

合金鋼鍛造

熱加工譯丛

上海市科学技术编译馆

前 言

由于科学技术不断发展，现代工业日新月异地沿着高参数的方向迈进，对产品品种和质量的要求日渐增高，因此对各种合金钢和合金的应用也越来越广。目前，合金钢和合金锻件在整个工业产品中已占有相当重要的地位。但是，这些合金钢和合金一般都具有锻造温度范围窄、塑性低、导热性能差、变形抗力大和冶炼缺陷多等问题，因而给锻造工艺技术方面也带来了很多新的课题。随着新钢种和合金的陆续出现，从事锻造工艺的技术工作者也相应地进行了有关的研究和探讨，促使合金钢和合金的锻造工艺日趋完善。

为了有助于我国从事锻造工艺的技术工作者了解国外在这一领域中的一些情况，本辑收集了苏联、英国等国家比较实用的文献共 15 篇，介绍了国外合金钢和合金锻造工艺研究和生产上的部分成果。

本辑主要内容包括钢的可锻性试验方法及合金元素的影响、锻造耐热合金的发展、加热方法及参数、锻造工艺过程的制订及其参数，以及锻造缺陷的形成、防止和分析等方面的资料；有理论探讨，亦有实践经验的介绍；比较系统地汇编成辑，以供我国从事锻造工艺研究和生产的技术人员在工作中参考。

本辑由第一机械工业部第二设计院冯桐笙工程师主编。由于时间和编译者水平的限制，收集的面尚不够广，译文中可能还有很多差错或欠妥之处，尚希读者予以批评和指正。

1963 年 10 月

目 录

鋼的可鍛性.....	1
鍛造高溫用材料方面的发展	12
高合金鋼和合金坯料的快速感应电加热	17
ЭИ437Б合金在鍛造溫度下的保温時間对塑性的影响.....	23
不銹鋼工艺塑性的研究	25
鍛造比對奧氏体銻鋼組織和机械性能的影响	30
高合金鋼鍛造	34
特种鋼鍛造	43
耐热鋼錠鍛造	47
大型 P18 鋼錠的应用及其鍛造工艺	52
P2 和 ЭИ 415鋼轉子鍛件鍛造工艺的主要参数	55
鍛造高合金鋼时发生的局部过热和內部缺陷	58
关于低塑性合金部分鍛造时形成裂紋的問題	61
ЭИ 481 鋼鍛件出現內部裂紋的原因	66
鍛造高合金鋼和合金鑄錠时防止形成內部橫向裂紋	69

鋼的可鍛性

G. P. Contractor W. A. Morgan

鐵和鋼的可鍛性或熱加工性這一課題，特別是在過去的五十年中，引起許多科研工作者的興趣。雖然，鐵和鋼已經鍛造了幾千年，但是由於金屬在錘的沖擊之下，往往會形成裂紋，所以操作上還不是很成功的。近年來，在鋼中加入了不同的合金元素，使鋼的熱脆性增加了。例如，高速鋼在高速鍛造或軋制時，對形成裂紋便具有很大的敏感性。換言之，即有許多金屬和合金可以很容易的用開式或閉式模鍛的方法，從一種切面改變為所希望的形狀，而有些合金，甚至對簡單的鍛粗操作，都會有很大的困難。同時，材料在鍛造時所表現的特性不但與化學成份而且亦與晶粒大小、表面狀態和變形速度等有關。

為了發展一種裝備來決定鋼是否能進行熱加工和在什麼溫度下其可鍛性最好，過去已經作了許多嘗試，幾乎所有常用的機械試驗方法，都被一個或更多的科研工作者用來確定有關可鍛性的金屬性能。這些方法有壓縮、延伸、彎曲、扭轉和沖擊等試驗。這些努力已有不同程度的成就。本報告的目的是將某些已進行過的確定金屬熱加工性能方面的工作，扼要的作些初步評介，而將重點放在近年來應用的，由伊瑞格(Ihrig)、克拉克(Clark)和魯斯(Russ)等所進行的“熱扭轉試驗”的結果。

雖然近幾年來關於金屬在高速時的性能的知識增加很多，但通常的研究工作大多是在設備所規定的工作溫度下，而不是在加工和製造時的溫度下進行的。但是從研究中得出了一个很明顯的結論，這對於全部高溫範圍都是有效的，即金屬的變形速度與工作時的溫度同樣重要。例如低碳鋼(0.15% C)，當變形速度與蠕變試驗一樣，如每10,000小時或100,000小時為1%的情況下，其斷裂溫度便低於800°F；而在斷裂試驗1,000小時或更多一些時，則為900°F。另一方面，如變形速度與拉力試驗相似時，則這一溫度便為1,500°F。

因為在鍛造和其他熱加工操作中遇到的變形速度均超過了測量抗拉強度時的速度，因此，在這一

情況下，同一種鋼的斷裂溫度便大於1,500°F。一般認為，由於對變形速度影響的這一基本事實不能理解，以致使測量金屬熱加工溫度的有效裝備發展得很為緩慢。

試驗室壓縮試驗

早先通常應用的確定鍛造坯料塑性的方法是將圓柱形或方形的試樣加熱至不同的溫度，然後從加熱室中取出放在冷砧座上，用冷錘鍛造。通常都知道假使壓縮超過了一定程度以後，許多合金材料在其鍛件的桶形外周便會形成裂紋。檢查鍛平試樣所形成的裂紋，就可以得出可鍛性中塑性部分的定性指標。

羅賓(Robin)是確定他所謂的在不同溫度下鋼對形成碎裂的阻力的最早研究工作者之一。他對一些鐵合金和非鐵合金都進行了許多試驗(溫度從-300~2,010°F，即-185~1,100°C)。在1910年出版的有關這些試驗的報告中，他能估計使標準圓柱體的高度(高與直徑相等)減小20%時所需的能量。使碳鋼碎裂的阻力在液態空氣溫度時，是很大的，但隨即很快的下降，超過0°C時又緩慢下來，直至570°F時阻力達到最小值。超過570°F(300°C)時，阻力增加，而在930°F時(500°C)達到最大，以後在1,560°F(850°C)時很快的下降，而在較高的溫度，下降很慢。

從羅賓的試驗結果得出了一个眾所周知的結論，即鋼的含碳量愈高，其對碎裂的阻力愈大，換言之，其可鍛性愈差，而其餘都一樣。

羅賓對合金鋼也進行了研究並且得出了結論，即溶液中加入足夠的合金元素，如鉻，可以大大地減小甚至消除對碎裂的阻力。他同樣也注意到，有些鋼在高速時，保持了較碳鋼大得很多的對碎裂的阻力。鎳在高速時對於這阻力有利。鉻和鎳的影響當然是不同的，鉻形成了複雜的碳化物而鎳則是奧氏體的形成者。

1910年發表的羅賓研究報告，對鋼可鍛性問題

有很重要的貢獻。印森 (Yensen) 在 1920 年發現純鐵-鎳合金在通常的鍛造溫度下不易鍛造；錳和鉄能够強化晶粒間的所謂“不結晶的材料”，而使其較結晶格子更强。他也进一步地記錄了鋁、碳、鎂和硅對可鍛性的影响很小或几乎沒有，即使在显微組織中也沒有能肯定地看出何種材料鍛造得好。但在下面將指出奧氏体較鉄素体更为難鍛，以及复合的組織不能象均匀的組織一样的鍛得很好。

在 1924 年，伊里斯 (Ellis) 发表了一篇題为“組織對鋼在高温时展性的影响研究”論文。这是他发表的許多論文中的一篇，他在金属的可鍛性方面曾做了很多試驗。上述的論文討論了鉄和鋼的临界点对热加工性能的影响并說明了临界点对热加工性能的重要性。他指出在 A_{c3} 点时，原子的重新排列，使鉄的变形阻力增加。

伊里斯所觀察到的在临界点以上的 γ -鉄相具有很大的强度或变形抗力，是因为 γ -鉄含有的碳較鉄素体为多，因而強化了晶格。

为了决定可鍛性，伊里斯曾采用了一种所謂靜力鍛平試驗 (亦即所謂落錘一次打击試驗或冲击压缩試驗)。在这一試驗中，測量了标准圓柱形試样在受到从一定高度自由落下的一定重量的落錘一次或几次打击而在高度方向的收縮百分率。試样在試驗前先加热到一定的溫度。在鍛造前后試样的高度差乘以 100，即代表試样在高度方向的收縮百分率，用来測量材料的可鍛性。伊里斯所得到的几种碳鋼的可鍛性-溫度曲線示于图 1。鎳鋼和鉻鋼的曲線形

狀很相似，在所研究的低合金鋼中，碳較鎳或鉻對可鍛性的影响为大。

自从伊里斯的报告发表后，很多科研工作着应用了压缩試驗檢查压缩后桶形試样圓周上新产生的裂紋以衡量金属的热塑性。这种方法已应用于热态和冷态的鍛造上。一般都认为在断裂开始时收縮值或在沒有破裂时的最大收縮值應該用来决定可鍛性中的塑性部份。因此，馬丁 (Martin) 和比伯尔 (Bieber) 曾建議鎳合金例如从 1 吋立方体压缩至 1/8 吋厚，收縮率約为 87%，这是在 $1,800^{\circ}\text{F}$ 和 $2,100^{\circ}\text{F}$ 通常进行的这种試驗的实际极限。若要得到某一种合金在一定溫度下的塑性，可用許多 1 吋的立方体試样以不同的能量进行打击，并注意第一次出現裂紋时的收縮率。如为鎳合金时，則这一方法可以用来区别在一定溫度下的塑性和脆性 (热脆) 材料。

鮑特文 (Portevin) 和巴斯坦 (Bastien) 亦已指出，非鉄合金压缩試驗的結果将受到成形速度的影响。他們认为当变形速度增大时，則产生断裂时的溫度，也显著的移向高温方面。換言之，在应变速度高的情况下，裂紋发生时的鍛造溫度大大高于应变速度低的情况。这說明了为什么在輕金属和超輕金属热加工时，宜采用緩慢的变形 (例如在压机上鍛造)。

科研工作者也試將压缩試驗应用于銅-鋅合金，这些合金在某一特定的成份、溫度和变形速度范围内，鍛造和軋制都較困难。但是这些研究的結果沒有能得出这些材料的压缩試驗和热脆性間存在任何关系的結論。因此，压缩試驗好象只有在热脆性严重或者表面缺陷或污漬在剧烈的鍛粗后会引引起裂紋时才有其价值。

应用压缩試驗时，必須理解到在完全压缩应变的条件下，很多材料的塑性是很高的。例如，許多被认为是不能鍛造的材料，可以很成功地用挤压进行加工。另一方面，当圓柱形試样經過鍛粗变成了桶形，沿圓周处将有拉应力产生。这个二次拉应力限制了其压缩量并使桶形的表面上形成了裂紋。由于桶形的大小是随模具和試样間接触面的摩擦力而变化，所以由压缩試驗而得出的塑性与采用的潤滑剂很有关系。

狄特瑞希 (Dietrich) 和安希尔 (Ansil) 在图 2 中指出鎳合金在冷鍛时所需的单位压力，在收縮很大时，增加很多。这是由于这种合金加工硬化很快的緣故。当然，摩擦力将随变形压力的增加而增加，而冷工作表面与模具的摩擦系数亦有增加，所以超过某一极限位置后实际上不可能再产生更大的收縮。

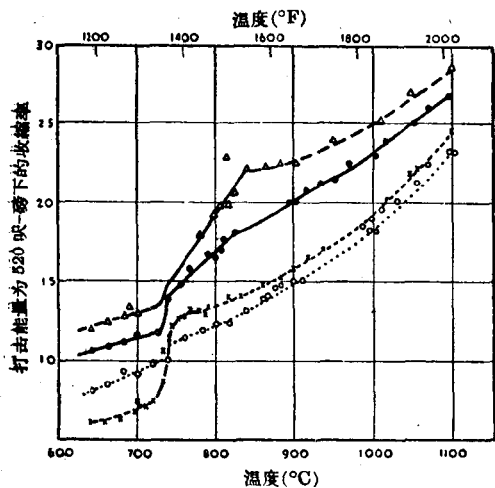


图 1 碳鋼中碳对可鍛性的影响

- △—鋼 P—0.10% C
- 鋼 F—0.16% C
- 鋼 B—0.68% C
- X—鋼 H—0.85% C

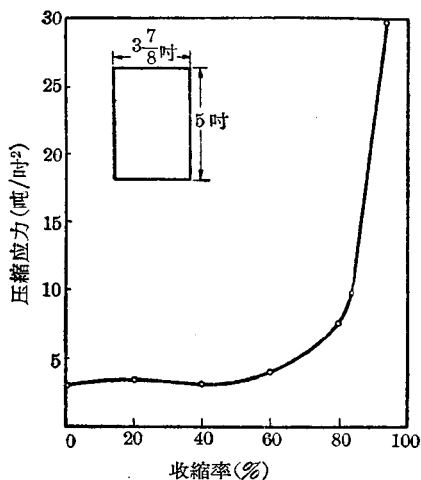


图2 镁合金的压缩应力与收缩率关系曲线

应变速度的影响

1950年以来, 庫克 (Cook) 等对在 $1,830^{\circ}\text{F} \sim 2,200^{\circ}\text{F}$ 間的不同温度和不同应变速度下进行压缩的一些鋼的热强度, 进行了很多研究。研究結果指出, 在任何已定的温度下, 鋼的强度随应变速度的增加而增加很快。

显然, 应变速度对热强度的影响, 随材料的不同而有所不同。所以以等速压缩为基础的可鍛性試驗必須采用与实际生产中同等的速度。事实上, 由冲击压缩 (锤击) 和緩慢压缩而得到的收缩率之間, 沒有任何简单的关系。换言之, 在慢速下进行的靜力試驗, 与在如鍛造等快速应变条件下的試驗, 所得到的結果亦相应地不同。它們对在較高应变速度下所观察到的可鍛性, 会有所增减。

更进一步的指出, 一般在試驗温度下保温, 将减低材料的热强度, 特别是在含有碳化物形成的元素如鉻等的情况下, 尤为显著。不保温时, 在奥氏体中出现了不溶解的碳化物, 所以鋼的强度亦較高。如試驗温度由 $1,830^{\circ}\text{F}$ 增至 $2,200^{\circ}\text{F}$, 快速加热和保温試样間的差异不是很明显的。这是因为在高温时碳化物的溶解度增加和晶粒很快增大的原因。庫克和布萊斯 (Blythe) 所观察到的另一种情况认为試样不經保温則加热至試驗温度所需的时间, 是决定热强度的重要因素。

总之, 虽然不論是冲击压缩或是等速压缩已被用来測量鋼的热加工性能, 但仍旧存在着許多不能控制的变数, 除非这些变数能減至最少, 这种方法还不能看作是可鍛性可比較的定性測量。此外, 作为实

驗室內适用的試驗方法, 應該是操作简单, 相当快速并能和大規模或通常的热加工操作如鍛造、軋制、穿孔等有所連系。压缩試驗的另一缺点是在試驗过程中很难維持温度不变。

如前所述, 除了压缩試驗外, 亦曾企图用別种試驗方法来測量鍛坯的塑性。虽然, 这些試驗对某些特殊的目的是有用的, 但是許多科研工作者对將它們普遍地应用于可鍛性的試驗还存在着疑問。一种檢驗材料用的简单的可鍛性試驗方法, 如拉力或疲劳試驗, 肯定是缺乏的。德萊波尔 (Draper) 建議采用在膨胀試驗后为測量板料、薄板和管子 (在室温下) 的塑性而設計的几种試驗, 可以解决这一問題。但是, 近年来热扭轉試驗 (其中主要是剪切应力) 用来估价金属的热加工性已得到很大的注意。

扭曲和热扭轉試驗

1924年梭維尔 (Sauveur) 說明了在鋼的临界点附近时碳对鋼的扭曲性能的影响。他指出碳提高了 γ -鉄的塑性。1930年梭維尔在一个研究报告中提出有槽棒料的扭轉試驗已被用来測定碳鋼、奥氏体和非奥氏体鋼在 1830°F (1000°C) 时的一些物理性能。將以磅表示的扭曲强度 (断裂应力) 除以断裂时 (应变) 的扭曲次数而得到的刚度系数, 在有些鋼的兰热範圍內 ($480 \sim 750^{\circ}\text{F}$ 或 $250^{\circ} \sim 400^{\circ}\text{C}$, 視碳含量的多少而定) 突然的升高 (图3)。

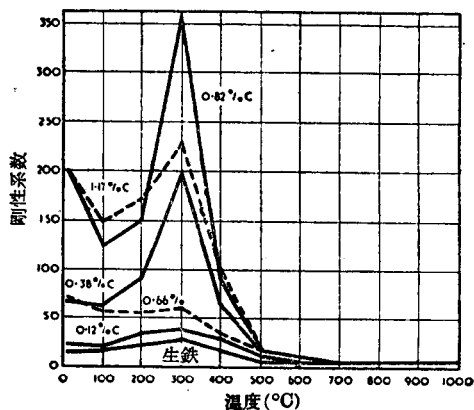


图3 在不同温度下生鉄和一些碳鋼的刚性系数*

梭維尔亦証明在碳鋼中所发现的兰热脆性范围, 在奥氏体材料中是没有的, 而普通碳鋼中发生的热脆性主要是由于面心体鉄 (γ -鉄) 特性的作用。但他的工作仅限于在 $2,000^{\circ}\text{F}$ ($1,090^{\circ}\text{C}$) 时进行的扭

* 扭曲强度 (断裂应力) 与断裂前扭曲次数 (应变) 之比

轉試驗，較正常的鍛造溫度為低。他也還提到蠕變應力(在1% 延伸下壽命為100,000 小時)和由短的扭轉試驗所決定的扭曲強度間，有着很明顯的關係。

自1930 年梭維爾的研究報告發表後，在高溫下的扭曲試驗或熱扭轉試驗已被一些研究工作者認為

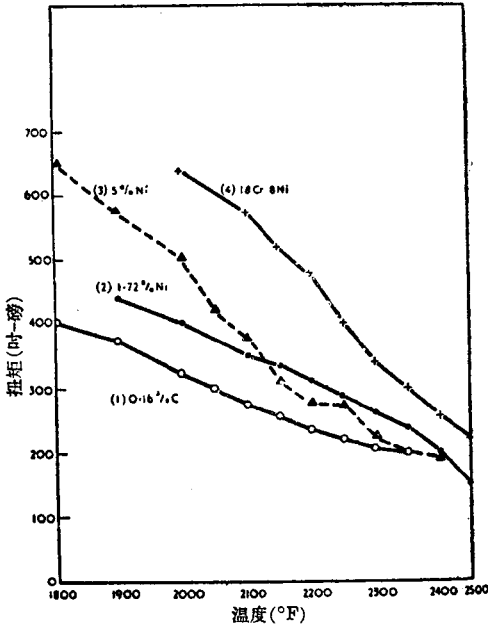


圖4 下表內各種成份鋼的扭轉特性曲線

	組成 (%)			
	(1)	(2)	(3)	(4)
碳	0.16	0.14	0.10	0.05
錳	0.46	0.62	0.56	0.52
硅	0.27	0.30	0.28	0.52
鉻	0.07	0.15	0.15	17.78
鎳	0.09	1.72	5.01	9.60
銅	0.03	0.25	0.05	—
硫	0.017	0.021	0.020	0.012
磷	0.013	0.022	0.018	0.006

是最適合於測量碳鋼和合金鋼可鍛性的方法之一。根據許多鋼試驗的結果，克拉克和魯斯得出了這樣的結論，即熱扭轉試驗能準確地指出熱加工最適合的溫度。若在某一溫度下的斷裂扭轉次數最大，則這一溫度即為最佳的鍛造溫度。

除了熱扭轉特性以外，在試驗的不同溫度下也作了測量扭矩的試驗。因為斷裂時的扭轉次數代表了材料的热塑性，扭矩則相對地測量強度或流動應力。雖然扭轉溫度曲線對決定合適的鍛造溫度範圍很為重要，而扭矩曲線則表示材料強度如何地隨溫度的升高而下降的情況。圖4 表示碳鋼和合金鋼溫度與扭矩間的關係。從圖上可以看出，18Cr 8Ni 不銹鋼在所試驗的溫度中熱強度最高，而0.16% 碳鋼的熱強度最低。

熱扭轉試驗設備

關於試驗的設備問題，伊瑞格、克拉克和魯斯等都會敘述過，但其原理基本上與25 年前梭維爾所用的相似。這一設備主要有一個用於加熱試樣並使其維持在一定溫度的加熱爐，和一個用於在要求的速度下扭轉試樣的變速馬達。在試驗開始和結束時，自動開閉的計數器記錄了斷裂時的轉數。在每次試驗中，用磅秤和附於安裝在軸承上夾頭之一上的扭轉臂，來決定力的大小。圖5 即為伊瑞格所使用的試驗設備。

克拉克和伊瑞格所用的試樣為22~24 吋長的鍛造棒料，全部直徑為9/16 吋，中間沒有縮小。由於變形並不是僅限於最熱(中間)部分，休斯(Hughes)對用這種試樣所得到的結果表示懷疑。表示斷裂時的總扭轉數不僅包括了在所希望的試驗溫度部分試樣的扭轉而且也包括了最熱部分以外的面積上的扭轉。所以這一方法表示了試樣在一個溫度範圍內的扭轉。結果，扭轉的總數將受到在加熱爐中最熱部分的長度和試樣長度上存在的溫度差的影響。對這

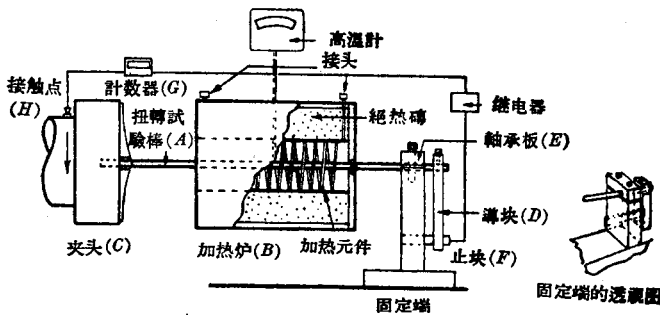


圖5 伊瑞格用來決定鋼的可鍛性的熱扭轉試驗設備

一影响,当然,可以采用特殊设计的加热炉而使之减至最小。

伊瑞格又发现使用比 9/16 吋标准试样的直径更大或更小的试棒是无益的。他觉察到棒中部的缩小部分使结果不准,因为扭转并不局限于中央的一小部分,而在突肩处有着积聚起来的倾向。关于棒的大小,伊瑞格的观察已经被安德逊 (Anderson) 等所证实,他们发现断裂时的扭转数并不受试样直径变动的影响。但是他们也记录了断裂时所要求的转数增加当试样的直径从 5/8 吋减小至 3/8 吋这样的现象。此外,关于试验速度,安德逊注意到当扭转速度增加时,断裂时的扭转数亦相应地增加。

虽然,用直的圆试棒的结果不能令人满意,但是布鲁姆 (Bloom) 等仍认为热扭转试验是有价值的,因为它能概略地测量材料的热加工性 (塑性)。他们用这种试验方法去探讨不锈钢的组织和其热加工性的关系后发现奥氏体和铁素体同时存在时,较在已知合金成份中仅出现主要相情况下的加工性,显然为差。

温度-可锻性的结果

图 6 为一典型的热加工性曲线,图中包括了四个钢种,其中两种为结构钢 SAE 4615 和 SAE 2512,一种为高碳工具钢,另一种为 304 不锈钢 (18Cr: 8Ni)。从这些曲线中可以很清楚地看出,在每一种情况下,断裂时的转数都是随温度的上升而增加,直到最佳或最大温度为止,超过了这一温度扭转次数又复下降。但这几种钢有如下的一些差别: (1) 在一定温度下所需的断裂时的扭转数; (2) 扭转数随温度上升而增加的速度; (3) 扭转数达到最大时的温度; (4) 在过了最佳温度后扭转数减少的速度等。

比较图 6 中两种结构钢,由于 SAE 4615 的最大扭转数时的温度仅较 SAE 2512 高出 25°F, 如曲线 (1) 的斜度所示,接近和离开这一温度 (2,350°F) 的速度是较慢的。工具钢曲线 (3) 与 SAE 2512 有些相似,但其最大扭转数时的温度可以看出是较低的,仅为 2,150°F, 而 SAE 2512 则为 2,350°F。另一方面, 18Cr 8Ni 不锈钢在 2,450°F 时尚没有达到最大扭转数时的温度。但是这种钢断裂时的扭转数较其他几种钢为少。此外,在美国俄亥俄州的梯姆肯 (Timken) 滚动轴承厂的研究室中对以扭转试验为基础而得出的各种钢种的最佳温度和锻造温度间的关系,已在进行广泛的工作。根据探讨的结果发现,一般由扭转试验所得到的最佳温度与由经验而决定的

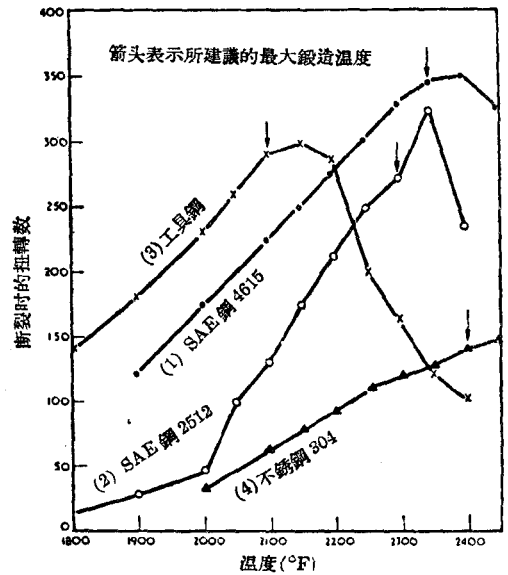


图 6 四个不同钢种的典型热加工性曲线

组 成 (%)

	(1)	(2)	(3)	(4)
碳	0.14	0.10	1.02	0.05
锰	0.62	0.56	0.31	0.52
硅	0.30	0.28	0.35	0.52
铬	0.15	0.15	0.30	17.78
镍	1.72	5.01	0.09	9.60
钼	0.25	0.05	0.03	—
硫	0.021	0.020	0.018	0.012
磷	0.022	0.018	0.015	0.006

最大锻造温度是一样的。

虽然,很多人已对各种不同因素,包括合金元素,关于钢的热加工性的影响进行了很广泛的研究工作,但每一个研究工作者所发表的热扭转试验的结果,彼此都多少有些不同。换言之,即使对同一材料所进行热扭转试验所得到资料也不是可比的或能重复的。但是,根据一些有用的报告仍可以得出广泛的结论,以得到各种合金元素对锻造热加工性影响的一般概念。

在这方面,开始时有必要提出,虽然一次熔炼的热扭转试验结果是完全可以重复的,但是同一钢种而不同炉次间则并不存在这种重复性。例如,对 304 不锈钢的五次熔炼进行了试验后指出,每炉钢的断裂时最大扭转数是各不相同的,而且彼此的差别很大。换言之,要从各不同钢种的一次熔炼的曲线上决定最大锻造温度,看上去是不易做到的。所以最好能象伊瑞格所建议的,为了能使这些试验能够有

重复性，每一次单独熔炼应得出临界的热加工性资料。

碳

关于碳的影响，已经知道对含碳量约 0.4% 的碳钢，其最大塑性(加工性)随温度的增加而提高，而含碳量较高时最大塑性约在 2,350°F 或稍低时出现。图 7 所示为 5 种含碳量 0.04~0.96% 钢的热扭转试验的结果。可以看出在每一温度下的断裂时的扭转数随含碳量的增加而减少(特别是高碳钢)，而最大扭转数产生时的温度也是一样。这意味着当含碳量增加时，塑性随温度的增加而很快的下降。

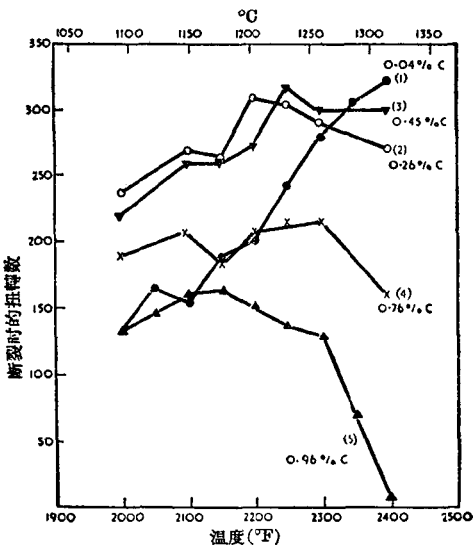


图 7 碳对碳钢热加工性的影响

组成 (%)

	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
C	0.04	0.26	0.45	0.76	0.96
Mn	0.26	0.49	0.84	0.84	0.34
Si	0.003	0.19	0.08	0.20	0.31
S	0.024	0.030	0.042	0.035	0.045
P	0.004	0.014	0.026	0.016	0.019

锰

大家都知道，钢中锰的作用主要是减少由硫而产生的热脆性的影响。一般，它改善了碳钢的可锻性，如图 8 所示。在决定锰的影响时，进行比较的各次熔炼的含硫量应尽量接近，这一点很重要。这主要是因为假使在某一熔炼中含硫量较另一炉为

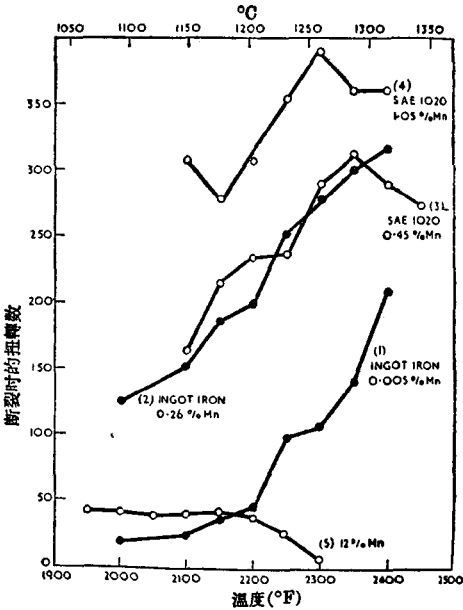


图 8 锰对低碳钢热加工性的影响
ingot iron——生铁

组成 (%)

	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
C	0.02	0.04	0.22	0.26	0.64
Mn	0.005	0.26	0.45	1.05	12.88
Si	0.02	0.003	0.08	0.23	0.88
Ni	—	—	—	—	3.11
S	0.026	0.024	0.021	0.028	0.032
P	0.009	0.004	0.014	0.021	0.017

少，则用于中和掉硫的不良影响所需的锰亦将较少，所以其热加工性将与含锰量高的相比较。

图 8 中亦表示出 12% 锰的奥氏体钢的热加工性很低。这并不奇怪，由于铁素体钢断裂时的最大扭转数较奥氏体材料为大。

在研究锰对 304 和 321 不锈钢的影响中指出，锰大于 0.40% 时并没有改善这些钢的热加工性。一致认为镍和锰具有同样的效果，所以低镍钢中希望锰能起更多的作用。但是在 304 (18Cr:8Ni) 和 321 (18Cr: 8Ni: Ti) 不锈钢中，镍的含量已经很高，这样可将锰对这些钢可锻性的有利影响，限制在 0.4% 范围内。

硫

大家都熟知，比较大量的硫对铁和非铁金属的热加工性很为不利。图 9 所示当钢中硫的含量为

0.012% (1) 时, 在 2,100°F 和 2,350°F 时的断裂时扭转数分别为 170 和 320。但是当硫的含量增至 0.116% 时, 如钢 (3), 则在 2,100°F 和 2,350°F 时的断裂扭转数相应地减至 70 和 110。图 9 中钢 (5) 和 (6) 亦表示出虽然锰对抵消由硫而产生的热脆性的作用很为重要, 含 0.014% 硫的钢在高温时的塑性亦显然是很好的。

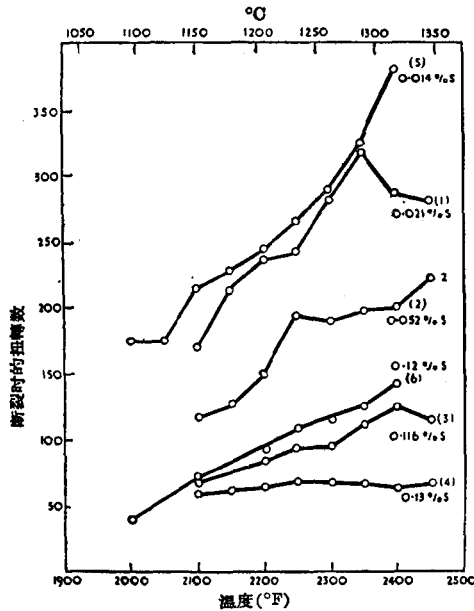


图 9 硫对碳钢热加工性的影响

组 成 (%)

	(1)*	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
	SAE 1020			SAE 1335		
C	0.22	0.22	0.24	0.24	0.36	0.38
Mn	0.45	0.48	0.46	0.44	1.74	1.62
Si	0.08	0.08	0.08	0.08	0.27	0.20
S	0.021	0.052	0.116	0.130	0.014	0.12
P	0.014	0.014	0.014	0.014	0.014	0.026

* (1) 表示最初熔炼即炉中分析。炉次 (2)、(3) 和 (4) 中钢锭的含硫量较 (1) 增加。

图 10 进一步地证明实际上不含锰的低碳钢的热加工性如何受少量硫的影响。注意到在 2,000°F 时含 0.002% 硫的钢 (1) 其断裂时的最大扭转数为 440, 而含硫量双倍 (0.004%) 的同一种钢 (2) 则仅 40 次。

至于硫对铬不锈钢的影响, 有迹象表明在 410 钢 (11.50%~13.50% Cr) 和 416 钢 (12~14% Cr; Zr, Mo 最大 0.60%) 中, 铬有减少硫不良效果的倾

向, 以使这些钢易于进行热加工。当然必须注意这些钢, 甚至在锻造温度时, 仍是铁素体。

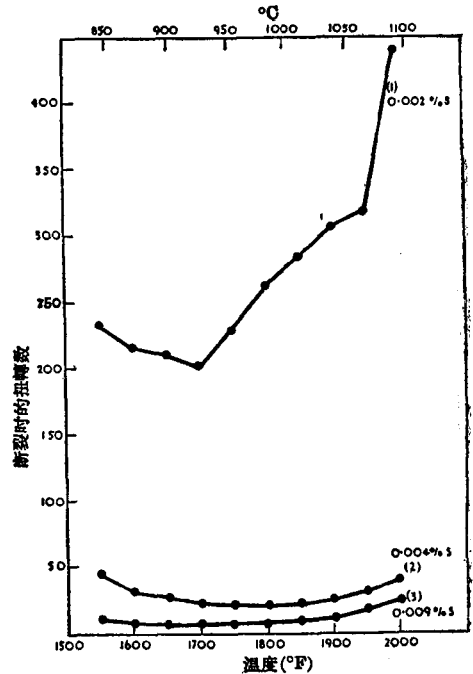


图 10 硫对低碳钢热加工性的影响

组 成 (%)

	(1)	(2)	(3)
O	0.28	0.21	0.17
Mn	0.003	0.004	0.001
Si	0.115	0.004	0.001
S	0.002	0.004	0.009
P	0.004	0.002	0.003

硅

硅的含量为在 0.20% 以下时, 则其对低碳钢可锻性的影响, 可略而不计。在大约 1.00% 以上时, 热加工性则行下降, 如图 11 所示。但是, 这些结果要很好的注意, 如所发表的许多热扭转试验的资料一样, 钢 (3) 和 (4) 的含硫量高于钢 (1) 和 (2) 而含硅量则较低。高的含硫量伴随着比较低的锰对钢 (3) 和 (4) 的可锻性更为不利。因此, 很难决定钢 (3) 和 (4) 热塑性的降低是主要由于高硅或高硫和高硅的联合作用。虽然, 钢 (4) 含硅高达 1.20%, 在温度 2,250°F 至 2,400°F 间, 其热加工性的确是最低。

至于硅对高合金钢的影响, 有些证据指出 302 和 304 (18Cr: 8Ni) 奥氏体不锈钢的热加工性在高

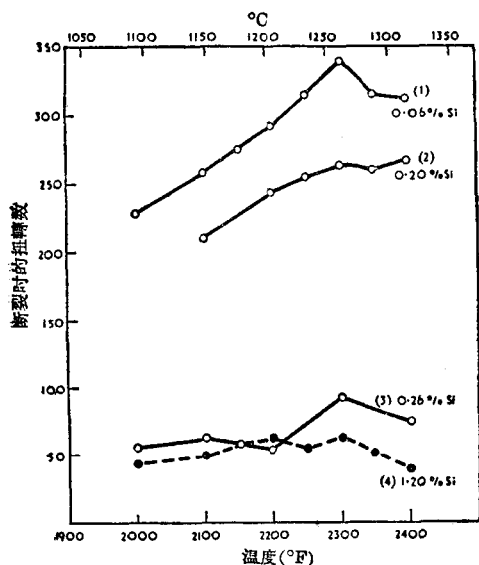


图 11 硅对低碳钢热加工性的影响

組成 (%)

	(1)	(2)	(3)	(4)
O	0.12	0.11	0.068	0.070
Mn	0.51	0.52	0.26	0.232
Si	0.06	0.20	0.26	1.20
S	0.035	0.030	0.043	0.043
P	0.010	0.022	0.031	0.009

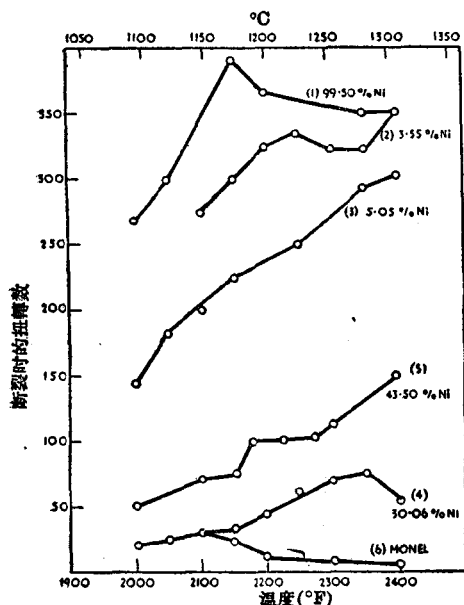


图 12 镍对低碳钢热扭转特性的影响

組成 (%)

	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
O	0.06	0.16	0.16	0.11	0.052	Monel
Mn	0.26	0.57	0.51	0.47	0.49	
Si	0.05	0.24	0.18	0.01	0.13	
Ni	99.43	3.55	5.05	30.06	43.50	67% Ni, 30% Cu
S	0.005	0.013	0.019	0.042	0.008	(1% Mn, 1% Fe)
P	—	0.013	0.019	0.010	0.011	

温时降低了，假使硅的含量大于0.5%。这假定是由于硅的形成铁素体倾向形成了复合的组织，这对热加工性是不利的。

镍

假使含镍量在5%以下，则它与锰一样具有改善低碳钢热扭转性的影响(图12)。这个图表示纯镍在高温时是有延性的，这对钢的热加工性很有利。虽然，从(图12)上曲线(4)看，大量镍的存在好象降低了热加工性。这是由于作为奥氏体形成者的镍所产生的影响。曲线(6)指出莫涅尔合金(Monel)的热加工性以及加入大量的铜后如何地对镍和镍合金的可锻性产生不利的影响。

铬和其他合金元素

铬是少量或大量存在于合金钢中的元素。它常与镍、铝和硅等同时存在。它在低碳钢中的影响(图13)是使材料的热加工性下降。虽然，发表的资料指出含量超过9%，使热扭转特性得到改善，特别在2,300°F时，如图13中曲线(4)所示的那样。这一影响是由于形成了均匀的铁素体基体代替了二相组织的缘故。

高铬不锈钢的热加工性随着较高的含碳量而降低。而18-8镍铬钢低碳材料的热加工性较含碳量为0.07~0.08%的材料为低。虽然，这是因为低碳不锈钢中形成了δ-铁的缘故，但是这些钢热加工性的差别究竟是由于含碳量的不同，还是由于溶炼时的原因，还值得怀疑。

根据报告在合金钢中，材料中的合金成份和碳的成份显然地会影响到热加工性，而对含碳量大于1.00%的钢，合金的成份的多少尤为重要。图14表示在高碳钢中加入了如铝、钨和铬等元素后，它的可锻性降低的情况。图15更进一步地证明了铝在SAE 1015低碳钢中的影响。图中指出同样含碳量的钢但是不含铝则具有很好的热塑性，在18-8不锈

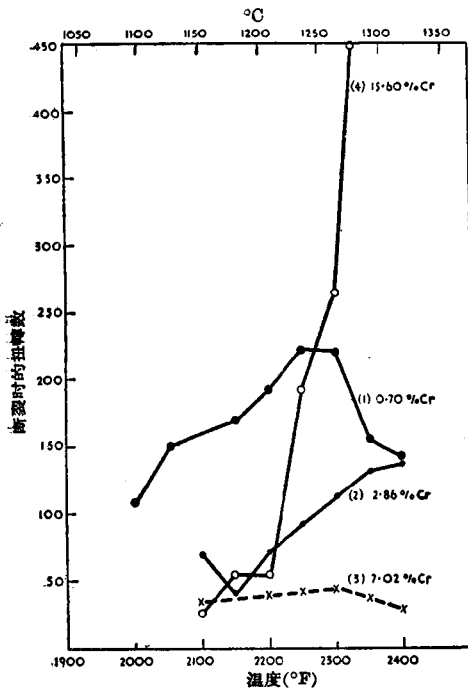


图 13. 鉻对碳鋼热加工性的影响

組成 (%)				
	(1)	(2)	(3)	(4)
O	0.21	0.11	0.11	0.07
Mn	0.43	0.47	0.38	0.41
Si	0.23	0.30	0.69	0.38
Cr	0.70	2.86	7.02	15.60
Mo	—	0.49	0.55	0.025
S	0.026	0.009	0.014	0.013
P	0.018	0.013	0.016	0.018

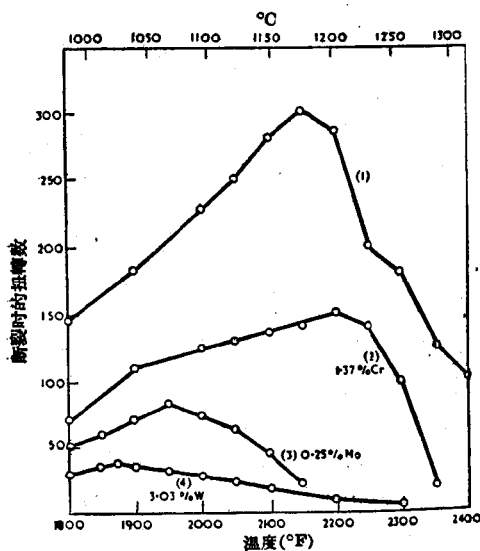


图 14. 合金元素对含碳量 1% 的鋼热加工性的影响

組成 (%)

	(1)	(2)	(3)	(4)
O	1.02	1.03	1.49	1.45
Mn	0.31	0.44	0.40	0.37
Si	0.35	0.32	0.72	0.66
Cr	0.30	0.37	0.12	0.09
Ni	0.09	0.12	0.17	0.13
Mo	0.03	0.03	0.25	0.54
W	—	—	—	3.03
S	0.018	0.012	0.017	0.015
P	0.015	0.014	0.014	0.023

鋼中，鉬的影响仍然是降低了热加工性，如图 15 中的曲綫(4)和(5)所示。大家都相信鉬是鉄素体形成元素，使鋼中出現了第二相，这样便使这一类的鋼的热加工性降低。

各种不同的奥氏体不銹鋼的热扭轉特性說明了

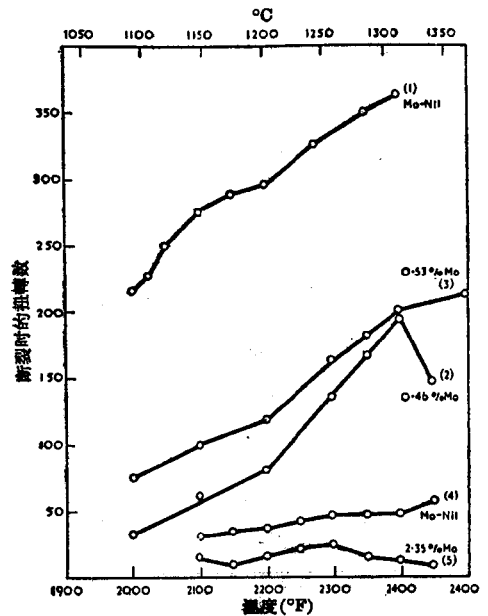


图 15. 鉬对低碳鋼和鉻鋼热加工性的影响

組成 (%)

	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
O	0.13	0.14	0.12	0.074	0.022
Mn	0.47	0.42	0.48	1.37	1.60
Si	0.03	0.81	0.23	0.50	0.32
Cr	—	—	—	18.59	18.08
Ni	—	—	—	10.44	11.40
Mo	—	0.46	0.53	—	2.35
S	0.028	0.020	0.025	0.013	0.0107
P	0.018	0.016	0.016	0.017	0.015

这些鋼的热加工性差别很大,而在加入稳定元素如鈦和鈳以后,最大扭轉温度和在这一温度时的扭轉数都有所降低。同样,增加鉻和鎳的含量,如 25Cr-12Ni 和 25Cr-20Ni 鋼,减少了断裂时所需的轉数。18Cr-8Ni 鋼的可鍛性由于高的含硫量而大为降低。

鉛、錫和氮

鉛,如硫一样,近年来用来改善鋼的切削性能。氮在鉻鋼中作为合金元素以在常温下稳定奥氏体。在商品鋼中亦被視作杂质。在碳鋼和低合金鋼中,其含量一般很小,对热加工性没有什么危害。在高鉻鋼中高温时的塑性随氮的增加而下降。錫不是作为合金元素用的,但在溶鋼中常以杂质出現。

这些元素对鋼的热加工性的影响是不利的。它

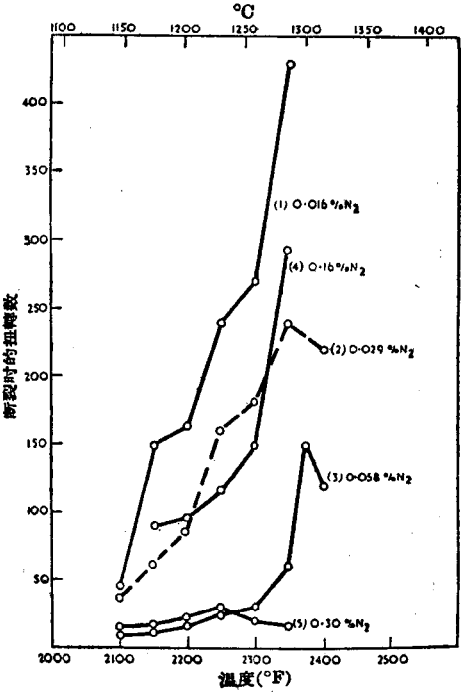


图 16 氮对 430 和 446 鉻鋼热加工性的影响

組成 (%)

	AISI 430			AISI 446	
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
O	0.08	0.09	0.11	0.10	0.10
Mn	0.44	0.43	0.34	0.42	0.48
Si	0.38	0.38	0.35	0.43	0.38
Cr	15.86	15.09	15.60	27.12	26.44
S	0.018	0.013	0.018	0.010	0.012
P	0.022	0.013	0.018	0.011	—
N ₂	0.016	0.029	0.0575	0.16	0.30

們有下降的影响,如图 16 和 17 所示。为了进行比较,在图 17 中也包括了含硫高的和低的曲線。可以看出錫和鉛的影响和硫很相似,曲線(2)和(4)与高硫鋼的曲線(6)很接近。

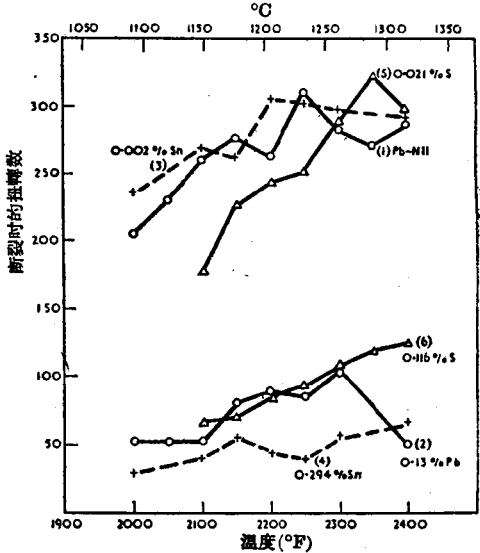


图 17 錫和鉛对 0.20~0.25% 碳鋼热加工性的影响

組成 (%)

	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
O	0.20	0.20	0.26	0.26	0.22	0.24
Mn	0.48	0.48	0.49	0.48	0.45	0.46
Si	0.17	0.17	0.19	0.17	0.08	0.08
S	0.031	0.031	0.030	0.037	0.021	0.116
P	0.020	0.020	0.014	0.012	0.014	0.014
Pb	—	0.13	—	—	—	—
Sn	—	—	0.002	0.294	—	—

根据报告,氧、磷、鈷、鈳和鈦在含量正常时,单独对鋼的热可鍛性的影响,即使有的話也是很小。决定鈳含量約 1% 时的影响值得注意。例如,含磷在 0.013% 和 0.025% 間的低碳鋼热加工性曲線差別很小。而另一方面,含硫量相差很小的鋼,其热加工特性則有很显著的差別,如图 9 和图 10 所示。

結 論

几乎所有常用的机械試驗方法都會由一位或几位科研工作用来决定金属热加工性或可鍛性等方面的特性。都已取得不同程度的成果。

看上去似乎肯定缺乏一种简单的可鍛性試驗方法,象拉力和疲劳試驗那样的将材料分类。

近年来热扭轉試驗(主要的应力是剪应力)已被公认为是测量不同温度下鋼的热加工性最好方法。

这一方法是在一系列控制的温度下，将试样进行扭转试验。试样断裂前的最大扭转次数时的温度是热加工最适宜的温度。

断裂时最大扭转次数发生在一般认为无缝钢管生产中棒料和钢坯穿孔时最适合的温度。这一最适合的温度同样亦是评定钢的可锻性认为满意的温度。

到现在为止所发表的有关热扭转试验的资料，大部分是对不同成份的钢而言，在非铁金属方面尚未应用这种试验。决定热扭转试验所得到的资料与工厂中不同强度热加工操作实际经验间的关系，是很不容易办到的。所以，适当地考虑所发表的资料和所指的热加工操作间的关系是很重要的。

某些操作如穿孔，在加工过程中温度升高，这样，必须调整操作温度，以使温度升高后，其最大或最佳温度不致超过断裂时最大扭转的温度。

热扭转试验最重要和最不利的方面之一是一次熔炼的结果是可重复的，而同样的钢在不同炉次时，便不能重复。换言之，要决定钢的热加工性，试验必须在一次熔炼下进行。

对于不同研究者用同一种材料的研究结果不能很好的进行比较，一位研究者得到的可锻性-温度曲线，往往与别人所得到的形状不同。如能严格控制：(a) 加热至锻造温度时的速度及在锻造温度下保温的时间，(b) 应变速度，这些差异当然可以减至最小。

钢中的合金成份愈高，不同炉次间结果的差异愈为显著。这种差异相信是由于试验材料的关系而不是试验本身的问题，因为这种试验一般认为是测量金属热加工性能的最适宜的方法。大部分发表的结果都是轧制和锻造方面的。所以这些资料是否能与同样铸造或锻压的材料进行比较，仍是疑问。

因为钢加工中的热加工操作最初是从钢锭开始进行的，所以将来应当对轧制或锻造产品的和同样铸造材料的热扭转特性进行研究比较，极为重要。

大部分已发表的资料是用中央部分没有缩小的直的圆试棒(长 22 吋，直径 1/2 吋)试验后得到的。用这种试样所得到的结果，在某些方面受到非议而且认为不很重要。虽然试棒有这样的缺点，但仍旧一致认为热扭转试验用来概略地决定在不同温度下，钢的热扭转性是有其一定价值的。

至于试验的速度，根据报告，当扭转速度增加时断裂时的扭转次数也增加。

虽然，试棒的尺寸对断裂时的扭转数的变化作用不大，但是有迹象表明试棒的直径从 5/8 吋减小

至 3/8 吋时，断裂时扭转数亦增加。

钢的微观组织除了能分别出单相或多相组织外，并不能对锻造的好坏有所说明。

试验也并没有对表面缺陷与热加工性的影响提供任何资料，虽然，大家都知道很多热加工操作的困难是这些缺陷造成的。这方面似乎还须进一步研究。

已经进行了很多有意义的工作，以决定合金元素对钢的热加工性的影响。但是系统的研究各种元素单独的或联合的作用对常用的或不常用的钢种热加工性的影响，是仍有很广阔的天地。简言之，合金元素的影响如下：

(1) 易切削的附加成份，如硫和硒，使最大扭转温度和在这一温度下的扭转次数降低。换言之，这些元素减低钢的热加工性。

(2) 锡和铅的作用和硫很相似。

(3) 强烈的碳化物形成元素如钛或钒，具有减低奥氏体铁素体钢在高温时(2,300°F 以上)的可锻性。

(4) 铁素体形成元素如硅和钼对钢特别是对在高温时的奥氏体铁素体钢的热加工性不利。

(5) 钨在低碳钢中含量小于 9% 时，产生了有害的作用，但超过了这一含量，似乎对热加工性有所改善，特别是在 2,300°F 时。

(6) 镍和锰一般改善了碳钢的热加工性。虽然这些元素大量存在时加工性由于形成奥氏体而受到影响。热扭转试验表明，锰抵消了硫的热脆性影响。

(7) 氮显著地降低了 430 和 446 高铬不锈钢的热加工性，或许是由于它具有稳定奥氏体的倾向。

(8) 磷、钼、钴和氧的影响还不能很正确的掌握。虽然，这些元素在单独地少量存在时，对钢的热加工性影响不大。

(9) 奥氏体钢如 304(18Cr-8Ni) 和 12% 锰铁素体钢 410 的热加工性为低。同样，增加钨和镍的含量如 309(25Cr, 12Ni) 或 310(25Cr, 20Ni) 钢，减少断裂时的扭转数，亦即降低了热加工性。

(10) 含有铁素体形成元素(如钛或钒)或含有弱的奥氏体形成元素(如镍或锰)的奥氏体钢有形成热加工性最差的复合相的倾向。

这种试验方法适用于(a) 求出组成和结构对热加工性的影响；(b) 表示出钢的最适合的热加工温度和临界区；(c) 比较新钢种和不常用钢种和已知热扭转特性的钢种断裂时的扭转数，以比较其热加工性。

(冯桐荃译自《Metal Treatment》1959 年，

第 26 卷，第 160~161 期，第 65~71

页；第 162 期，第 107~114 页)

鍛造高温用材料方面的发展

为了适应火箭和宇宙飞船各种部件的需要,美国的 Wyman-Gordon 公司,对在高温时仍需保持相当强度的金属和合金的鍛造問題进行了探討。根据这些部件是用三种材料鍛造的: (1) 中等高温合金,如 INCO 901、V57 和 A286; (2) 镍基“超合金”,包括 Astroloy、Rene 41 和 Waspaloy; (3) 耐热金属——钼、鈳,可能还有钽。

中等高温合金部件的鍛造已正式投入生产,这

些部件系用于 $1,000 \sim 1,200^{\circ}\text{F}$ 的高温間。当使用温度高于 $1,200^{\circ}\text{F}$ 但低于 $1,800^{\circ}\text{F}$ 时,則采用镍基的“超合金”。使用温度高于 $1,800^{\circ}\text{F}$ 时,則須采用耐热金属。鍛造耐热金属的經驗尚很有限,虽然現在已有使用了但仍有許多基本的操作問題尚待解决。各种不同金属鍛件的使用温度范围和現在的生产情况列于图 1 中。

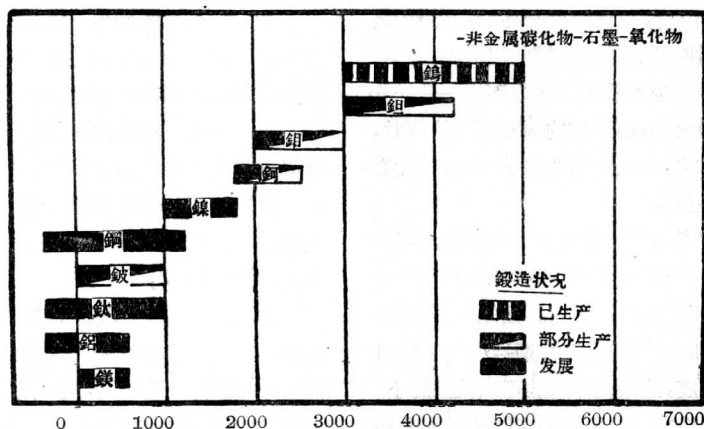


图 1 各种金属鍛件的使用温度范围图(附各种金属的鍛造状况)

在高温时(高于 $1,000^{\circ}\text{F}$)使用的铁基和镍基合金模鍛件,在模鍛前加热至 $1,600 \sim 2,100^{\circ}\text{F}$ 。在該公司的車間用于加热鍛造坯料的炉子是輸送带式或轉底式的,如图 2 所示。預热至 600°F 的标准工具鋼模具用于鍛造这些合金和耐热金属。在鍛造温度时,铁基和镍基合金的部件在压床上或錘上成形,并在模具损坏前从模具中取出。从图 2 可以看到一个工件正在放入 50,000 吨鍛造水压机的模具中,这台水压机装在格拉夫頓城(Grafton),由 Wyman-Gordon 公司管理,但为美国空軍所有。这是美国空軍重型水压机规划中两台同样大小的水压机中的 1 台。

超合金和耐热金属在高温时的强度大,鍛造起来比較困难,因而模具的磨損也較快。有些耐热金属現在試鍛的温度超过 $2,500^{\circ}\text{F}$,对模具的磨損最大。改进模具的方法現在正在进行研究,但是这一問題現在并不怎么严重,因为用耐热金属制造的鍛件

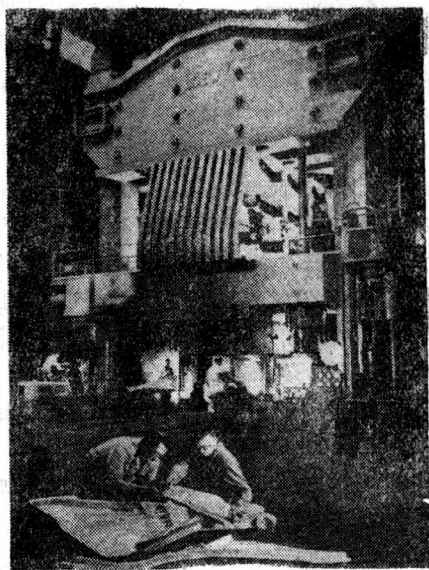


图 2

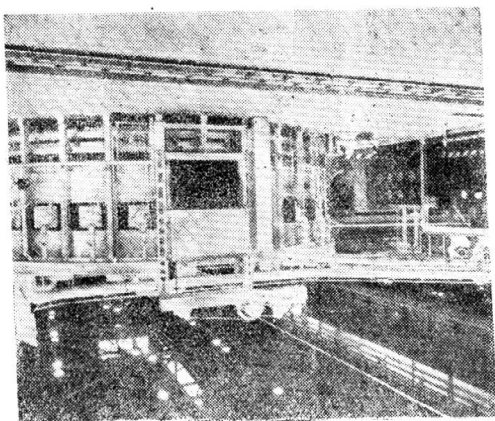


图3 加热锻造坯料的轉底式炉。直徑 30 呎, 配有仪表, 使工件的温度保持在較窄的範圍內

数量尚不足以使模具造成很大的磨損。用于鍛造鉄基或鎳基鍛件的模具, 在正常的情况下并没有出現很严重的磨損。

图4是模鍛的模具在立式搪床上用靠模正在加工模具部件外形的情况。加工好之后, 一套模具連同图中加工的部件共重 70 吨, 用于 50,000 吨的水压机上, 以鍛造火箭上的前端圓錐体。这样大的模块在使用前先在台車式炉中进行加热如图4所示。

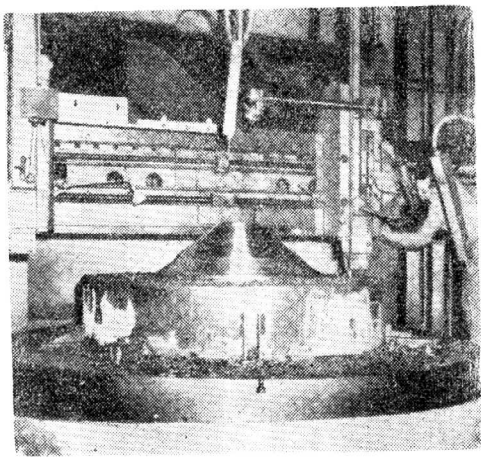


图4 用于鍛造火箭上前端圓錐体的模具正在用靠模加工的情况。一整套模具用于图2的水压机上

使用各种真空熔炼方法

現在用于高温的許多鍛件都是圓盘形的或者是具有各种不同外形切面的輪形件, 如噴气式飞机上的叶輪或压缩机轉子等。为了能得到滿意的鍛件, 在开始熔炼金属时, 就要很留心地控制操作过程。大部分这些金属是采用一种真空熔炼方法进行,

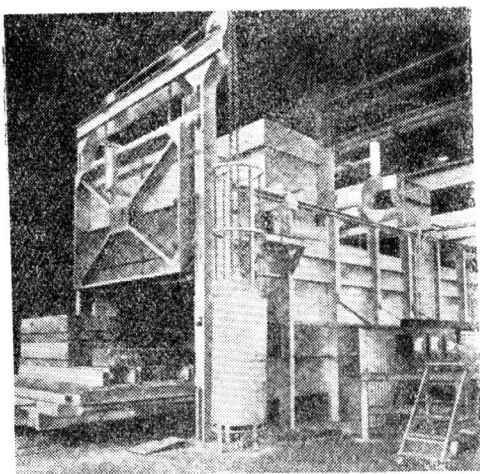


图5 大型模块在台車式炉上預热至約 600°F 使用各种真空熔炼方法

而鑄成鋼錠。例如感应真空熔炼技术用于鎳基超合金, 而鈦錠則用电子束熔化金属的真空自耗电极熔炼法制造。

由于鎳基超合金很为复杂, 所以在熔炼时必须很留心, 而在操作时也要特別小心以防在澆鑄前即被染污。此外, 一般还需在特种的錠模中进行澆鑄以将不同相的偏析減至最少。

澆鑄好的金属錠經开坯后使成所需的切面, 然后切成一定长度的坯料送入鍛工車間。

坯料一般先用超声波檢驗并从各个不同部分切取試样, 經腐蝕后在显微镜下檢查相的偏析、夹杂或其他缺陷。同时亦确定了其化学組成、工程性能和鍛造特性。从坯料上切取的試样或者專門熔炼的試驗材料先进行鍛造試驗, 在証实其可以加工后再投入生产。在生产过程中的各个阶段, 材料再經過超声波檢驗、腐蝕或用染料侵入的方法来檢查, 以发现在鍛造工作上可能发展的缺陷。直接讀数的光谱仪(图6)通常是被用来决定化学組成, 它既快又可靠。假使在坯料中发现夹杂和开裂, 即需报廢, 因为大部分的开裂缺陷在鍛造时是不能很好修复的。

这样, 工程师們便要决定鍛造某一另件所需坯料的重量(包括某些損耗在內)。一个典型叶輪鍛件需要 300 磅的坯料。

起初, 加热的坯料放在平砧面上鍛鍛成“圓餅形”, 隨即在閉合模具中鍛造。根据叶輪的不同复杂程度, 一个叶輪鍛件有时需用四副不同模具之多。当用四副模具时, 其变形过程一般是头鍛、鍛粗、預鍛和終鍛, 每一副模具所制造的鍛件外形都較前一副模具更为精确。

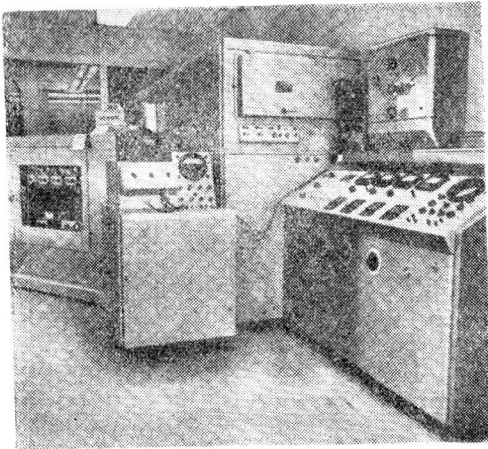


图6 分析鍛造材料成份用的直接讀数的光譜儀，可以很快的讀出可靠的數字

簡單的鍛件不需這樣的工序，而常可在終鍛模中一次成形。但大部分葉輪仍需要一些預鍛和鍍鍛等工序。圖7所示為含1% 鎢的鈰合金鍛件，在閉合鍛模中鍛好後準備進行精加工操作。

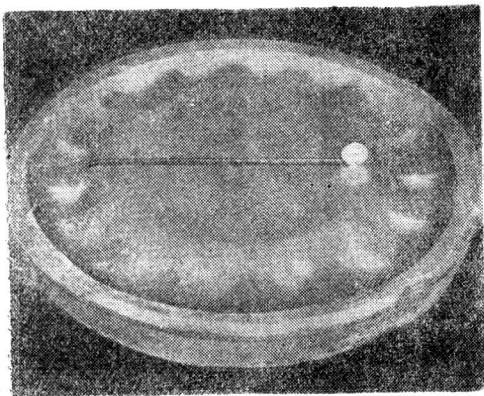


图7 在封閉的鍛粗模子中鍛出的鈰鍛件
正準備進行精加工

小型葉輪常常在對每一操作具有足夠能量的錘上進行鍛造。大型的葉輪則需用大型水压机。Wyman-Gordon 公司擁有6台能量由6,000噸至50,000噸的模鍛水压机。此外，有些鍛造操作還需在其他的專用設備如擴孔機上進行（圖8）。擴孔機的滾輪使工件轉動，並逐步的加壓，以使其逐漸成形。噴氣式飛機上用的40吋直徑的圓環件如圖中所示就是用擴孔方法製造的。

圖9上所示的系一個A-286鋼（一種中等高溫合金）的透平軸鍛件，在20,000磅錘上正準備在模子中進行終鍛。鍛件是圓錐形的，長16.5吋，直徑（大頭）21吋，重233磅。

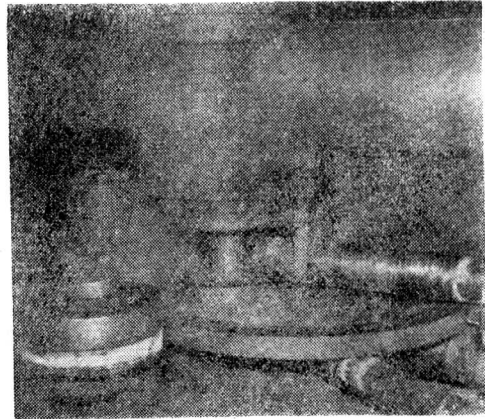


图8 噴氣式飛機上用的40吋直徑的圓環件
正在進行擴孔

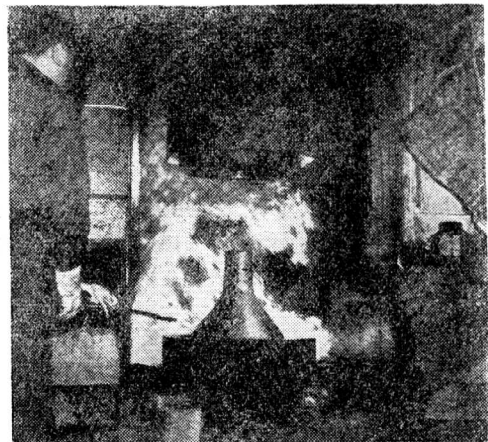


图9 用中等高溫鋼鍛造的透平軸正在20,000
磅鍛錘上終鍛

當鍛造鎳基超合金時，鍛造溫度必須控制在很小的範圍內。假使工件在高於或低於這一溫度範圍時進行鍛造，即會形成裂紋或斷裂。這種材料，如在先前的檢驗中即使有很微小的缺陷沒有能發現，鍛造時往往隨時可造成廢品。一般超合金和耐熱金屬很難加工，對裂紋的敏感性很大，較鍛造性能好的材料容易報廢。

除鍛造溫度範圍較窄以外，對鎳基超合金來講，變形量和變形速度很有決定性作用。這些因素不但與合金本身有關而且亦與工件的形狀有關。進一步改進機械性能將同時要依靠冶金成份和加工方法。換言之，工件最後的組織將大部分決定於材料變形的的方法。超金屬一般較容易加工的金属需要更多的工序。

某些推進系統中的葉輪有許多是用鎳基超合金進行鍛造的。例如，一個由Wyman-Gordon 公司