

高等学校教学用书

蒸汽鍋爐·汽輪机及
汽輪發电机金屬強度原理

上 册

И. А. 奥勤格著

高等教育出版社

高等學校教學用書



蒸汽鍋爐·汽輪機及 汽輪發電機金屬強度原理

上 冊

И. А. 奧勤格 著
錢定華 范从振 譯

高等教育出版社



本書系根据蘇聯國立動力出版社（Государственное энергетическое издательство）出版的奧勤格（И. А. Одинг）著“蒸汽鍋爐·汽輪機及汽輪發電機金屬強度原理”（Основы прочности металлов паровых котлов, турбин и турбогенераторов）1949年版譯出。原書經蘇聯高等教育部審定為動力高等學校的教學參考書。

本書論述動力機器製造方面的金屬強度問題。全書共分十五章，詳細地敘述了金屬的靜力強度、金屬脆性、塑性變形與再結晶、高溫下的金屬強度、內應力、循環強度以及金屬腐蝕等問題。對於蒸汽鍋爐、汽輪機及汽輪發電機主要機件的使用情況、損壞原因以及製造這些機件的金屬特性及其試驗等也作了詳細的分析。

本書適於作為高等學校動力類各專業的參考書，也適於作為動力機器設計、製造及運用方面的工程師的參考書。

本書分上下兩冊出版。上冊第一章到第六章系南京工學院錢定華教授翻譯，第七章系南京工學院范從振教授翻譯。

蒸汽鍋爐·汽輪機及汽輪 發電機金屬強度原理

上 冊

И. А. 奧勤格著

錢定華 范從振譯

高等教育出版社出版

北京琉璃廠一七〇號

（北京市書刊出版業營業許可證出字第〇五四號）

商務印書館上海廠印刷 新華書店總經售

書號 15010·121 開本 850×1168 1/32 印張 9 2/16 字數 232,000

一九五六年十二月上海第一版

一九五六年十二月上海第一次印刷

印數 1—7,000

定價（10）¥ 1.40

序

蒸汽鍋爐、汽輪機以及汽輪發電機零件的特殊使用情況對於製造這些零件的金屬提出了很高的要求。為了製造這些動力機器和裝備，必須採用各種鋼、鑄鐵、有色金屬以及輕合金等的廣泛品種。這類裝備的許多主要零件都有複雜的形狀、大的尺寸，因而也有大的重量；這樣就使製造過程複雜，並且增加機件內產生降低強度的缺陷的可能性。所有這些情況就使金屬強度問題在這一類機器製造方面具有更大的意義和作用。

在蘇聯，動力機器製造獲得了特別迅速的發展，在發展的規模上，美國、英國以及其他工業國家近年來的進展是不能和蘇聯比擬的。特種的機器不必談，只要指出功率 100000 瓩、轉速 3000 轉/分的固定汽輪機及汽輪發電機就夠了；這類機器的製造在蘇聯已經成為一種普通而熟練的製造過程。蘇聯動力機器製造的發展可以作為社會主義經濟制度優越性的一個顯明例子。

蘇聯的強大冶金基礎，尤其是金屬科學的成就——金屬強度的研究、工藝因素對於強度的影響等等問題的研究——促進了動力機器製造的發展；在蘇聯，金屬科學的發展早在十九世紀與二十世紀初就被阿諾索夫(П. П. Аносов)、切爾諾夫(Д. К. Чернов)、卡拉庫茨基(Н. В. Калакуцкий)及巴依可夫(А. А. Байков)等的工作奠定了堅固的基礎。

本書共分十五章，前七章說明金屬強度的一般問題；後八章說明蒸汽鍋爐、汽輪機及汽輪發電機個別零件的強度問題，同時考慮到這些零件製造的最新工藝過程對於強度計算所提出的那些要求。

技術科學副博士斯米爾諾夫(В. И. Смирнов)副教授寫了“汽輪機

轉子零件”一章，以及技術科學副博士奧勤格(Г. А. Одниг)副教授寫了“汽輪機鑄造”一章，對於編著本書給予很大幫助，著者在此對他們表示感謝。

技術科學副博士拉勃謙可夫(А. В. Рабченков)校閱了“金屬的腐蝕與浸蝕”及“蒸汽鍋爐零件”兩章並供給了圖片說明資料，著者表示感謝。

工程師阿伊澤施塔(И. И. Айзенштат)對於原稿校訂及其出版準備做了很多工作，著者同樣致以謝意。

書內如有錯誤請逕寄：Москва, Шлюзовая набережная, 10, Госэнергоиздат。

И. 奧勤格

目 錄

序

第一章 金屬的靜力強度	1
1-1. 彈性與塑性	1
1-2. 金屬強度的特性	9
A. 拉伸	9
B. 壓縮、彎曲及扭轉屈服點	19
第二章 金屬的脆性	24
2-1. 測定沖擊脆性的方法	24
2-2. 沖擊脆性的種類	28
2-3. 冷脆性	29
2-4. 回火脆性與熱脆性	34
2-5. 鋼的時效	40
A. 機械時效	40
B. 弥散硬化	43
2-6. 赤熱脆性	45
2-7. 脆性斷裂強度	47
第三章 金屬的塑性變形與再結晶	54
3-1. 概論	54
3-2. 塑性變形時顯微組織的改變	55
3-3. 再結晶時顯微組織的改變	62
3-4. 塑性變形和再結晶時金屬物理性質的變化	66
第四章 高溫下的金屬強度	72
4-1. 概論	72
4-2. 溫度對於強度極限和塑性的影響	73
4-3. 溫度對於屈服點的影響	77
4-4. 溫度對於彈性性質的影響	80
4-5. 金屬的松弛	84
4-6. 金屬的蠕變	88
4-7. 蠕變的本質	93

A. 应变硬化和再结晶	94
B. 組織变化	96
B. 相的轉變	98
Γ. 金屬的时效	99
Δ. 外生原因	102
4-8. 金屬蠕变抵抗力的評定方法	103
A. 均匀蠕变速度方面的蠕变特性	108
B. 綜合应变方面的蠕变特性	118
B. 蠕变極限	122
4-9. 金屬蠕变与松弛之間的关系	127
4-10. 長期强度	135
4-11. 耐热合金	137
第五章 内应力(工藝应力)	139
5-1. 概論	139
5-2. 鋼在加热和冷却时的体積变化	140
5-3. 鋼料發柱体的加热	141
5-4. 圓柱形鋼錠与鋼鍛件的冷却	144
5-5. 热处理时所得到的应力的計算	148
5-6. 用切取圓环的方法来測定圓柱体内的残余应力	155
5-7. 扎克斯法	157
5-8. 測定薄管内残余应力的达維罕柯夫法	162
第六章 循环强度	165
6-1. 疲勞極限	165
6-2. 循环韧性	170
6-3. 循环强度的标准	178
6-4. 工藝因素	191
A. 鉄粒喷射	191
B. 表面輾压	193
B. 切削规范的影响	195
6-5. 制件的形状与尺寸	202
A. 应力集中的理論系数与实际系数	202
B. 应力高峯的降低作为塑性变形的結果	206
B. 測定循环韧性的方法	209
Γ. 其他因素對於循环强度的影响	219
6-6. 金屬疲勞破断面的分析作为确定机器损坏原因的方法	235
A. 破断面特征	237
B. 疲勞破裂范围發展的深度	239

B. 应变硬化的程度与特征	240
Г. 策源中心的数目	244
Д. 疲劳裂纹前沿线的特征	244
Е. 疲劳裂纹前沿线的痕迹	255
Ж. 汽轮机叶片疲劳破断面組織的某些特点	256
3. 循环扭转所引起的疲劳破断面的特征	259

第七章 金屬的腐蝕和浸蝕 264

7-1. 概論	264
7-2. 腐蝕理論。金屬和電解質的相互作用	265
7-3. 腐蝕的遲鈍現象及薄膜理論	268
7-4. 腐蝕的電化學理論	269
7-5. 電化學腐蝕舉例	270
7-6. 電腐蝕	271
7-7. 氣體腐蝕	273
7-8. 蒸汽動力裝置的腐蝕	274
7-9. 浸蝕	275

中俄名詞對照表

參考書目

第一章 金屬的靜力強度

1-1. 彈性與塑性

金屬合金所有的物理性質之中，強度性質對於機器製造最有關係。所謂強度就是金屬能夠承受外力和內力的作用而不被破壞的能力。這些力作用於金屬零件時，將在零件內引起彈性應變和塑性應變。

載荷去除後即行消失的那種應變（零件恢復其原來的大小和形狀者）稱為彈性應變。載荷去除後並不消失而留存的那種應變稱為塑性應變。因此塑性應變常常稱為殘余應變。

金屬能夠彈性地變形而不斷裂的能力稱為彈性，而金屬能夠承受殘余應變而不斷裂的能力稱為塑性。從這方面來看，彈性和塑性是對立的性質。用這個觀點來考慮金屬的強度時，可以說所謂金屬強度就是金屬能夠承受彈性和塑性應變而不斷裂的性質。

大家知道，如果無限小的力 dP 作用於無限小的面積 ds 上，則

$$\sigma = \frac{dP}{ds}$$

稱為應力。

解決與零件強度有關的問題時，研究作用於一定平面上的應力要比研究作用力來得簡單。假如有一個受外力作用的試塊（圖 1-1），外力在其斷面 SS 上引起正應力 σ ，那末對於任何一個其他的斷面 S_1S_1 而言，這個應力可分為兩個分應力： σ_n —垂直於平面 S_1S_1 ，以及 τ —沿着這個平面。

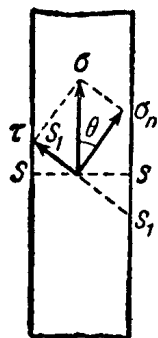


圖 1-1. 正應力與切應力。

假如 σ_n 与 σ 之間所成的角用 θ 表示, 則

$$\left. \begin{aligned} \sigma_n &= \sigma \cos \theta \\ \tau &= \sigma \sin \theta \end{aligned} \right\}^{\circ} \quad (1-1)$$

对平面 S_1S_1 而言, 应力 σ_n 称为正应力, 而应力 τ 称为切应力或剪应力。

正应力和切应力都可以引起彈性应变, 因此將应变区别为正应变和剪应变。彈性应变与应力之間有一定的关系, 称为比例定律(虎克定律)。例如, 在單純的正拉应力或正压应力之下, 这个定律可用下式表示:

$$\sigma = E \cdot \varepsilon_u, \quad (1-2)$$

式中 ε_u —試件的彈性伸長(或縮短)率;

E —彈性系数。

对切应力而言, 彈性应变与应力之間的关系則以下式表示:

$$\tau = G \cdot \gamma_u, \quad (1-3)$$

式中 G —抗剪彈性系数(抗剪系数)。

γ_u —相对剪切。

除了以上所說的彈性常数之外, 泊松系数 μ 對於強度計算有很大作用, 該系数說明在力的縱向作用下的橫向应变。

这三个金屬彈性常数, 相互之間有以下的公式关系:

$$G = \frac{E}{2(1+\mu)}, \quad (1-4)$$

某些金屬的泊松系数的数值見表 1-1。

某些金屬的彈性系数与抗剪系数的平均数值如表 1-2 所示。

彈性特性對於許多机械零件的設計具有很大作用。設計者常常不能滿意於这些平均数值, 而要求更正确地定出这些特性。

彈性变形时, 金屬原子依照变形的特点彼此接近或离开(金屬結晶格子發生彈性应变)。但在塑性变形时, 金屬內發生晶粒的一部分相对

表 1-1. 某些金屬的係數 μ 的數值

金 屬	μ
鋁及其合金.....	0.30—0.40
青銅.....	0.30—0.35
金.....	~ 0.40
黃銅.....	0.30—0.45
銅.....	0.30—0.35
銀.....	~ 0.40
鋼.....	0.25—0.35
鋅.....	0.20—0.30
鑄鐵.....	0.23—0.30

表 1-2. 某些金屬的係數 E 及 G 的數值

金 屬	E , 公斤/公厘 ²	G , 公斤/公厘 ²
鋁.....	7200	2700
鎢.....	36000	——
鐵與鋼.....	20000	8300
金.....	8100	2800
銅.....	12700	4700
錫.....	5500	——
鉛.....	1700	——
鋅.....	13000	——

於另外一部分的滑移。這種沿着一定的結晶面所進行的滑移，只是由於切應力所引起，而不是由於正應力所引起。正應力不能引起塑性應變。即使外力的作用是在試樣最小的截面上引起了正應力，譬如圓形或稜形試樣在單純拉力下所發生的情形，在這種情況下應變也會發生，因為沿着與作用力方向約成 45° 角的平面上產生了滑動（滑移）。這些平面上有最大的切應力發生，可由公式(1-1)看出。

拉伸磨光的試樣時就可以明顯地看出沿着大約成為 45° 角的平面上所發生的滑動應變。圖 1-2 所示就是經過變形的這種試樣。上面的黑線是沿着這些平面所發生的滑移的聚集。在顯微鏡下研究變形時，

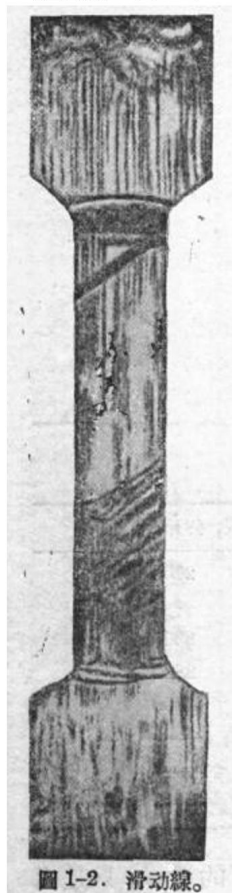


圖 1-2. 滑動線。

很容易發現到個別晶粒內的滑移線。

圖 1-3 所示是軟鋼(几乎是純鐵)經過壓縮變形後的顯微鏡照片。箭头表示壓縮方向。鉄素体晶粒上的滑動帶明晰可見。

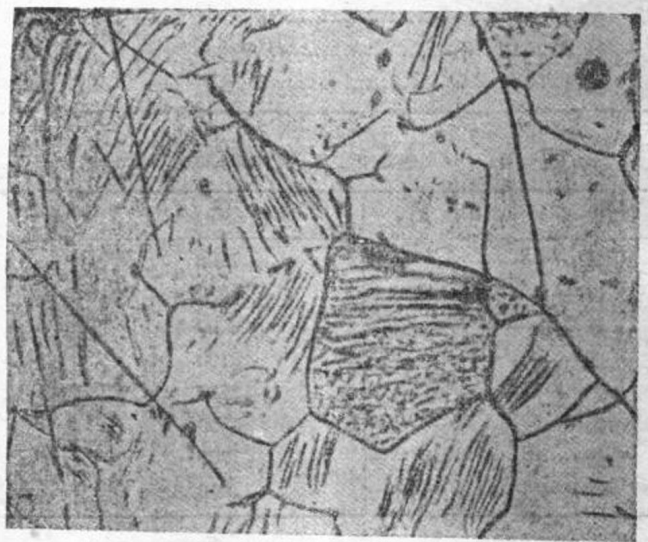


圖 1-3. 鉄晶粒上的滑移線(×300)。

人們也曾設法在塑性应变与应力之間确定一个分析关系, 提供了某些經驗公式。其中一个是幂数关系的形式:

$$\delta = A \cdot \sigma^m, \quad (1-5)$$

式中 A 及 m 为常数。

經過退火的金屬, 常数 m 的数值总在 2 到 3.5 的范围之內, 但是金屬經過淬火之后, 該常数就迅速提高到 25—30 之間以及更高的数值。常数 A 的变異范围較小, 就退火金屬而言常数 A 是在 0.025—0.030 之間。

也曾有人建議用下列公式來表示拉伸應力與應變之間的关系 [參考書刊 1]:

$$\delta + \delta_0 = \frac{A(B^\sigma - 1)}{B - 1}, \quad (1-6)$$

式中 δ —實際伸長率;

δ_0 —試驗前金屬曾獲得的實際伸長率(例如拉絲或壓延時所得);

A —塑性系數;

B —應變公倍數;

σ —和力的作用相垂直的平面上,作用於拉力方向的實際應力。

表 1-3 內所示是某些金屬的 A 與 B 的數值。

表 1-3. 某些金屬的塑性系數及應變公倍數的數值

金 屬	A	B
鋁青鋼.....	9500×10^{-8}	1.070
硬鋁.....	14500×10^{-8}	1.125
機器製造鋼(0.35—0.45% C) ...	5400×10^{-8}	1.032
銅.....	172200×10^{-8}	1.105
軟鋼(0.10—0.20% C)	5500×10^{-8}	1.120
無磁性鋼.....	286000×10^{-8}	1.010

根據研究結果可以得出這樣一個結論:彈性常數與變形速度無關;而塑性常數,例如塑性系數和應變公倍數,却在很大的程度上決定於變形速度。譬如說,說明應力與應變之間相互关系的拉伸曲線,同一種金屬在不同的拉伸速度下所確定出來的這些曲線,彼此之間就會有很大的區別。各種金屬在變形速度上的反應不同,雖然還沒有找出應力、塑性應變以及變形速度之間的函數关系,但是研究結果可以使我們斷言:變形速度對於金屬的塑性常數確有影响。

圖 1-4 所示是含碳 0.12% 的碳鋼拉伸圖。橫坐標代表應變,以試樣的斷面收縮率表示(ψ);縱坐標代表實際應力(σ_s),該應力是按當時有效橫斷面面積上所擔負的載荷計算。曲線 α 是緩緩拉伸時所得,曲

線 δ 是迅速拉伸時所得，兩條曲線很不一致。

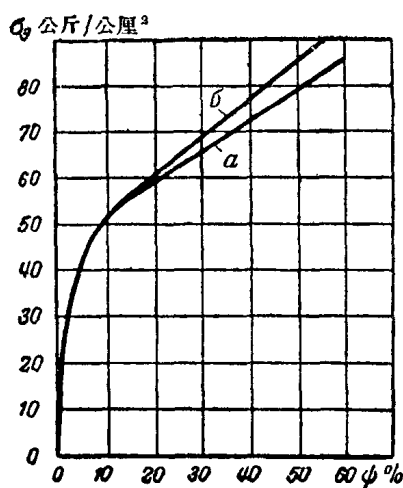


圖 1-4. 含碳 0.12% 的碳鋼的有
效拉伸圖：

α —緩緩拉伸； δ —較快拉伸。

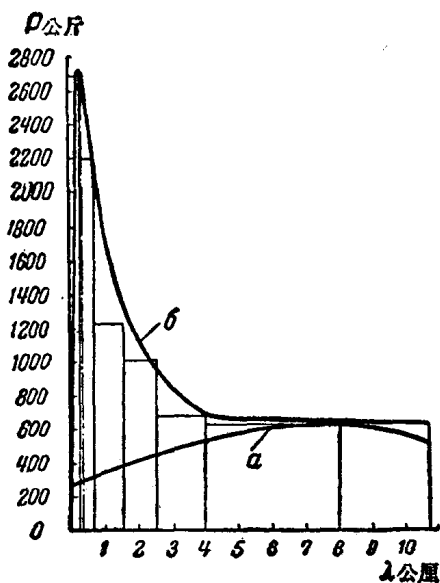


圖 1-5. 靜力拉伸(α)與動力拉伸(δ)圖。

圖 1-5 所示是靜力拉伸曲線和動力拉伸曲線[參考書刊 2]。在這里，縱坐標代表載荷 P ，橫坐標代表絕對伸長 λ 。顯然，兩曲線之間彼此區別很大。

塑性性質和變形速度之間的关系以及彈性極限隨着變形速度增加而提高的能力，可以使我們在金屬動力強度方面——金屬在沖擊載荷下的強度——作出一個非常重要的結論。

人們發現了，假如金屬具有隨着變形速度的增加而迅速提高其彈性極限的能力，那末這種金屬就可能脆性地斷裂而無塑性應變發生。在試樣斷裂上所消耗的功很小。我們把這種金屬稱為沖擊-脆性金屬，以別於沖擊-韌性金屬，後者在力的很快作用下——沖擊時——就發生塑性應變。

因此，我們可以認為變形速度是能使那些能夠塑性變形的金屬發

生脆性破裂的一個因素。

對於塑性變形發生阻碍作用的，除了變形速度之外，還有其他因素，例如低溫，复合應力狀態，以及那些也引起复合應力狀態與應力集中現象的切口等。

上面所說可以使我們確定：根據金屬所處的情況，金屬可以脆性地破裂（沒有顯著的塑性應變）或者韌性地破裂（有顯著的塑性應變痕跡）。

這兩種情況下的抗拉強度，即是引起金屬斷裂的那個應力數值，也將各不相同。

我們可以將引起金屬脆性斷裂的那個應力稱為抗斷性能（сопротивляемость отрыву），而將金屬發生某些塑性應變之後才會引起金屬斷裂的那個應力稱為抗拉強度（сопротивление разрыву）。這兩種斷裂的本質都是一樣。在兩種情況之下，金屬整體性的破壞（裂開）都是由於金屬晶粒內原子間結合的破壞而開始。

圖 1-6 所示是金屬強度情況的示意圖，該圖由下法作出。縱坐標代表應力的數值（ σ ），橫坐標代表應變，以試樣的斷面收縮率（ ψ ）表示。曲線 ABC 代表被研究金屬的抗拉強度的大小；曲線 OC 與 OC_1 都是拉伸曲線； OC 的變形速度為 v_1 ，而 OC_1 的變形速度為 v_2 ，且 $v_2 > v_1$ 。

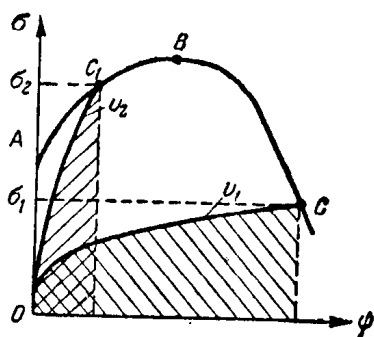


圖 1-6. 有不同變形速度的拉伸圖。

顯然，金屬拉伸的速度如為 v_1 ，當應力達到 σ_1 時金屬即開始斷裂；如拉伸速度為 v_2 ，應力達到 σ_2 時金屬開始斷裂。在兩種情況之下，斷裂之前都有一定的塑性應變，同時斷裂所需要的功則與圖 1-6 上畫着斜線的面積成比例。

下面將要討論什么原因使得抗拉強度的數值增加和降低，以及什

么原因使得金屬的破裂有时是沿着与作用力方向垂直的平面而發生，而有时則沿着有最大切应力作用的平面而發生。現在我們僅僅指出：与其說是脆性与韌性說明了金屬的性質，还不如說脆性与韌性說明了金屬的狀態。韌性金屬可以变到会產生脆性破裂的狀態，同时相反地，大家知道脆性材料通常在一定的狀態之下会顯示出較大的塑性。譬如說，大理石在复合应力的狀態下变形时就呈現較大的塑性。

也应当注意：金屬可以承受無限次数的彈性应变而不破裂，並且这种应变非但可以是單方向的（如拉力），也可以是反复变号的方向（如拉力—压力）。相反地，金屬倒並非常常能夠承受無限次数的重复塑性应变，尤其是反复变号的塑性应变。

实验曾証明：材料經受了經過一定期間重复的重复应力或反复变号的应力，非但会在載荷低於抗拉強度时破裂，並且常常会在載荷低於所謂彈性極限的时候就破裂。这种現象称为材料的**疲劳**。

設計者常常必須知道**疲劳極限**的大小，也就是經受無限次变号的載荷的金屬所能忍受而不破裂的最大应力的数值。因为这种数值不能用实验的方法确定，所以將鋼質試样在变号載荷的次数等於 10^7 时，以及有色金屬在变号載荷的次数等於 10^8 时，金屬所能忍受的最大应力定为**疲劳極限**。我們將在下面看到，就实用目的而言，这种数值大多数是十分令人满意的。

为了确定鋼的**疲劳極限**与**彈性極限**之間的关系，过去曾進行过很多研究工作。但是这些研究沒有得到所希望的結果，同时也不可能得到，因为金屬的疲劳現象与塑性性質有关而与彈性性質則無關。有人會想，一般疲劳試驗时所测定的应力大多是低於彈性極限，有时也稍微大於彈性極限，那末在这样的应力之下，塑性应变就不一定会對於材料強度發生顯著的影响。可是更仔細地研究一下這個問題就可以知道，在实际許可应力下所發生的塑性应变，就已經不是像一般所想的那樣小。

从下面的例子就很易确信这一点。所謂彈性極限常常是指引起殘余伸長 $\delta_0 = 0.03\%$ 的那个应力。現在把这个塑性应变与彈性应变比較一下。假如彈性極限 $\sigma_u = 20$ 公斤/公厘²，彈性系数 $E = 20000$ 公斤/公厘²，則伸長等於：

$$\delta_u = \frac{\sigma_u}{E} \times 100 = \frac{20}{20000} \times 100 = 0.1\%;$$

而殘余伸長則为彈性伸長率的

$$\frac{\delta_0}{\delta_u} \times 100 = \frac{0.03}{0.1} \times 100 = 30\%,$$

这已是一个必須重視的数值。

大家知道，有些种类的鋼可以在 $n = \frac{\delta_0}{\delta_u}$ 等於 1.5 的情況下，在变号載荷作用下長期地工作，但是另外一些鋼当 $n = 0.002$ 时就会很快地断裂。於是，各种类型的鋼所能夠承受重复塑性应变或反复变号塑性应变的能力就頗有差別。这些事实就足夠明顯地說明疲勞現象和塑性应变之間的关系。

1-2. 金屬強度的特性

前面我們討論了金屬強度的質量特性——彈性和塑性性能。現在我們要討論強度和塑性的数量特性。后者已是数字特性，用來判断所給金屬是否適用於机器制造。

A. 拉伸

進行金屬拉力試驗时，差不多都是採用有均匀截面的圓柱形試样或者是稜柱形試样。这些試样固定在專用拉力机的夾子当中。圖 1-7 所示是一种結構最完善的拉力机的外貌。这些拉力机通常都具有附屬裝置，借以繪制載荷 P 和試样伸長 $\Delta l = \lambda$ 之間的关系曲線。这些曲線称为拉伸圖。各种金屬及合金的这类曲線如圖 1-8 所示。按照伸長的特