



內 容 簡 介

本文研究了非合金鈾在 α , β , γ , δ 相区內的拉伸性能与压縮性能, 以及溫度、試驗速度对上述性能的影响。列出了上述相区內承受 100,000 磅載荷时压縮成形数据和有关鈾 α 相区內初步蠕变数据、拉伸-冲击数据、扭轉試驗数据。同时报道了在 β , γ , δ 相区內挤压常数与压力, 以及挤压鈾在室溫下的拉伸和压縮性能。并評述各相区加工成形的可能性。

本文同时还利用金相方法来測定拉伸、压縮及挤压加工对鑄态鈾显微組織的影响。

本文譯自美国原子能委员会 报告 HW-65019, H.R. Gardner 和 I.B. Mann 著, "Mechanical Property and Formability Studies on Unalloyed Plutonium" 由李一清譯

目 录

一、引言	1
二、結論	1
三、一般实验技术	3
四、鑄态鈰的金相	4
五、拉伸性能研究	8
六、压缩和成形性的研究	32
七、蠕变試驗	63
八、拉伸-冲击試驗	66
九、扭轉实验	68
十、在 β , γ 和 δ 相的挤压	69

一、引 言

鈰在工程应用中的数量是比較少的,但是,在工程应用中却极其重視机械性能数据。因此,已經开始研究了鈰的拉伸、压縮、蠕变、拉伸-冲击和扭轉的性能。并测定了在拉伸和压縮試驗中溫度及試驗速度对金属鈰性能的影响。

为了获得有关鈰的成形性能的数据,已經着手研究 β 相, γ 相和 δ 相的挤压特性。测定了 β 相及 γ 相挤压的鈰在室溫时的拉伸和压縮性能。

二、結 論

在 α 相区、 β 相区和 δ 相区中,已测定了溫度对于鑄态鈰的拉伸和压縮性能的影响。一般說来,增高溫度会引起强度降低和韌性增加。 α 相是十分脆的,但是, β 相、 γ 相和 δ 相却是非常韌的。 β 相的韌性最大;在溫度为 160°C 、試驗速度为 0.015时/分 的条件下,测出 β 鈰的延伸率达 620% ,断面收縮率为 100% 。尽管 α 相的脆性是明显的,但要着重指出的是,根据拉伸和压縮时所测得的延伸率数据,証实了变形的机制在 30° 与 70° 之間发生了一个变化,这可能是由于再結晶所引起的。此外,在 α 相的压縮試驗过程中材料破裂之前测出的总塑性变形量,証实了在进行有限度地改变尺寸的操作时不发生破裂是有可能的。

不出所料,增加金属的純度会引起强度值的降低。在有关压縮成形性的研究中,証实了 δ 相具有最大的成形性。金相观察表明,在 β 、 γ 和 δ 相进行加工,通常形成一种非均匀

的晶粒組織。在成形后的試样中也还观察到微裂紋；但是，由于在大多数的鑄态試样內存在着微破裂現象 (Microcracking)。因此預料这种微破裂对于在成形之后所观察到的微裂紋是起着很大影响的。所得出的結論是，在成形操作中需要增补金相学的研究，以便能估計出成形后部件的完整性。

在 α 、 β 和 γ 相区内测定了試驗速度对于拉伸和压縮性能的影响，并得出了不同的結果。在 α 相中，强度值先增加至最大值，随后再降低。 β 相强度值随着試驗速度的增加而迅速地增加，而 γ 相强度值却增加較少。

由于 γ 相的性能并不象 β 相的性能那样受到試驗速度的影响，所以 γ 相也許比較容易进行热成形操作。但必須牢記，原先存在于鑄态显微組織內的微破裂現象的程度，可能会显著地影响到成形后部件的完整性。

根据 Pu-Pu₆Fe 共晶体在制止微破裂現象的发生中所起的显著作用来看，可以在需要經受成形工序的鈎中加入一定数量的鉄，这样，从保持金属完整性的观点來說可能是有利的。

在初步的蠕变研究中，已經測出 α 相的第二阶段蠕变速率是低的，这一点与所測得的总的塑性形变数据相适应。在应力为10000磅/吋²的条件下，当試驗温度为31°和100℃时的蠕变速率分別为15至 330×10^{-4} 吋/吋·10000小时。

在室温下进行拉伸-冲击試驗时材料均发生脆性断裂，冲击能量值在1.3至4.8呎·磅的范围之內，其平均值为2.6呎·磅。

在純扭轉試驗中获得的极限剪切强度值为46400磅/吋²。

已經确定，对 β 、 γ 和 δ 相进行挤压加工可作为鑄态鈎的

一种切实可行的加工方法。在从 β 相至 δ 相的整个区域内，挤压常数及挤压压力随着温度增高而减低。在挤压以后存在有不均匀的晶粒组织，这表明可能存在着有害的残余应力。挤压加工使得室温时的拉伸强度增加近10%，但对压缩强度没有影响。

三、一般实验技术

1. 试样制备程序

除了另作说明以外，在本文中用于测定数据的所有试样都采用了下述程序制备。

把名义上纯 (nominal purity) 的钮扣状小块钕放入氧化镁坩埚内进行熔化。每炉浇铸的金属料在1200至3000克的范围内。钕是在真空中熔炼的，并且在浇注入一个已加热至300℃的用多孔性氧化镁涂覆的石墨模子以前，于950℃保温30分钟。当模子冷却至150℃时，取出铸件，然后在手套箱的普通大气气氛中缓慢地冷却至室温。

先把铸件在-23℃至-34℃的条件下冷处理 (cold treated) 数小时，然后在室温条件下切削加工至试样尺寸。供化学分析用的样品取自正要进行最后精加工的试样中。

2. 金相观察程序

对各炉的铸件都取金相试样，金相试样被镶嵌在Thalco聚脂树脂 (Thalco polyester resin) 内，这种树脂是在室温条件下固化的。初始的表面制备，是用手在180至600号砂纸上磨光，并使用四氯化碳作为润滑剂。在Syntron摆动抛光机的“台球桌面用的絨布” (billiard cloth) 盘上，使用Linde A在四氯化碳中的乳浊液进行自动抛光二小时，

就可以得到所要求的拋光表面。把拋光状态的表面放在明視場照明下照相，所有的显微图片上并没有晶粒組織。在20份正磷酸、30份水及50份2-乙氧基乙醇(2-ethoxyethanol)的溶液中，使用21伏和0.15至0.30安的电流，可以完成为研究晶粒組織用的电解拋光及夹杂物研究用的电解蝕刻。电解蝕刻需用10秒鐘的时间，电解拋光用60秒鐘就足够了。在經過60秒鐘的电解拋光和5至15小时的氧化阶段以后， α 鈾的晶粒組織在偏光照明下是很容易被显现出来的。电解拋光时间長一些，氧化阶段的时间就可以少些。

四、鑄态鈾的金相

为了鉴定所使用的鈾的质量，取自各炉鑄件的金相試样都需要在拋光态的条件下及电解拋光的条件下进行观察。在大多数試样中都观察到了微破裂現象；这些微裂紋的大小，則是变动于在图10.10与图10.11中所列示的两种极端情况之間。当然可以預料到，随着微裂紋尺寸的增加，密度就会减低。在图10.12中，列示出有一种在显微組織中极为普遍的、尚未鉴别出的球状夹杂物。在某些少数試样中存在有Pu-Pu₆Fe共晶体的网络(图10.13和10.14)。此外，在19-2-2炉次的鑄件中存在有未鉴别出的、白色顆粒状夹杂物(图10.13)。在若干試样中也观察到氮化鈾夹杂物。

把图10.10及10.11与图10.13及10.14相比較，証实了存在相当量的Pu-Pu₆Fe共晶体(含鉄量約500ppm或更多些)，会趋向于制止微裂紋的形成。苏联研究工作者已发现Pu-Pu₆Fe具有良好的延展性*，并且，这可能就是Pu-Pu₆Fe共晶体对于微破裂現象起着明显的制止作用的原因。当显微



图 10.10 典型区域，浇铸炉次19-6-4，密度19.56克/厘米³。注意微裂纹现象（放大50倍后缩小至 $\frac{3}{4}$ ）

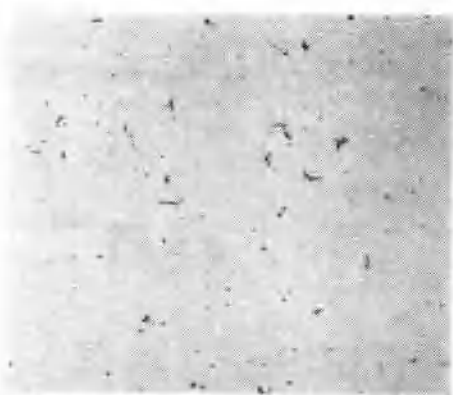


图 10.11 典型区域，浇铸炉次18-1-6L，密度19.47克/厘米³。注意有比图10.10中更大尺寸的微裂纹（放大50倍后缩小至 $\frac{3}{4}$ ）



图 10.12 与图10.10同一试样，250倍放大摄影，观察其中未鉴别出的球状夹杂物。注意那些具有“面包圈”（‘Donut’）形状的东西（箭头处），（放大250倍后缩小至 $\frac{3}{4}$ ）

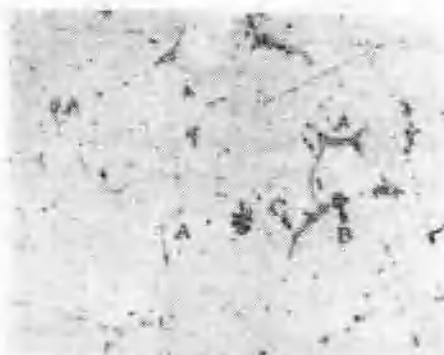


图 10.13 浇铸炉次19-2-1和19-2-2的典型区域，平均密度19.43克/厘米³，平均的铁含量1250ppm，(A) Pu-Pu₂Fe 共晶体，(B) 未鉴别出的球状夹杂物，以及 (c) 在视场内可见到的、未鉴别出的白色颗粒状夹杂物。注意没有微裂纹存在（放大250倍后缩小至 $\frac{3}{4}$ ）

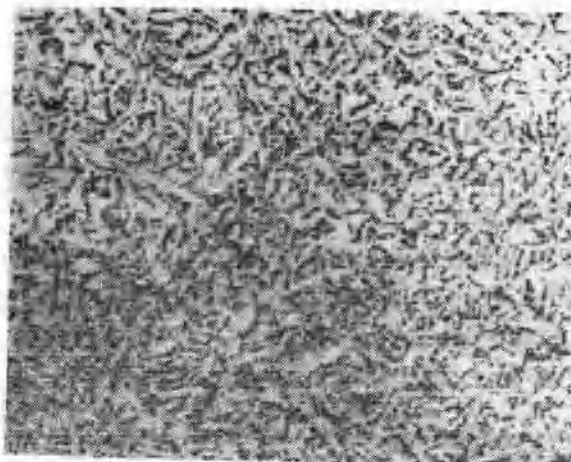


图 10.14 浇鑄炉次19-11-2E 的典型区域, 在鈾基体上有 Pu_6Fe 共晶体, 密度19.47克/厘米³, 含鉄量为1175ppm. 共晶体网络的晶粒大小为0.033毫米, 10秒钟蚀刻 (放大100倍后缩小至 $\frac{1}{4}$)

組織中存在有足够数量的 $\text{Pu-Pu}_6\text{Fe}$ 共晶体时, 在浇鑄后的冷却过程中伴随着相变所发生的塑性应变将被吸收在 $\text{Pu-Pu}_6\text{Fe}$ 中, 而并不是由鈾基体承担。当 $\text{Pu-Pu}_6\text{Fe}$ 的数量并不充分时, 塑性应变就消散在鈾基体中, 則随后就形成微裂紋。在全部鑄件中所呈現的典型的晶粒組織如图 10.15 所示。在全部試样中, 鑄态时的平均的晶粒直径是在 0.016 至 0.070 毫米之間, 总的平均值是 0.040 毫米。

* Coffinberry, A.S. and Waldron, M.B. "The Physical Metallurgy of Plutonium". Progress in Nuclear Energy, Series V, 399, Pergamon Press (1956).

五、拉伸性能研究

实验用的材料和试验技术

在拉伸性能研究中所使用的钚的化学杂质、密度和晶粒度列于表 10.3 中。

0.250 吋直径的拉伸试样 (图 10.16) 是在 440000 磅的 Baldwin-Lima-Hamilton 万能试验机上试验的, 在该试验机上的可调夹头和固定夹头之间装置有手套箱设备*。

表 10.3 在拉伸研究中所使用的钚的化学分析*,
密度和晶粒度**

	Al	Ca	Cr	Cu	Fe	Mg	Mn	Ni	Si	C	合計	密度 (克/厘米 ³)	鑄态 晶粒度 (毫米)	試样 編号
最小值	3	2	5	2	51	22	10	2	1	40	—	19.43	0.024	—
最大值	40	16	100	30	1175	10	100	50	20	290	—	19.60	0.070	—
平均值	14	5	22	7	252	5	47	19	3	136	520	19.53	0.046	21

* 单位是 ppm

** 是指平均的晶粒直径, 毫米。

在 0.015 吋/分的试验速度条件下, 于 -30° 至 325°C 的温度范围内研究了试验温度的影响。在高温试验时使用花生油作为加热介质; 在低温试验时则使用三氯乙烯和干冰。借助于在浴槽内的剧烈搅动, 在试验中有可能保持 $\pm 1.5^{\circ}\text{C}$ 的温度控制。

* Gardner, H. R. Bloomster, C. H. and Jefferes, J. M. "The Tensile Properties of Pure Plutonium and Some Aluminum-Plutonium Alloys." Second Geneva Internat. Conf-60686-9 (1958)

在 α 相内，使用一个线性差接变压器类型的伸长计测定应力-应变曲线*，从该曲线中可以测定出残余变形为0.01%的屈服强度、弹性模量及延伸率数据。所有的延伸率数据都是采用1吋的计量长度作为基准而测得的。

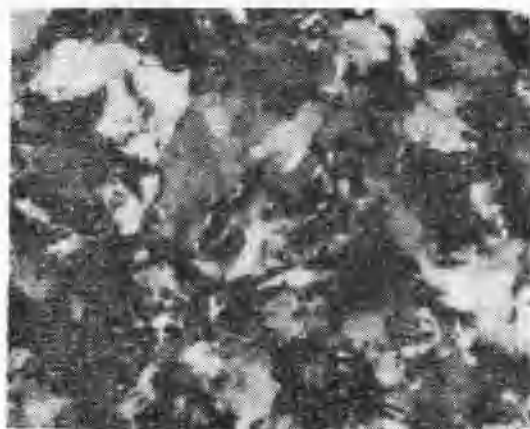


图 10.15 17-9-2 试样。镓态钚中的典型晶粒组织
晶粒尺寸为0.047毫米（放大250倍后缩小至 $\frac{3}{4}$ ）

从室温起始的加热过程中，在 β ， γ 和 δ 相内会发生大量的热膨胀，以至于目前所使用的大多数伸长计测量系统都不能适用。为了鉴别出屈服迹象，使用了Baldwin平台挠曲计（Baldwin platen deflectometer）测得在试验过程中的负荷与平台位移之间的关系图。典型的曲线是如图10.33中所示的曲线(B)。由于挠曲计的灵敏度低，因此就不可能从

* Gardner H. R., Bloomster, C. H. and Jefferes, J. M. "The Tensile Properties of Pure Plutonium and Some Aluminum-Plutonium Alloys" Second Geneva Internat. Conf. 6, 686-9 (1958)

这种类型的曲线上应用残余变形测得屈服强度。但是由于曲线具有一个直线部份，分界点为(C)，因此从直线可以定出屈服强度。在 β ， γ 和 δ 相中，这种类型的屈服强度数据已经测得。

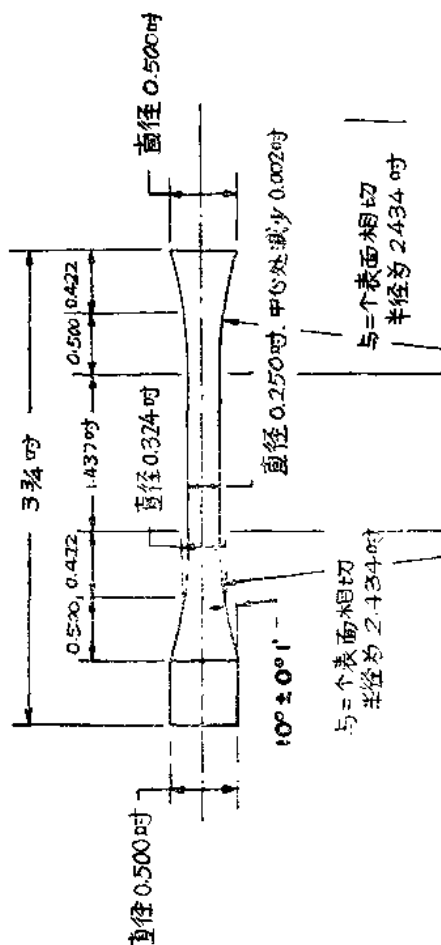


图 10.16 0.250吋直径拉伸试样的设计

使用Martens伸长計*測得了0.505吋直径的拉伸試样在 β , γ 和 δ 相的弹性模量数据。試样的伸长由4根平行的棒传递到2个鏡子上, 使得鏡子能随着試样延伸而发生轉动。这些棒通过在2吋計量长度的两端上的錐状銷与試样相連結。錐状銷插在鈷通过計量直径的錐状孔中。用一个高差計(cathetometer, 或称, 測高仪)及标尺借助于光学方法来跟踪鏡子的轉动量。鏡子的旋轉量与試样应变的关系可以使用一个已知弹性模量的試样, 或者是用光学系統的几何学原理来简单地校正。

在 β , γ 和 δ 相, 以1吋計量长度为基准的延伸率和断面收縮率可以相应地使用通常在破裂处測量刻痕标記和直径的方法来測得。試驗速度、平台移动速率由Baldwin平台移动調速机(Baldwin Platen Motion Pacer)来控制。

結果和討論

1. 試驗温度的影响 一般而言, 随着試驗温度由 α 相增高至 δ 相, 强度及弹性模量的数值都是降低的(图10.18和10.19, 表10.4和10.5)。应指出: γ 相的低温区比 β 相的高温区具有稍微高的强度和弹性模量值。由于 α 相延伸率小于1%, 因此就不可能借助在断裂后測量1吋計量长度上划痕标記間长度的方法来求得延伸率数据。然而, 可以从应力-应变曲线上的断裂点开始, 画出一根平行于該曲线弹性部份的直线, 并使它与应变座标軸相交, 这样就可以求得延伸率数据(图10.20)。指出延伸率从在30℃时的0.065%至在

* Sinnott, M. J., Kiessel, W. R. and Tobin, J. C. Final Report on Development of Apparatus and Methods for Measurement of Creep to Temperatures of 3500°F, Part I, Project M781, University of Michigan (1950)

70℃时的 0.46%，增加 600%。这种现象表明形变机制的类型可能发生了变化，而这种变化则可能是由再结晶所引起的。但不可能求得在 110℃ 条件下的延伸率数据，因为所测得的断裂是典型的脆性断裂。

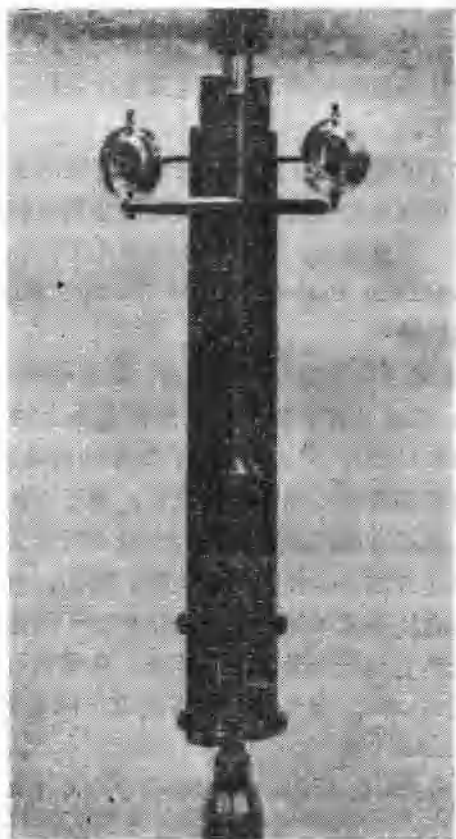


图 10.17 装在 0.505 吋直径的拉伸试样上的 Martens 伸长计

在 β 相区内，延伸率和断面收缩率很高（图 10.21）。平均延伸率在 295% 至 570% 的范围内，此时，断面收缩率名义上是 100%。 β 相延伸率值从 160℃ 和 180℃ 时的 570.4% 和 503.2% 降低至在 190℃ 时的 325.0%，这是由于在试验过程中发生 β - γ 相变的缘故，并且，在本文中以后将讨论 200℃ 时的试验结果。

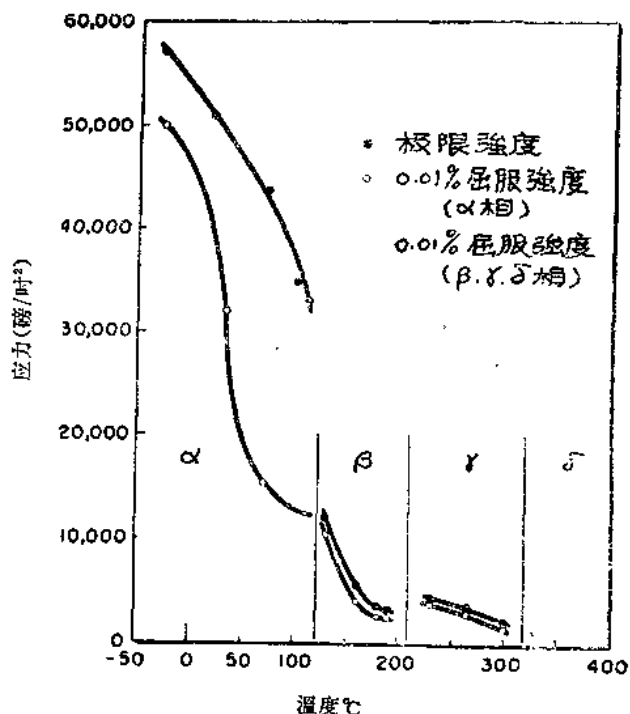


图 10.18 温度对拉伸强度的影响

在 γ 相区内，延伸率和断面收缩率都是极低的，并且，它们随着温度的升高变化很小。平均的延伸率是在 50.0 至 57.2% 的范围内，此时，断面收缩率从 75.0% 稍微增加至

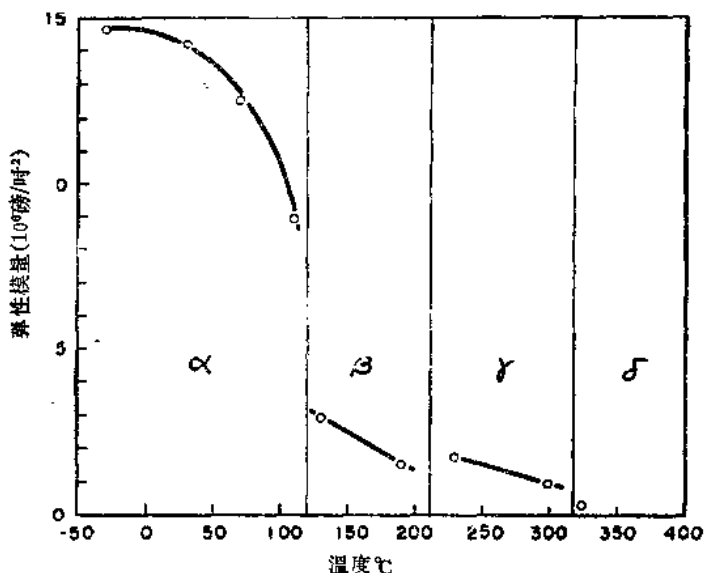


图 10.19 温度对弹性模量的影响

表 10.4 温度对于 α 相钎拉伸性能的影响*

	試驗溫度 °C	極限強度 (磅/吋 ²)	0.01% 屈服強度 (磅/吋 ²)	彈性模量 (磅/吋 ²)	延伸率 ¹⁾	斷 面 收 縮 率	試 樣 編 號
最小值	-30	52500	46700	14.0	0.016	—	4
最大值		63300	56800	15.2	0.020	—	
平均值		57300	50300	14.7(12.7) §	0.018	—	
最小值	30	47800	28200	13.5	0.054	—	5
最大值		56800	35600	14.8	0.077	—	
平均值		50900	32100	14.3	0.068	—	
最小值	70	42900	14900	12.6	0.41	—	2
最大值		44600	15600	12.7	0.45	—	
平均值		43800	15200	12.6	0.43	—	
最小值	100	29100	11800	8.5	0.91	—	3
最大值		38700	14100	9.4	1.08	—	
平均值		35100	13300	9.0(9.2) §	1.00	—	
最小值	110	—	11600	9.0	—	—	2
最大值		—	13000	10.9	—	—	
平均值		33100	12300	10.0	—	—	

* 試驗速度, 0.015吋/分。 ¹⁾ 以 1 吋計度長度為基準。

§ 用 Martens 伸長計測定。