

過高溫 T4/T6 熱處理對 Al-Mg-Si 合金之微觀組織與機械性質探討

The effect of over high T4/T6 heat treatment on microstructures and mechanical properties of the Al-Mg-Si alloy

*呂偉民、呂傳盛、陳立輝、洪飛義

*Wei-Min Lu, Truan-Sheng Lui, Li-Hui Chen, Fei-Yi Hung

國立成功大學 材料科學及工程學系

摘要

6xxx 系列鋁合金(Al-Mg-Si alloy)有高比強度、高導熱性以及良好的抗腐蝕性與成型性，近年來逐漸使用在運輸工業上。6082 鋁合金因不同溫度的 T4/T6 熱處理條件， Mg_2Si 之固溶限不同而使機械性質有所改變，在過高溫固溶化處理溫度的 T4/T6 熱處理，6082 鋁合金硬度增加、平均晶粒徑與延性並無顯著差異，卻發現低熔點相冷卻所形成之孔洞缺陷。

關鍵字：Al-Mg-Si alloy、T4/T6 熱處理、過高溫固溶化處理、孔洞。

Abstract

6xxx Al alloy has high specific strength, high thermal conductivity, good corrosion resistance and good formability, which is used in transportation industry in recent years. The solidus limit of Mg_2Si of Al alloy 6802 change with various T4/T6 heat treatment. With over high T4 temperature, the hardness increases, but the averaged grain size and ductility are similar with other T4/T6 heat treatments of Al alloy 6082. Also, in over high T4 temperature, the pores whose are formed by the low melting point phase.

Keywords: Al-Mg-Si alloy, T4/T6 heat treatment, over high solution temperature, pores.

一、前言

近年來因響應節能減碳，輕金屬所具備良好的性質逐漸取代常用的鋼鐵等金屬零件。輕金屬中的鋁合金具有價格低廉、高比強度、導電度佳，並且擁有良好的抗腐蝕性與成型性，目前廣泛應用於運輸工業(鍛造輪圈、汽車零件等)。析出強化型的 6xxx 系列鋁合金，是以 Al-Mg-Si 為主要添加元素，並以 Mg_2Si 為主要析出強化相。

據文獻指出⁽¹⁻⁵⁾，Mg 與 Si 含量比值會影響材料性質，可將材料區分為 Mg 過剩或 Si 過剩。Si 過剩時會促進析出物的成核速率增加，提高析出物密度，促使材料強度上升，但 Si 含量過高時卻會導致材料的脆化；Mg 過剩時，

因 Mg_2Si 的固容量減少，使材料中析出相的析出速率減緩使強度下降。本研究使用的 6082 鋁合金中添加少量合金元素，如：Mn、Cr、Zr 等可控制晶粒尺寸，使其在固溶化熱處理時，晶粒尺寸能受到溶質原子的阻擋而限制成長。添加 Zr 能形成鋁-鋯化合物(Al_3Zr)提升硬度與強度；添加 Cu 元素則能使峰值時效之硬度提升。當 Cu 添加至一定含量下⁽⁶⁾，在 Al-Mg-Si 合金中將會形成 Q 相(Al-Mg-Si-Cu)，Q 相為低熔點相，在高溫熱處理下可能會造成熔融相出現。

文獻指出⁽⁷⁾，不同固溶化溫度下，析出相之固容量與型態也會影響人工時效之硬度變化，而 6082 鋁合金之 Mg_2Si 固容量將隨著 T4 溫度提升而上升，並在 595°C 達到最大值 1.85 wt.%。此外，空孔濃度也會隨著固溶化溫度上升而提高，這些空孔將會成為人工時效處理時析出相之成核點，促使析出相尺寸變小，達到更好的析出強化效應。

本實驗針對含銅量較高之 6082 鋁合金，進行高溫與過高溫之 T4/T6 熱處理，探討 Mg_2Si 固容量以及低熔點相對於微觀組織與機械性質之影響。

二、實驗方法與步驟

本次實驗材料為 6082 鍛造鋁合金，為 Si 過剩鋁合金，化學組成如 Table 1 所示。將 6082 鋁合金進行不同溫度，兩小時固溶熱處理(530°C、550°C、570°C)後水淬，接續置於 175°C 進行人工時效熱處理(T6)後水淬。代號為 As-received (未經熱處理)、530/175、550/175 及 570/175 稱之，Table 2 為理論 Mg_2Si 與 6082 之矽過剩含量。

經過 T4 熱處理後，不同人工時效時間之熱處理試片進行洛氏硬度測試(Rockwell hardness test, HR)，得到不同 T4 溫度下之時效曲線，並確認穩定峰值時效之條件。採用的人工時效時間分別為：0、0.5、1、1.5、2、3、4、5、6、8、10、12 及 24 小時。

由時效曲線取出最佳人工時效條件後，進行不同 T4 溫度下和尚未熱處理之微觀組織觀察，計算不同條件下的平均晶粒徑以觀察固溶化溫度對晶粒成長之效應；另將四種條件下之樣品製成拉伸試片，以初始應變速率為 $1.67 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ 進行拉伸試驗，探討經過不同固溶化處理溫度及低熔點相對拉伸性質之影響。

三、結果與討論

(一) 不同固容量對人工時效之效應

不同 T4 溫度下人工時效(175°C)之硬度曲線如 Fig. 1 所示：530/175 與 550/175 之峰值硬度沒有明顯提升，但達到峰值硬度的時間縮短；觀察 570/175 硬度曲線，硬度則是明顯地提高，顯示在高溫下， Mg_2Si 固容量的提升有助於增加鋁合金 6082 的硬度。經觀察可得，人工時效處理六小時後硬度值達到平緩趨勢，並取八小時之人工時效為 T6 熱處理

的穩定條件。

(二) 不同固溶化溫度對微觀組織變化與硬度之效應

Fig. 2 為不同 T4/T6 熱處理條件後之微觀組織，可觀察出經由不同溫度之熱處理後鍛造流紋仍存在，但長寬比有縮小之趨勢，顯示在高溫條件下，晶粒會逐漸成長為等軸晶。Table 3 為不同熱處理條件之平均晶粒徑統計結果，經過 T4/T6 熱處理後，因高溫時所生成之靜態再結晶而導致平均晶粒徑下降，而隨著 T4 溫度提高，平均晶粒徑沒有顯著的變化；硬度方面，不同 T4/T6 熱處理條件中，570/175 具有最高的硬度值，而 550/175 與 530/175 的硬度值相對略低且無明顯差異。再由晶粒徑無明顯變化，且較高 T4 溫度下具有較高的固溶量得知，在 570/175 之硬度上有增加的趨勢。

(三) 不同固溶化熱處理條件對拉伸性質之影響

不同 T4/T6 熱處理條件之拉伸強度與延伸率如 Fig. 3 和 Fig. 4 所示。Fig.3 顯示，由於時效熱處理的析出強化效應，使三組 T4/T6 熱處理條件之強度表現高於 As-received 之強度。由上述實驗結果得知，530/175、550/175、570/175 之平均晶粒徑並無明顯差異，推測強度增加乃因 Mg_2Si 固溶量隨著固溶化處理溫度增加而上升導致；Fig.4 顯示經過 T4/T6 熱處理後延伸率受到硬度上升而降低，但仍具有一定的延性，且 T4 溫度改變下並無太大的變化。

另外，Fig.3 中 570/175 相對於 550/175 雖有較高的固溶量與較多成核點提供析出相成核，但在強度表現並沒有顯著差異，比較 550/175 與 530/175 兩條件時，發現固溶化溫度對強度表現有顯著的影響。對此，將 570/175 試片進行微觀組織觀察，結果如 Fig. 5 所示：可發現晶界上有許多富含 Cu 之共晶相存在⁽⁸⁾。Fig. 6 及 Table 4 為 As-received 材針對晶出相做成份分析(EDS)，發現在熱處理前已有含 Cu 之第二相生成。此含 Cu 的第二相為低溫溶解相，於 570°C 固溶化溫度將熔融形成液相，後因冷卻凝固體積收縮而造成材料內部的孔洞缺陷，故導致 570/175 雖硬度較高且晶粒無異常成長，但強度表現卻無明顯提升。

四、結論

不同固溶化溫度的 T4/T6 熱處理後，570/175 因 Mg_2Si 固溶量增加使硬度上升；而高溫固溶化熱處理後三者之平均晶粒徑無明顯變化。

550/175 的強度對比於 530/175 有明顯增加，但 570/175 與 550/175 相比無明顯改變，成因為 570°C 固溶化熱處理時將造成含 Cu 的低溫溶解相熔融，冷卻後收縮形成孔洞，故強度無法上升。

五、參考文獻

- (1) P. Sepehrband, R. Mahmudi, F. Khomamizadeh, "Effect of Zr on the aging behavior of A319 aluminum cast alloy", *Scripta Material* 52, 2005, pp.253-257.
- (2) S.R. Claves, D.L. Elias, W.Z. Misiolek, "Analysis of the intermetallic phase transformation occurring during homogenization of 6xxx aluminum alloys", *Materials Science Forum Vols. 396-402*, 2002, pp.667-674.
- (3) 侯彥羽, 「改良式 SIMA 製程之累積應變量及鹽浴時間對 6068 鋁合金微觀組織及拉伸性質之影響」, 國立成功大學材料科學及工程學系碩士論文, 民國 102 年, pp.2。
- (4) D. E. Laughlin and W. F. Miao, "The effect of Cu and Mn content and processing on precipitation hardening behavior in Al-Mg-Si-Cu alloy 6022", *The Mineral, Metals & Materials Society*, 1998, pp.63-78.
- (5) L. F. Mondolfo, "Aluminum alloys structure & properties", Chapter 4-3, 1976, pp.806-842.
- (6) Anne Lise Dons, "The Alstruc homogenization model for industrial aluminum alloys", *Journal of Light Metals* 1, 2001, pp.133-149.
- (7) 程文宗, 「Al-Mg-Si 鋁合金拉伸性質與可靠度之固溶化處理效應」, 國立成功大學材料科學及工程學系碩士論文, 民國 99 年, pp.2-3。
- (8) 王柏翰, 「過熱固溶處理對 2218 鋁-銅合金時效材 顯微組織與室溫拉伸性質影響之探討」, 國立成功大學材料科學及工程學系碩士論文, 民國 101 年, pp.1-2。

誌謝

感謝國科會計畫(102-2221-E-006-060-MY2)於研究上予以經費補助。

Table 1. Chemical composition of 6082 aluminum alloy (wt.%).

Mg	Si	Cu	Zr	Cr	Fe	Al
1.43	0.95	0.81	0.13	0.10	0.16	Bal.

Table 2. The content of Mg₂Si and excess Si of 6082 aluminum alloy (wt.%).

Mg ₂ Si	Si
2.25	0.13

Table 3. The average grain size and hardness of various T4/T6 heat treatments

	As-received	530/175	550/175	570/175
Grain size(μm)	29.5	17.1	18.9	19.2
Hardness(HRF)	53	97.6	98	101

Table 4. The result of the EDS of As-received 6082 (at.%)

Element	Al	Mg	Si	Cu
A.	68.66	00.90	01.38	25.87
B.	88.07	00.82	00.48	08.77

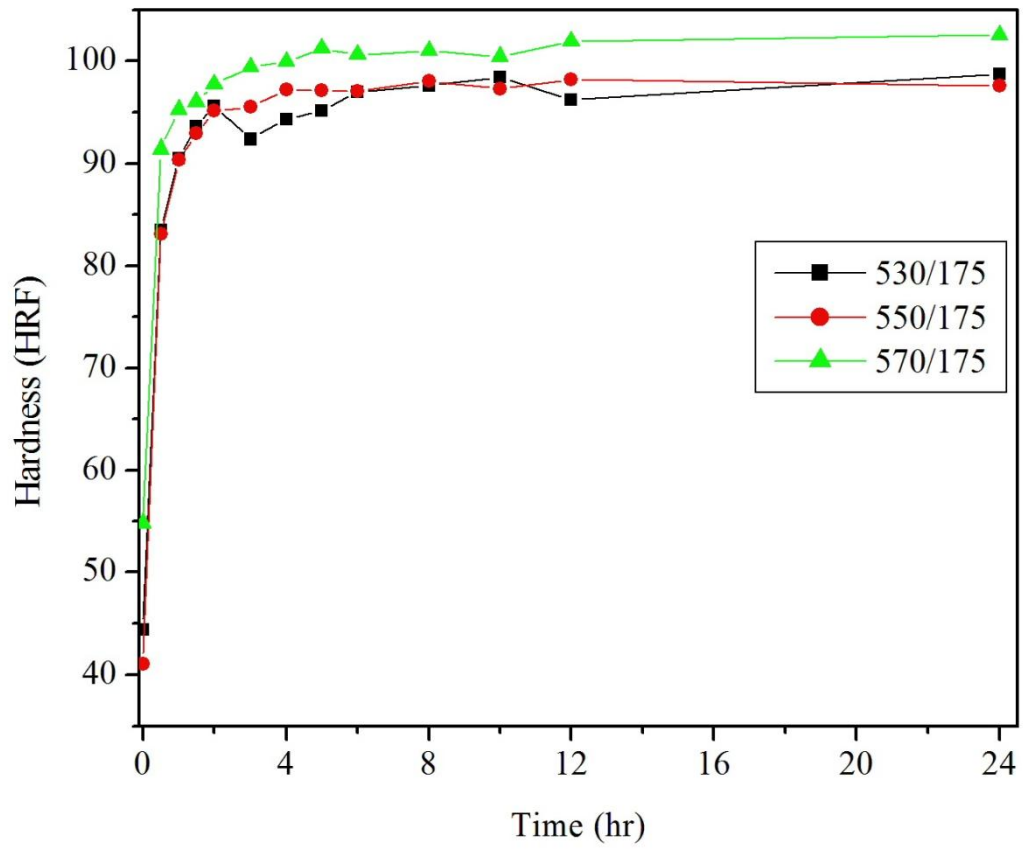
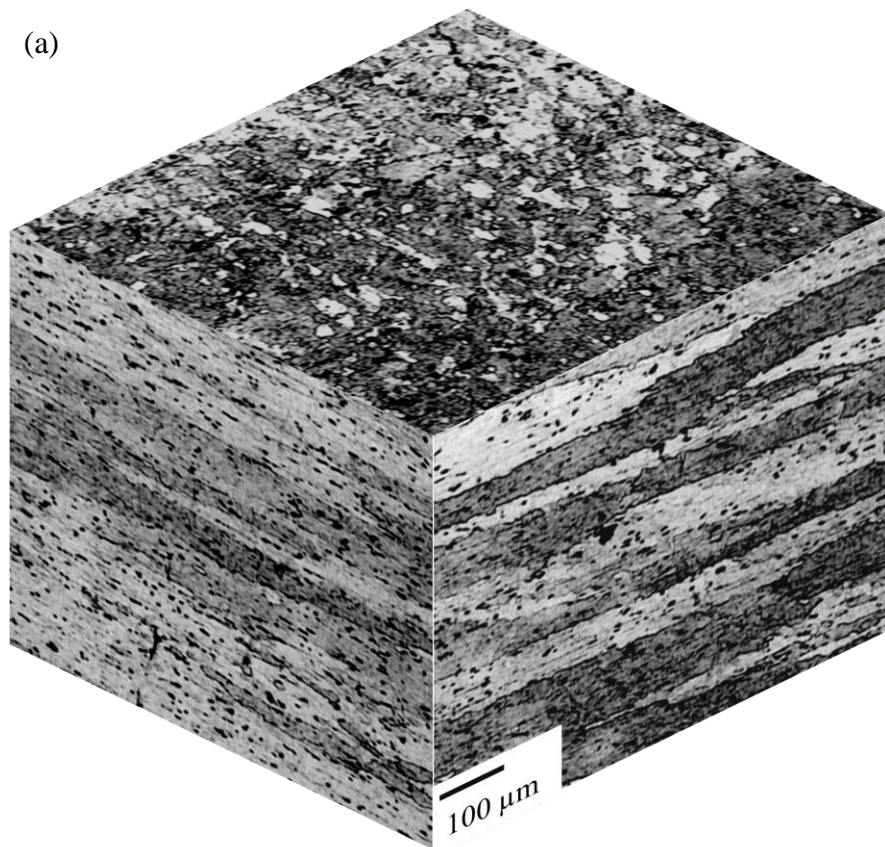
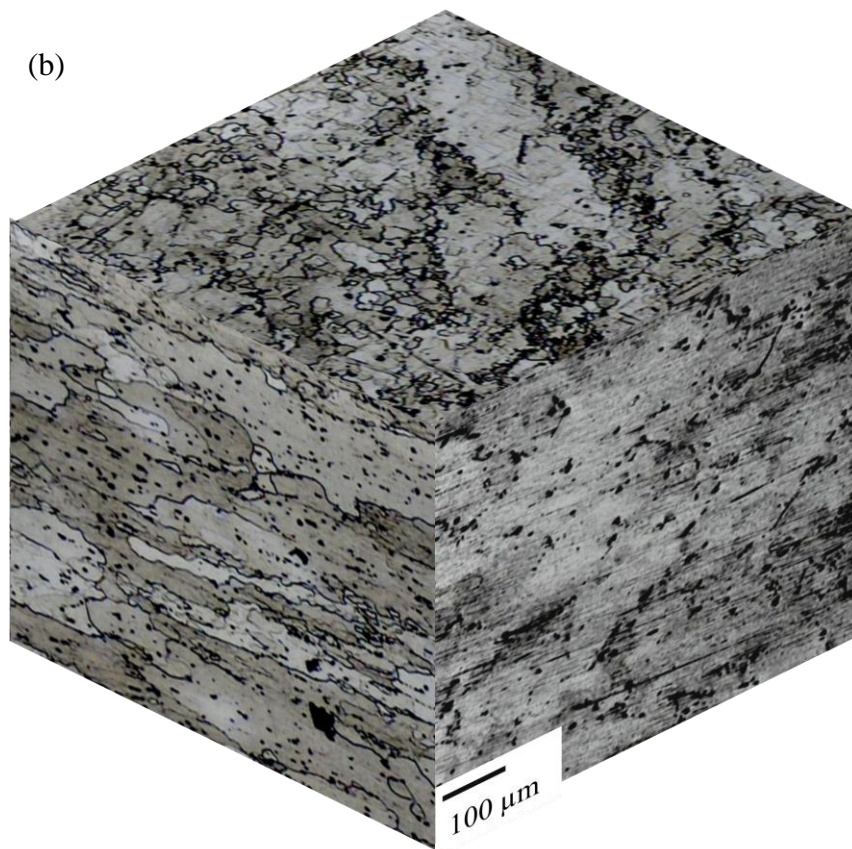


Fig.1 The aging curves of various T4/T6 heat treatments

(a)



(b)



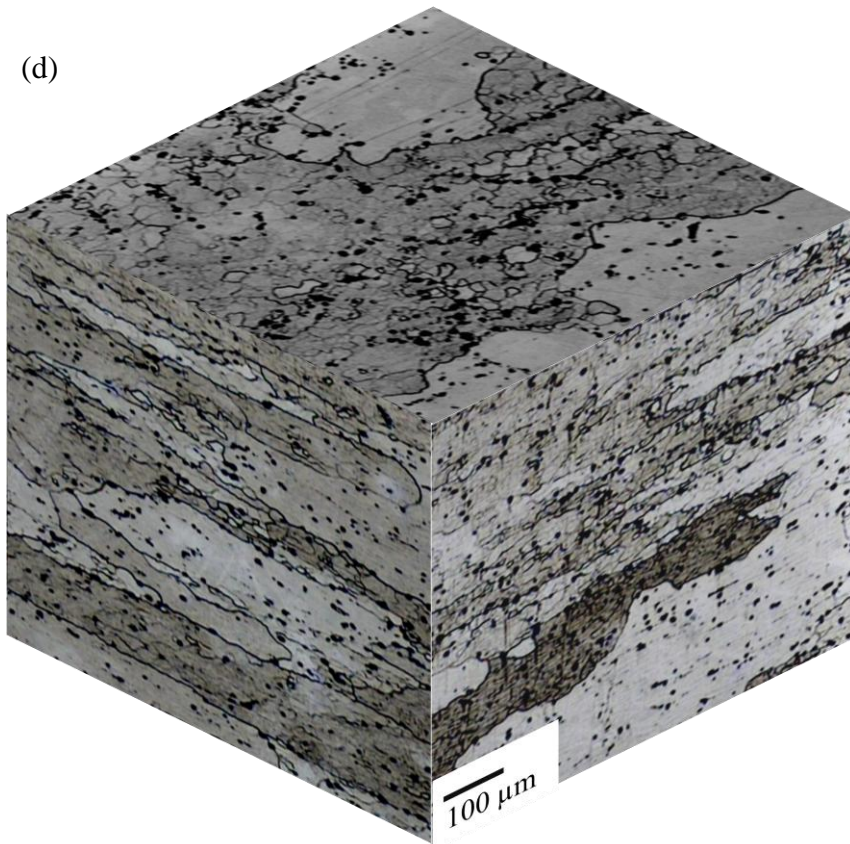
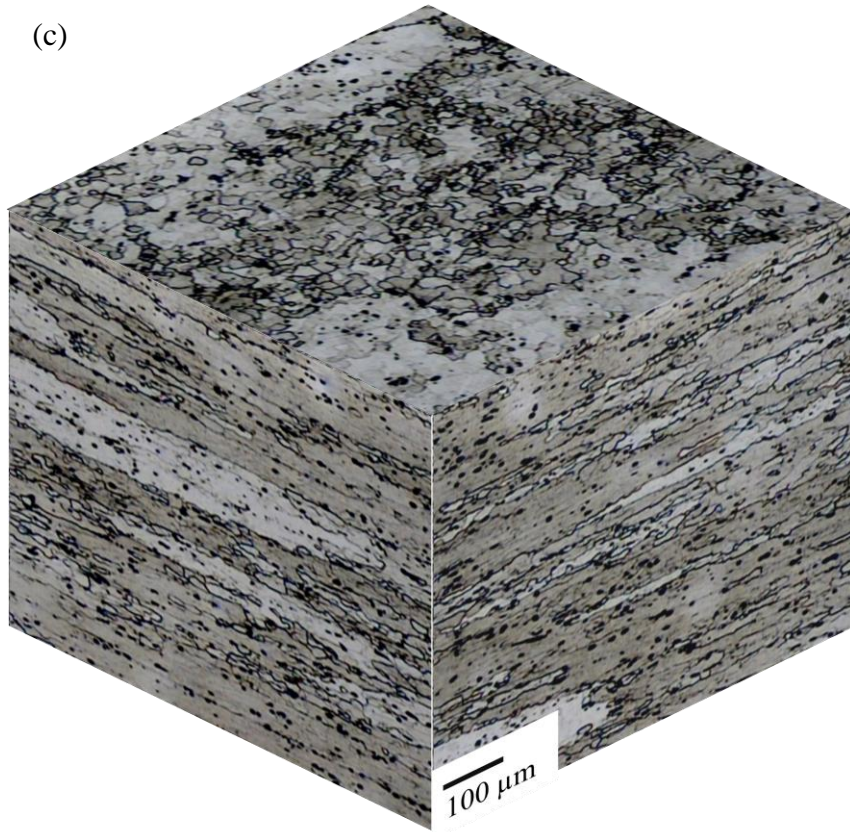


Fig. 2 The microstructure of various T4/T6 heat treatments
(a) As-received, (b) 530/175, (c) 550/175, (d) 570/175.

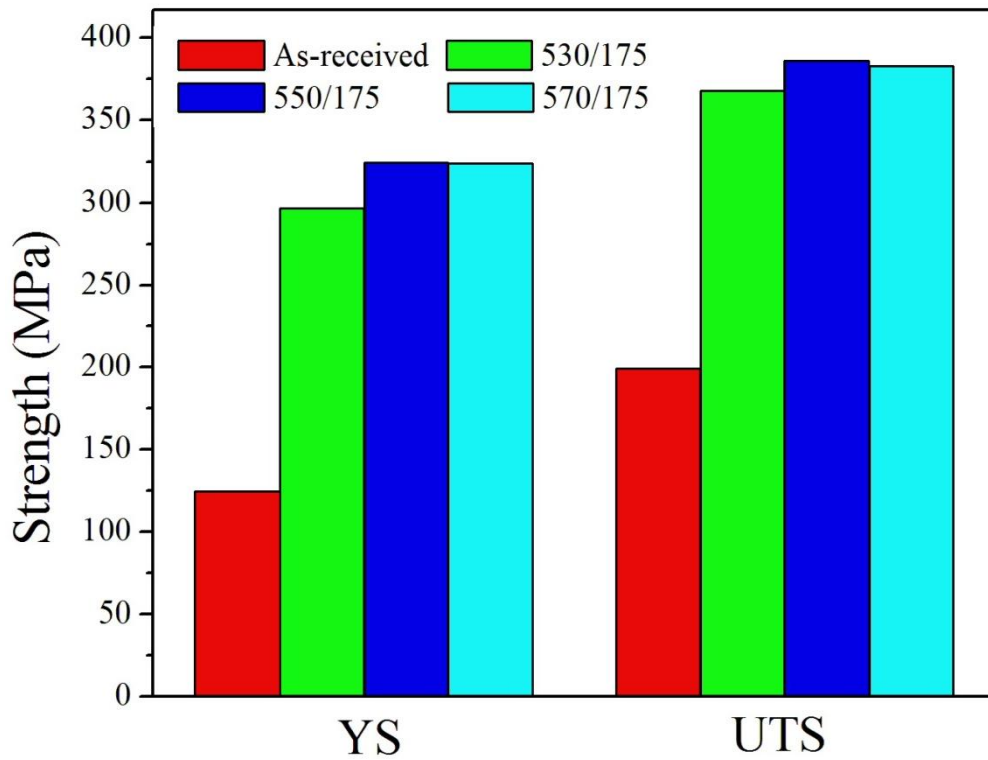


Fig. 3 The YS and UTS of various T4/T6 heat treatments

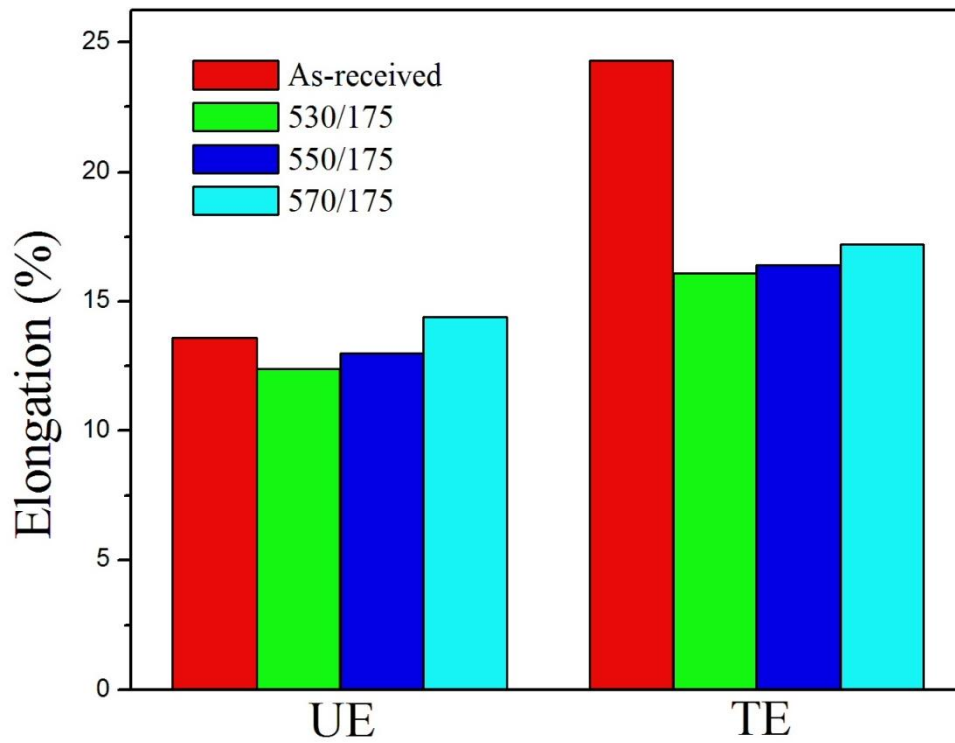


Fig. 4 The UE and TE of various T4/T6 heat treatments

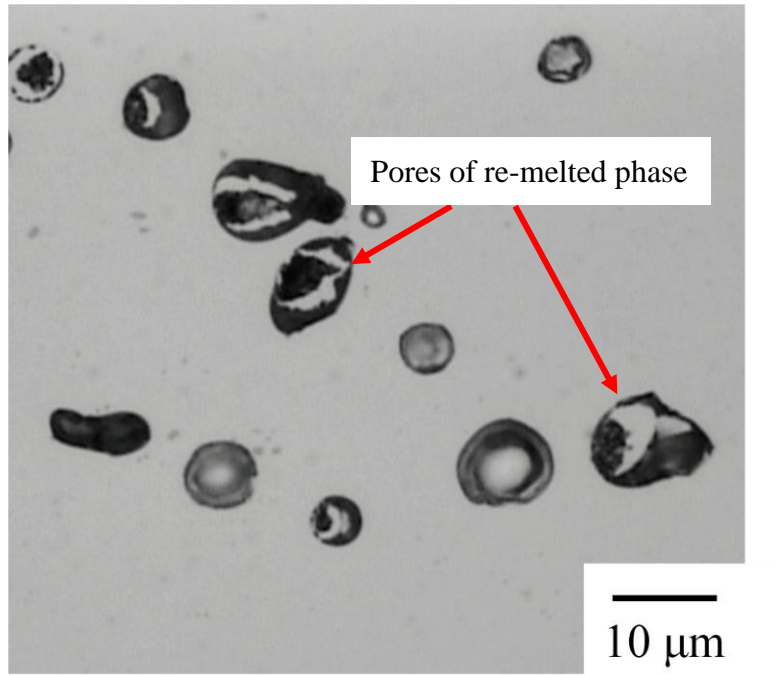


Fig. 5 Pores are formed in 570/175 by re-melted phase

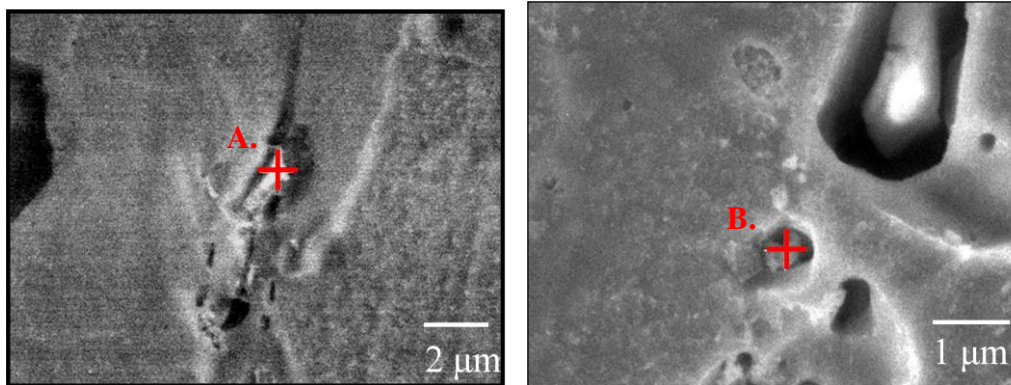


Fig. 6 The EDS of the As-received specimen