



防蝕工程學會

防蝕工程

期刊網址：<http://www.anticorr.org.tw>



10.6376/JCCE.201906\_33(2).0003

## 汽車引擎蓋掛耳熱處理淬裂研究 Investigation on quenching cracks for automobile hood hook in the heat treatment process

許曉弘\*<sup>1</sup>、林守杞<sup>1</sup>、王博正<sup>2</sup>

Hsiao-Hung Hsu\*<sup>1</sup>, Shou-Chi Lin<sup>1</sup>, Po-Chen Wang<sup>2</sup>

### 中文摘要

本研究針對 SAE 1541 鋼材生產汽車引擎蓋掛耳，在品管 UT 檢測後發現表面疑似熱處理淬火裂紋進行研究。由於淬裂發生的原因很多，遂進行破損分析探討其成因，並提出有效的改善建議。綜合破損分析結果可知，造成引擎蓋掛耳淬裂的原因主要有四點：1.冷卻速率過快，硬度值偏高，接近表面的拉張應力隨之偏高。2.表面(微)脫碳，使表面與次表面間的界面，因淬火相變態時的應力分布而形成不連續面。3.酸洗後表面品質不佳，缺口效應會產生應力集中現象。4.感應加熱造成過熱或升溫過快，導致晶粒成長及熱應力變化過大。根據以上的淬裂發生的機制，提供以下改善方案：1.高分子淬火液的濃度必須監控，控制淬火後的硬度在 HRC 55 左右，若硬度超過 HRC 56 以上，在局部應力集中位置，或有缺口效應的位置，容易產生淬裂。2.控制球化退火爐氣，儘量降低脫碳層厚度，尤其是避免全脫碳層發生。3.縮短酸洗時間，避免過度酸洗造成表面缺陷；折彎模具必須檢視，發現瑕疵必須修整，避免產生刮傷造成缺口效應。4.感應加熱的升溫速率過快，須調降樣品加熱速度，使樣品的升溫速率減緩，也減少過熱情形發生。後續經過以上相關製程的協調改善後，有效解決汽車引擎蓋掛耳的淬裂問題。

**關鍵詞：**SAE 1541、引擎蓋掛耳、淬裂、感應加熱。

### Abstract

SAE 1541 steel was used to produce the part of automobile hood hook. It was inspected that the surface cracks was suspected the quenching cracks in the heat treatment process through the UT examination. In this study, the

收到日期：108 年 12 月 02 日

修訂日期：109 年 11 月 12 日

接受日期：109 年 9 月 29 日

<sup>1</sup> 中國鋼鐵股份有限公司 綠能及系統整合研究發展處

<sup>1</sup> Green Energy & System Integration Research & Development Department, CSC

<sup>2</sup> 中國鋼鐵股份有限公司 冶金技術處

<sup>2</sup> Metallurgical Department, CSC

\*聯絡作者：175877@mail.csc.com.tw

damage analysis of the failure part was conducted to realize what caused the quenching cracks initiation and propose the effective improvement suggestions. According to the comprehensive damage analysis results, there are four reasons for the quench cracking: 1. The cooling speed is too fast when quenching so that the hardness value is too high and the tensile stress at the surface is much higher than the interior. 2. The micro decarburization in the surface makes the discontinuous stress distribution formed in the interface between the surface and the subsurface during the quenching phase transformation. 3. The surface quality is poor after pickling, and the stress concentration occurs due to the notch effect. 4. The induction heating is overheated or the temperature rises too fast, causing the grain growth and thermal stress change too much. According to the above quenching mechanism, the improvement scheme is provided: 1. The concentration of the polymer quenching liquid must be monitored, and the hardness after quenching is controlled at about HRC 55. If the hardness value exceeds HRC 56, there are quenching cracks formed where the local stress concentration is, or the notch effect. 2. Control the spheroidizing annealing furnace atmosphere to reduce the thickness of the decarburized layer, especially to avoid the occurrence of the full decarburization layer. 3. Shorten the pickling time to avoid excessive acid washing to cause surface defects. The mold must be inspected and repaired if found the defects on its surface to avoid scratching the hooks. 4. It is advisable to reduce the induction heating rate of the sample, slow down the heating rate of the hook, and avoids the occurrence of overheating. After the subsequent improvement of the above related processes, the problem of quenching cracks of the hood hook is effectively solved.

**Keywords:** SAE 1541; Hood hook; Quenching crack; Induction heat treatment.

## 1. 前言

汽車部件業者採用 SAE 1541 線材生產汽車引擎蓋掛耳，其生產製程為：線材→球化→酸洗→磷酸鹽皮膜→精抽→折彎加工→週波調質熱處理→電鍍→組裝。在品管檢驗中，熱處理後會進行染色滲透探傷抽檢，確認部件加工品質。某量產批次發現，在折彎處存在縱向裂紋，觀察開裂形貌疑似熱處理淬裂<sup>[1]</sup>，如圖 1 所示。本研究遂針對引擎蓋掛耳失效樣品，進行破損分析與正常件比對，以期能釐清產生開裂的原因，並提供改善措施協助客戶順利生產。

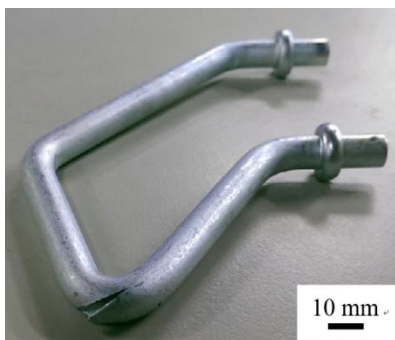


圖 1 引擎蓋掛耳破裂樣品外觀照。  
Figure 1 Appearance of cracked hood hook.

## 2. 實驗方法

此批 NG 品所採用的 SAE 1541 鋼種，其材料

化學成分及 DI 值如表 1 所示。另外，淬火性能與晶粒度有關，表 2 顯示此批鋼料的平均 ASTM 晶粒度級數<sup>[2]</sup>。由於淬裂的發生原因相當多，與前製程也有關聯，所以針對熱處理後的不良品與熱處理前的樣品做進一步分析。研究方法與步驟如下：

1. 針對引擎蓋掛耳 NG 件進行破損分析，如圖 2 所示。先進行樣品外觀檢查，再進行 8 個位置的金相觀察，以及微硬度的量測<sup>[3]</sup>。
2. 未熱處理的樣品外觀檢查，以及比照 NG 樣品的 8 個位置金相觀察。
3. 比對 NG 樣品與 OK 樣品的觀察結果，釐清引擎蓋掛耳發生開裂(淬裂)原因。
4. 提供改善建議協助客戶降低引擎蓋掛耳生產不良率。



圖 2 引擎蓋掛耳 NG 件金相取樣位置。  
Figure 2 Metallographic sampling position of NG hood hook.

表1 SAE 1541 鋼材化學成分及 DI 值。  
Table1 The chemical compositions and DI value of SAE 1541 steel.

DI 值	1.79	
Chemical composition (wt %)	C	0.41
	Si	0.20
	Mn	1.53
	P	0.014
	S	0.005

表2 SAE 1541 鋼材 ASTM 晶粒度級數<sup>[2]</sup>。  
Table2 ASTM grain size numbers of SAE 1541.

Grain size numbers	
Maximum	7
Minimum	6.5
Average	6.7
Standard deviation	0.25

### 3. 結果與討論

#### 3.1 不良 NG 樣品破損分析

利用立體顯微鏡進行不良 NG 樣品的外觀檢查，觀察兩個折彎處有無裂縫，如圖 3 所示。從外觀上可發現，在兩個折彎處，也就是圖 2 的位置 2、位置 3 與位置 6 的地方表面品質不佳，有許多微小孔洞，並有疑似淬裂縱向裂縫，如圖 3 紅色圈圈處。

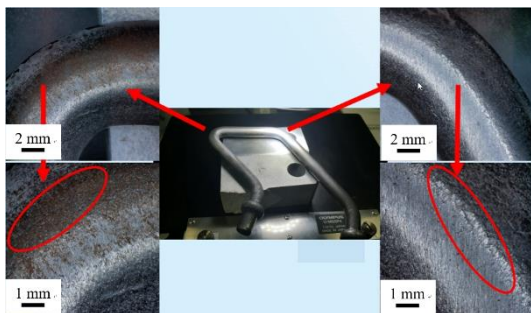


圖3 NG 樣品外觀檢查。  
Figure 3 Inspection for appearance of NG sample.

將樣品依不同部位裁切，製作 1~8 組金相樣品，圖 4 為 NG 樣品右側折彎大 R 處拋光後未腐

蝕之橫截面觀察，裂縫呈 zigzag 狀，為典型淬火過程之淬裂形態<sup>[4]</sup>，裂縫附近並無明顯夾雜物或不純物，表示鋼材表面內部清淨度良好，可先排除鋼材內部介在物引起的淬裂因素。

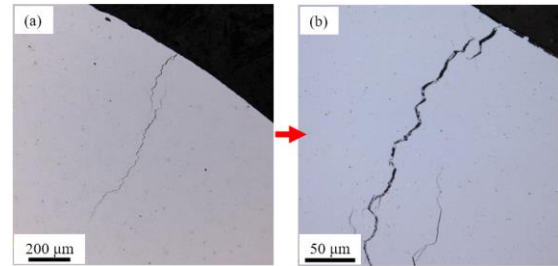


圖4 NG 樣品右側大 R 處拋光後橫截面觀察。  
Figure 4 Observations of the polished cross-section at right large R area of NG sample.

拋光後的樣品施以 Nital 溶液侵蝕，觀察右側大 R 折彎轉角處 4 個位置的橫截金相，如圖 5 所示。位置 2 有 2 處淬裂裂縫，深度約 0.3 mm 與 1.4 mm 位置 3 有 1 處淬裂裂縫，深度約 1.4 mm，此裂縫與位置 2 深度 1.4 mm 的裂縫應是同一條裂縫，淬裂時從位置 2 橫跨到位置 3。圖 6 為 NG 樣品左側折彎小 R 處的橫截面金相圖，在左邊折彎轉角處並無觀察到裂縫，但掛耳的表面品質不佳有孔洞，推測應是酸洗過度造成。

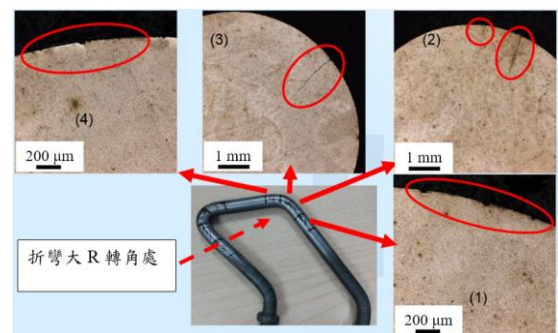


圖5 NG 樣品右側大 R 處的橫截面金相觀察。  
Figure 5 Metallographic observations of the cross sections at the large R area of NG sample.

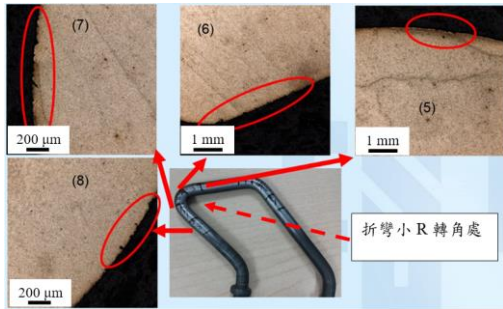


圖 6 NG 樣品左側小 R 處的橫截面金相觀察。  
Figure 6 Metallographic observations of the cross sections at the small R area of NG sample.

放大觀察圖 5 位置 2 左側的裂縫(深度約 0.3 mm)側面金相,如圖 7 所示。鋼材表面並未裂穿,淬裂裂縫起始於次表面處約 30 μm~50 μm 處,進而向材料內部傳播。從圖 7(b)及圖 8 橫截面(a)D/4 處與(b)D/2 處,推估麻田散鐵的晶粒大小約為 50 μm,以 ASTM E112-2013 測定平均晶粒度的標準試驗方法的「表 4:用於均勻任意取向的等軸晶粒計算的晶粒度關係」<sup>[2]</sup>,估算 ASTM 晶粒度級數約為 5.5~6.0 級,與表 2 SAE 1541 的平均晶粒度級數 6.7 比較,鋼材經過加工及週波淬火熱處理後,晶粒大小略為增加 5~10 μm。

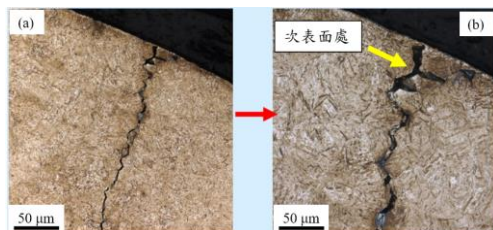


圖 7 NG 樣品位置 2 左側裂縫側面金相觀察。  
Figure 7 Metallographic observations of the left crack at position 2 of NG sample.

常見的週波加熱形式為表面硬化淬火,對於本研究樣品加熱的過程,很容易因瞬間的加熱控制不當,造成局部材料瞬間過熱,部分材料組織在沃斯田鐵化時晶粒異常成長、粗大化<sup>[5,6]</sup>。可見週波感應加熱的方式,可能會因快速加熱及過熱兩種原因,使沃斯田鐵晶粒粗大化,雖有提升硬

化能的優勢,卻增加晶粒粗大淬裂的可能性<sup>[7]</sup>。

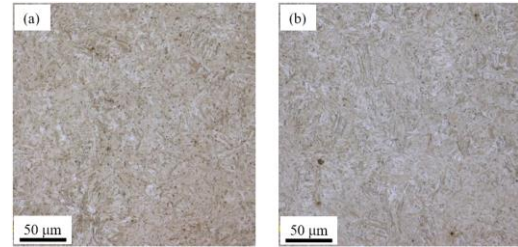


圖 8 NG 樣品橫截面(a)D/4 處與(b)D/2 處金相觀察。  
Figure 8 Metallographic observations at (a) D/4 and (b) D/2 cross sections of NG sample.

圖 9 為位置 2 右側的裂縫(深度約 1.4 mm)側面金相,圖 9(a)可觀察到表面有缺口效應及脫碳層<sup>[3]</sup>,使得淬裂從應力集中點產生,兩者綜合作用造成淬裂開口比圖 7(b)更大,進而沿著原先沃斯田鐵晶界像鋼材內部傳播,如圖 9(b)所示。所以,如果表面品質不佳有缺陷,如較尖銳的刮傷或酸洗過度坑洞,缺口效應(Notch effect)所產生的應力集中點,也可能是淬裂發生的裂縫起始位置<sup>[8,9]</sup>。另外,表面脫碳是一種有害的缺陷<sup>[10]</sup>,它不僅使零件機械性能如硬度、強度、耐磨性和疲勞強度下降。淬火過程中,由於表面脫碳鋼材組織拔熱較快,先形成碳點較低的麻田散鐵,它的硬度及強度也較低,而次表面為脫碳的鋼材組織較慢變態,形成較硬且強度較高的麻田散鐵,因為上述麻田散鐵的變態時間不一,加上脫碳層中殘存較大拉應力,導致淬火過程中有可能沿原先沃斯田鐵晶界產生裂縫。

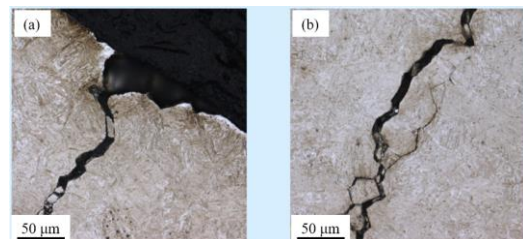


圖 9 NG 樣品位置 2 右側裂縫側面金相觀察。  
Figure 9 Metallographic observations of the right crack at position 2 of NG sample.

圖 10 為圖 6 位置 6 與位置 7 的金相放大圖，圖 10(a)表面品質不佳有孔洞，部分泛白區域可能有微脫碳的現象，圖 10(b)部分表面也有微裂縫存在，推測因其位置不在折彎處，加工殘留應力較小，或因其不在主要線圈加熱區，熱應力的變化較緩和，造成淬裂裂縫未繼續向內部傳播。

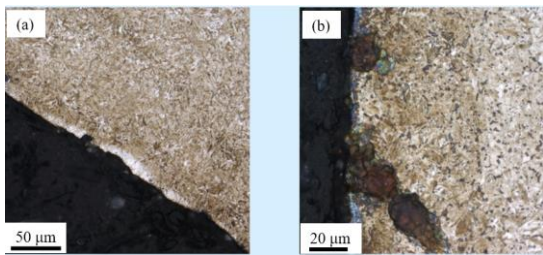


圖 10 NG 樣品(a)位置 6 與(b)位置 7 金相觀察。  
Figure 10 Metallographic observations at position (a) 6 and (b) 7 of NG samples.

以 200 克荷重量測以上金相樣品的微硬度值 HV0.2<sup>[3]</sup>，圖 11 為圖 5 與圖 6 共 8 個位置的微硬度測量值，橫軸的 1 與 6 為引擎蓋掛耳橫截面的近表面處，2 與 5 為橫截面的 D/4 位置，3 與 6 為橫截面的心部 D/2 位置，從橫截面的硬度分布來看，表面微硬度值略高於心部，符合鋼材硬化能的表現。但引擎蓋掛耳橫截面的整體微硬度值偏高，約在 HV 600~HV 770 之間，可換算為 HRC 值，約 HRC 55~HRC 63 的範圍。實際上若以 HRC 硬度機測量橫截面的硬度值，表面約 HRC 56.65，心部 HRC 55.55。此產品放行標準為心部大於 HRC 52 而此 NG 樣品回火後硬度值仍偏高太多。另外，統計 NG 樣品右側大 R 折彎處位置 2、位置 3 與位置 4 的微硬度值，其平均微硬度值約 HV 690，而 NG 樣品左側小 R 折彎處微硬度值，其平均微硬度值約 HV 675。此微硬度值的差異應為淬火過程中，淬火液由上而下可均勻噴淋在大 R 折彎處，但左側小 R 折彎處被上方橫桿所遮蔽，拔熱速度較慢，也因此右側大 R 折彎處微硬度值較高，也更容易開裂，與實際現場 NG 樣品發生淬

裂的位置一致。

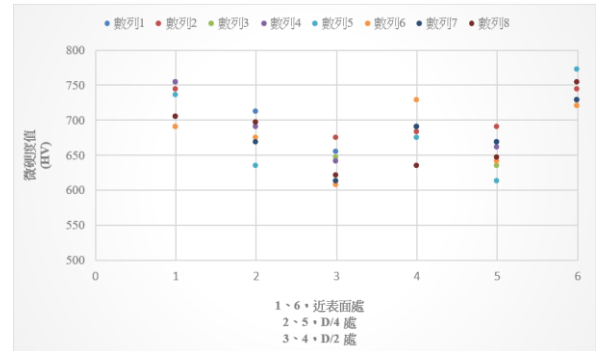


圖 11 NG 樣品 8 個位置的微硬度測量值。  
Figure 11 The measurements for Micro-hardness at 8 positions of NG sample.

### 3.2 未熱處理樣品比對分析

為釐清引擎蓋掛耳表面品質不良及脫碳的原因，分析抽線折彎後的未熱處理樣品。從外觀檢查發現，未熱處理樣品在折彎處有刮痕或微裂，如圖 12 中紅色圈圈所示。由於缺陷只發生在局部折彎處，並無沿伸至其他部位，所以刮傷或微裂應該是折彎的模具造成的，而不是盤元線材的線縫缺陷，或是抽線時眼模造成的刮傷。

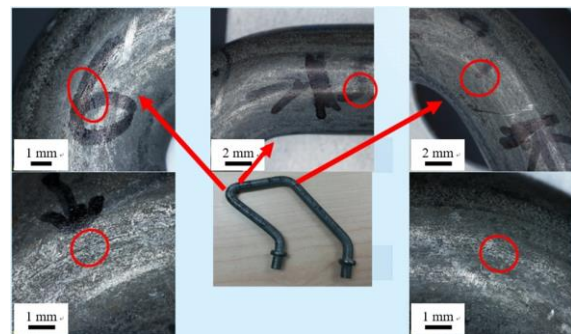


圖 12 未熱處理樣品外觀檢查。  
Figure 12 Inspection for appearance for unheated treatment sample.

如同 NG 樣品一樣，未熱處理樣品裁切 8 個位置做橫截面金相樣品，圖 13 為未熱處理樣品右側大 R 折彎處，位置 3 與位置 4 的橫截面金相圖，可觀察到許多較圓滑的坑洞，此為過度酸洗所造

成的，因為掛耳前段製程經過二球二抽，球化退火後皆有酸洗及磷酸鹽皮膜處理。另外有少數較尖銳的缺角，這是折彎模具所造成的刮傷。

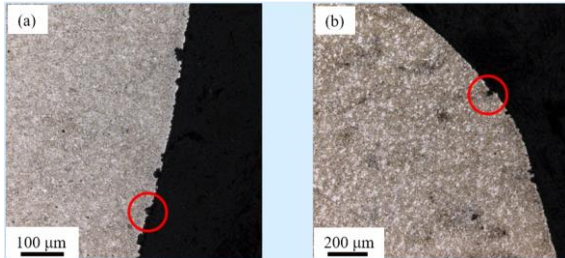


圖 13 未熱處理樣品(a)位置 3 與(b)位置 4 橫截面金相。

Figure 13 Metallographic observations of the cross sections at position (a) 3 and (b) 4 for unheated treatment sample.

圖 14 為未熱處理樣品右側折彎(a)位置 1 與 (b)位置 2 的橫截面金相，過度酸洗可造成將近 20 μm 深的坑洞缺陷，如圖 14(a)所示，或是寬 75 μm 的坑洞缺陷，如圖 14(b)所示。同時，表面有將近 20 μm ~ 30 μm 的較粗大的肥粒鐵脫碳層，此與圖 7 中 NG 樣品在次表面引發淬裂的位置不謀而合，證明了鋼材在淬火變態時，因為表面及次表面的麻田散鐵發生變態的時間與膨脹量的不同，造成脫碳層與底材(未脫碳)的交界處產生拉應力，引發鋼材淬裂。

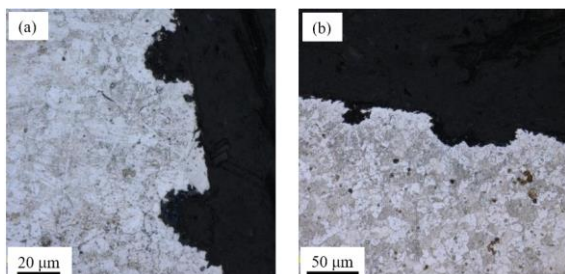


圖 14 未熱處理樣品 (a)位置 1 與(b)位置 2 橫截面金相。

Figure 14 Metallographic observations of the cross sections at position (a) 1 and (b) 2 for unheated treatment sample.

### 3.3 客戶改善方案

綜合以上分析結果，本案例淬裂的因素有：

- 一. 冷卻速率過快，接近表面的硬度值偏高，造成拉張應力隨之偏高。
- 二. 表面(微)脫碳，使表面與次表面的界面，在相變態時的應力分布形成不連續面。
- 三. 表面品質不佳，缺口效應會產生應力集中現象。
- 四. 週波加熱過熱或升溫過快，造成晶粒成長及熱應力變化過大。

根據以上的淬裂發生機制，提供客戶以下建議改善方案：

- 一. 高分子淬火液的濃度必須監控，應控制在淬火後的硬度在 HRC 55 左右，若硬度超過 HRC 56 以上，在局部應力集中位置，或有缺口效應的位置，容易產生淬裂。
- 二. 球化退火的爐氛需控制，儘量降低脫碳層厚度，尤其是避免全脫碳層發生。
- 三. 酸洗必須縮短時間，避免過度酸洗造成表面缺陷；折彎模具必須檢視，發現瑕疵必須修整，避免產生刮傷造成缺口效應。
- 四. 週波加熱的升溫速率過快，宜調降樣品加熱速度，使樣品的升溫速率減緩，也減少過熱情形發生。
- 五. 以 SAE 1541 鋼材而言，淬火全硬化的表面硬度值約在 HRC 52 至 HRC 58 之間，而本產品設計圖面要求心部硬度須達 HRC 52 以上，造成回火熱處理時的溫度操作範圍過窄。

## 4. 結論

針對汽車引擎蓋掛耳熱處理淬裂的研究結果顯示：

- 一. 經過以上製程改善後已完成一個批次的量產，從熱處理後的染色滲透探傷檢驗，並未發現有淬裂的現象，符合研究所提的破損原因及改善方案；

- 二. 掛耳的淬裂主要原因為冷速過快所造成，使用環保型的高分子淬火液，在濃度的控制上必須注意。此外，加工後的工件表面帶有油汙，確實會造成高分子濃度不均及改變，影響淬火性能的穩定性，建議在熱處理前增設清洗製程；
- 三. 表面脫碳及表面品質不佳都會放大淬裂的機率，熱處理前的每一製程品質要求往往被忽略，造成不良因子累積到最終熱處理製程後放大，發生嚴重的品質問題；
- 四. 車廠對產品所需性能與熱處理技術的搭配不甚清楚，引擎蓋掛耳的性能需求應為防止引擎蓋鬆脫所需的抗拉強度，以及抵抗掛耳與對手件接觸磨耗的表面硬度。圖面設計除要求心部硬度外，應可增加規範表面硬度，且以採用的SAE 1541 鋼種而言，要求的心部硬度過高，熱處理操作範圍過窄。

## 參考文獻

- [1] "Steel heat treatment failures due to quenching.", Canale, L. C. F., and G. E. Totten., Failure Analysis of Heat Treated Components, 1st ed.; Canale, LCF, Mesquita, RA, Totten, GE, Eds (2008), pp.255-284.
- [2] Standard Test Methods for Determining Average Grain Size, ASTM E112, ASTM Standards, 2010.
- [3] ASTM E92 Test Method for Vickers Hardness of Metallic Materials, Annual Book of ASTM Standards, Vol 03.01.
- [4] "The Occurrence of Quenching Cracks in High-Carbon Tool Steel Depending on The Austenitizing Temperature.", Sanja Šolića, Bojan Podgornika, Vojteh Leskovšek, Engineering Failure Analysis, Volume 92, (2018), pp.140-148.
- [5] "The mechanism and the rate of formation of austenite from ferrite-cementite aggregates.", Roberts, G. A., and R. F. Mehl., Transactions of the ASM 31 (1943) , pp.613-650.
- [6] ASM International, in: Heat treating, vol. 4 (ASM international, Materials Park OH, USA, 1991)
- [7] "The effect of austenite grain size on microcracking in martensite of an Fe-1.22 C alloy.", Brobst, R. P., and George Krauss., Metallurgical Transactions 5.2 (1974), pp.457-462.
- [8] "Sharp crack and blunt notch toughness behavior of quenched and tempered AISI 4340 steel.", Datta, K. P., Materials Science and Engineering 51.2 (1981), pp.241-252.
- [9] "Effect of tempering temperature on notch sensitivity of quenched steels.", Ustilovskii, S. Ya, N. M. Rudnitskii, and V. Kh Ambartsumyan., Strength of Materials 7.9 (1975) , pp.1144-1146.
- [10] Samuels, Leonard Ernest, in: Light microscopy of carbon steels (ASM international, OH, USA, 1999) p. 373.