

模具材料選用以及殘留應力檢測技術來延長模具壽命

出處：2018.08 型技術雜誌(P018-023)

—九洲工業大學 日原政彥

*Masahiko Hihara :客員教授

E-mail : ma-hihara@mopera.net

模具是產品量產和零件製造很重要的“工具”，模具品質穩定和壽命提高，會促進操作過程的穩定性以及產品品質的提升。

圖 1 顯示模具材料中工具鋼的分類。模具材料包含合金工具鋼、機械構造用鋼、不銹鋼、時效硬化鋼和析出硬化鋼，非鐵金屬系材料(鋁合金、鋅合金、銅(錫)系合金)和超硬材料。

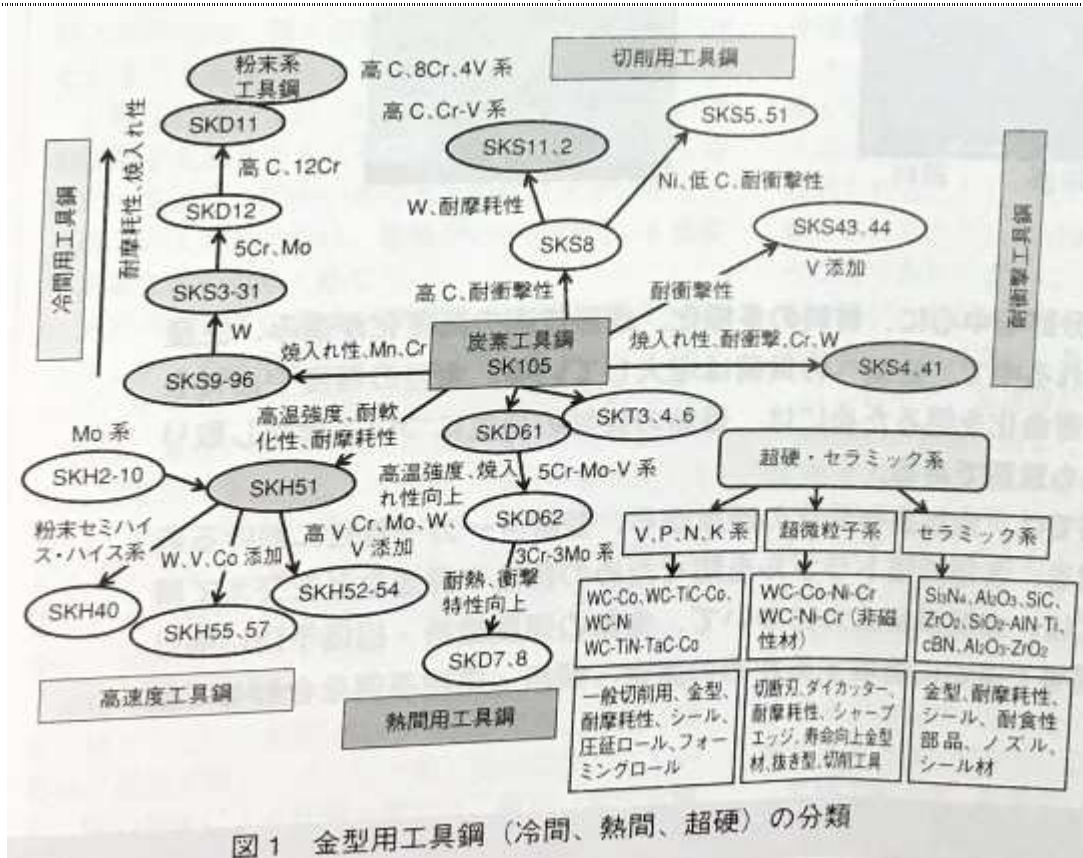


図 1 金型用工具鋼（冷間、熱間、超硬）の分類

近年來，隨著積層製造(AM)技術的發展，愈來愈多 3DP 積層造形的試作品、模具和零件。

工具鋼（特殊鋼）採用通常熔煉法和特殊熔煉法（重熔法：ESR、VAR、P-ESR，也稱為雙/三重熔煉），經過鍛造、壓延、熱處理、機械加工、缺陷檢查等工程才提供給市場。

模具材料所需的特性取決於所使用的模具，加工方法/精度和生產方法，但①耐磨耗性、②抗裂性、③耐熱性、④切削性、⑤耐熱應力/耐疲勞性、⑥高韌性/延展性、⑦機械加工性、⑧耐腐蝕性、⑨鏡面性、⑩褶皺加工性、⑪焊接性等。

本文中描述用於各種模具的工具鋼的趨勢，主要是用於沖壓成形的冷作工具鋼以及壓鑄、鍛造用的熱作工具鋼。另外，關於模具品質管理中的評估和壽命預測的方法，介紹 X-Ray 殘留應力檢測方法（非破壞性檢測方法之一）應用於模具的實例。

冷作工具鋼

1.冷作工具鋼的趨勢

冷作工具鋼主要用於需要耐磨耗性的 Press 成型、Forming press、擠型、Body Press 用、Lead Frame、Stamping、Fine blanking（精沖）、用於加工和切削工具、生產高精度產品的高效率量產工具，使用熔煉材料、粉末材料（工具鋼、高速鋼、超硬）等。

冷作工具鋼是將鉻(Cr)、釩(V)、鎢(W)等碳化物形成元素添加到高碳材料中，碳化物析出硬化處理來提高耐磨耗性。模具材料如果只增加硬度，韌性降低，這會導致破損或裂痕，調整材料中碳化物的成分和多寡、減少非金屬夾雜物、改善清潔度等，可增加材料的韌性。

典型的鋼種有碳素工具鋼（SK105，SKS3）、合金工具鋼（高 C-高 Cr-Mo 系的 SKD11、8%Cr 系）、高速鋼（Matrix high-speed steel）、粉末工具鋼（SKH51，SKH40）和 Frame 硬化鋼（火焰硬化鋼）。

此外，為了改善冷作工具鋼材料的偏析以及提高機械性能，提出交叉滾軋法，與普通軋延方法生產的鋼種性能相比，交叉滾軋法可製造具有改進金屬組織和材料特性（偏析、衝擊值、機械性能、變形/尺寸變化）的鋼種。

高強度鋼(Matrix 系)的 DCMX (大同特殊鋼製)，與 SKD 11 常規材料(冷間用工具鋼)的特性相比，具有高硬度、高韌性、提高被削性以及熱處理的尺寸變化很小的特性。此外，KD11S、KD11 MAX、KRCX (日本高周波鋼業製)的材料特性中，韌性、被削性和熱處理變形均得到改善。NOGA (日本高周波鋼業製)是汽車用鋼板的高強度化，為了模具穩定性而開發的一種冷作工具鋼，其鑽孔加工性比 SKD11 具有更高的穩定性，提高了表面處理的皮膜和材料的穩定性，並減少熱處理後的尺寸變化。

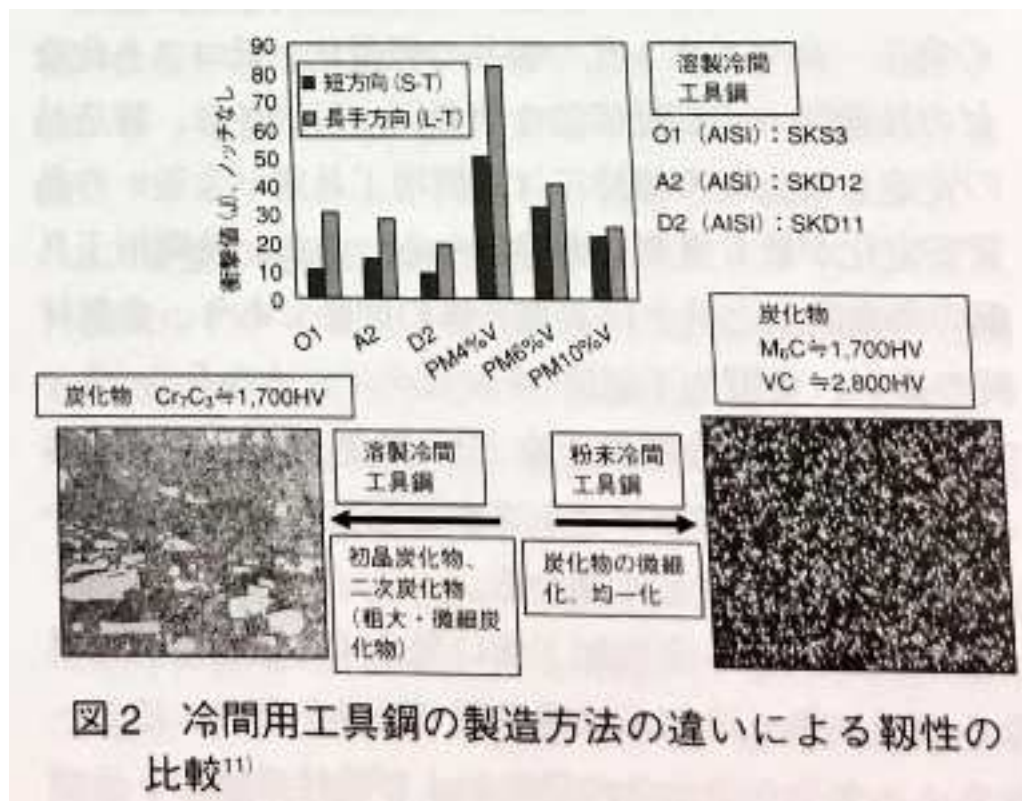
高韌性冷作工具鋼 SLD-i (日立金屬製)的成分與 SKD11 相近，改善鋼種的耐磨耗性，ARK1 (10 % Cr 系、日立金屬製)具有非常良好的切削性，並具有與常規 SKS 3 鋼種相同的快削性。

2.粉末冷作工具鋼

汽車用車身鋼板及結構件，其 980~ 1,700 MPa 級的高張力及超高張力鋼板的使用量年年增加，用於車身、方向盤、裝飾、座椅等部件。用於沖壓這些鋼板的沖頭和模具，隨著工件強度的增加，施加到模具表面的負載和應力很大，為了減少成形品的回彈，開發具有耐磨耗性高的品質特性鋼種。

提高韌性和耐磨耗性 SPMR8 (粉末高速鋼、山陽特殊製鋼製)是適用於冷軋模具、冷鍛、粉末成型和塑料螺絲等的材料類型。

圖 2 顯示冷作工具鋼的製造方法不同其韌性的比較。粉末高速鋼(PM 材)材料中均勻分布具有不同硬度的微細碳化物(Cr7C3、M6C、VC)，與熔鋼 O1 (AISI 標準，JIS：SKS)、A2 (AISI 標準，JIS：SKD12)、D2 (AISI 標準，JIS：SKD11) 相比，衝擊值（韌性）高於熔煉材料，比較材料的滾軋方向與垂直方向的衝擊值，粉末高速鋼是具高機能性的鋼種。



近年來，超硬合金材料的發展，隨著超細粉末燒結技術的進步，開發了高韌性鋼種，它使用在冷作用、高機能性塑料成型、熱作用等模具以及頂針之類的零件。這些材料的特性，除了有優異的低溫硬度和高溫硬度，並具有高強度和穩定的物理特性。

順便一提，WC-TiC-Co 合金、WC-TaC-Co 合金、WC-TiC-TaC-Co 合金用作抗氧化材料。以 Ni 作為粘結相的超硬合金中，當 Ni 中 W 的溶解量高於一定濃度時發生非磁性，添加 Cr 提高耐腐蝕性。近年來，WC 粒子的超微粒子及超超微粒子化，開發出具有高硬度、高強度、高韌性的合金，並且已應用在模具及其部件。

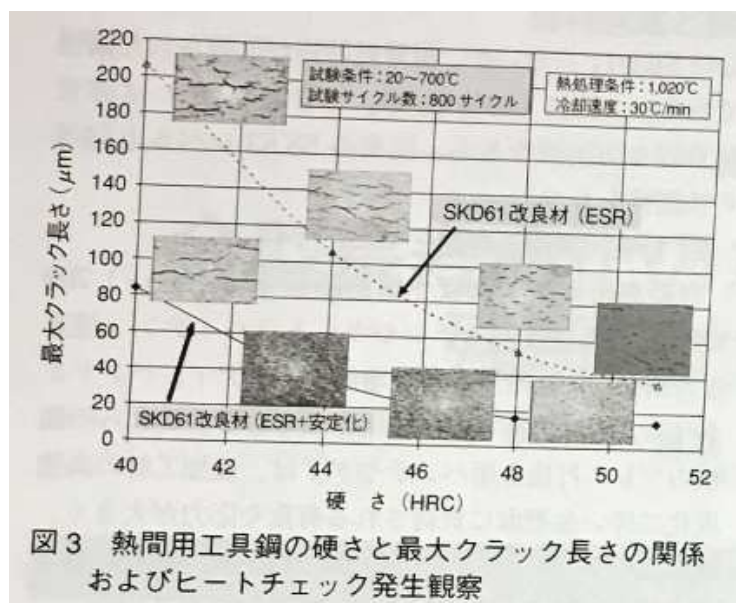
熱作工具鋼

熱作工具鋼用於壓鑄、鍛造、擠出、玻璃成型，具有高溫強度、軟化特性、韌性、耐熱疲勞等性能，因為使用在高溫環境下，模具壽命的穩定更形重要。壓鑄伴隨著技術和經濟因素，壓鑄機的高壓、高循環，為了產品輕量化和低成本化，並且保持鑄件的穩定生產，熱工具鋼（模具）的品質穩定是最重要的關鍵。順便提及，改善和減少熱作工具鋼的壽命是一體兩面的，包括模具材料的選擇、模具加工部位（模穴，水冷卻孔等）及工法（直接雕刻、放電加工等）、熱處理、表面處理和焊接修復，以及模具保養是否正確執行，其穩定性會有很大差異。

每種加工法在模具加工面上產生的損傷形態各異，因加熱—冷卻操作過程的熱負載，而產生熱疲勞、裂紋及脆性斷裂的問題。在壓鑄的環境下，使用熔融金屬，因模具表面和熔融金屬之間的反應，同時發生損壞情形（熔損、燒付、磨耗）。

熱作工具鋼中鍛打用的工具鋼（QT41-HARMOTEX、山陽特殊製鋼製造），微結構組織的碳化物微細化，與傳統材料（SKT4）相比，大型材料的淬火性、韌性和軟化性能得到改善。

圖3是熱作工具鋼(SKD61改良材)的硬度和最大裂紋長度的關係，並且觀察熱疲勞發生狀態。近年工具鋼的製造過程中，降低雜質濃度和非金屬介質來改善韌性、增加硬度，以及提高了耐熱疲勞性。因此，提出了改進熱工具鋼的導熱性和韌性的鋼種。



殘留應力檢測技術在模具上的應用

1. 金屬材料的殘留應力檢測方法

殘留應力是存在於模具或結構件內部的應力，外觀看不見的應力。模具中殘留應力檢測是指熱處理後的相變應力和熱應力、焊接部位的內應力、氮化處理和噴砂造成的壓縮應力，用在品質管理的手法，如結構材料損壞、壽命預測、健全性管理方法、改善機械加工精度等。

殘餘應力檢測方法包括（1）破壞檢測法，（2）非破壞性檢測法和（3）材料物理性質變化檢測法

破壞檢測法主要包括①切割法（應變計法，將應變計連接到測量位置，逐次切割部件並測量切割過程中應力釋放現象），②鑽孔法（在鑽孔周圍貼上應變計來量取鑽至不同深度之表面應變進而推估殘留應力），③DHD 方法（Deep Hole Drilling）和④電子斑點干涉術（ESPI: Electronic Speckle Pattern Interferometry）。

非破壞性檢測法有①X 光繞射法②同步輻射法③中子衍射法，一般來說，較多使用 X 光繞射法進行殘留應力檢測。

物理性質值變化檢測法包括（1）共振張力測量法，（2）磁歪法，（3）巴克豪森噪音法，（4）聲彈性法(Acoustoelastic method)，以及（5）通過測量模型的光彈性法。因版面有限，省略介紹每種測量方法的細節，下面只介紹 X 光殘留應力檢測法。

2. X 光殘留應力檢測法

X 光殘留應力檢測法即為 X 光繞射原理量測晶格變形。受到 X 光照射時，晶體中原子平面間隔與在該平面產生最強反射的入射角之間的關係，稱為布拉格定律，當入射光之情況滿足此定律時，即視為布拉格條件(Bragg 條件)。基準晶格面間距 d_0 和應力負載下的晶格面間距的差異， Δd ($d - d_0$)，基於胡克定律 ($\sigma = E \varepsilon$ 、 ε 是晶格應變) 是求殘留應力的方法

布拉格 (Bragg) 的條件式如下所示：

$$n\lambda = 2d \sin\theta$$

λ ：測定 X 線の波長(Å)、 n ：回折面次数、 $\sin\theta$ ：回折面角度

晶格面間距和晶格常數之間的關係式如下所示：

$$1/d^2 = (h^2 + k^2 + l^2)/a^2$$

a ：晶格常數($\text{\AA}$)、 d ：晶格面間距($\text{\AA}$)、 $h+k+l$ ：各格子的回折面(面指數)

X 光殘留應力檢測與一般的晶體結構和成分分析不同，並測量 X 光入射角 (ψ 角) 的變化，所得到各 ψ 入射角(0° 、 15° 、 30° 、 45°) 回折線角度 (2θ 峰值角)， 2θ - $\sin^2\psi$ 法和 ψ 角常規法的檢測方法 (圖 4)。

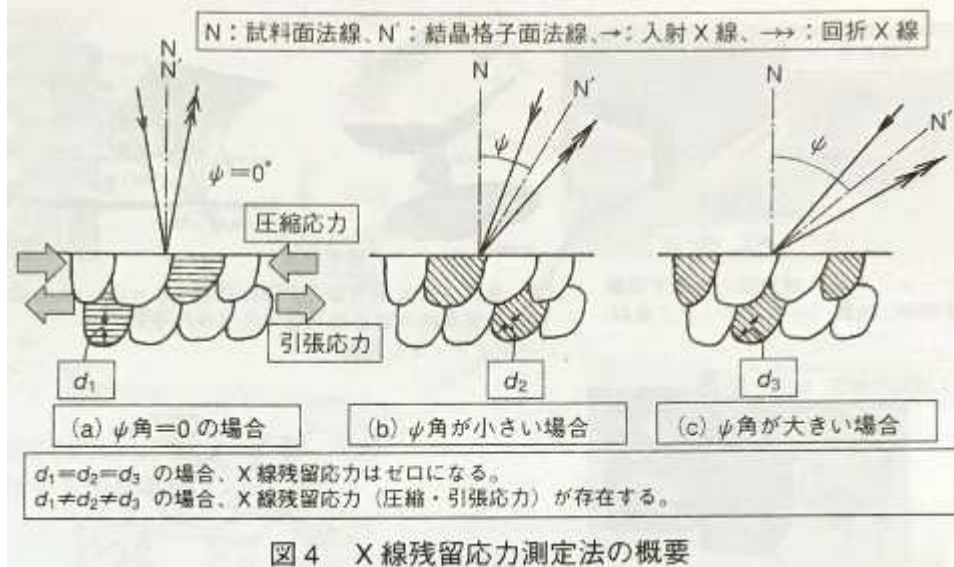


図 4 X 線残留応力測定法の概要

X 光殘留應力檢測法公式如下所示：

$$\sigma_x = -(E \cdot \cot \theta / 2(1+\nu) \cdot \delta 2\theta / \delta \sin^2 \psi)$$

$$= -K \cdot M$$

K 和 M 如下所示：

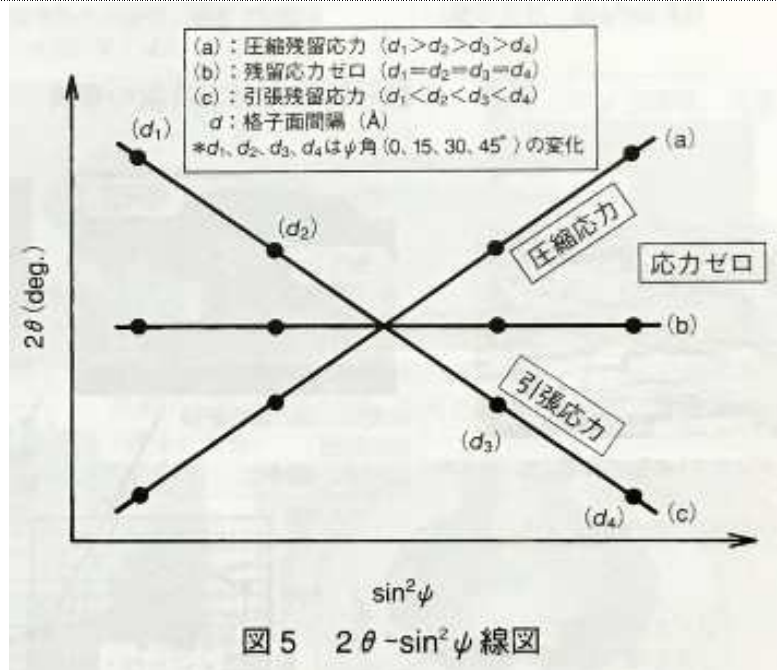
$$K = \delta 2\theta / \delta \sin^2 \psi (\text{deg.})$$

$$M = -(E / 2 (1 + \nu)) \cdot (\cot \theta \cdot \pi / 180)$$

$$(\text{MPa/deg.} \cdot 9.8 \text{Xkgf/mm}^2/\text{deg.})$$

K 表示應力常數，M 是各 ϕ 角獲得的回折線（ $\alpha \text{Fe} (211)$ 面）的 2θ 值和 ϕ 角，相對於來自 $2\theta - \sin^2 \phi$ 線圖中求得直線的斜率(圖 5)。

如圖 5 所示，從此關係中獲得各 ϕ 角相對於 2θ 角的變化，線性關係成立。由於每條線的斜率，(-) 的斜率是拉伸應力，(+) 的斜率是壓縮應力。這是因為(-)項與殘餘應力計算公式相關聯，直線的斜率反轉。晶格面間距(d)隨拉伸應力增加，隨壓縮應力而減小。



各製造商已提出了各種類型 X 光殘留應力測量裝置（圖 6），這裡除了 $2\theta - \sin^2 \phi$ 法、 ϕ 常規法(cos ϕ 法)和一般 X 光繞射裝置外，還附加了附屬裝置的示例。



図 6 X 線残留応力測定装置の概要 (一部)

3. 模具の残留応力検測案例

目前壓鑄模具的 X 光檢測殘留應力的報告很少。近年來，CAE 的進步使得諸如溫度、熱應力和變形的分析技術隨著發展，並且用在企業內事前評估的方法。

[註：本章節顯示的殘留應力檢測值，是由測量公式表示的應力係數 K 為 297.2 MPa/deg. (-30.33 kgf/mm²/deg.) 是計算的結果。討論應力的絕對值時，從 X 光殘留應力檢測得到的係數以及從機械應力得到的係數顯示不同的值，因此在處理數值時應小心]

圖 7 顯示模具的放電加工表面、噴砂處理表面、無處理狀態等試驗的週期次數和殘留應力分佈曲線。拉伸殘留應力存在於放電加工表面的表面上並隨著測試週期的增加而逐漸減小。噴砂處理表面顯示出大的壓縮殘留應力，並且隨著測試週期次數有應力消除的趨勢。

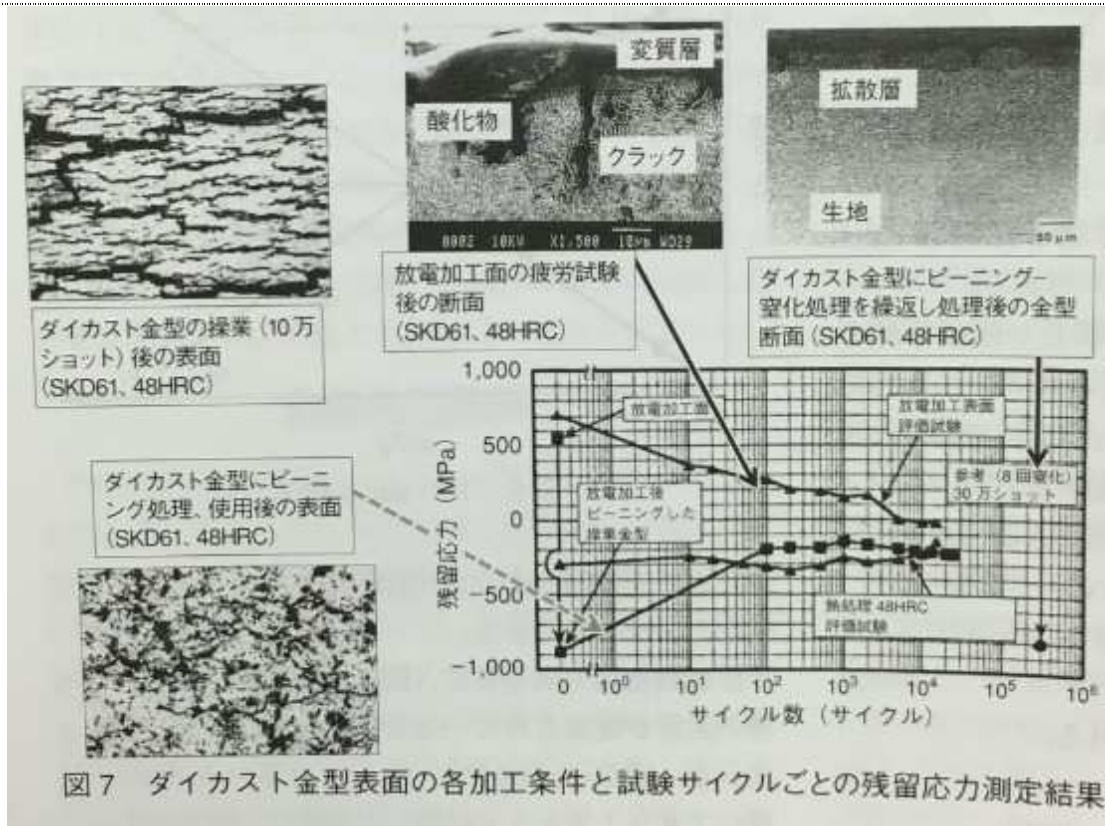


圖 8 顯示操作模具重複氮化處理，進行 30 萬模次射出後表面的殘留應力。鋁熔湯通過的模具表面上的殘留應力隨循環週期數逐漸減小，但是不與熔湯接觸的氮化表面（分模面）保持與初始殘留應力值同樣轉變的狀態。

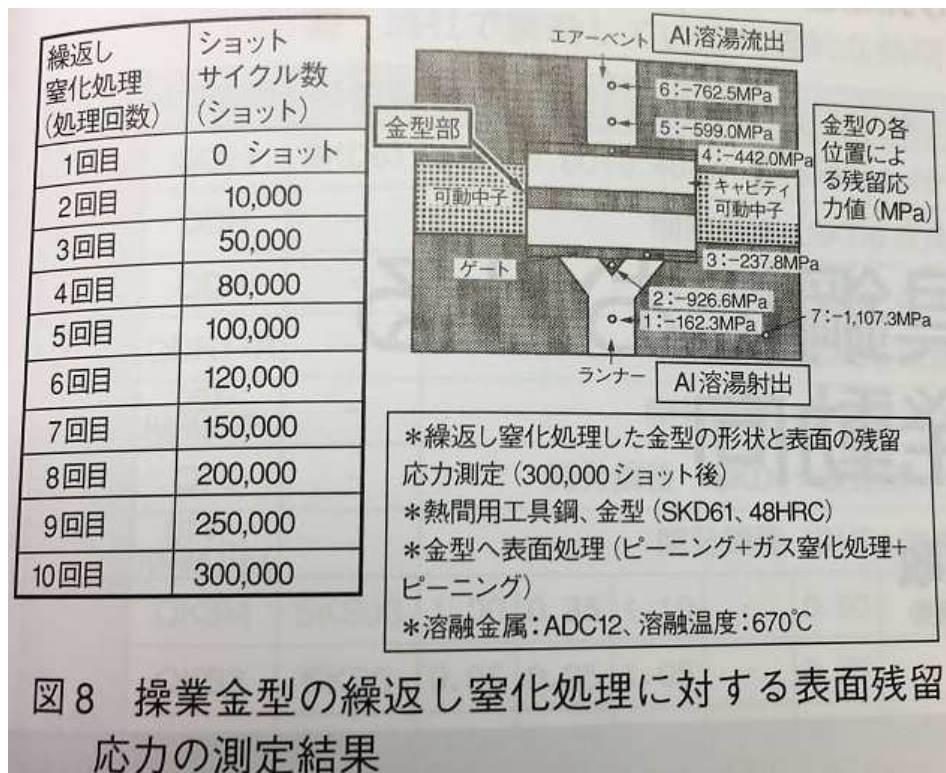


圖 9 顯示線割放電加工面和在其表面上進行噴砂處理的試片的殘留應力分佈曲線。線割放電加工表面處於軟化狀態，噴砂處理使大的壓縮應力產生變化，可以看出，噴砂處理的應力影響區域距離表面約 $30\ \mu\text{m}$ 。

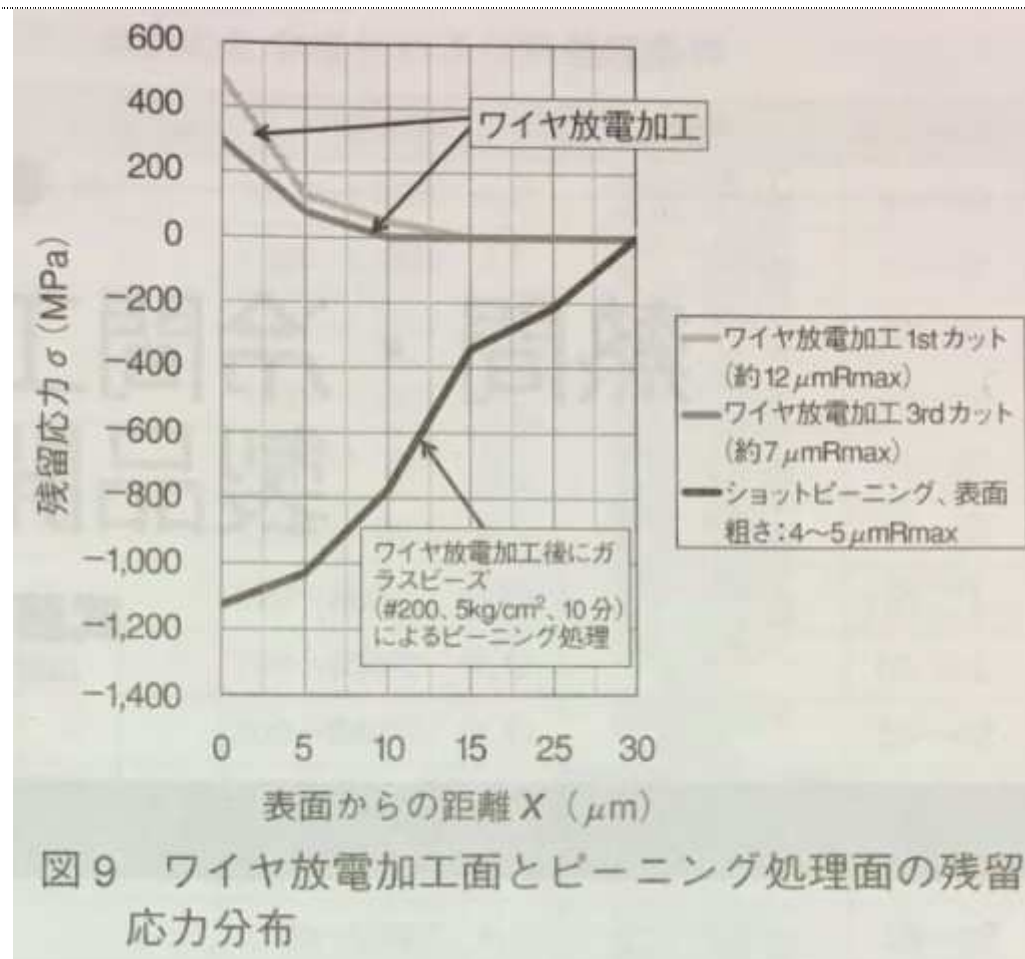


圖 10 顯示壓鑄模具操作後進行保養，噴砂處理的效果。壓鑄模具操作過程中，澆口附近與熔湯直接接觸的部分，易產生熱疲勞、熔損、燒付等的缺陷。這些缺陷隨著週期次數的增加，表面劣化會愈來愈嚴重，但是當中間階段或結束時進行噴砂處理，添加表面的壓縮應力以及清潔表面，之後操作上像新模具一樣，使得模具穩定性和產品品質提高。在模具保養過程中系統性地執行此方法時，可以獲得操作過程的穩定性，這是延長模具壽命的有效手段。

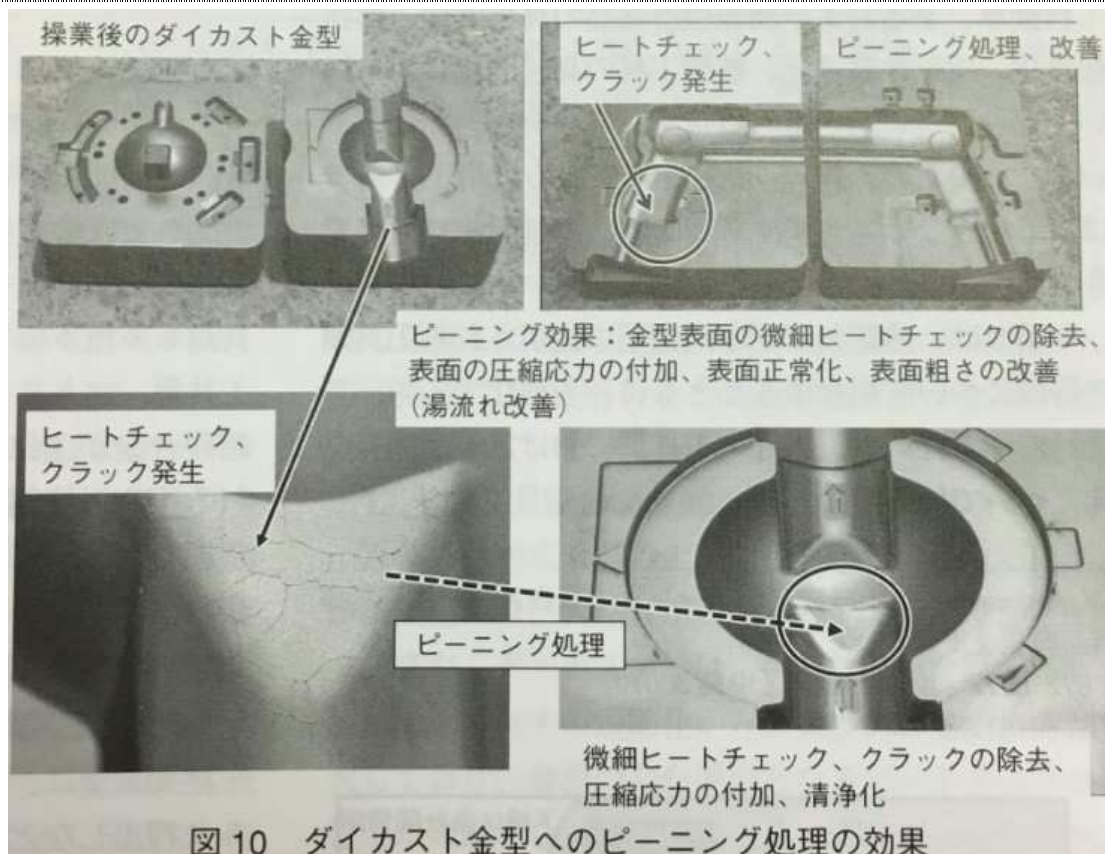


図 10 ダイカスト金型へのピーニング処理の効果

以上描述了冷作/熱作用模具材料（工具鋼）的技術趨勢和壓鑄模具殘留應力的檢測方法的應用實例。近年來，小型簡便的檢測裝置推出市場，我們認為殘留應力檢測方法用在模具穩定性和壽命預測時，是有效的評估方式。此外，**CAE** 分析結果和實際模具的相互驗證，也是有益於改善壽命的方法。希望這種評估方法今後作為模具的品質管理技術。