

鋼線斷線原因探討及分析(中)



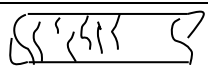

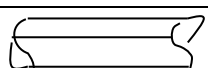
張正熙

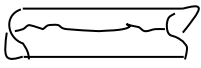
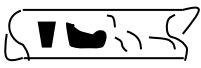

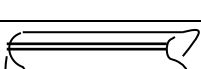
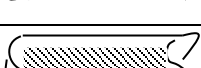

伍、盤元線材品質上的異常

首先讓我們來談談會造成鋼線斷線，有關的盤元線材品質上的異常。這些常見的盤元線材的品質異常，包括盤元線材內部夾雜物、中心網狀碳化物以及中心縮孔……等金相組織上的缺陷，另一種則是盤元線材表面上的缺陷。盤元線材在尚未進行伸線加工前進行的機械性質試驗，或是在伸線加工過程中，其可能發生的斷線現象，除了盤元線材品質正常的塑性斷口，其斷口有頸縮的現象外，另外在盤元線材發生品質異常時，其斷口依據巨觀形態，可以區分為脆性斷口和杯形斷口。

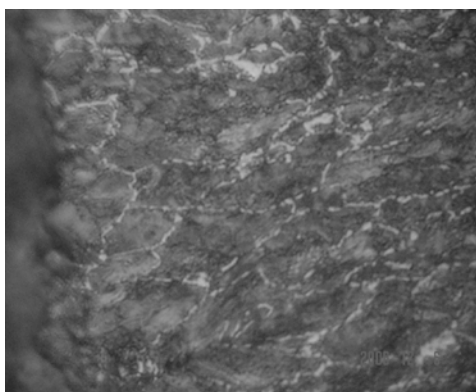
盤元線材品質異常所造成伸線過程中斷線，其脆性斷口主要源於裂紋、折疊、耳痕和結疤等盤元線材的表面缺陷，以及鈣、鋁酸鹽等非金屬夾雜物，如聚集分佈的夾渣構成盤元線材中的薄弱區域，盤元線材在機械除鱗時因承受交變應力作用，所以易在薄弱區域產生裂紋，裂紋不斷擴展並最終導致盤元線材的斷裂。通常盤元線材表面的缺陷，有縮孔、結疤、橫裂、鱗、刮痕、折疊、氧化皮、蛀痕、耳痕、擦痕、鏽……等，如圖十四。

圖十四 盤元線材表面傷痕種類

異常名稱	型 態 及 特 色	外 觀
1. 縮孔	鋼材內部有縮孔殘留，及因而鋼材生的傷痕。	
2. 結疤	表面剝缺的葉狀、喇叭狀傷痕。	
3. 橫裂	與軋軋方向成直角或斜交的橫裂狀痕。	
4. 鱗	表面較細的裂紋狀或鱗狀。	
5. 刮痕	在軋軋方向刮擦、削成的凹凸狀傷痕。	

6. 折疊	沿軋軋方向折疊的傷痕。	
7. 氧化皮	氧化皮壓著成咬入表面。	
8. 蛙痕	切屑等異物壓著形成的傷痕，一部份脫落成凹狀。	
9. 耳痕	在軋軋方向連續溢出者。	
10. 擦痕	表面局部擦成的凹痕，常有金屬光輝。	
11. 鏽	紅鏽	

一般常見的盤元線材表面傷痕除了如圖十四的種類外，盤元線材表面有時也會夾雜有碳化物的保溫材，通常是在軋延盤元線材時捲入，這樣會造成盤元線材表面有網狀的雪明碳鐵存在。如果我們對斷線樣本進行金相組織分析，就會在試片的縱切面組織的表面層發現裂紋及網狀的雪明碳鐵(如圖十五)存在，網狀的雪明碳鐵硬及脆，會造成我們在伸線時，鋼線表面產生裂紋，甚到斷線，或是鋼線產品送交客戶捲製彈簧時表面發生裂紋(如圖十六)，甚至斷線。



圖十五 鋼線表面裂紋及網狀的雪明碳鐵



圖十六 捲製彈簧時表面發生裂紋

有時候盤元線材在尚未伸線前就發生脆性斷裂，盤元線材用手一折就產生斷裂(如圖十七)，這是由於盤元線材組織中存在白點所致。如果盤元線材組織中存在有高碳的麻田散鐵，則這種麻田散鐵組織的形成，大部份與盤元線材中的錳和鉻元素偏析有關。此外盤元線材組織中麻田散鐵的出現，和基地是為糙斑鐵(中波來鐵)、吐粒散鐵(細波來鐵)和少量變韌鐵的混合組織，也是斷裂的主要原因。這大部份是由於盤元線材出精軋機組進入 Stelmor 冷卻線時，冷卻溫度過低造成的。



圖十七

另外我們在伸線過程中，發生呈杯形斷口的斷線，其主要原因為軋延盤元線材的鋼胚中心偏析、縮孔、疏鬆……等缺陷所造成。或者是由於鋼胚內部存在V形裂縫及孔洞缺陷所造成，這種缺陷是由於鋼胚中的縮孔經熱軋、冷抽伸線所演變而成。盤元線材內部組織的異常，引起我們伸線途中發生斷裂，大概有夾雜物、中心縮孔、孔洞、麻田散鐵、雪明碳鐵、粗波來鐵過多……等異常。

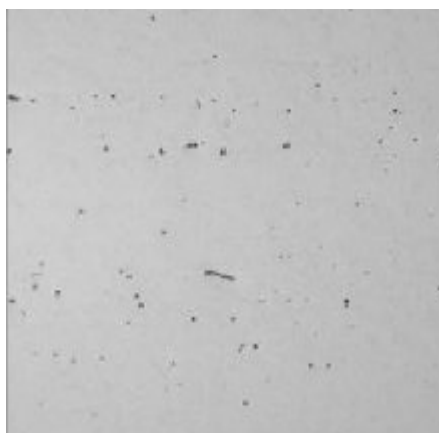
因為盤元線材組織中的夾雜物，所引起的伸線斷裂，是盤元線材在伸線過程中常見的斷裂，其斷裂的原因，是由於盤元線材的夾雜物而引起的拉應力不平均。這一種斷線其斷口面光滑平直(如圖十八)，鋼線的斷口頸縮很小，巨觀上不會呈現拉伸斷口的纖維區、擴展區和剪切唇等三個區域，而主要是呈現斷裂紋源區、纖維區、擴展區和剪切唇。斷裂紋源區的斷口形貌為解理，纖維區



圖十八 線材夾雜物造成斷裂

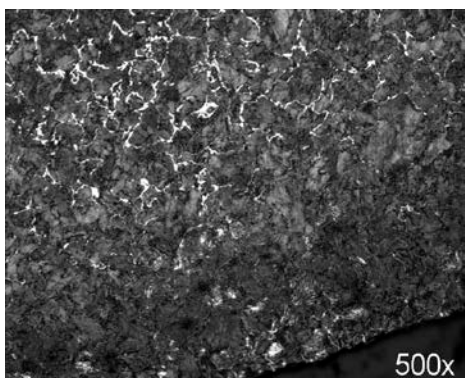
為韌窩加上少量解理，擴展區為解理。這種斷裂是因為夾雜物割裂基體，當受力時夾雜物與基體結合的部位會引起應力集中，在夾雜物處首先開裂。夾雜物周圍會呈現脆性斷裂，斷裂形狀為解理，斷口中仍存在纖維區，纖維區斷口為韌窩，但這裏由於夾雜物的存在裂紋及擴展迅速，纖維區的形狀則為韌窩加上解理，擴展區為解理，最終裂紋迅速擴展而導致盤元線材在伸線時斷裂，通常盤元線材中的夾雜物是引起脆性斷裂的主要原因。

盤元線材組織中的夾雜物，主要是非金屬夾雜物。我們可以在製作金相組織試片時，經過研磨、拋光後，而在未經腐蝕的情況，先在顯鏡微下觀察其非金屬介在物的情況(如圖十九)。盤元線材中的非金屬介在物之檢驗，通常我們可以依據 CNS 2910 G2020 鋼內非金屬介在物之顯微鏡試驗法，或是 JIS G 0555 Microscopic testing method for the non-metallic inclusions in steel 的規範標準進行檢驗。對於盤元線材非金屬介在物含量的要求，中鋼通常稱之為清淨度。中鋼對於清淨度有要求的盤元線材，會將檢驗的結果顯示在中鋼的品質證明書中，我們鋼線鋼纜產界常用的盤元線材產品規格，目前大概有 JIS G3502 Piano wire rods (SWRS)及 SAE 9254 兩種比較常見。中鋼對於非金屬介在物之檢測是依據 JIS G 0555 Microscopic testing method for the non-metallic inclusions in steel 的規範標準進行檢驗，並且採取記點法，品質上符合 $dB(\text{鋁化物}) + dC(\text{氧化物}) < 0.05\%$ 之要求。

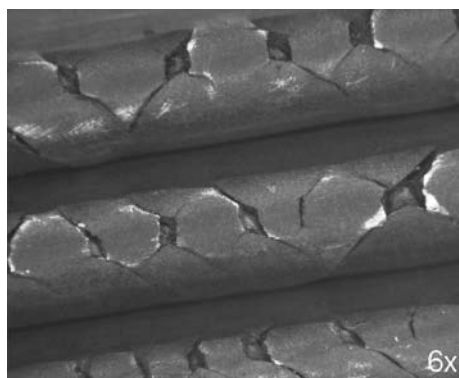


圖十九 非金屬介在物

另一種盤元線材夾雜有異物的情況，則是表面夾渣。盤元線材表面夾渣，主要是盤元線材在軋延時表面捲入保溫的材料，這些保溫的材料因為富含碳，會使用盤元線材表面夾渣的地方含碳量增加，而增加析出網狀的雪明碳鐵(如圖二十)，而盤元線材表面夾渣的部位，也會由於雪明碳鐵組織的硬度高，而容易產生龜裂(如圖二十一)。

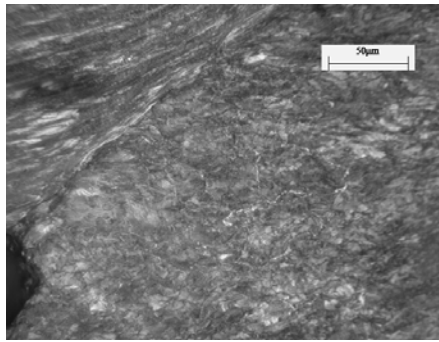


圖二十 夾渣表面的雪明碳鐵組織



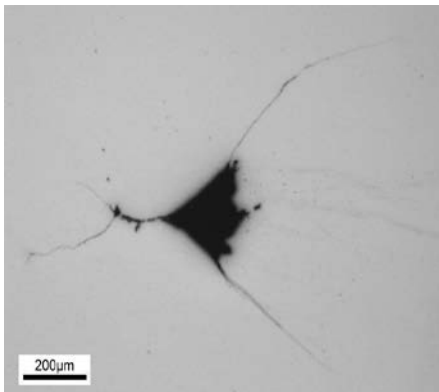
圖二十一 盤元線材夾渣部份龜裂

另外一種情況是盤元線材的組織中，存在有網狀的雪明碳鐵(如圖二十二)和孔洞(如圖二十三)，所引起盤元線材在伸線過程中斷裂。這一類斷線其斷口的巨觀斷裂面類型相似，都是一端為凸出的尖錐狀斷口，而對接的斷頭那面為杯錐狀斷口，稱之為杯形斷裂(如圖二十四)。我們如果將斷裂的試片，磨製成金相試



圖二十二 組織中的網狀的雪明碳鐵

片，就可以在金相試片的橫切面向及縱切向面，觀察到以下兩種情況，首先是金相試片的橫切面上中心有孔洞(如圖二十五)，另外則是會在磨製的金相試片，其縱向面可發現有縮孔的殘餘(如圖二十六)，以及由此產生的月牙狀伸線產生的缺陷。



圖二十三 鋼線中心孔洞



圖二十四 杯形斷裂

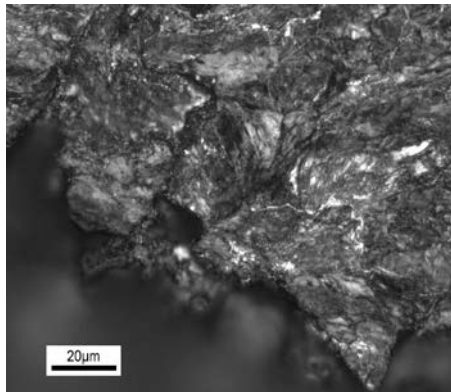


圖二十五 試片橫切面上中心有孔洞



圖二十六 試片縱切面縮孔的殘餘

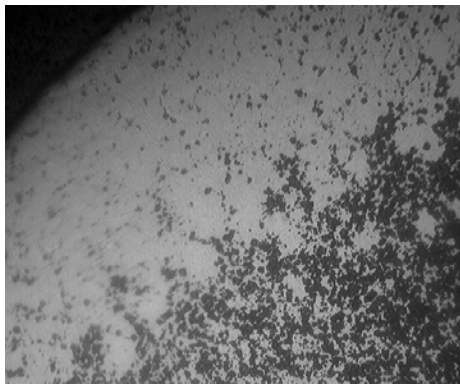
盤元線材中心存在有孔洞，是因為鋼胚的中心疏鬆所引起，而在軋製盤元的過程中又沒有將其接合，在我們後續伸線的過程中，就會從該處裂開。另外則是盤元線材的中心區域存在著網狀分佈的雪明碳鐵體時（如圖二十七），而盤元線材內部的裂紋又多產生於雪明碳鐵體處，我們由此就可以認定是盤元線材中心有著大量網狀雪明碳鐵體，並且沿著沃斯田鐵晶界的析出。雪明碳鐵是一種硬且脆的組織，當盤元線材中心的雪明碳鐵，呈連續網狀分佈在塑性相的晶界上時，這種分佈情況是比較可怕的，因為脆性相在空間上，會把塑性相分割開，從而使得伸線時組織的變形能力受到限制。在伸線時經過少量的變形後，盤元線材內部組織首先在脆性相之處形成微裂紋，進而迅速擴展產生孔洞，進一步受力直到斷裂。這樣會使得鋼線的塑性和韌性急速下降，因此在盤元線材組織中，脆性相越多及網狀組織越連續，就會使得盤元線材的塑性也就越差。盤元線材內部網狀雪明碳鐵的形成，主要與鋼胚中心存在碳的結晶偏析有關。



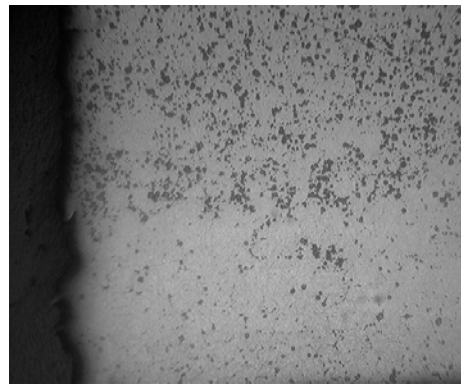
圖二十七 線材中心的網狀雪明碳鐵

鋼胚澆鑄時鋼水過熱度，對於減少鋼中碳偏析有重要作用，過熱度低則鋼胚的凝固快，碳偏析程度也就會顯著降低。另外當盤元線材加熱至沃斯田體化溫度時，若以較慢的速度來冷卻，也往往會沿晶界析出網狀的雪明碳鐵。通常可以通過過熱加工和熱處理的相互配合，來破壞或消除其網狀組織的分佈。網狀的雪明碳鐵組織的產生，主要是因為盤元線材中的錳、鉻和矽等合金元素以及碳偏析所引起的。

盤元線材組織中含有麻田散鐵，也是造成伸線過程中發生斷線的因素，這時鋼線的斷口面較為平直，基本上為脆性斷裂，鋼線的斷口形狀為異常的沿晶斷裂加少量解理形狀。如果我們將鋼線斷裂樣本，分別磨製橫切面及縱切面的金相試片，對橫切面試片腐蝕後檢驗觀察，可以發現有局部有白色組織(如圖二十八)。對縱切面樣片腐蝕後檢驗觀察，可以發現其對應的白色組織帶(如圖二十九)，另



圖二十八 試片橫切面白色組織

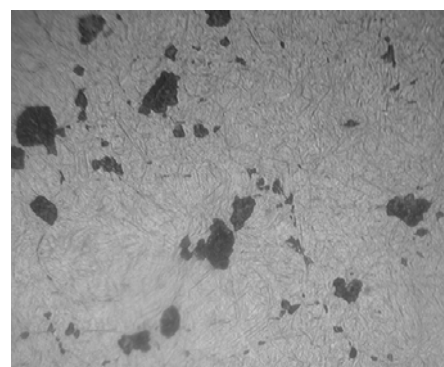


圖二十九 試片縱切面白色組織

外也可以在試片的縱切面中心白色組織帶上，觀察到有一條明顯伸線形的孔洞帶(如圖三十)。對於磨製的鋼線斷口金相試片檢驗觀察，我們可以發現盤元線材的異常組織，為麻田散鐵體組織加上少量細波來鐵體組織所構成(如圖三十一)。如果我們對磨製的鋼線斷口金相試片進行微硬度測試時，可以發現基地細波來鐵組織硬度約為 360HV 左右，而白色相的麻田散鐵組織硬度約為 570 HV 左右。因此我們也可以從硬度值來判斷白色的組織為麻田散鐵組織。



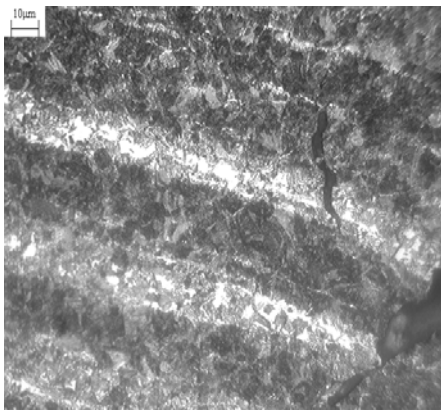
圖三十 伸線形的孔洞帶



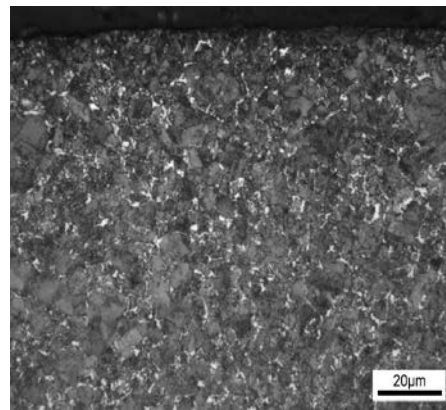
圖三十一 麻田散鐵加少量細波來鐵

盤元線材組織中出現了異常的麻田散鐵組織，會在鋼線的斷口上對應出現異常的沿晶斷裂形態，我們可以判斷該盤元線材斷裂的主要原因，這是盤元線材組織中出現了高碳的麻田散鐵組織。高碳的麻田散鐵組織，通常會被認為是產生裂紋的顯微裂紋來源，加上高碳的麻田散鐵組織硬度高，容易造成盤元線材在伸線過程中應力集中，在伸線過程中極易導致盤元線材發生斷裂。盤元線材組織中的麻田散鐵組織，通常會分佈在盤元線材內部的縱向偏析條帶上(如圖三十二)，而盤元線材的基體組織則為正常的細波來鐵組織。分析其原因主要是由於鋼胚在凝固的過程中，容易產生碳、矽和錳等的偏析，鋼胚在軋製成盤元線材後，如果盤元線材內部碳偏析仍未被消除，偏析帶上的碳、矽和錳等元素含量較高，會使得冷卻的C曲線向右移，所以即使在正常的冷速下，其偏析帶上仍然有可能會轉變為麻田散鐵組織。

在我們鋼線鋼纜產業中，常用的盤元線材大部份都是屬於中高碳盤元線材，它內部的正常組織(如圖三十三)應該都是細波來鐵(黑色部分組織)加上肥粒鐵

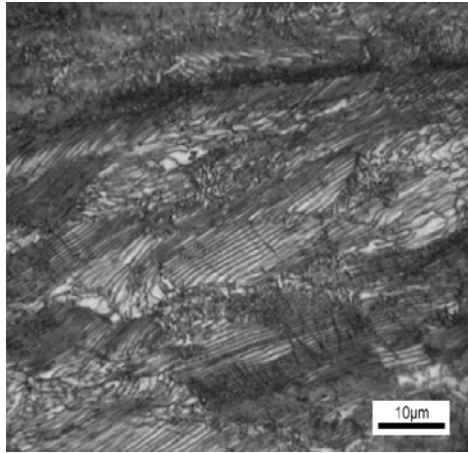


圖三十二 線材內部的白色縱向偏析條帶



圖三十三 細波來鐵加上肥粒鐵

(如白色部份組織)，並且會因為含碳量的增加，而使得黑色的細波來鐵區域增加。一般像我們常用的中高碳盤元線材中，SWRH72A 以上，白色的肥粒鐵區域就會看不見了。通常盤元線材中的波來鐵大部份都是要屬於細波來鐵，粗波來鐵的量不能太多，因為粗波來延性較差不利於伸線，數量太多就會造成伸線時產生斷線的異常。但有時候會由於盤元線材在軋延後冷卻的過程發生異常，而使得盤元線材內部會有大量的粗波來鐵產生(如圖三十四)。



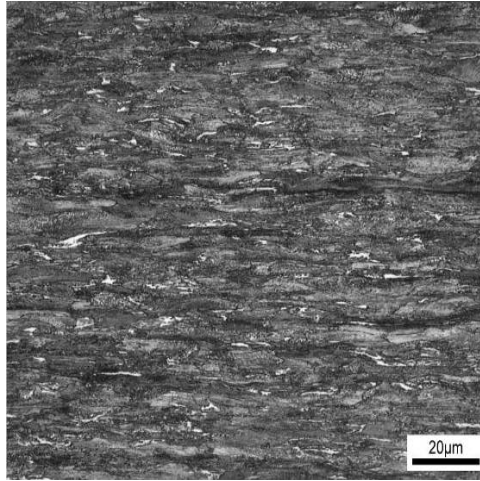
圖三十四 層狀粗波來鐵組織

對於盤元線材組織中的粗波來鐵要如何認定呢？通常我們如果將金相試片組織放大至 500 倍觀察，可以在波來鐵組織中觀察到層狀的組織，那這就是屬於粗波來鐵組織。在金相組織的觀察中，粗波來鐵組織的顏色會較細波來鐵組織來得白。盤元線材的組織中要含有多少量的粗波來鐵量，才算品質異常呢？中鋼相關的技術部門是回覆我們，含量要是在 70%以上，才能算是粗波來鐵量超過標準。但我想這只是一個大略值，如果我們在觀察一個金相試片的組織，其中層狀粗波來鐵的面積如果佔 50%以上，那就算是很多了。

鋼線鋼纜產業所使用的盤元線材，大部份都是屬於中、高碳的硬線，所以常會由於偏析及冷速過快，而極易形成網狀雪明碳鐵及白色的麻田散鐵組織，或者是冷速控制不當，而產生粗波來鐵，從而導致其在伸線過程中發生斷線。因此我們對於含碳量較高的高碳盤元線材的使用，一定要選擇生產技術水準及品質要求較高的盤元線材廠商。因為盤元線材用的鋼胚在連鑄及後續軋製的過程中，必須要嚴格依照生產技術的控制，減少鋼胚中組織偏析，並且合理的控制盤元線材軋製冷速，以獲得理想的盤元線材組織。

陸、伸線過程中的異常

盤元線材經過抽拉伸線加工後，達到我們需要的鋼線尺寸。盤元線材經過抽拉後內部的組織，會從波來鐵及肥粒鐵組織，轉變為伸線纖維化組織（如圖三十五）。因為伸線過程中發生異常所發生的斷線，其斷口型態通常有杯斷、橫裂斷



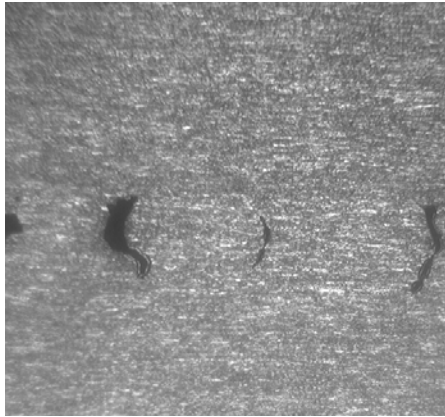
圖三十五 伸線後纖維化組織

、脆斷、頸縮斷……等幾種。而伸線過程中所發生導致斷線的異常因素，主要有伸線眼模尺寸不良、伸線過程潤滑不良、伸線過程冷卻不良、伸線過程中表面擦傷、伸線機捲胴間張力過緊、超過伸線加工度……等。伸線過程中發生異常所導致的斷線，依據其斷口的型態，分析造成斷裂的原因，大概有下列幾種：

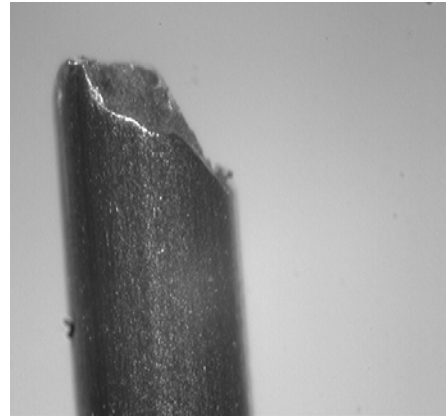
一、在伸線過程中發生斷口呈杯錐形的斷線，會發生這種斷線的異常，其最主要的原因是眼模角度(眼模的漸近角)的問題，當眼模角度過大時，就容易發生杯錐形的斷線。通常我們在選用眼模時，中高碳鋼線的硬度越高，我們要選用角度較小的眼模；低碳鋼線的硬度較低，我們就可以選擇角度較大的眼模。另外當在伸線時單趟眼模的減面率過小，也比較容易在伸線過程中發生杯錐形的斷線，通常鋼線在伸線時單趟眼模減面，最好控制在 10~30%之間。其他像是伸線過程潤滑不良，或是伸線時後方的張力過大，也可能會產生伸線的錐形斷線。當伸線的過程中，因為眼模角度過大、單趟眼模減面率過小，或是伸線時後方張力過大……等因素，所產生的伸線杯錐形斷線。在我們後續的金相組織觀察中，大部份都不會發現有異常的組織存在，這時候金相組織中都只是伸線後的纖維組織，及在縱切面組織可能會有中心形成斷杯(如圖三十六)。

二、伸線過程中發生斷口呈橫裂斷或脆斷的斷線(如圖三十七)，發生這種斷線的

異常，其最主要的原因是伸線過程中，潤滑及冷卻不良所產生。特別是在高碳鋼線因為伸線加工過程中線溫較高，容易進行應變時效，而導致鋼線易脆化。當我們伸線時鋼線溫度在 250°C 左右時，就可能產生應變時效，而導致鋼線脆化延性變差，如果我們在這種溫度下進行伸線加工，就可會發生斷



圖三十六 試片縱切面組織的中心斷杯

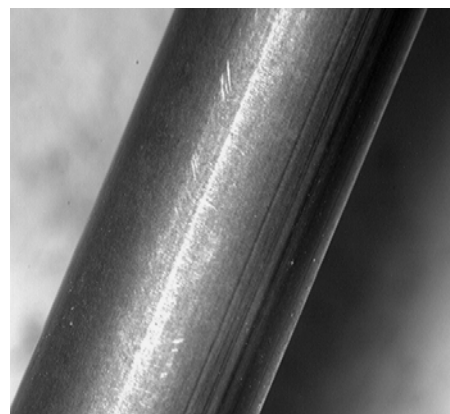


圖三十七 脆斷的斷線

線的異常，這時候斷口會呈脆斷的情況(如圖三十八)。正常的話，我們伸線加工過程，鋼線的溫度最好都能夠控制在 200°C 以下。有時候在伸線時，鋼線表面會有嚴重的縱向刮痕或是擦傷的痕跡(如圖三十九)，這是因為伸線眼模損壞破裂所導致，或是在伸線過程中在發生擦傷，例如伸線捲胴或過路的羅拉的擦傷鋼線表面。

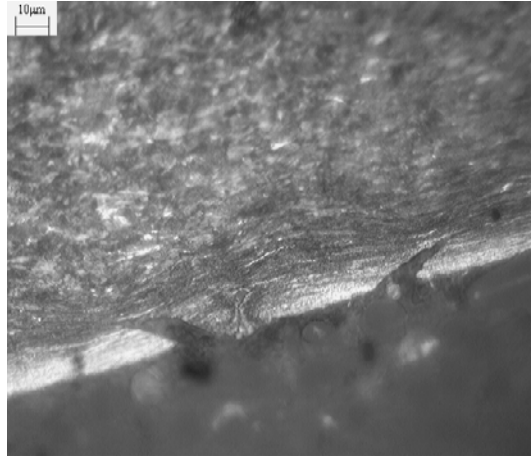


圖三十八 伸線脆斷



圖三十九 鋼線表面刮痕

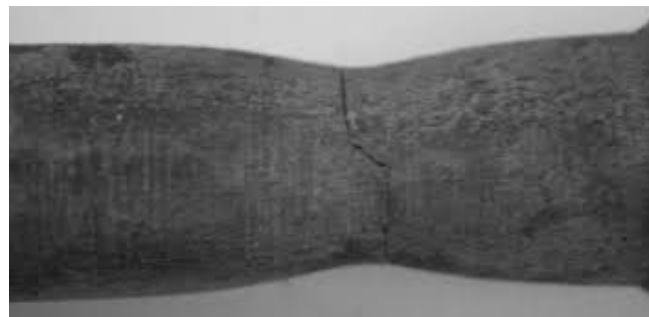
伸線過程中發生斷口呈橫裂斷或脆斷的斷線，如果對斷頭進行金相組織試驗，會在金相試片的橫切面表面組織，會發現有裂紋及 Martensite skin 組織存在(如圖四十)。



圖四十 裂紋及 Martensite skin 組織

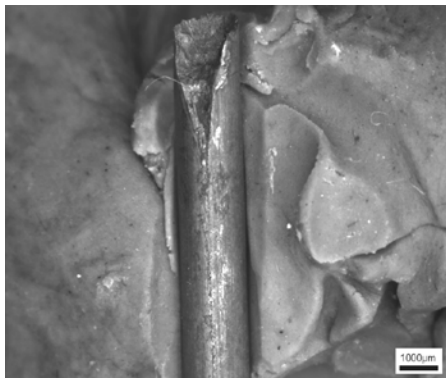
Martensite skin 組織的形成，依據中鋼技術人員的說法，當盤元線材或是鋼線表面擦撞或伸線潤滑不良時，盤元線材或是鋼線表面會產生高溫，當溫度達到淬火的溫度時，而鋼鐵是一熱傳導的速度很快材質，很快地將熱量從擦撞傷部位帶走，造成類似淬火的效果，而在鋼線表面生成麻田散鐵。而麻田散鐵硬脆又有細裂紋，就容易造成後續加工的斷線。

三、伸線過程中發生斷口頸縮的斷線(如圖四十一)，這是在伸線過程受到應力強力拉扯導致塑性斷裂的情況，其主要原因是由於伸線機捲胴間張力過緊，導致強力拉扯而斷線。有時候在伸線過程中的送料作業，如果發生亂線無法正常供線時，也會有發生鋼線被硬拉扯斷的情況。

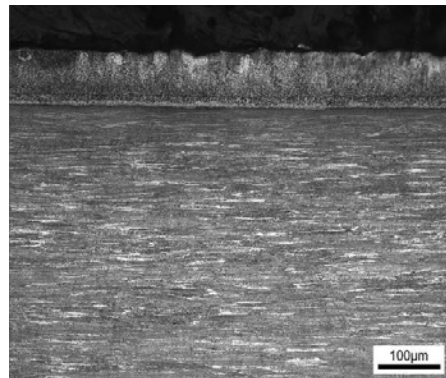


四十一 斷口頸縮的斷線

四、盤元線材若是超過伸線的加工度，也會發生斷線，這時候會呈現脆斷情況，斷口通常會呈 45° 的裂角(如圖四十二)，而且鋼線用手一折就斷裂。如果我們對斷線樣本，進行金相組織試驗時，會發現其金相組織中縱向的纖維組織被拉的很直(如圖四十三)，通常我們鋼線在進行伸線加工時，伸線眼模單趟減面率約在 10-30%，而伸線過程中其整體總減面率約在 70-90%，如果超過這個界限，就很容易在伸線過程中發生加工過度的脆斷。



圖四十二 加工過度 45°脆裂



圖四十三 纖維組織被拉的很直

(本文作者現任佳大世界股份有限公司主任)