

大專教材 科技用書

應用塑性加工學

河合望著
賴耿陽譯著
復漢出版社印行

大專教材 科技用書

應用塑性加工學

河合望著

賴耿陽譯著

復漢出版社印行

中華民國七十三年八月一日出版

應用塑性加工學

原著者：河合望

譯著者：賴耿

出版者：復漢出版社

地址：台南市德光街六五十一號
郵政劃撥三一五九一號

發行人：沈岳林

印刷者：國發印刷廠

版權所有
翻印必究

平裝 一三一五元
精裝 一七〇元

本社業經行政院新聞局核准登記局版台業字第〇四〇二號

序

塑性加工的外文書籍頗多，因此分野乃工業上的一大主力，可經濟製造強力、精美的製品，國內的壓造、鍛造正朝向精密層次邁進，這也是在機械、電子、電機零件上力求突破所不可缺少的一環。

不過，這方面的技術素來是在經驗中摸索，缺乏學理的指引，所以特編輯本書，先討論材料的性質和力學。在塑性加工各論中，主要照製品的工程順序編排加工法，說明該加工法在製造製品時所占的意義。解說加工法時，先挑出問題所在，以便從加工機構的觀點瞭解內容。

本書的資料不是純粹的理論敘述，而是將實際工作的現象作一整理，在另謀創新時，有一定的條理可循，省掉不必要的浪費，也可能得到寶貴的提示，而有意外的收穫。

1980年7月

目 次

序

0 緒 論	1	
0.1 概念與範圍	1	
0.2 工學上的塑性加工	1	
1 材料的性質	3	
1.1 結晶體的塑性變形機構	3	
1.2 加工硬化與回復	7	
1.3 應變速度與溫度的影響	8	
1.4 靜水壓力的影響	9	
1.5 承受塑性加工的材料之性質	10	
1.5.1 冷間及溫間加工 10	1.5.2 熱間加工	11
問 題	11	
2 力 學	12	
2.1 1軸應力狀態的塑性變形	12	
2.1.1 應力及應變	12	
2.1.2 應力 - 應變線圖	13	
2.1.3 應力 - 應變曲線 的表示式	14	
2.1.4 n 乘式中的材料 常數	15	
2.1.5 1軸拉伸的不安 定現象	17	
問 題	19	
2.2 應力與應變	20	
2.2.1 不變量	20	
2.2.2 應變及應變增量	22	
問 題	24	
2.3 降伏條件	25	

2.3.1	降伏條件式應具備的性質	25	2.3.3	降伏條件的幾何學表示	27
2.3.2	Tresca 的條件及mises 的條件	26	2.3.4	平面應力場的Tresca及Mises 的條件	29
問 題					30
2.4	應力 - 應變方程式				32
2.4.1	彈性體的應力 - 應變方程式 (Hooke 's law)				32
2.4.2	塑性體的應力 - 應變方程式 (Reuss 的方程式及 Levy - Mises 的方程式)				33
2.4.3	比例負荷的應力 - 應變方程式 (Hencky 的方程式)				36
問 題					38
2.5	塑性加工問題的力學解析法				38
2.5.1	基礎方程式	39	2.5.2	解析方法的種類	40
2.6	塑性不安定				40
2.6.1	彈性挫曲 (Euler 之解)	41	2.6.3	平面應力狀態的蜂腰	46
2.6.2	塑性挫曲	42			
問 題					52
2.7	平面應變狀態的滑移線場理論				52
2.7.1	基礎方程式	53	2.7.3	例 題	61
2.7.2	滑移線場解的解析方法	60	2.7.4	變量原理	65
			2.7.5	例 題	70
問 題					73

3 製造素材時的塑性加工 75

3.1	熱間鍛造				75
3.1.1	熱間鍛造加工法	75	3.1.3	熱間鍛造力	78
3.1.2	熱間鍛造的變形	76			
3.2	軋 軋				83
3.2.1	棒、線材及型材的軋軋				84

3.2.2	管材的軋軋	85	3.2.4	板材軋軋的力學 解析	93
3.2.3	板材的軋軋	87			
3.3	擠壓	98			
3.3.1	擠出加工法	99	3.3.4	應變速度	104
3.3.2	擠出時的變形	99	3.3.5	擠出的作業條件	104
3.3.3	擠出的力學解析	102			
3.4	抽製	106			
3.4.1	棒材、線材的抽 製	106	3.4.2	管材的抽製	107
			3.4.3	抽製的力學解析	108
問 題		114			

4 機械零件的塑性加工 117

4.1	冷間鍛造	117			
4.1.1	冷間鍛造法	117	4.1.3	冷間鍛造性	122
4.1.2	鍛模內的材料流 動	119	4.1.4	加工壓力	123
4.2	滾製	124			
4.2.1	螺紋的滾製	125	4.2.3	各種零件的滾製	127
4.2.2	齒輪的滾製	126			
4.3	剪斷加工	127			
4.3.1	剪斷變形機構	130	4.3.4	模具的構造與壽 命	136
4.3.2	剪斷荷重	134	4.3.5	精密剪斷法	138
4.3.3	最適間隙	136			
4.4	彎曲加工	143			
4.4.1	彎曲變形	144	4.4.3	彎曲加工限度 (最 小彎曲半徑)	159
4.4.2	彎曲變形的力學 解析	145	4.4.4	模彎曲	160
			4.4.5	滾子矯正機	162
4.5	深壓拉及伸展成形	164			
4.5.1	成形加工的變形	164	4.5.3	深壓拉的力學解 析	172
4.5.2	縐紋的抑制	165			

4.5.4	深壓拉成形界限	178	4.5.6	再壓拉	184
4.5.5	成形速度的影響	184	4.5.7	各種深壓拉成形法	186
4.6	成形性試驗 (formability test)	188			
4.6.1	成形性試驗的分類	188	4.6.2	基礎試驗	189
			4.6.3	模擬試驗	191
4.7	高能量速度加工	197			
問 題		199			

5 壓造機械202

5.1	壓造機械的分類	202			
5.2	機 台	203			
5.2.1	C形機台	203	5.2.3	拱 形	226
5.2.2	直緣形機台	226	5.2.4	立柱形	226
5.3	驅動機構	227			
5.3.1	機械式驅動機構	227	5.3.2	液壓及氣壓式驅動機構	230
5.4	動力傳達機構	232			
5.5	滑 件 (slide)	234			
5.6	壓機的容量	234			
5.7	特殊壓機	234			
5.8	壓機精度	236			
5.9	改善壓機的生產性	236			

0 緒 論

0.1 概念與範圍

固體的金屬或非金屬材料進行機械性加工時，承受外力的固體會因彈性、塑性性質而變形，終至破壞。

加工的目的在將固體素材變成所需形狀、表面性狀及材質，在實用上永久保持該狀態。利用塑性和破壞的變形加工總稱塑性加工。

實用的塑性加工有製金屬素材的一次加工，在此加工中，從金屬的鑄塊出發，藉連續穩定加工的軋軋、擠製、抽製等製造板、棒、線、型材、管等。

另有利用一次加工製成的素材，製造機械零件的二次加工，這是機械生產工廠慣用的機械性加工，包括鍛造、衝擊擠壓、滾製及各種板材成形加工，圖0-1為上述塑性加工的基本形。

0.2 工學上的塑性加工

加工負責人擬訂加工計劃時，須決定下列加工條件：

- ①素材材質。
- ②材料的幾何學條件……素材及製品的形狀。
- ③工具的幾何形狀、構造、材質及其加工。
- ④工具的作動、材料拘束及加工機械。
- ⑤生產性、製品成本。

已知上列條件的一部份，委由技術組決定其餘部份，欲合理解決問題時，需要固體力學（包含彈性及塑性）、材料科學、表面工學、控制工學、生產工學等廣範圍的知識。

實加工時，加工負責人須直接檢討的具體問題如下：

- ①以何種形式對何種形狀的素材施加外力，才可有目的的變形？亦即以何種工具形狀及工具作動形式賦予拉伸、壓縮、彎曲、剪斷等負荷

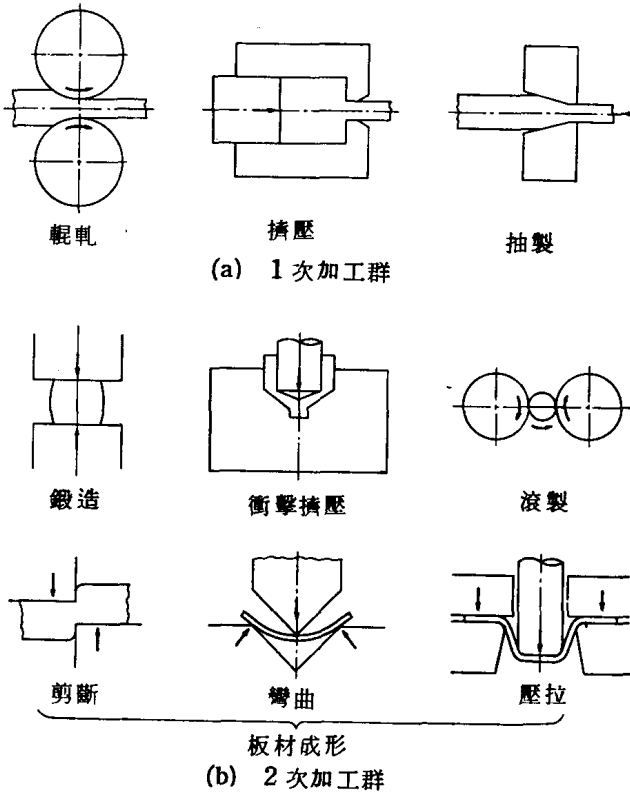


圖 0 - 1 塑性加工的基本形

②外力的需值如何？

③材料可否順利達成目的變形？亦即有無破壞、挫曲、表面損傷等危險？

④製品的機械性性質是否滿足使用目的。

1 材料的性質

金屬材料的塑性加工有用油壓機以相當低速度（慣用滑移速度約 150 mm/s ）施行者、用機械壓機（慣用滑移速度約 500 mm/s ）及鎚擊機（Hammer）（慣用滑移速度約 5 m/s ）以中速度或高速度施行者、用氣壓式壓機以高速度施行者（慣用滑動速度約 20 m/s ），爆炸成形之類的超高速者（壓力波速度 $1200 \sim 7500 \text{ m/s}$ ），加工速度範圍相當廣（表 1-1）。

另如冷間、溫間、熱間加工之稱謂，可在相當廣的溫度範圍加工，最近更在高靜水壓力下加工，抑制破壞。

應變速度、溫度及外氣壓力很影響金屬材料的應力-應變關係或延性。解明塑性加工的變形機構時，須先瞭解這些影響。

1.1 結晶體的塑性變形機構

在常溫，金屬由原子的規則配列組成結晶體。金屬元素的 70% 由面心立方（Face centered cubic lattice），體心立方（Body centered cubic lattice）及最密六方（Hexagonal closed packed lattice）之一結晶構造組成（圖 1-1）。

若為單結晶體，晶塊中各處的原子配列方向相同，物理性質因方向而異，微視、巨視上都有異方性（Anisotropy）。多結晶體是原子配列方向不同的晶塊多個形成 1 個金屬塊，在晶塊的交界，2~3 原子層的原子不規則配列，形成所謂的結晶粒界。各結晶粒若有任意的原子配列方向，其多結晶體在巨視或統計上為等方性（Isotropy）。原子配列方向若有偏倚，該物體會依其程度而有巨視性異方性，亦即，此種多

表 1-1 加工速度一例

加工	加工速度 mm/s
拉力試驗	$10^{-3} \sim 10$
Charpy 衝擊試驗	6000
液壓擠壓機	25~350
板材 軋軋	250~25000
管抽製	50~500
抽線	5000~40000
壓機成形	50~1000
鎚擊鍛造	2500~10000
Dynapak 鍛造	20000~50000
爆炸成形	30000~125000

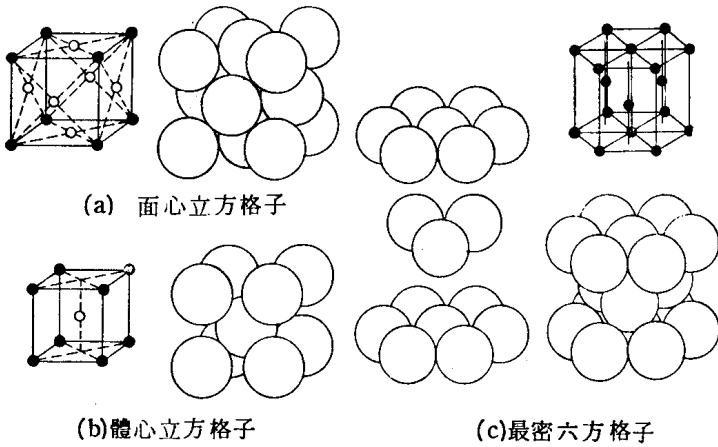


圖 1 - 1 結晶構造

結晶體有選擇方位 (Preferred orientation) 或集合組織 (Fibre structure) 。

金屬的變形乃原子相對移動所致，原子的相對移動有原子間距離的變化與原子間的滑動，前者大致為可逆性——亦即彈性，只發生龜裂時才可能有非可逆性變化。滑移 (Slip) 並非原子配列的本質性變化，為非可逆性，藉圖 1 - 2 的原子移動而達成。亦即金屬的塑性變形乃因結晶的滑動 - 剪斷變形而達成。圖(a)的狀態欲達成(b)的狀態，若是在結晶而相對的原子同時發生滑動，滑動所需的理論臨界剪斷應力達實際經驗值的數千倍。實際上，如圖 1 - 3 所示，原子的滑移是局部發生，在其遷移過移，格子為彈性變形，上下原子位置偏差最大的場所稱為轉位 (Dislocation)，以記號「 \perp 」表示其位置。在圖中，例如一轉位貫

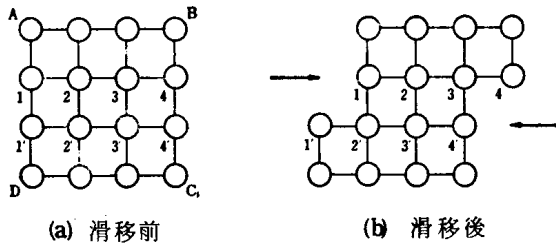


圖 1 - 2 結晶的滑移

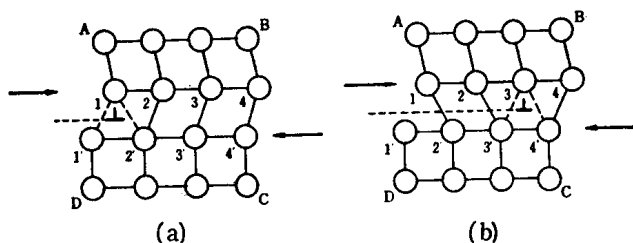


圖 1 - 3 轉位的移動

通滑移面的話，發生 1 原子間隔的滑移，此為滑移的最小單位，以向量表示之，稱為 **Burgers 向量**。此大小因金屬的種類與方向而異，大約數 A 。圖 1 - 4 表示一般的滑移，滑移終了部與未了部的交界線形成轉位線。垂直 **Burgers 向量** 的轉位線部份為 **雙狀轉位 (Edge dislocation)**，平行的轉位線部份為 **螺旋轉位 (Screw dislocation)**，不垂直也不平行的轉位線部份可視為 **雙狀轉位與螺旋轉位的混合**，稱為 **混合轉位 (Mixed dislocation)**。此種轉位為格子缺陷之一，本就存在於結晶中，轉位密度以單位體積的轉位線長度或貫穿單位斷面積的轉位線數表示，兩者在數值上約略為同程度。在充分退火的純粹金屬單結晶體為 $10^2 \sim 10^3$ 線/cm²、退火的金屬多結晶體為 $10^7 \sim 10^8$ 線/cm²，在承受大塑性變形的多結晶體為 $10^{11} \sim 10^{12}$ 線/cm²。

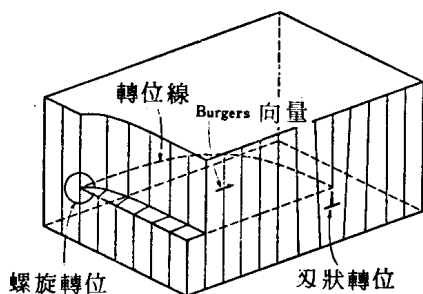


圖 1 - 4 轉位移動所致的滑移

金屬多結晶體的塑性變形在冷間乃因貫通結晶粒內的滑移所致，在熱間乃因貫通結晶粒界的滑移所致。沿結晶面移動轉位所需的臨界剪斷應力 τ_{cr} (**Critical resolved shear stress**) 因結晶面與結晶軸方向而異。在原子密度最大的面內，原子密度最大方向之值最低，在此面和方向發生滑移的可能性最高，此面和方向稱為 **滑移面及滑移方向**。表 1 - 2 為各種金屬元素的結晶構造，滑移面及滑移方向，在結晶中以相同的 **米勒指數 (Miller indices)** 表示，很多在結晶學上等值的面或方向存在，施加外力時，參與變形的是其中作用的剪斷應力成分達臨








界值的面及方向。

如圖 1-5 所示，進行單結晶圓柱體的拉力試驗時，設拉伸方向與滑移面法線而夾角為 ϕ ，與滑移方向夾成的角為 λ ，則拉伸應力 σ 為

$$\sigma = \frac{\tau_{cr}}{\cos \phi \cdot \cos \lambda} \quad (1.1)$$

此關係為 Schmidt 定律， $\cos \phi \cdot \cos \lambda$ 稱為 Schmidt 因子，在 0 ~ 0.5 的範圍。若以一定的 τ_{cr} 為前提，則因拉伸軸與結晶方位的關係， σ 呈現大變化。

表 1-2 滑動面及滑動方向

結晶構造	金屬	滑動面	滑動方向	滑動係數	
面心立方	Cu, Al, Ni, Pb, Au, Ag, γ Fe	{111}	$\langle 1\bar{1}0 \rangle$	$4 \times 3 = 12$	
體心立方	α Fe, W, Mo, β Brass	{110}	$\langle \bar{1}11 \rangle$	$6 \times 2 = 12$	
	α Fe, Mo, W, Na	{211}	$\langle \bar{1}11 \rangle$	$12 \times 1 = 12$	
	α Fe, K	{321}	$\langle \bar{1}11 \rangle$	$24 \times 1 = 24$	
最密六方	Cd, Zn, Mg Ti, Be	{0001}	$\langle 11\bar{2}0 \rangle$	$1 \times 3 = 3$	
	Ti	{10 $\bar{1}0$ }	$\langle 11\bar{2}0 \rangle$	$3 \times 1 = 3$	
	Ti, Mg	{10 $\bar{1}1$ }	$\langle 11\bar{2}0 \rangle$	$6 \times 1 = 6$	

通常，物體的變形可分為體積變化與不包含體積變化的部份。塑性變形乃滑移或剪斷變形所致，原則上不包含體積變化，通常也有剪斷應力與拉伸或壓縮的垂直應力作用於滑移面，但是，垂直應力即使造成彈性變形的原子間距離變化——亦即體積變化，也不參與塑性變形的發生

。金屬的破壞起因於原子結合的分離及其造成的微小龜裂 (Micro-crack) 之成長、傳播、垂直應力若為拉伸性，會促進破壞，若為壓縮性，可抑制破壞。亦即，引起體積變化的應力成分本為彈性，不參與塑性變形的發生，但可支配材料耐塑性變形的能力 (變形能)。依據彈性理論，產生體積應變 Δ 的應力成分為垂直應力的平均值 σ_m ，表成 $\Delta = \epsilon_x + \epsilon_y + \epsilon_z = \sigma_m / K$ (K 為體積彈性係數)，因而，從垂直應力減去此平均垂直應力的應力成分與剪斷應力成分參與塑性變形，這些應力稱為偏差應力 (Deviatoric stress , stress deviator)。

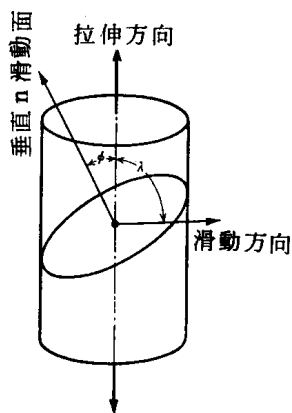


圖 1 - 5 單結晶的拉伸

1.2 加工硬化與回復

對金屬結晶體施加外力，往滑移系的分解剪斷應力 (Resolved shear stress) 若達臨界值 τ_{cr} ，則在它們的滑移系開始轉位移動。轉位移動所致的塑性變形常伴有滑移面的旋轉，造成活動的滑移系 (Active slip system) 變化。隨著塑性變化的進行，呈現轉位間的相互作用、轉位交差、轉位反應、轉位堆積 (Pile up) 於障礙物 (Obstacle) 等現象。不久，轉位源 (Frank-Read source 為其一) 的活動開始增殖轉位，轉位密度漸高，轉位交差的頻度或轉位往障礙物 (固溶形及侵入形的異質原子、不動轉位、析出物、介在物等) 的堆積漸增加，出現轉位密林 (Dislocation forest)，在轉位線形成很多 Jog，此一系列過程全需要應力增加量，此即加工硬化 (Work-hardening , strain-hardening) 的機構。

在多結晶體，結晶粒界成為轉位運動的新阻力，各個結晶粒須變形為適合隣接結晶粒的變形，所以，結晶粒度愈小時，降伏應力 σ 愈高，此關係以 Petch 的實驗式表示

$$\sigma = \sigma_0 + kd^{-1/2} \quad (1.2)$$

σ_0 為相對於一轉位運動的物質固有阻力， k 為常數， d 為結晶粒的平

均直徑。

塑性曲線的傾斜 $d\sigma / d\varepsilon$ 通常隨著應變的增加而減少，這是由於有回復過程 (Recovery) 減弱加工硬化的機構。產生回復的三種主要過程為動力學過程的交差滑移 (Cross slip) 與熱激起過程的轉位上昇 (Dislocation climb up)。

金屬材料進行冷間塑性加工時，轉位的堆積、格子的應變漸增，作用應力增高，不久，格子發生微視性龜裂，藉其合體、成長、傳播發生巨視性龜裂，終告破壞。因而，可施加的應變自有限度。

冷間加工材料退火時，冷間加工所致加工硬化的原因消失，變形能也回復，退火溫度增高時，起先，熱能激起的原子擴散過程使轉位開始降低其周圍應變能的再配置，亦即發生 Jog 的消滅、小傾角粒界的形成、固溶原子往刃狀轉位的擴散等。轉位因從表面逃散、往粒界或空洞 (Void) 消滅、與相反符號轉位反應等而減少，這些稱為回復 (Recovery)，通常造成材料軟化，但是，固溶原子往刃狀轉位擴散會形成 Cottrell 的氣氛，使轉位固着，使材料硬化。因而，此現象顯著時，在回復過程，呈現材料硬化，碳鋼的藍熱脆性現象屬此，原因在侵入形固溶原子 N 所致的高溫時效現象。

圖 1-6 為碳鋼的高溫拉力試驗結果，在 $200 \sim 300^\circ\text{C}$ 的範圍有抗拉強度的極大值及斷面節縮率的極小值，顯示藍熱脆性。

溫度昇高時，產生無應變的新結晶粒，材料驟然軟化，這是再結晶，因而大幅回復變形能。

1.3 應變速度與溫度的影響

以低溫度及大應變速度進行塑性變形時，在碳鋼、Mo、W 等 bcc 金屬，降伏應力顯著增高，發生脆性化，圖 1-7 為碳鋼的延性-脆性遷移現象。比起 fcc 金屬，bcc 金屬對應變速度與溫度的變化極敏感。

在銅或鋁之類的 fcc 金屬不呈現延性-脆性遷移現象，所以鋁合金

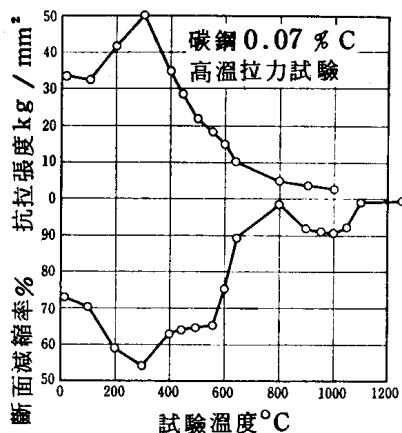


圖 1-6 碳鋼的拉伸特性值與溫度的關係

或 austenite Fe-Ni 合金廣用於低溫。

高溫度而應變速度大時，施加應變而發生的加工硬化過程與溫度高而發生的回復過程之抵銷成爲問題的焦點。回復速度較大時，在軟化狀態進行變形，溫度高到可發生再結晶時，軟化程度更顯著。但是，塑性變形所致的加工硬化速度大於原子擴散所致的回復速度時，金屬在高溫下也可耐高應力。

在冷間，準靜性試驗所致的塑性曲線（萬能試驗機的拉伸速度常約 $1 \sim 10 \text{ mm/s}$ ，相當低速）與高速試驗者差不多，在熱間時，如上所述，速度的影響大，圖 1-8 爲其模型，圖 1-9 表示與絕對溫度表示的融點 T_{MP} 之相對值超過 0.4 的話，衝擊抗拉強度與準靜性抗拉強度之比在 1 以上顯著增加。金屬的再結晶溫度通常存在於 T / T_{MP} 爲 0.4 ~ 0.5 的範圍。

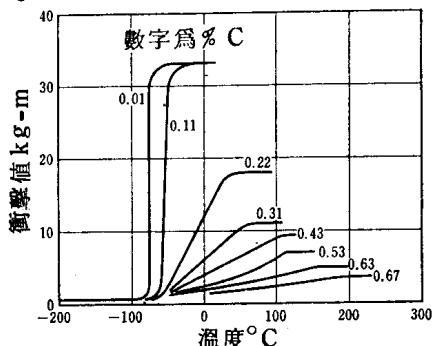


圖 1-7 碳鋼衝擊值的遷移現象所受碳量的影響

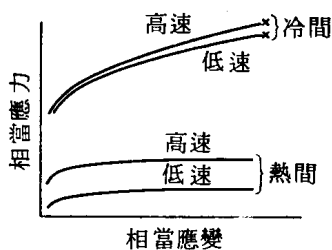


圖 1-8 應力-應變曲線的溫度及速度依存性

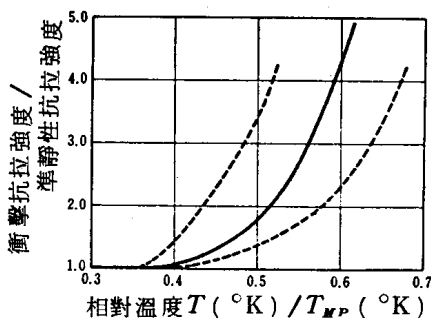


圖 1-9 抗拉強度的溫度及速度依存性

1.4 靜水壓力的影響

假設只偏差應力成分參與金屬材料的塑性變形，則不論靜水壓力成分如何高，降伏應力也不變化。事實上，後述的 Tresca 及 Mises 之