

不同冷加工量和退火處理對 316L 不銹鋼磨耗行為之影響

Effects of Cold Working and Annealing on Wear Behavior of 316L Stainless Steel

林欣儀* 鐘楷 黃冠豪 許正勳

大同大學材料工程學系

由於 316L 不銹鋼無法藉由一般熱處理改善其硬度，因此本研究先將 316L 不銹鋼基材進行固溶處理 (1050°C/持溫 30min/水淬)，再施以不同的冷加工量搭配不同次數的退火處理 (溫度 850°C/持溫 1min./水淬)，然後利用 XRD、FE-SEM 進行結構分析和組織觀察、微硬度試驗機測量硬度及進行磨耗試驗，以探討不同冷加工與退火製程參數對 316L 不銹鋼顯微結構、硬度及耐磨耗性之影響。

實驗結果顯示：當冷作應變量愈大，微結構之麻田散鐵含量越高，所獲得的硬度亦越高，其耐磨耗性也愈佳。其中又以重複 2 次搭配處理 (75% 冷加工量+850°C-1min 退火) 可獲最低摩擦係數與最小的重量損失。

關鍵詞：316L 不銹鋼、冷加工、退火、耐磨耗

Abstract

316L stainless steel cannot be improved its hardness via any general heat treatment. In this study, 316L stainless steel was used as experimental material for solution treatment at 1050°C for 30 min and then was cold-worked along with annealing at 850°C for 1min. Structure analysis and observation were performed by using X-ray diffractometer and field emission scanning electron microscopy. In addition, Vickers-hardness tests and wear tests were conducted for exploring the effect of cold working and annealing treatments on microstructure and hardness, and wear resistance of 316L stainless steel.

The experimental results showed that the content of martensite in microstructure increased with increasing the cold working amount, resulting in an improvement in both the hardness and wear resistance. In particular, the material treated by repeating two times (cold rolling to 75% thickness reduction followed by annealing at 850°C for 1min) could obtain the smallest friction coefficient and minimum weight loss.

Keyword : 316L stainless steel, Cold working, Annealing, Wear resistance

1. 前言

SUS316L 不銹鋼為 300 系列鉻-鎳-鎢-氮鐵不銹鋼中最常使用的鋼種之一，因為添加 2~3% 鉬元素且含碳量比 SUS 316 低 (其化學成分如 Table 1 所示 [1])，所以高溫潛變強度高且抗晶界腐蝕性較佳，唯其強度不高，因此只能使用於不需高硬度或高張力之構造物上，且由於 316L 耐蝕性和高溫強度優良廣泛應用於生醫、化學、建築 [2-5]；但 316L 不銹鋼的機械性質較差，限制了 316L 不銹鋼的應用。因此有些研究藉由冷加工使金屬發生塑性變形，使晶粒細化並產生應變誘發麻田散鐵 [6,7]，使材料的硬度提升，再透過退火處理，消除冷加工之應力，使材料韌性提升。由於有文獻指出 [1]，

在室溫下進行冷軋，若加工量低產生的應變量不足，316L 不銹鋼可能不易生成麻田散鐵相，因此本研究設計較高冷加工量 (75%)，再配合不同次數的退火處理，以了解不同冷加工與退火製程參數對 316L 不銹鋼顯微結構、硬度及耐磨耗性之影響。

2. 實驗步驟與方法

本實驗使用 AISI 316L 不銹鋼為基材，試片尺寸取樣為 103x63x30mm，進行反覆式熱機處理，即先在 1050°C 空氣爐中進行固溶處理，持溫 30 分鐘，之後迅速取出水淬。

實驗主要分為最後一次進行冷加工和最後一次進行退火

處理兩部分。實驗流程如 Fig.1。第一次 75% 冷軋，厚度由 30mm 降至 7.5mm、經過兩次冷加工的，冷軋分別為 75%、60%，厚度降至 3mm、75%、75%，厚度降至 1.875mm。製備完之試片皆由砂紙號數#80 研磨至#1200 再進行拋光，而磨耗試驗之試片先經過鑲埋再進行研磨拋光。

利用 Vickers 微硬度試驗機對試片進行表面硬度測量，荷重為 100g，各數據皆採用 5 次量測的平均值，並使用 X 光繞射儀(XRD, 型號 D2-phaser)進行結構分析，以及使用 CSM Tribometer (Ball-on-disk) 進行磨耗試驗，使用直徑 6mm 鎢鋼球作為對磨材，荷重為 1N，磨耗軌跡 300m，半徑設為 7mm，轉速為 10cm/s，溫度(25°C)及相對濕度(55%)皆控制在一定範圍內，最後利用 FE-SEM 觀察其磨耗軌跡，並量測重量損失。

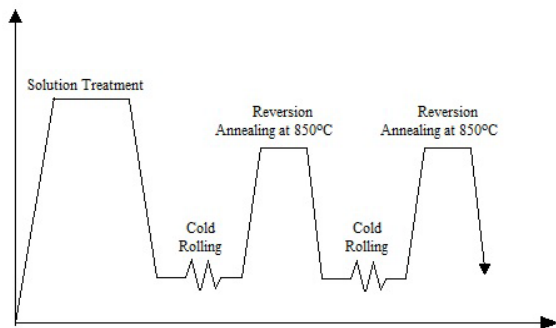


Fig.1 Schematic illustration of the repetitive thermo-mechanical process

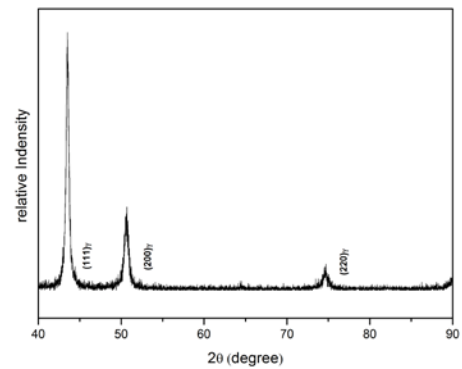
Table.1 The composition of 316L stainless steel (wt%)

Element	C	Cr	Mn	Mo	P	Si	S
wt%	0.023	16.53	1.72	2.68	0.048	0.62	0.015

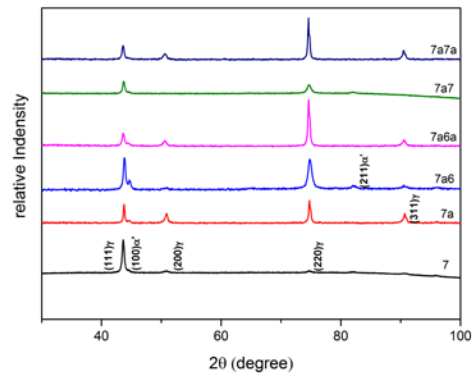
3. 結果與討論

3.1 XRD 結構分析

Fig.2 為 316L 不銹鋼經過反覆式熱機處理後的 X-ray 繞射圖形，透過圖可以看出經過固溶處理的基材僅有 γ 沃斯田體相的存在，繞射峰值出現於(111)、(200)、(220)平面，經過一次冷軋至 75% 微結構轉變為 α' 麻田散鐵相，因此除了有(111) γ 、(200) γ 、(220) γ 繞射峰值外，出現了(100) α' 、(211) α' 相，經過第一次退火 α' 麻田散鐵相轉為 γ 沃斯田鐵相，因此沃斯田鐵相的相對強度較麻田散鐵相強，經過第二次軋軋至 60%， α' 麻田散鐵相的繞射峰值強度增強，退火過後峰值減弱。



(a)



(b)

Fig.2 XRD pattern of the specimens (a) Substrate (b) after thermo-mechanical treatment

3.2 維氏硬度分析

Table.3 為試片之硬度值，透過 Table 可發現最後一次進行退火處理的試片硬度值皆低於最後一次進行軋軋的試片，且硬度值皆高於基材，最後一次進行軋軋處理之試片，硬度值隨著冷加工量上升而增加，第一次冷加工至 75%，平均表面硬度為 364.8Hv；第二次冷加工至 60%，平均表面硬度為 401.2Hv；而第二次冷加工至 75%，平均表面硬度更可達到 427.1Hv。而最後一次進行退火處理之試片相同的隨著冷加工量上升而增加，最高的硬度值可達 308.9Hv。

由上述結果可知原本表面平均硬度值只有 230Hv 的基材透過熱機處理表面硬度能明顯提升，得到不錯的硬化效果，最高硬度值為 427.1Hv。

Table.3 The hardness of the specimens (Hv)

	sub	7	7a	7a6	7a6a	7a7	7a7a
硬度值	230	364.8	288.1	401.2	298.7	427.1	308.9

3.3 磨耗試驗分析[8]

磨耗試驗可用來評估試片的磨耗特性，為了瞭解 AISI316L 不銹鋼經過熱機處理後的耐磨耗性，利用 CSM Tribometer

(Ball-on-disk)進行磨耗試驗得其磨耗曲線，觀察其摩擦係數值，結果如 Fig.3，由圖可得知摩擦係數與硬度之趨勢相近，硬度值越高的磨擦係數越低，即最後一次進行軋軋處理的試片比基材和最後一次進行退火處理的試片耐磨耗性質更好，基材之摩擦係數為最高，約為 0.77，經過反覆式熱機處理之試片中經過兩次冷加工至 75% 搭配一次退火處理之試片表現出之耐磨耗性質最佳。

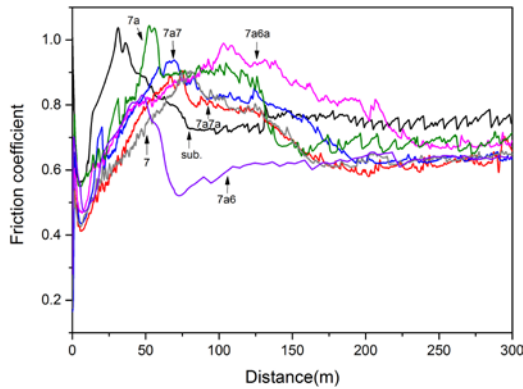


Fig.3 Comparison of friction coefficient among all the specimens after thermo-mechanical treatment.

Table.4 為試片的重量損失率，透過表可發現冷加工量和重量損失率呈反比，即隨著冷加工量增加重量損失率越小，且結果顯示最後一次進行冷加工的重量損失率低於最後一次進行退火試片，其中，經過兩次冷加工至 75% 搭配退火處理的重量損失率為最低，僅 $1.667 \times 10^{-6} \text{g/m}$ ，而僅經過固溶處理的基材重量損失率高達 $6.667 \times 10^{-6} \text{g/m}$ 。

綜合硬度值、磨耗曲線及重量損失率之結果，冷加工量越大其硬度值越高、摩擦係數值越低、重量損失率越小，因此可得知冷加工量越大，耐磨耗性質越佳。

Table.4 Weight loss of AISI 316L specimens after wear test under the different conditions

	Sub.	7	7a	7a6	7a6a	7a7	7a7a
重量損失率 (10^{-6}g/m)	6.667	3	3.667	1.667	4.333	1.667	4.333

Fig.4 為各個試片進行磨耗試驗後的表面形貌圖，Fig.4(a) 為基材的表面形貌，可看出無明顯的刮痕，而是發現有黏著磨耗的產生，磨屑大片剝落，Fig.4(b)至(g)為經過熱機處理的表面形貌，其中可發現，最後一次進行退火處理的試片發生黏著磨耗現象較最後一次進行軋軋之試片嚴重，可從圖上發現有許多類似鱗片的凹痕和孔洞，且隨著冷加工量上升黏著磨耗現象越來越不明顯，這可能是由於隨著應變量增加其硬度值上升，材料經黏焊被撕開之情形較不嚴重所致。透過最後一次進行軋軋處理的試片 Fig.(b)、(d)、(f)可明顯比較出冷加工會影響黏著磨耗的情形，經過一次 75% 冷加工的試

片 Fig.(b)，有大片磨屑剝落，經鎢鋼球對磨所產生的刮痕不明顯，Fig.(d)為進行第二次冷加工至 60%，可明顯看出仍有類似鱗片的凹痕但同時也能看出有刮痕的產生，而第二次冷加工至 75%，即 Fig.(f)，可看出明顯的刮痕，並無黏著磨耗的情況發生。另一方面，最後一次進行退火之試片 Fig.(c)、(e)、(g)也能看出隨著冷加工量增加，黏著磨耗之現象越趨不明顯。

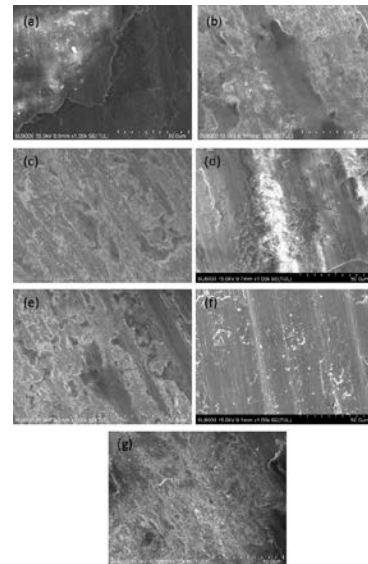


Fig.4 Surface morphologies of the substrate and different conditions after ball-on-disc wear test: (a) substrate, (b) after first cold rolling, (c) after first annealing, (d) after second cold rolling to 60%, (e) after second annealing, (f) after second cold rolling to 75%, and (g) after second annealing

4. 結論

1. 本研究成功使用反覆式熱機處理得到更佳之硬度與耐磨耗性質，隨著冷加工量增加，應變誘發麻田散鐵的量越多，所得硬度越高、耐磨耗性質越佳，且最後一次進行軋軋處理的試片性質優於最後一次進行退火處理的。
2. 表面平均硬度值方面，相較於基材硬度值僅 230Hv，以重複 2 次搭配處理(75%冷加工量+850°C-1min 退火)可將硬度值提升至高達 427.1Hv。
3. 磨耗試驗方面，可將摩擦係數原為 0.77 的基材降至約 0.63，重量損失率也從 $6.667 \times 10^{-6} \text{g/m}$ 降至 $1.667 \times 10^{-6} \text{g/m}$ 。總結上述結果，以重複兩次熱機處理(75%冷加工+850°C-1min 退火)所獲得的性質為最佳。

[參考文獻]

1. Paulo Maria de O. Silva, Hamilton Ferreira G. de Abreu, Victor Hugo C. de Albuquerque, Pedro de Lima Neto, João Manuel R.S. Tavares "Cold deformation effect on the microstructures and mechanical properties of AISI 301LN and 316L stainless steels", Materials and Design 32 (2011) pp.605-614.
2. Afroz Latifi, Mohammad Imani, Mohammad Taghi Khorasani, Morteza Daliri Joupari "Electrochemical and

chemical methods for improving surface characteristics of 316L stainless steel for biomedical applications”, *Surface & Coatings Technology* 221 (2013) 1–12

3. O. Lavigne , C. Alemany-Dumont , B. Normand, P. Delichère , A. Descamps “Cerium insertion in 316L passive film: Effect on conductivity and corrosion resistance performances of metallic bipolar plates for PEM fuel cell application” *Surface & Coatings Technology* 205 (2010) 1870–1877
4. J. Pellier, J. Geringer, B. Forest “Fretting-corrosion between 316L SS and PMMA: Influence of ionic strength, protein and electrochemical conditions on material wear. Application to orthopaedic implants”, *Wear* 271 (2011) 1563–1571
5. N.R. Baddoo” Stainless steel in construction: A review of research, applications, challenges and opportunities”, *Journal of Constructional Steel Research* 64 (2008) 1199–1206
6. M. Moallemi, A. Kermanpur, A. Najafizadeh, A. Rezaee, H Samaei baghbadorani “ Formation of nano/ultrafine grain structure in a 201 stainless steel through the repetitive martensite thermomechanical treatment” , *Materials Letters* 89 (2012) pp.22–24
7. M. Eskandari, A. Najafizadeh, A. Kermanpur “Effect of strain-induced martensite on the formation of nocrystalline 316L stainless steel after cold rolling and annealing” , *Materials Science and Engineering A* 519 (2009) 46–50
8. 曾春風、郭央、施永村，花生收穫機落果器零組件用料 JIS-SCM440 鉻銅鋼之熱處理，*金屬熱處理* 第 117 期，2013，第 13–15 頁。