

微小零件之精確滲碳研究

The study of accurating heat treatment on miniature parts.

杜威宏* 蘇洋右* 邱六合*

Wei-Hung Tu Yang-Yu Su Liu-Ho Chiu

摘要

本研究嘗試探討微機電零件之精確滲碳技術，由改變微機電零件表面的結構和性質，使微機械應用能具有長的工作壽命。滲碳處理可以使工件表面硬化，並且保持心部之韌性，因此工件不易破裂。由於低碳鋼材有好的成型性，因此選用 JIS S20C 碳鋼進行實驗，並且利用氣體變成爐生成之 RX 氣體及丙烷氣體添加來控制碳勢，爐內溫度介於 870~930°C 和持續時間在 10~30 分鐘，再將試片迅速從爐溫進行水淬至常溫和 200°C 回火處理。實驗分析以微結構相、結構觀察表面粗糙度和滲碳硬度量測為主。本研究以氣氛為 RX gas 露點為 5°C 200ml/min+enrich gas 80ml/min，870°C 滲碳作業處理時間為 8-10 分鐘經水淬後回火 200°C 一小時，表面最高硬度為 702 HV_{0.3}，心部硬度為 450 HV_{0.3}，硬化深度為 0.080mm 可與目標值符合。

關鍵字：微小零件、滲碳、低碳鋼、RX 氣體

Abstract

Accurate heat treatment of small part used in the micro electro mechanical systems (MEMS) has been studied. They altered the surface structure and property of small parts in order to extend the application lifetime. According to the formability of the plain carbon steel, the AISI 1020 carbon steel was chosen as the experimental material. Carburization was conducted at temperatures ranging from 870°C and 930°C for 10~30 minutes in an endothermic atmosphere with a control carbon potential generated by the gas generator and a direct boosting of propane into the furnace. The specimens were directly water quenched from

the carburizing temperature and tempered at 200°C. The microstructures, morphologies, phase structures, surface roughness, and hardness of the carburized parts were investigated. The results show that the effective case depth of the carburized AISI 1020 specimens was larger than 0.08 mm, the hardness near the carburized surface was at the range of 700~750HV and core hardness was 350-450HV, respectively.

Keywords: miniature parts, carburizing, carbon steel, RX gas, case depth

1. 前言

傳統表面硬化在工廠製程上是很重要的應用，機械零件於使用之前必須先經過表面處理，例如：滲碳，滲氮和滲碳氮化。齒輪生產製程上，起初必須要設計成型性加工和熱處理操作，而製程的選擇和控制則扮演很重要的角色^[1-2]。材料、成型製程、熱化學的選擇、熱處理之操作、表面清淨和環境都會是最終決定齒輪的極限性能^[3]。以冶金觀點來看，微機電零件的成形性和硬化是很重要的因素。

AISI 1020 低碳鋼有好的成型性，因此常用於製造齒輪。通常齒輪之硬化藉由熱處理或富含碳之表層來達到硬化^[3]。而構成碳鋼之機械性質的因素為表面之硬化和心部之韌性。碳鋼被大量使用在製造齒輪的工廠，其中 AISI 1020 (低碳鋼)則常用在滲碳之應用以達到表面硬化和維持其韌性。

MEMS 的小零件通常小於 1cm³，且厚度通常只有大小只有 0.2mm^[4]，因此精準滲碳技術之製程非常重要。雖然很多研究都有討論到滲碳技術，但是關於氣體滲碳中有效滲碳深度影響機械性質方面的技術還是不夠成熟

Table.1 Chemical compositions of the specimens

Fe	C	Si	Mn	P	Fe	C	Si
Bal.	0.196	0.221	0.374	0.014	Bal.	0.196	0.221
S	Cr	Ni	Mo	Cu	S	Cr	Ni

。C.F.Yang 等人^[5]對於未經處理的 AISI 4118 鋼材進行滲碳後，能夠使衝擊能降低並且提高延脆轉換溫度。Genel and Demirkol^[6]研究 AISI 8620 於鹽浴中進行滲碳，並且討論有效滲碳深度對磨耗之影響。Osman 等人^[7]研究 AISI 8620 進行氣體滲碳，發現當氧化相和非麻田散體變態相於表面增加時，有效滲碳深度會降低。

本研究對於一系列的 AISI 1020 於不同碳勢下，探討如何達成試片的有效滲碳深度能夠精準到 $0.08 \pm 0.01\text{mm}$ ，而表面硬度和心部硬度分別為 700-750HV 和 350-450HV

2. 實驗方法

2.1 試片製備

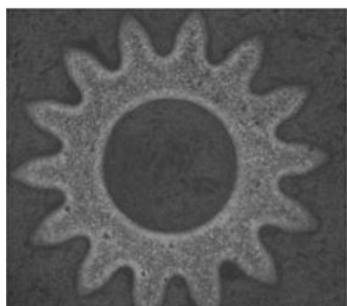


Fig.1 The shape of the miniature gear

本實驗使用的 AISI 1020 試片其成分顯示在 Table 1，直徑約為 8mm、厚度約為 1mm 且齒峰間距 0.2mm。以試片直徑 20mm 厚度 2mm 圓盤來模擬 MEMS 小零件之厚度，經由 1000 號砂紙磨平，最後浸於丙酮進行超音波震以清潔表面。

2.2 實驗規劃

滲碳技術被廣泛利用在表面硬化製程，此製程使試片表面外之富碳擴散進入貧碳的低碳鋼表面中。本實驗的試片都是經由不同滲碳時間和碳勢，短時間的滲碳介

於 2 分鐘到 30 分鐘，長時間的滲碳則到 30 分鐘到三小時；碳勢的控制由 RX 氣體露點溫度表示，範圍介於 0°C 到 8°C 。為了得到不同的滲碳深度，不同試片個別放入不同碳勢條件中，滲碳溫度設定 870°C ，滲碳時間從 2 分鐘到 30 分鐘。爐內氣氛由 RX 變成爐氣體和丙烷(C_3H_8)組成。當滲碳時間到達時，立即從爐內取出並迅速進行淬火，之後再進行 200°C 回火 1 小時。本實驗不同滲碳氣氛之參數顯示於 Table 2。

Table 2 Specimens and their processing steps

Group	RX gas dew point	RX gas flow rate	Enrich gas flow rate	Carburizing time (min)
A	2°C	200 ml/min	80 ml/min	10, 20, 30
B	5°C	200 ml/min	80 ml/min	10, 20, 30
C	8°C	200 ml/min	80 ml/min	10, 20, 30
D	2°C	200 ml/min	80 ml/min	6, 8, 10
E	5°C	200 ml/min	80 ml/min	6, 8, 10

2.3 滲碳層特色

滲碳深度是由 Vickers 硬度機來量測，表面到微硬度 550HV 之深度定義為有效滲碳深度。試片經過研磨拋光後以 5% Nital 溶液進行腐蝕並以 OM 觀察金相。而碳含量在滲碳層的分布以 GDOES 分析。

3. 結果與討論

3.1 微觀組織

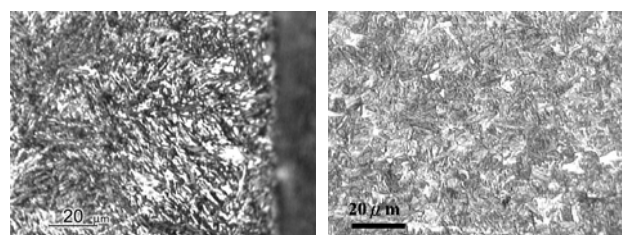
Fig.2 Case (a) and core (b) microstructure of specimen carburized at 870°C for 10 min.

Fig.2 可以觀察到表層為高碳麻田散體與殘留沃斯田體，內層為低碳麻田散體和肥粒體，並且很容易辨別出接近表面之殘留沃斯田體滲碳製程後進行水淬，滲碳層高碳區造成試片表面有高含量的殘留沃斯田鐵以及心部硬度的提升。

一般來說，滲碳層的厚度是由滲碳時間來控制。露點溫度 5°C 時，滲碳時間 10 分鐘的試片其滲碳層為 0.06mm，而殘留沃斯田體量比其他試片還少。滲碳時間 20 分鐘和 30 分鐘之試片其滲碳層分別是 0.12 和 0.18mm，其殘留沃斯田體量比滲碳時間 10 分鐘之試片還多。

為了減少殘留沃斯田體，因此回火溫度提升至 240 °C。高溫回火試片表面含有較少量的殘留沃斯田體。此表示有更多的沃斯田體變態為麻田散體。殘留沃斯田體的含量對磨耗有性質很大的影響，而其含量的多寡是在淬火時即決定。含有過多的殘留沃斯田體會降低鋼材的磨耗強度。雖然殘留沃斯田體影響機械性質的理論還有些爭議，但是較少量的殘留沃斯田體能夠達到較高之硬度，如 Fig.3 所示。因此為了減少殘留沃斯田鐵，需要近提高回火溫度。

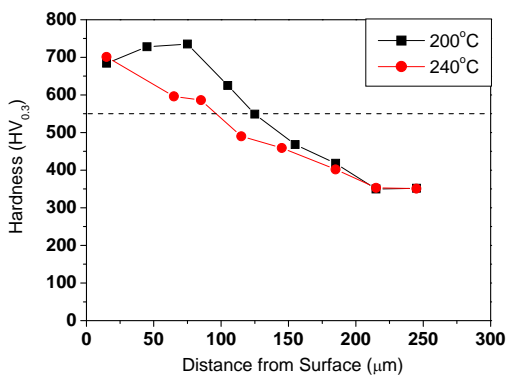


Fig. 3 Microhardness of the group A specimens tempered at 200 and 240°C for 1hour

3.2 微硬度

表面到微硬度為 550HV 之深度定義為有效滲碳深度。Fig.4 為群組 A 之橫截面硬度分布，顯示出微硬度從表面至心部呈現下降之趨勢，此結果和含有之碳勢有關。滲碳時間 10，20，30 分鐘之有效滲碳深度分別為 0.05，0.06，0.09mm，試片之心部硬度範圍為 400 到 450HV。

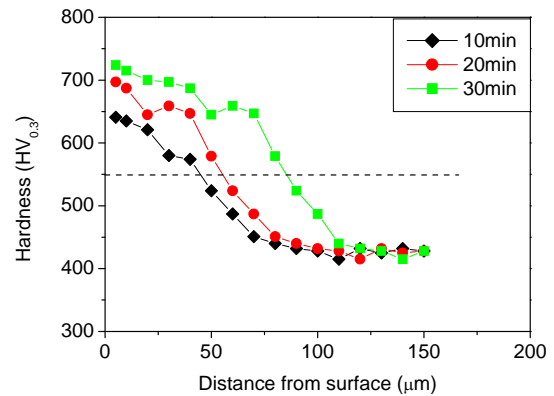


Fig. 4 The hardness profile of group A specimens carburized for 6~10 min

回火製程中，回火溫度對硬化之區域很重要。群組 B 之回火溫度 200 和 240°C 有效滲碳深度於 Fig.3 中顯示分別為 0.125 和 0.105mm。結果顯示回火溫度 200°C 之表面硬度較低是因為含有較多之殘留沃斯田體。顯示高溫回火使殘留沃斯田體減少，減少之部分則變態為麻田散體。雖然殘留沃斯田體因高溫回火而減少，但是表面硬度也跟著下降。

氣氛為 RX gas 露點為 5°C 200ml/min+enrich gas 80ml/min，870°C 滲碳作業處理時間為 6-10 分鐘經水淬後回火 200°C 一小時，其結果顯示於 Fig.5。表面最高硬度為 702 HV_{0.3}，心部硬度為 450 HV_{0.3}，硬化深度為 0.080mm。

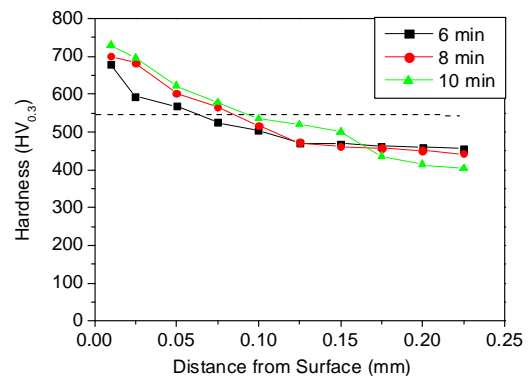


Fig.5 The hardness profile of group E specimens carburized for 6~10 min

3.3 X-ray 繞射

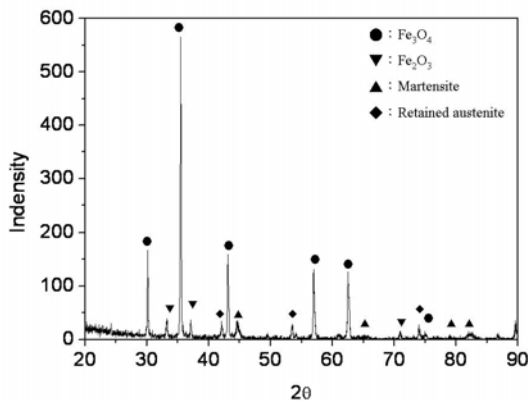


Fig. 6 XRD pattern of the case of carburized AISI 1020

X-ray 繞射用來呈現滲碳試片表層結構之相。Fig. 6 顯示典型 AISI 1020 滲碳件之 XRD，包含 Fe_2O_3 、 Fe_3O_4 、martensite 和殘留沃斯田體之相結構。滲碳製程使群組 C 之試片表面有較少量之殘留沃斯田體。然而，群組 A 和 B 中，滲碳 10 分鐘之有效滲碳深度分別為 0.075 和 0.12mm，並且明顯含有大量之殘留沃斯田體，但是表面硬度卻比群組 C 還高。 Fe_2O_3 和 Fe_3O_4 之繞射峰。氧化可以擴散進入鋼材中，因此形成氧化之深度和寬度受到滲碳時間和滲碳溫度影響。由於氧化可能發生於沃斯田鐵晶界上或晶粒內，因此這些氧化之晶界容易成為裂痕之起源。

3.3 有效滲碳深度 VS 碳勢

本研究比較吸熱氣氛控制和氣體變成爐內的碳勢之間的關係。當露點溫度上升時，變成爐之碳勢下降。群組 C 的爐內碳勢比其他群組低，因此需要更長的滲碳時間得以讓試片表面達到高碳勢。換句話說，試片表面之碳勢與爐內之碳勢以及時間相關。

Table 3 顯示所有試片之有效滲碳深度，表面硬度和表面碳勢。可以發現到最好的製程參數為 RX 氣體露點溫度 5°C 、滲碳時間 10 分鐘和 200°C 一小時的條件。雖然群組 A 之試片表面較高之碳勢，但是有太多的殘留沃斯田鐵。群組 A 之表面硬度比群組 B 還低，是由於群組 A 之殘留沃斯田鐵比群組 B 還多。一般來說，滲碳製程中產生較多的殘留沃斯田鐵是由於含有較高的含碳量 ($>0.8 \text{ wt}\% \text{ C}$)。然而，群組 C 中滲碳時間 10 分鐘顯示沒有殘留沃斯田體之微結構，其表面硬度低於 750HV，因此研判應該需要 30 分鐘的滲碳製程時間，表面硬度才可

達到 700 到 750HV。高碳勢之氣氛造成滲碳鋼材之表面有高含量之殘留沃斯田鐵。而低碳勢之氣氛需要花費更多時間讓試片表面之碳勢上升。

Table 3 Summary data for gas carburized AISI 1020 specimens

Group	Carburizing time (min)	ECD (mm)	Surface hardness ($\text{HV}_{0.3}$)
A	10	0.048	648
A	20	0.063	689
A	30	0.092	729
B	10	0.128	748
B	20	0.168	721
B	30	0.184	648
C	10	0.063	684
C	20	0.078	649
C	30	0.123	795
D	6	0.045	703
D	8	0.062	710
D	10	0.072	765
E	6	0.063	685
E	8	0.082	703
E	10	0.093	745

4. 結論

本研究已得到如何控制對微機械零件之滲碳製程。其中滲碳製程之滲碳時間、爐內碳勢、淬火回火都是很重要之參數。而滲碳鋼之表面硬度、有效滲碳深度、殘留沃斯田體和滲碳件之碳勢都是很重要的特徵。

以下為本實驗之主要結論：

- (1) 結果顯示 Fe_2O_3 、 Fe_3O_4 、麻田散體、and 殘留沃斯田體形成於滲碳鋼材之表面。
- (2) 橫截面之金相和硬度指出，進行滲碳製程時殘留沃斯田體形成於試片之表面。
- (3) 雖然低碳勢之爐內氣氛造成含量低之殘留沃斯田體，但是需要更多的滲碳時間去促使表面硬化。
- (4) 氣氛為 RX gas 露點為 5°C 200ml/min+enrich gas 80ml/min, 870°C 滲碳作業處理時間為 8-10 分鐘經水淬後回火 200°C 一小時，表面最高硬度為 702 $\text{HV}_{0.3}$ ，心部硬度

為 450 HV_{0.3}，硬化深度為 0.080mm，與目標值符合。

(5)僅通入 RX gas 露點為 0°C 200ml/min，870°C 滲碳作業處理時間為 1-3 小時經水淬後回火 200°C 一小時，由硬度分佈可發現表面硬度皆高於預期，表面硬度為 700HV。

參考文獻

- 1 G.P. Cavallaro, T.P. Wills, C.Subramanian, K.N. Strafford, P. French, J.E. Allison. Bedding fatigue and contact fatigue characteristics of carburized gear. Surf. Coat. Technol., 1995, 71(2): 182.
- 2 T.P. Wills, G.P. Cavallaro, C.Subramanian, K.N. Strafford, P. French, J.E. Allison. Conditions prevailing in the carburizing process and their effect on the fatigue properties of carburizing gear. J. Mater. Process. Technol., 1994, 40(1-2): 111-125.
- 3 M. Izciler, M. Tabur. Abrasive wear behavior of different case depth gas carburized AISI 8620 gear steel. Wear, 2006, 260: 90-98.
- 4 S.K. Yang. Introduction of Precision Micromachining Technology. 2002, Taipei: Introduction, 2.
- 5 C.F. Yang, L.H. Chiu, J.K. Wu. Effects of carburization and hydrogenation on the impact toughness of AISI 4118 steel. Surf. Coat. Technol., 1995, 73: 18-22.
- 6 K. Genel, M. Demirkol. Effect of case depth on fatigue performance of AISI 8620 carburized steel. Int. J. Fatigue, 1999, 21: 207-212.
- 7 O. Asi, A.C. Can, J. Pineault, M. Belassel. The relationship between case depth and bending fatigue strength of gas carburized SAE 8620 steel. Surf. Coat. Technol., 2007, 201: 5979-5987.
- 8 G. Krauss. ASM Metals Handbook. 1999, Ohio: Heat Treatment, 363