

冷作加工對 316L 沃斯田體不銹鋼磨耗及磁特性之影響

Effect of cold work on wear and magnetic properties of 316L austenitic stainless steel

彭俊豪¹ 許正勳¹ 唐自標²

C.H. Feng, C.H. Hsu, T.P. Tang

¹大同大學材料工程學系

²台北科技大學材料與資源學系

摘要

本研究針對 316L 沃斯田體不銹鋼進行冷作加工處理，擬藉由施予不同輥軋量(0%、25%、50%、75%、90%)的應變效應去誘發麻田散體變態，然後進一步探討不同應變量對 316L 沃斯田體不銹鋼磨耗行為及磁特性之影響。

實驗結果顯示：316L 不銹鋼因冷作加工會造成等軸晶粒逐漸變成長軸狀晶；隨著輥軋應變量的增加，不但麻田散體含量明顯地增加，而且 316L 不銹鋼表面硬度也大幅提高(202→453 HV_{100g})及略降其摩擦係數(0.95→0.82)；再經由 VSM 分析其磁性發現隨著輥軋量越大，其磁通量(Gs)也越大，推測主因也是受麻田散體含量的影響。

關鍵詞： 沃斯田體不銹鋼、冷作加工、麻田散體、磨耗、磁特性

Abstract

This study adopted 316L austenitic stainless steel as experimental material to cold work with different rolling amounts (0%, 25%, 50%, 75%, and 90%) in order to induce the martensitic transformation. The purpose in this study was to explore the effect of rolling strain on wear and magnetic properties of 316L austenitic stainless steel.

The experimental results showed that 316L stainless steel was cold rolled so that most the equi-axed grains in microstructure gradually became the long-axed ones. With increasing rolling amount, not only the martensite phase generated in the surface, but also there was an evident increase in surface hardness ((202→453 HV_{100g}) as well as a slight decrease in friction coefficient (0.95→0.82). After the measurement of magnetic property, it was also found that the magnetic flux had the higher value when the rolling amount was increased. Such a result should be dependent upon the content of martensite phase.

Keywords: Austenitic stainless steel, Cold work, Martensite, Wear, Magnetic flux

1. 前言

眾所皆知，300 系列沃斯田體不銹鋼(如 304)擁有良好的耐蝕性、耐熱性、不具磁性及適當機械性質等優點，在不銹鋼種類中最被廣泛應用，惟其在海水或鹽水等含有氯離子溶液中卻容易發生孔蝕的現象。另一方面，在進行銲接或熱加工時，因為在特定溫度範圍內(400~850 °C)⁽¹⁾，不銹鋼中的鉻與碳會在晶界處形成碳化鉻，使得晶界附近鉻含量降低，造成銲縫腐蝕(銲接處發生粒間腐蝕)，故在 300 系列沃斯田體不銹鋼中進一步被發展出 AISI 316L 不銹鋼⁽¹⁾，因其除了含有鉻(16wt%)、鎳(10wt%)之外，另添加約 2.0wt.% 鉬及降低碳含量(0.03wt%)，故更能具備良好之耐蝕性、耐熱性、高溫潛變強度高和良好的銲接性能，而且在人體內不會產生排斥，因此近年來在工業上已應用非常廣泛，諸如個人飾品、家庭用具、汽車配件、生醫材料、建材、船舶部件，乃至國際核融合反應爐(ITER)腔體材料等⁽²⁻⁶⁾；然而，最近國內因許多餐(鍋)具使用 200、300 或 400 系列不銹鋼作為材料，卻引起可能溶出錳的食安虞慮，以及 300 系列是否具有磁性問題，眾說紛紜，儼然已成為消費者關心的議題。

在學理上，300 系列由於是屬於沃斯田體組織，故不具磁性，然而其產品製作過程中因會受到沖壓成形製程等外力作用，而誘發麻田散體變態(Stress induced martensite)⁽⁷⁾，導致可能會產生微磁性效應，然而，過去對於 300 系列沃斯田體不銹鋼的文獻研究中，一般僅針對其強度、硬度及耐蝕性探討⁽⁸⁻¹⁰⁾，對於磁性方面的資訊尚為闕如，因此本研究乃針對 AISI 316L 沃斯田體不銹鋼施以不同程度的冷作加工處理，然後去探討軋軋量對其磁特性之影響，並且一併瞭解其磨耗行為。

2. 實驗方法與步驟

2.1 基材準備

本實驗乃採用商用 AISI 316L 沃斯田體不銹鋼為實驗材料，其化學成分列於 Table 1。先將 316L 板材切割成實驗所需之試塊，尺寸為 30×30×60 mm³，然後先經固溶均質化處理，其步驟為使用空氣爐加熱至 1100 °C 並持溫 1 hr，再水淬至室溫以確保材料為沃斯田鐵基地。

Table 1 Chemical compositions of AISI 316L alloyed steel. (wt%)

C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	N	Fe
0.03	0.41	1.6	0.03	0.01	10.00	16.40	2.02	0.08	Bal.

2.2 軋軋處理

將均質化之試塊施以冷軋軋處理，其步驟是將厚度 30mm 之試塊以軋軋速度 20mm/s 進行冷作，每一道軋軋試片厚度縮減量約 0.5mm，由於軋軋會產生熱量所以緊接著於水中冷卻，再進行下一道軋軋，如此重複軋軋步驟，直到達到所設

定之加工量(0%變形量=>30mm、25%變形量=>22.5mm、50%變形量=>15mm、75%變形量=>7.5mm及90%變形量=>3mm，共5種條件)。

2.3 組織相含量計算

使用 X 光繞射儀(型號：X'Pert Pro MPD, USA)以正常入射角度，對試片進行組織判定，X 光源是銅靶(Cu-K α)，掃描速率為 0.5°/min，入掃描角度(2 θ)為 20°~120°，並分別套用公式計算其殘留沃斯田體和麻田散體含量⁽¹¹⁾。公式如下：

$$(1). \text{沃斯田體含量 (Vol.\%)} = \frac{1}{1 + 2.057 \frac{I_M^{211}}{I_r^{200} + I_r^{220}}} \times 100\%$$

$$(2). \text{麻田散體含量(Vol.\%)} = \left[1 - \frac{1}{1 + 2.057 \frac{I_M^{211}}{I_r^{200} + I_r^{220}}} \right] \times 100\%$$

2.4 硬度試驗

使用微小硬度試驗機(型號：Vickers Tester, MVK-H100, Japan)測試不同輓壓量各試片之表面硬度，且分別量測 5 點，再求其平均值。

2.5 磨耗試驗

試驗設備是使用Ball-on-disk 試驗機(CSM Tribometer)，且採用對磨材為鎢鋼球；磨耗條件：施以10N荷重、磨耗距離為1000m、溫度為25°C、相對濕度為60及10 cm/s速率，以半徑5 mm作圓周運動進行磨耗試驗，可獲得摩擦係數與距離之關係圖，並且以SEM 觀察試片磨耗表面之型態。

2.6 磁性試驗

磁性試驗之設備是使用振動樣品磁力計(Vibrating Sample Magnetometer, VSM)，試片大小為 6.0 mm × 6.0 mm × 0.3mm，將試片黏貼於 VSM 振動棒之末端使試片位於兩個電磁鐵中央振盪，以線圈所感應的磁通量變化來反推測試樣品的磁特性，再控制電磁鐵之磁場，可進一步獲得磁滯曲線。

3. 結果與討論

3.1 顯微組織

本研究採用AISI 316L沃斯田體不銹鋼為實驗材料，經不同程度輓軋之顯微組織的變化情形如Fig.1所示，從圖中可看到原材經固溶退火處理呈現出等軸晶粒並含有雙晶結構(Fig.1(a))，隨著冷作輓軋量的增加(25%→90%)，晶粒逐漸被拉長變形成為長軸狀晶粒(Figs.(b)~(e))。

另一方面，各輓軋量試片利用 XRD 分析所獲得圖形如 Fig.2 所示，從圖中比較可發現隨著輓軋量的增加，除了原有的沃斯田體基質，也出現了麻田散體相，因此可確認 316L 沃斯田體不銹鋼經適當的冷作加工處理會誘發麻田散體變態，此結果與相關文獻相符合⁽⁸⁾；為了量化結構組成相的含量，再進一步利用 Origin 分析計算 XRD 各相的積分強度，再帶入公式去計算其含量⁽¹¹⁾，其計算後所獲得

沃斯田體及麻田散體含量則分別列於 Table 2。

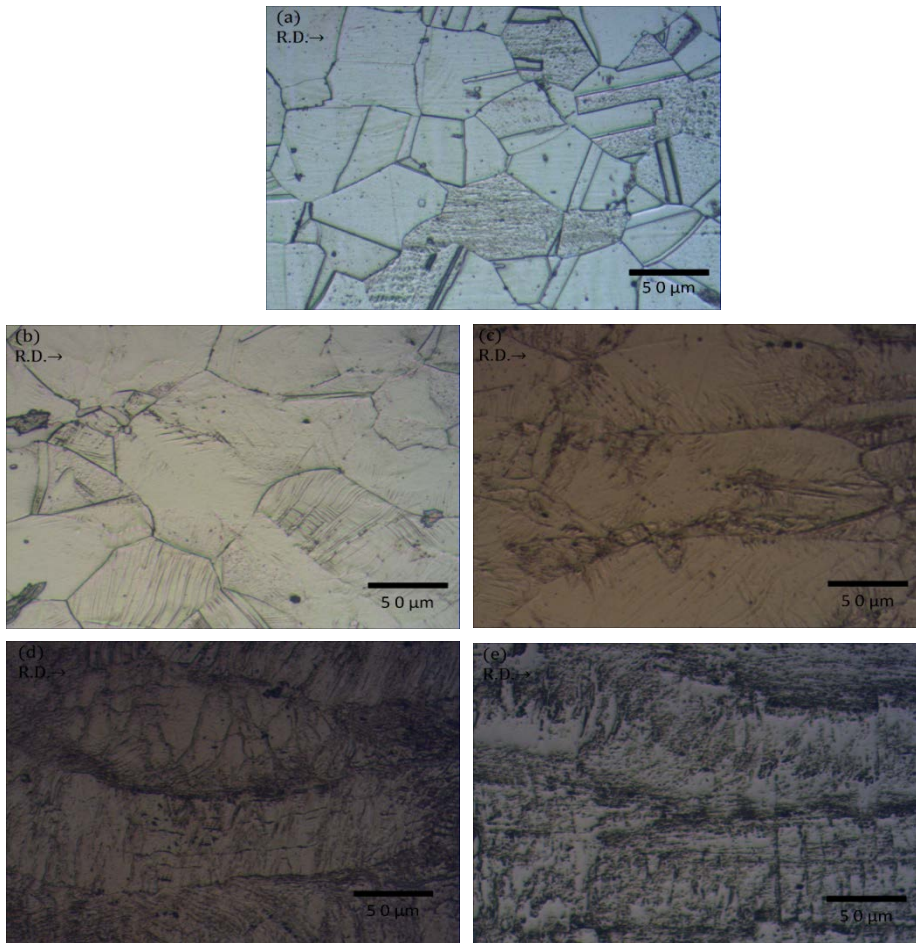


Fig.1 Microstructure of 316L stainless steel after the different cold rolling: (a) 0%, (b) 25%, (c) 50%, (d) 75%, and (e) 90%

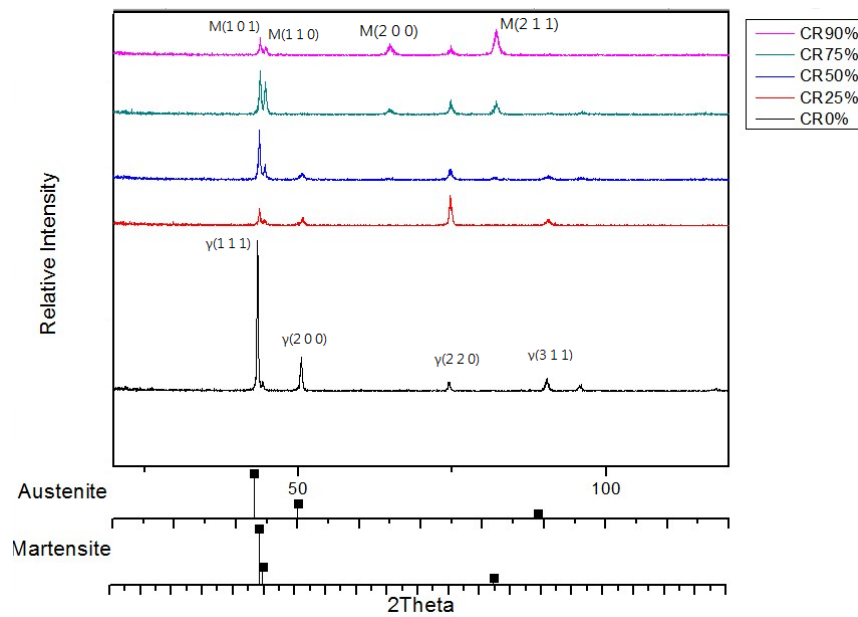


Fig.2 XRD pattern of all the specimens in the study.

Table 2 Amounts of austenite and martensite phases after different cold rolling.

Cold rolling (CR%)	0	25	50	75	90
Austenite (Vol.%)	100	98	70	44	9
Martensite (Vol.%)	0	2	30	56	91

由 Table 2 之量化數據比較可得知，316L 不銹鋼在經過軋軋後，其沃斯田體基質會逐漸應變誘發變態成麻田散體，此結果對其表面硬度、耐磨耗性及磁特性之影響，則分別敘述如下。

3.2 表面硬度分析

如 Table 2 所列數據之比較可知：隨著滾軋量的增加，所產生之麻田散體含量亦隨之增加。藉由應變誘發麻田散體是否可達到硬化試片之效用，可從 Fig.3 之表面硬度值比較獲得證實，從 Fig.3 清楚地看到隨著滾軋量的增加，表面硬度明顯地增加，當滾軋量為 90%，其硬度值可從原 202HV_{100g} 提高至 453HV_{100g}，主要原因應為如前所述，即為沃斯田體基質因應變而誘發大部分變態成麻田散體 (91%)。

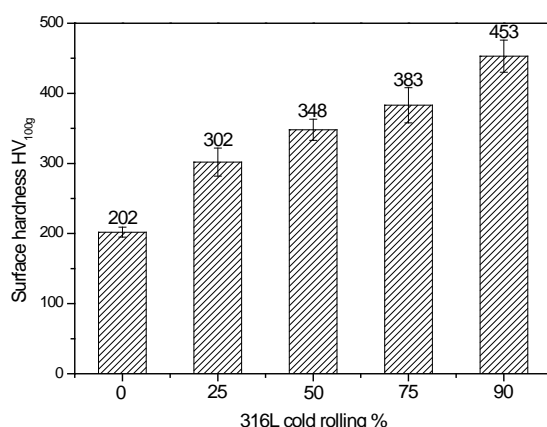


Fig.3 Effect of cold rolling on surface hardness of 316L stainless steel.

3.3 磨耗行為分析

本研究使用Ball-on-disk磨耗試驗所獲得之摩擦係數與磨耗距離關係來評估試片磨耗行為，其結果如Fig.4所示。從圖中可以看到316L 不銹鋼未冷作加工前之摩擦係數約為0.95，但經不同冷作加工量處理後，其摩擦係數隨著麻田散鐵含量增加而降低，滾軋75%和90%的摩擦係數相差不多，皆約0.82。此外，進一步利用SEM 觀察經過200m 磨耗後之試片表面形貌，其結果亦顯示於Fig.5，從圖中我們觀察到未軋軋試片之磨耗外觀呈現出磨損及龜裂形貌(如Fig.5(a))；另經軋軋試片則雖有部分區域磨損、剝落，但沒有龜裂情形(如Fig.5(b)-(e))。隨著滾軋量增加，剝落所顯露出白色區域會變多，因此利用硬度壓痕試驗來檢測結構相的差異性(如Fig.6所示)，我們可以看到黑色區域之壓痕深度明顯比白色區域大，因

此推測越來越多之白色區域應為麻田散體相。

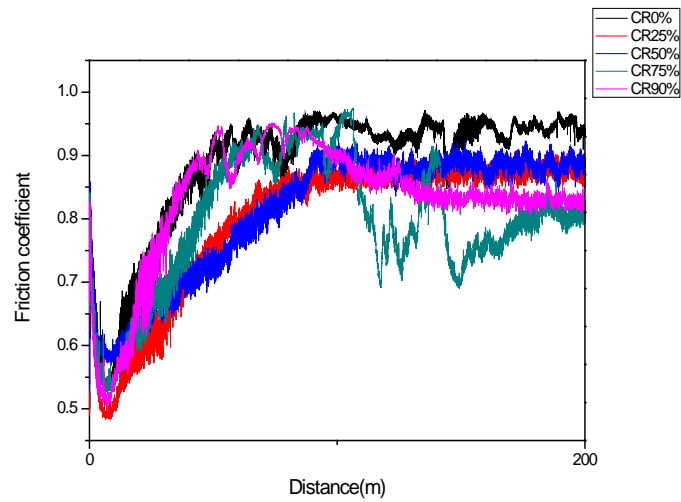


Fig.4 Comparison of friction coefficient among all specimens.

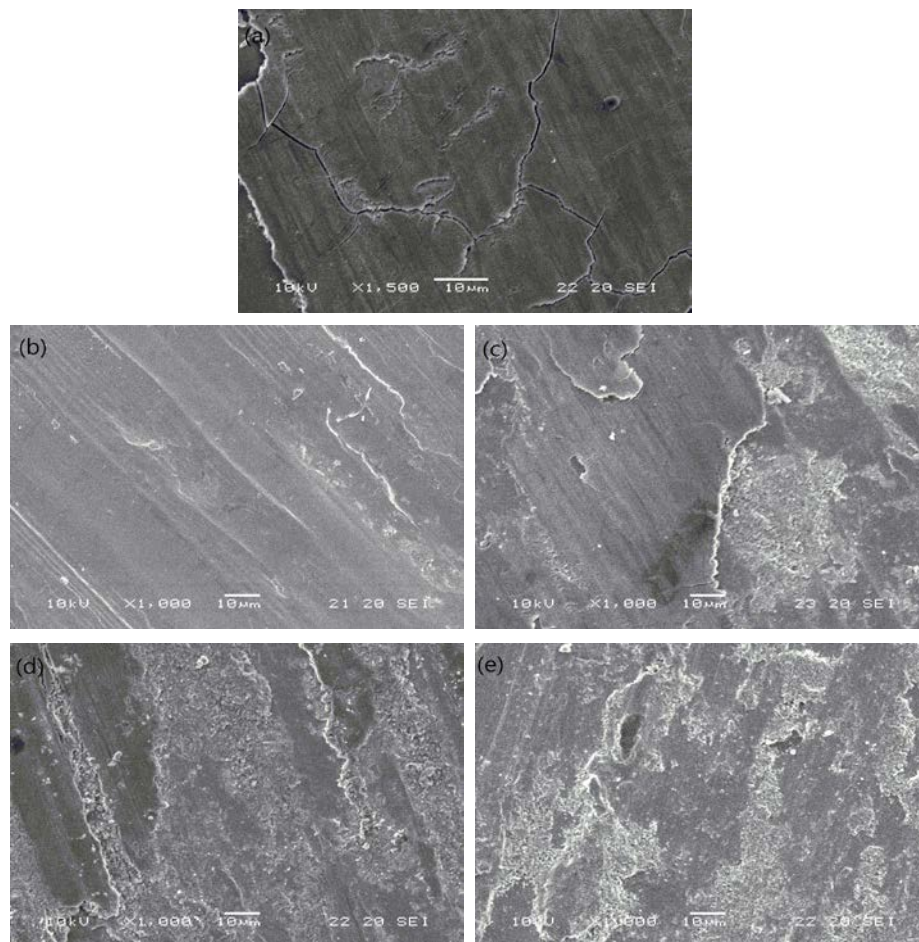


Fig.5 SEM surface morphologies of the specimens after ball-on-disk wear test.
(a)CR0%, (b)CR25%, (c)CR50%, (d)CR75%, and (e)CR90%.

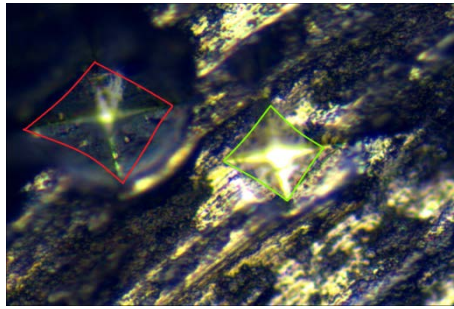


Fig.6 Hardness indentation of 316L specimen cold rolled CR90%.

3.4 磁性試驗

Fig.7 為各試片經 VSM 磁性試驗所獲得之磁滯曲線圖，由圖中曲線比較可知：316L 原材在外加磁力強度 14000(OE)時，材料內部產生之磁通量約為 80-100(GS)，隨著軋軋量變大，磁通量亦隨之增大，當軋軋量 90%時，在外加磁力強度 14000(OE)時，材料內部產生之磁通量可達約 10500(GS)，且可由圖中得知其為超順磁之軟磁性材料，由此可判別 316L 滾軋時會產生具有軟磁性之麻田散體。另進一步將其軟磁性對軋軋量及麻田散體量作圖(如 Fig.8 所示)，結果可發現磁通量與麻田散體含量幾乎成正比例之關係。

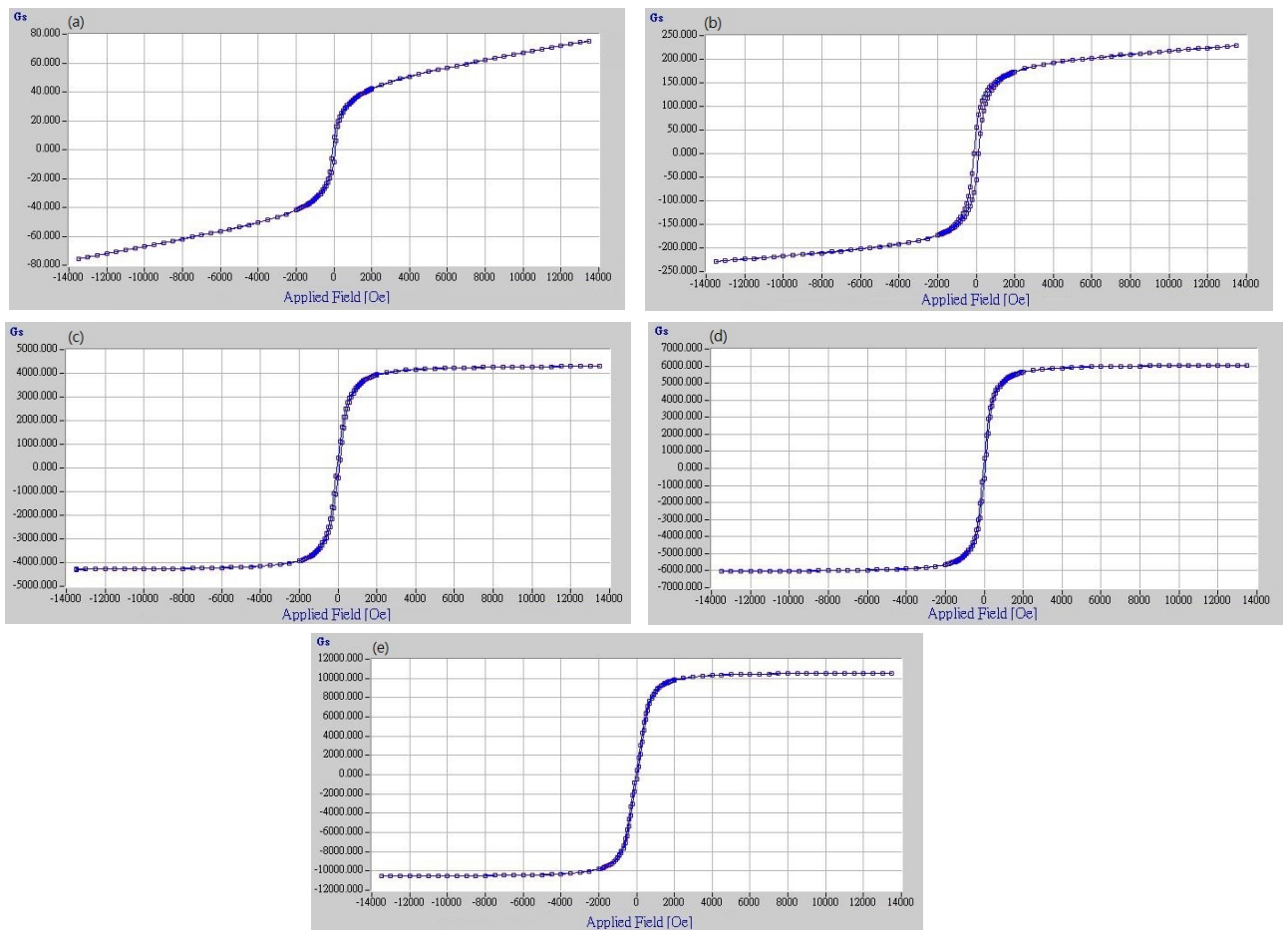


Fig.7 Hysteresis loops of the cold rolled 316L stainless steel: (a)0%, (b)25%, (c)50%, (d)75%, and (e)90%

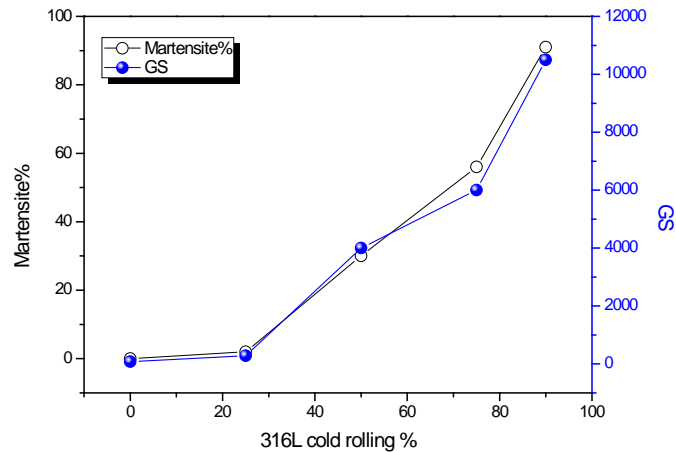


Fig. 8 The relationship among cold rolling, martensite content, and magnetic flux.

4. 結論

1. 316L 沃斯田體不銹鋼固溶退火材主要是含有雙晶化的等軸晶粒，隨著不同冷軋變形量的增加，晶粒型態會逐漸轉變為長軸晶。
2. 隨著不同冷軋變形量的增加，316L 不銹鋼之沃斯田體基質會誘發變態產生麻田散體相，當軋軋變形量為 90% 時，其麻田散體變態含量可達 91Vol.%。
3. 隨著不同冷軋變形量的增加，由於麻田散體含量亦增加，使得 316L 不銹鋼之表面硬度大幅提高，當滾軋量為 90%，其硬度值可從原 202HV_{100g} 提高至 453HV_{100g}，並同時可略降低其摩擦係數(0.95→0.82)。
4. 316L 不銹鋼經由 VSM 分析其磁性發現隨著軋軋量越大，其磁通量(Gs)也越大，推測主因也是受麻田散體含量的影響，且磁通量與麻田散體含量幾乎成正比例之關係。

參考文獻

1. W.F. Smith: Structure and Properties of Engineering Alloys, McGraw-Hill Inc., New York, 1993, pp.313-315.
2. R. Tian, J. Sun, "Corrosion resistance and interfacial contact resistance of TiN coated 316L bipolar plates for proton exchange membrane fuel cell," Hydrogen Energy 36, 2011, pp.6788-6794.
3. A. Latifi , M. 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, Vol.221, 2013, pp.1-12.
4. U. Helmersson, M. Lattemann, J. Bohlmark, A.P. Ehasarian, J.T. Gudmundsson, "Ionized physical vapor deposition (IPVD): A review of technology and applications," Thin Solid Films, Vol.513, 2006, pp.1-24.
5. N.R. Baddoo, "Stainless steel in construction: A review of research, applications,

- challenges and opportunities,” *Journal of Constructional Steel Research*, Vol.64, 2008, pp.1199-1206.
6. K. Ueno, J. Nagakawa, Y. Murase, N. Yamamoto, “Effect of cold work on the irradiation creep of SUS 316L,” *Journal of Nuclear Materials*, Vol.329-333, 2004, pp.602-606.
 7. R.E. Reed-Hill: *Physical Metallurgy Principles*, PWS Publication Company, Boston, 1994, p.583.
 8. M. Eskandari, A. Najafizadeh, A. Kermanpur, “Effect of strain-induced martensite on the formation of nanocrystalline 316L stainless steel after cold rolling and annealing’, *Materials Science and Engineering A*, Vol.519, 2009, pp.46-50.
 9. M.D. Mathew, K. Laha, V. Ganesan, “Improving creep strength of 316L stainless steel by alloying with nitrogen”, *Materials Science and Engineering A*, Vol.535, 2012, pp.76-83.
 10. T. Nakanishi, T. Tsuchiyama, H. Mitsuyasu, Y. Iwamoto, S. Takaki, “Effect of partial solution nitriding on mechanical properties and corrosion resistance in a type 316L austenitic stainless steel plate”, *Materials Science and Engineering A*, Vol.460-461, 2007, pp.186-194.
 11. C. Gheorgies: *Controlul structurii fine a metalelor Cu radiatii X/ Metals fine structure control with X-ray diffraction*, Ed Tehnica, 1990, pp. 242-271.