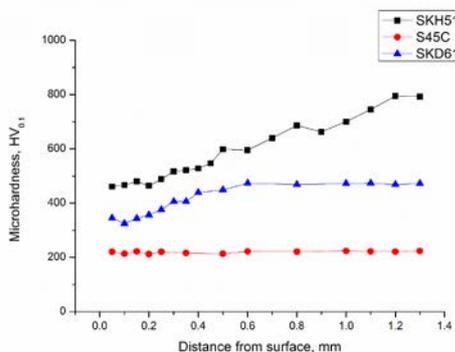


Fig 9 表面至心部之微硬度值。

#### 4. 結論

1. 由標準 SKD61 熱模鋼，經取料所製成試片以真空爐加熱到沃斯田體化後氣淬冷卻，並經回火，主要結構均為回火麻田散鐵。經淬火回火後之 SKH51 所得到之組織為大量球狀碳化物散佈在回火麻田散鐵基地上。而 S45C 之收料組織主要是由肥粒鐵及波來鐵所構成。
2. 由微硬度量測之結果得知，較硬之材料，在進行熱疲勞試驗之後，硬度下降幅度較多，受到熱應力而疲勞軟化的程度較嚴重。
3. 熱疲勞試驗後試片之表面裂紋形貌比對及橫截面損傷因子的計算，可有效評估材料的耐熱疲勞性。實驗得到之結果，SKD61 熱作工具鋼相較於高速鋼以及一般中碳鋼明顯有較低之損傷因子，故此得知有較佳之熱疲勞性質。
4. 綜合以上結果，SKD61 整體抵抗熱疲勞保有最佳強度，以及良好的抵抗熱應力軟化的能力。

#### 5. 致謝

感謝中國鋼鐵股份有限公司 RE101039 計畫案提供經費進行本研究。

#### 參考文獻

1. A. Persson, S. Hogmark, J. Bergstrom, Thermal fatigue cracking of surface engineered hot work tool steels, *Surface & Coatings Technology* 191 (2005) 216.

2. 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.
3. 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.
4. A. Persson, S. Hogmark, J. Bergstrom, Thermal fatigue cracking of surface engineered hot work tool steels, *Surface & Coatings Technology* 191 (2005) 216.
5. D. Klobcar, J. Tusek, B. Taljat, Thermal fatigue of materials for die-casting tooling, *Materials Science and Engineering* 472 (2008) 198.
6. C. Wang, H. Zhou, P. Y. Lin, N. Sun, Q. Guo, P. Zhang, J. Yu, Y. Liu, M. Wang, L. Ren, The
7. S. H. Chang, T. P. Tang, Y. C. Chen and J. K. Chen. Enhancement of erosion resistance on AISI H13 tool steel by oxynitriding treatment. *ISIJ International*, 49(2009) 421.
8. 周小平，胡心彬及江鋒，新型熱作模具鋼的熱疲勞性能，*金屬熱處理* 36(1) (2011) 107。
9. 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。
10. Yucel Birol, Thermal fatigue testing of Stellite 6-coated hot work tool steel, *Materials Science and Engineering A* 527 (2010) 6091.
11. 葉書宏、邱六合及林守杞，熱作模具鋼熱疲勞性能測試設備及方法之建置研究期末報告，2013。
12. Hitachi 技術資料-YSS 熱間加工用工具鋼 (2008)。