

不銹鋼扣件生產技術綜述

第二部分

文 / 劉文海

[延續2021年9月號螺絲世界雙月刊第190期所刊載的不銹鋼扣件生產技術綜述(第一部分), 本文將接續針對不銹鋼熱處理方法的選擇、不銹鋼扣件及線材熱處理製程、不銹鋼扣件熱處理設備及作業要點以及不銹鋼扣件成品拋光和著色等面向進行探討。]

一、不銹鋼熱處理方法之選擇

儘管不銹鋼材料的牌號有許多種類, 但必須利用正確的熱處理手段, 才能更好地發揮不銹鋼的功能, 可說熱處理是提高不銹鋼扣件品質和使用可靠性的重要保證。

▶ 1. 熱處理不可強化型不銹鋼

肥粒體系和沃斯田體系不銹鋼, 不能利用熱處理方法強化, 要求提高抗腐蝕性能和塑性, 消除冷作硬化的扣件, 應進行固熔處理, 對於形狀複雜、不宜固熔處理的扣件, 可進行去應力退火。含鈦或鈮的不銹鋼, 為了獲得穩定的抗腐蝕性能, 可進行安定化退火。

▶ 2. 熱處理可強化型不銹鋼

a. 麻田散體系不銹鋼, 對要求有較高強度和彈性極限, 而對抗腐蝕性要求不高的扣件, 應進行淬火加中溫回火處理。對要求獲得良好機械性能和一定抗腐蝕性能的扣件, 應進行淬火加高溫回火處理。

b. 雙相不銹鋼, 對要求消除加工應力, 降低硬度和提高塑性的扣件, 應進行退火處理; 對只需改善原始組織的扣件, 可進行正常化加高溫回火的預備熱處理。

c. 析出硬化系不銹鋼, 對要求有良好的綜合機械性能和抗腐蝕性能的扣件, 需進行固熔加時效, 固熔加深冷處理或冷變形加時效等調整處理。

▶ 3. 銲接組零件

經熱處理可強化的不銹鋼銲接組合扣件, 根據工件圖紙要求, 可進行淬火加高溫回火或去應力退火。經熱處理不可強化的不銹鋼銲接組合扣件, 需改善銲縫區域組織、抗腐蝕性能及較充分消除應力時, 可進行固熔處理。對於形狀複雜、不宜進行固熔處理的銲接組合扣件, 可採用去應力退火。經熱處理可強化或不可強化的不銹鋼銲接組合扣件, 當要求抗腐蝕性能為主時, 應進行固熔處理加低溫回火; 當要求以機械性能為主時, 應進行淬火加低溫回火或中溫回火處理; 對於形狀複雜的銲接組合扣件, 可進行去應力退火或高溫回火。



二、不銹鋼扣件及線材熱處理製程

▶ 1. 沃斯田體系不銹鋼

(1) 固熔處理（完全退火）

固熔處理是使析出的碳化鉻及 σ 相重新固熔於沃斯田體基地中，主要目的是提高耐蝕性並消除冷加工內應力，恢復延性。固熔處理的加熱溫度約950~1150°C，含碳量高時取上限溫度，含碳量低時取下限溫度。一般採用水冷，薄壁件可採用空冷。一般而言，加熱溫度愈高，碳化物愈易固熔，但晶粒易粗大化，導致其後加工之橘皮效應，加熱溫度太低則碳化物固熔不完全。

(2) 應力消除退火

沃斯田體不銹鋼螺栓、螺帽等扣件，經冷鍛/冷擠壓加工強化後，存在較大的加工應力，在應力腐蝕環境中使用時，會增加應力腐蝕的敏感性，影響尺寸的穩定性。應力消除退火一般加熱到280~400°C，保溫2~3h後空冷或緩冷。去應力處理不僅能減小扣件應力，在伸長率無大改變的情況下，使硬度/強度得到提高。消除銲接應力時，一般採用800~900°C加熱，保溫1~3h，空冷或水冷。

(3) 安定化處理

對耐晶界腐蝕（抗敏化）為目的而加鈦（AISI 321）或鈮（AISI 347）等的安定化型沃斯田體不銹鋼而言，為避免鈦或鈮碳化物在高溫分解，需先於955~1050°C進行固熔熱處理，使M23C6回溶至 γ 相。之後應再進行一次安定化處理，以便將Cr23C6中的碳原子轉移到碳化鈦或碳化鈮中，進而提高抗晶界腐蝕能力。安定化退火之加熱溫度選擇很重要，原則上應高於M23C6的析出溫度，一般選擇在870~885°C之間保溫2~6h，空冷或水冷。

(4) 消除 σ 相熱處理

σ 相是一種硬而脆的FeCr金屬間化合物，它的存在使鋼的韌性、耐腐蝕性和抗氧化性均降低。 σ 相最易在高鉻肥粒體系中出現，在沃斯田體系與雙相不銹鋼中也可能出現。 σ 相在高溫下可溶解於沃斯田體中，它在不銹鋼中存在的溫度約820°C，消除 σ 相的熱處理就是在高於其存在的上限溫度進行加熱。對於AISI 347來說，在850°C加熱後， σ 相即會消失。隨不銹鋼成分的不同， σ 相存在的上限溫度也不相同，因此具體的加熱溫度應藉由試驗確定。

(5) 敏化處理

在500~850°C溫度範圍內加熱，用以檢驗不銹鋼的耐晶界腐蝕能力，稱為敏化處理。除特殊情況外，應儘可能避免使不銹鋼在敏化溫度範圍加熱。對於一些特殊使用場合，為更嚴格地考核材料的抗晶界腐蝕能力，可依據扣件將來使用的溫度及材料的含碳量及是否含鉬元素等，採用不同的敏化製程，例如加熱到650°C，保溫5h空冷。

▶ 2. 肥粒體系不銹鋼

肥粒體系不銹鋼在應用中應避免 σ 相脆性、475°C脆性及晶界腐蝕敏感傾向的存在，以保證有較好的塑性、韌性、耐蝕性。 σ 相為含20%-75% Cr之Fe-Cr中間相，當長時間使用於550-830°C時易發生。475°C脆性是指加熱於400-550°C範圍內，其組織雖無變化但常溫韌性大減，耐蝕性亦甚差。肥粒體系唯一的熱處理就是退火，目的是消除475°C脆性、 σ 相脆性和冷加工殘留應力，一般約在700-900°C加熱，厚度或直徑每25mm保持1~2小時，然後空冷或水冷。肥粒體系不銹鋼極易氮化，其氮化層深度比沃斯田體不銹鋼大。對於需耐磨及表面硬度之場合，氮化法很有效。

▶ 3. 麻田散體系不銹鋼

麻田散體系不銹鋼熱處理包括退火、淬火和回火，淬火後硬度較高，不同回火溫度具有不同強韌性組合。由於合金含量高，硬化能力極佳，甚至以空冷方式冷卻，也可獲得完全麻田散體。其中含高Cr者具有自硬性，油冷即可硬化。此外，回火軟化很慢，如同高合金工具鋼一樣，也有二次硬化現象發生。

(1) 完全退火：

加熱到800~900°C處，保持一段時間，使溫度均勻後後冷，使沃斯田鐵變態為肥粒鐵和碳化物，獲得最軟狀態。因冷卻速度為20°C/hr以下，故所需時間很長，當溫度降到約500°C以下時可以採急冷。SUS431因含Ni使變態速率減慢，故不宜採用完全退火使其軟化。

(2) 恆溫變態退火：

是將完全退火溫度冷到變態速度最大的700°C溫度，保持一段時間使完成變態後，在空氣中冷卻的方法。其所費時間較完全退火者短，可提高作業效率，且退火後性質與一般退火者相近，故此法漸受重視。

(3) 淬火和回火：

麻田散體系不銹鋼的導熱度較碳鋼及構造用合金鋼小，迅速昇溫時易產生內部應力導致彎裂，故淬火加熱階段必須預熱。對小型件而言，進行一段預熱至700~800°C；大型或厚斷面物件宜先預熱至500~600°C，再預熱至800~900°C，亦即進行二段預熱。淬火後鋼中存有殘留應力，且在組織中有殘留沃斯田體。在常溫下沃斯田體會變態為麻田散體，使體積膨脹，在加上殘留應力的影響，很容易造成破裂。所以淬火後須立刻實施回火或零下處理。視鋼種及用途而異，但須避免400~565°C間易起脆化之溫度範圍內回火。

淬火溫度愈高，回火後的硬度愈大，韌性愈低。因此對構造物而言，需要回火後具有最大韌性，其淬火溫度要低，宜選擇920~1000°C溫度。然而對需要高硬度的刀具而言，淬火溫度要高，宜選擇1000~1070°C溫度。對高碳不銹鋼來說，淬火溫度不宜過高，因易生殘留沃斯田體。對低碳不銹鋼，高淬火溫度亦有不良影響，容易生成肥粒體，致使硬度降低。淬火溫度過高時，沃斯田體晶粒粗大化會造成脆性，且表面有氧化與脫碳的可能，須特別注意。



4.析出硬化系不銹鋼

析出硬化系不銹鋼一般是先經固熔處理獲得較低的硬度後，再用不太高的溫度進行析出硬化(時效強化)。比較常見的作法是選用已固熔化材料並加工至尺寸及精度幾近成品的要求，再作後續的析出硬化處理，可避免高溫加熱淬火硬化時產生的氧化及變形，也減少固熔化熱處理成本及作業時間。

析出硬化型不銹鋼可自麻田散體或沃斯田體基地中析出強化相，從固熔處理冷卻後依麻田散體轉換溫度(Mf)高低，分為麻田散體型、半沃斯田體型、沃斯田體型不銹鋼。麻田散體型(如17-4PH)之Mf在室溫之上，固熔處理後水淬，可獲得近100%麻田散體組織，再施以時效處理。半沃斯田體型(如17-7PH)之Ms、Mf溫度皆低於室溫，需藉由深冷或調質熱處理(淬火和高溫回火)，才能獲得麻田散體組織，之後施以時效處理。沃斯田體系型不銹鋼之Ms溫度遠低於室溫，無法藉由麻田散體強化，其強化方式僅有介金屬化合物之析出硬化。

析出硬化不銹鋼熱處理製程通常比較複雜，而且對熱處理的加熱溫度和保溫時間及冷卻方式要嚴格控制。以17-4PH為例，ASTM A693標準中推薦的固熔溫度為1040±15°C。固熔溫度不同，最終得到的組織與性能也不同。在固熔退火中，降伏強度升高到大約750 MPa，完全時效後可能達到1200MPa。在固熔處理後，17-4PH呈現出軟的麻田散體結構，硬度約38 HRC。如果要在這種熱處理時態下(稱為時態A)加工使用，可在300°C下進行應力消除熱處理，此時對機械性能沒有明顯影響。

表1 為17-4PH不銹鋼的固熔及時效溫度，因為保溫溫度的差異、保溫時間的長短及冷卻速度的快慢將會使17-4PH的機械性能產生很大的不同。17-4PH在1040°C固熔後，隨時效溫度的升高，麻田散體組織發生回火，且不斷地析出M₂₃C₆、ε-Cu及NbC等第二相。450°C時效時已有銅、鉍等相析出，到470~480°C時，基地內析出物顆粒細小且彌散分布，此時材料的硬度最高約達HRC 42(圖1)。之後，隨時效溫度的繼續升高，甚至開始出現沃斯田體的形成，硬度和強度下降，塑性、韌性提高。即使於480°C之時效溫度，隨時間增加，其硬度也會稍下降。由於硬度和強度的變化規律類似，所以對硬度和強度有明確要求的工件，應嚴格控制時效溫度，以滿足使用要求。

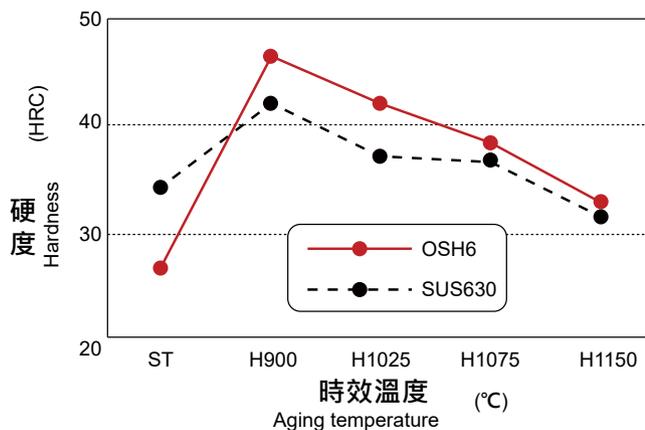
表1 17-4PH不銹鋼的固熔及時效溫度

時態A溶體化熱處理於1900°F±25°F(1038°C±14°C)或空冷低於90°F(32°C)

時態	加熱至 ±15°F (8.4°C)	達溫需時(小時)	冷卻類型
H 900	900°F (482°C)	4	空冷
H 925	925°F (496°C)	4	空冷
H 1025	1025°F (551°C)	4	空冷
H 1075	1075°F (580°C)	4	空冷
H 1100	1100°F (593°C)	4	空冷
H 1150	1150°F (621°C)	4	空冷
H 1150 + 1150	1150°F (621°C)	4 接著再 4	空冷
H 1150-M	1400°F (760°C)	2	空冷
	1150°F (621°C)	接著再 4	空冷

資料來源:www.aksteel.com

圖1 SUS630時效溫度與硬度關係(H900為480°Cx1hr, 空冷)



資料來源:www.sanyo-steel.co.jp

5.雙相不銹鋼

雙相不銹鋼與其他不銹鋼一樣，其機械性能和耐腐蝕性能需靠正確的熱處理來保證。雙相不銹鋼機械性能和耐腐蝕性能的改善，是利用改變雙相不銹鋼兩相的比例、兩相中合金成分及消除其他析出相來實現的。雙相不銹鋼最基本的也是最重要的熱處理是固熔處理，雙相不銹鋼有低合金、中合金、高合金及超級雙相不銹鋼之分，只是由於合金元素的種類和含量不同，在加熱溫度上略有差別，固熔溫度範圍約950-1150°C快冷。



三、不銹鋼扣件熱處理設備及作業要點

1. 熱處理設備

不銹鋼和耐熱鋼扣件可用空氣電阻爐、鹽浴爐、可控氣氛爐、真空爐等加熱，對於尺寸較大的螺栓、螺帽、銷、螺絲等，一般應在可控氣氛爐、真空爐中加熱。常用的保護氣有氫氣、氮氣、氬氣和氨氣，純度 $\geq 99.98\%$ ，以利於保護加熱或冷卻。在真空度高於0.13 MPa狀態下，真空熱處理爐的泄漏率應小於0.67 Pa/h。淬火槽的容積要保證在連續生產條件下具有足夠的冷卻能力，應具有冷卻循環系統、攪拌裝置，介質採取螺旋泵攪拌，不採用壓縮空氣攪拌。淬火油槽的油溫保持在50~80°C之間，水溫應保持在10~40°C之間。

2. 熱處理作業要點

扣件及夾具在加熱前均應清除油污、殘鏽、油漆等外來雜質。在真空爐中首次加熱使用的夾具，應預先在低於扣件要求的真空度下進行除氣淨化處理，對容易產生變形的扣件，應在專用夾具上進行加熱，並置於有效加熱區內。

對於形狀複雜或截面有急劇變化及直徑較大的扣件，必須進行預熱。預熱方法有：一次預熱法為800°C保溫；二次預熱法為500~650°C和850°C分別保溫、升溫至設定溫度。扣件加熱應有足夠的保溫時間，可根據扣件的有效直徑和條件厚度來確定。可控氣氛爐保溫時間為：2-3min/mm×直徑；真空爐的保溫時間為：<750°C時為3~4min/mm×直徑， $\geq 750^\circ\text{C}$ 時為1~2min/mm×直徑。

麻田散體不銹鋼扣件空冷時，應散開放在乾燥處，淬火時冷至室溫後才能進行清洗、深冷處理或回火。扣件淬火後應及時回火，時間間隔一般不超過4h。熱處理強化後的銲接組合扣件，銲接和其後的熱處理時間間隔不應超過4h。熱處理後可根據扣件要求和表面狀況，採用鹼液、水溶性清洗劑、氨溶劑及噴砂、珠擊等方法進行清理。不銹鋼和耐熱鋼扣件，尤其是銲接組合扣件，熱處理後原則上不宜採用酸洗的方法進行清理。

對於變形量大的螺栓，應採用靜負荷進行校直，一般不宜局部敲擊，校直後應在低於原回火溫度的條件下進行去應力回火。沃斯田體不銹鋼扣件校直後，只在300°C以下進行去應力回火。當機械性能不合格時，可進行重複熱處理，但重複淬火或固溶次數一般不超過2次，扣件的補充回火不算作重複處理。淬火狀態或低溫回火後的麻田散體不銹鋼和耐熱鋼扣件，重複淬火前應進行預熱、退火或高溫回火，以防止再淬火時開裂。

參考資料

1. 李勝隆，「熱處理-金屬材料原理與應用」，全華圖書公司，2014年8月
2. 「不銹鋼實用手冊」，中國科學技術出版社，2003年9月
3. 特殊鋼，61卷6號，(2012.11) pp.18-20
4. 孔德才等，「不銹鋼扣件生產技術」，第六屆華北(擴大)塑性加工學術年會論文集，2010年
5. 張先鳴，「摩托車不銹鋼扣件的熱處理」，摩托車技術，2011.02
6. Angelo Fernando Padilha, Ronald Lesley Plaut, and Paulo Rangel Rios: 「Stainless steels heat treatment [Chapter 12]」, Taylor & Francis Group, LLC. 2006
7. J.Beddoes, J.G. Parr, 「Introduction to Stainless Steels」, Materials Park, OH: ASM International, 1999
8. <https://www.aksteel.com>
9. <https://www.sanyo-steel.co.jp>
10. <https://www.asminternational.org>
11. <https://kknews.cc>
12. <http://www.chihong-ht.com.tw>

四、不銹鋼扣件成品拋光和著色

不銹鋼扣件成品表面色澤不佳，甚至帶有黑皮時，應進行發白和拋光。拋光分機械拋光、化學拋光和電解拋光。以電解拋光效果為最好，機械拋光可將工件置於加入穀殼的滾筒內進行，或用320#金剛砂珠擊。不銹鋼還可進行著色處理或鈍化處理，著色處理可將不銹鋼件染成黑色、藍色、金黃色、紅色、綠色等。著色後再加鈍化處理，既可增加美觀，又能提高耐熱性、耐磨性和耐蝕性。

五、結語

隨著不銹鋼扣件成型技術的發展及材料熱處理領域新技術的不斷湧現，對不銹鋼扣件品質的要求也越來越高，生產不銹鋼扣件關鍵技術知識(know how)是：

1. 熟悉各類不銹鋼材料的耐蝕性、物理性能、室溫下的機械性能、冷熱加工性能、熱處理製程等，做到正確和合理選用不銹鋼材料。
2. 正確制訂工法流程，合理選用設備，研製或採用各種合適的潤滑，保證抽線、鍛鍛、搓牙和攻牙的順利進行和提高產品品質。
3. 正確修正工模具尺寸，提高工模具的強韌性、耐磨性和抗咬合能力，保證批量生產的品質。 ■

