

杜拉鋁在新鮮沾火狀態下的變形條件對

時效後機械性能的影響

本試驗資料討論杜拉鋁在介穩定狀態下變形速度和程度對自然時效和人工時效後機械性能影響的某些特性，且提出了解釋所觀察到的規律性之見解。

大家知道，隨著變形速度的降低，金屬和合金的變形阻力會減小，這是由於提高了軟化（恢復）的作用而降低了冷作硬化的效應〔1—3〕。合金在介穩定狀態（例如過飽和固溶體狀態）變形時，由於時效的結果能夠引起速度對變形阻力的相反影響，而時效過程決定於本身變形過程的參數。時效能引起機械性能的提高，外應力作用的時間愈長，也就是變形速度愈小，則這種程度表現得愈大，因此，在一定的變形溫度和速度範圍下時效效應能夠超過軟化（恢復）效應，而速度的變化對變形阻力會引起相反的影響〔4—5〕。

許多研究者的著作里都同樣制定：在過飽和固溶體狀態下（新鮮沾火狀態）杜拉鋁的變形對時效後的機械性能引起了不良的影響，沾火後變形然後時效的杜拉鋁比在時效後進行同樣變形程度的杜拉鋁具有更低的硬度〔7, 8〕和較低的強度〔5, 6, 7〕。

對於鋁基合金（Al+6—8%Zn）在沾火狀態變形後接着時效的硬度，同樣比只時效的要低些〔7〕。

我們最初的試驗證明，在新鮮沾火狀態下，對上述杜拉鋁由於變形而引起機械性能的降低有着顯著影響的就是變形速度。

在實際條件下，介穩定狀態的合金常常進行塑性變形（鉚釘的鉚接，制件沾火時的彎曲矯直等），這些制件在經過時效後的狀態下使用，因而，研究變形條件（程度和速度）對杜拉鋁在時效後性能的影響有着很明顯的實際意義，而且，在研究這些問題時還能弄清介穩定

狀態的金屬在塑性變形時發生變化的實質。

為了研究用杜拉鋁 D_1 制成的圓柱形試樣，其直徑為 7.00 ± 0.01 公厘，高度為 11.00 ± 0.01 公厘，經過 1 小時加熱至 $500^\circ\text{C} \pm 3^\circ$ ，在加熱溫度下保持 1 小時後將試樣在水中冷卻，試樣在新鮮沾火狀態下用下列機器進行壓縮變形達 5, 10, 20 和 30% 的變形率：

(а) 平均綫速為 0.05 公厘/分（速度 v_1 的 ИМ-4А 型機器）；

(б) 平均綫速為 6 公厘/分（速度 v_2 的 ИМ-4А 型機器）；

(в) 平均綫速為 1 公尺/秒（速度 v_3 的垂直衝擊機）。

為了防止變形前沾火試樣的時效，將它們放在保溫箱內（ -70°C ），在壓縮和接着進行 17 晝夜的自然時效後，所有的試樣在同一速度 v_1 下繼續變形，此外還有一批試樣在新鮮沾火狀態下沒有變形，而在自然時效後以速度 v_1 進行變形。

實際應力按下式計算：

$$\sigma = \frac{Ph}{V_0},$$

式中 P ——載荷，

h ——當時每個試樣的高度，

V_0 ——試樣的體積。

總之，按照一些試樣的平均斷口進行了計算，計算還根據了這種假設，即變形金屬的體積不變和試樣面上摩擦力的作用較小。

相對變形率 ϵ 一般按下式計算：

$$\epsilon = \frac{Oh}{h_0} \times 100\%,$$

式中 Oh ——絕對變形率，

h_0 ——試樣在第一次變形前的原始高度。

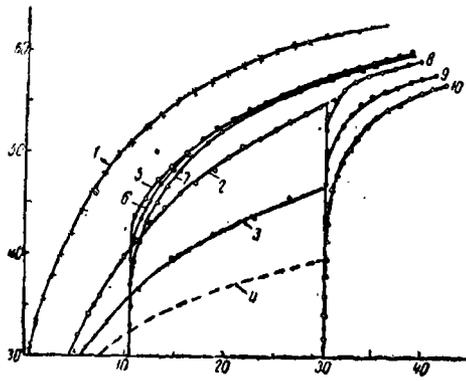


圖1 新鮮沾火杜拉鋁D1 壓縮達10和30%，其速度為：

曲綫2 —— $v_1=0.05$ 公厘/分；曲綫3 —— $v_2=6$ 公厘/分；曲綫4 —— $v_3=1$ 公厘/秒。

曲綫5, 6, 7 相當於在速度 v_1, v_2, v_3 下預先壓縮達10% 和自然时效後杜拉鋁在 v_1 速度下的二次壓縮；曲綫8, 9, 10 —— 壓縮達30% 之後。曲綫1 為在新鮮沾火狀態下沒有預先變形时效後的 $v_1=0.05$ 公厘/分。

試驗結果示於圖1 和部分地列於表1。

表1 在不同速度下預先變形和自然时效後杜拉鋁試樣以速度 v_1 的實際壓縮應力

預先變形速度， 公厘/分	預先變形速度， %	總變形(預先的與二次的) 時的應力，公斤/公厘 ²		
		達 $\epsilon=12\%$	達 $\epsilon=22\%$	達 $\epsilon=32\%$
—	—	52.6	59.0	62.3
0.05	10.5	45.6	54.2	58.2
6.0	10.5	44.5	54.2	58.4
動力	10.5	43.0	53.9	58.1
—	—	—	58.5	62.2
0.05	20.0	—	53.0	58.5
6.0	20.0	—	50.6	57.2
動力	20.0	—	46.9	55.7
—	—	—	—	62.3
0.05	30.0	—	—	56.7
6.0	30.0	—	—	53.3
動力	30.0	—	—	50.0

新鮮沾火狀態下來變形而經過17晝夜时效後以速度 v_1 變形的杜拉鋁試樣為曲綫1，直接沾火後的壓縮速度 v_1, v_2, v_3 為路綫2, 3, 4。假若沾火後以不同速度變形的試樣时效17晝夜，

然後以 v_1 速度進行二次壓縮時，在預先壓縮達10%的情況下，則得到曲綫5, 6, 7；在預先壓縮達30%的情況下，則得曲綫8, 9, 10。必須考慮到曲綫5和8系沾火後以速度 v_1 (曲綫2) 變形的試樣，而曲綫6和9、7和10為沾火後以相對應的速度 v_2 和 v_3 (曲綫3和4) 變形的試樣。

以上的結果證明：直接沾火後杜拉鋁試樣的變形能降低其时效後的機械性能，這可以從曲綫1、5和8在變形速度恆定時(參看圖1)的比較中看出。預先變形的程度愈高(比較曲綫5和8)及其變形速度愈大(曲綫8、9和10)，則這種降低也愈甚。

在預先變形程度很小的情況下(5和10%)，其變形速度對合金时效後機械性能的影響很小，即在新鮮沾火狀態下以不同速度變形的試樣當總的相對變形率為20~22%時，其二次壓縮的曲綫就能聚集在一起(參看圖1的曲綫5, 6, 7)。

當新鮮沾火試樣壓縮達20%和30%時(曲綫8, 9, 10)，其时效後變形阻力降低的程度與沒有變形的試樣相比，會隨著第一次變形速度的增加而顯著地增加。對於在新鮮沾火狀態下動力壓縮達30%的試樣降低達16~17公斤/公厘²，即接近屈服極限的25% ($\epsilon \sim 30.5\%$)，當試樣二次變形達 $\epsilon=40\%$ 時約為8公斤/公厘²。必須指出：在這種情況下二次壓縮曲綫8, 9和10的走向沒有任何聚集的趨勢。

圖1的曲綫同樣證明了杜拉鋁在變形後的时效本身能使機械性能有某些提高(比較圖1中二次變形開始時的曲綫2, 3, 4與曲綫5, 6, 7和曲綫8, 9, 10)。但是預先壓縮的試樣在此時的變形阻力值畢竟較試樣在新鮮沾火狀態下未變形的性能低些。

預先壓縮的程度愈小和程度愈大，則时效過程引起二次變形在開始時的機械性能顯著提高的程度也表現得愈大。假若以速度 v_1 預先壓縮達10%的試樣由於时效的結果，屈服極限的提高約為2公斤/公厘²，那麼在以速度 $v_2 > v_1$

压缩达同样程度时，其提高约达 5 公斤/公厘²。若在新鮮沾火状态下以速度 v_2 不压缩达 10% 而达 30% 时，则屈服極限的增高仅约为 2 公斤/公厘²。

显然，变形试样时效时，屈服極限的变化决定于变形过程中过饱和固液体分解的程度，这段分解（低的速度和大的变形程度）愈多，则在时效时屈服極限的提高也愈少。

关于預先变形对时效后的性能的影响問題，在研究鋁合金 D-16 和 B-95 的时效时，也获得了在性質上相似的数据。

假若降低上述变形试样的机械性能与过饱和固液体在变形过程中的分解、分解程度及其形状有关的话，则合金介稳定状态的减少应该表现在上述效应的减小。为了檢驗这种假設，曾进行过以下的試驗。杜拉鋁 D1 试样在沾火后进行 1, 2, 8, 16, 24 小时的时效，之后，动力压缩达 5% 和 20%，最后将所有的试样进行 15 晝夜的自然时效，且以速度 v_1 二次压缩达 $\epsilon = 37 \sim 40\%$ 。圖 2 所示为二次压缩的曲线，曲线上示出了第一次变形前的时效時間。为了进行比较，作出了未进行中間变形且仅时效 15 天后压缩试样的压缩曲线 AB。

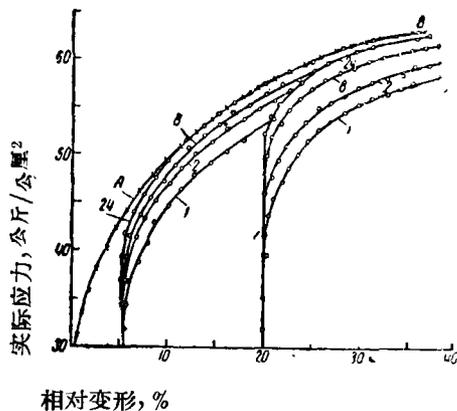


圖 2 自然时效(15晝夜)的杜拉鋁 D1 以速度 $v_1 = 0.05$ 公厘/分之压缩經過 1, 2, 8, 24 小时自然时效后(相应的曲线 1, 2, 8, 24)預先动力压缩达 5 和 20%。曲线 AB——时效后未經預先压缩的压缩(速度 v_1)。

分析圖 2 的数据，便确切地証实了第一次

变形前的自然时效愈長和介稳定状态的程度愈小，则合金的性能更接近于仅在完全时效后变形试样的性能。

时效温度对上述效应的影响極为有趣。

杜拉鋁 D1 试样在新鮮沾火状态下变形达相对变形率的 10 和 30%，然后在 100°C（一批）和 150°C（另一批）下时效 8 小时，将沾火后未变形的试样和它們一起时效同样的時間。待所有的试样时效后以 0.05 公厘/分 (v_1)，的速度压缩达 38~40%。試驗的数据示于圖 3 和圖 4，曲线的形状与圖 1 相同。

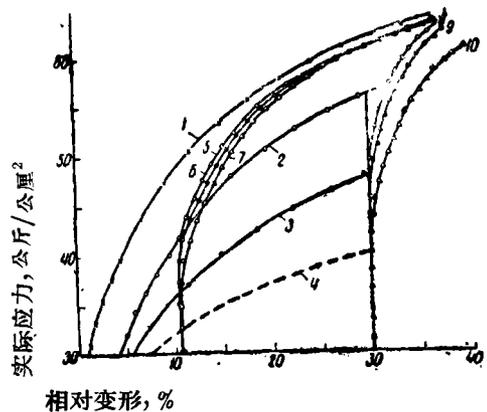


圖 3 新熱沾火的杜拉鋁 D1 以 v_1, v_2, v_3 的速度压缩达 10% 和 30%；在 100°C 下时效，随后以 v_1 速度压缩。曲线的符号仍与圖 1 相同。

正如所得数据証明的一样，随着时效温度的提高，压缩曲线的相互位置保持与自然时效时相同，但是，在新鮮沾火状态下变形试样机械性能的降低較少。可是在 20, 100, 150°C 温度下經過上述時間时效后才变形的试样，其机械性能大致停留在同一水平綫上。在新鮮沾火状态下少許压缩过的试样的变形阻力，是随着时效温度的提高而不断地增加。在新鮮沾火状态下以速度 v_1 压缩达 10%，然后在 150°C 时效之试样的性能，在二次变形时甚至能超过未变形试样的性能。預先变形达 30% 的试样，在压缩曲线（圖 3, 4 的 8, 9, 10）的走向中能清楚地發現与未变形试样的压缩曲线（圖 3, 4 的 1）有相交的趋势。

非常遺憾，我們在分析所得試驗数据时，

未能給予有足够根据的解釋。关于这个問題的資料还很少，因此我們所提出的推断，在很大程度上还是一种假設。

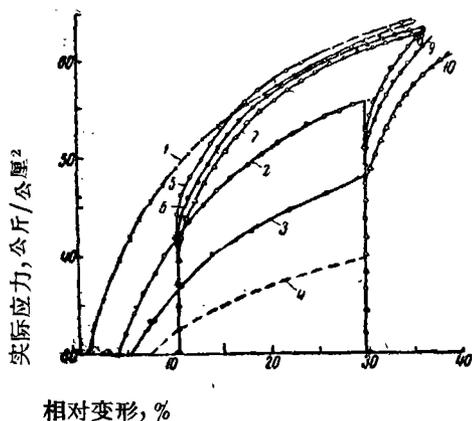


圖4 新鮮沾火的杜拉鋁D1以 v_1, v_2, v_3 的速度壓縮達10%和30%；在 150°C 下时效隨後以速度 v_1 壓縮。曲線的符号与圖1相同。

大家知道，固溶体的塑性变形能加速分解的过程，增加分解程度，为新相核心的形成創造条件和簡化其凝聚过程（9），假若使用自然时效时，在固溶体晶格上形成溶解元素的高濃度区的話，則在塑性变形时主要是它發生分解而形成新相的質点，并改变晶格参数（10）。可以設想变形金屬在时效时固溶体内的殘留物質，同样在很大程度上是沿塑性变形时所形成的中心进行分解，此时便会形成大的新相質点。

由于塑性变形在金屬中所产生的应力，能促使定向扩散的形成，而扩散同样也能使这些应力松弛。

上述沾火状态变形試样与未变形試样相比，其机械性能引起下降的原因，显然是由于上述二个过程的结果。自然，当变形程度增加时，塑性变形本身对分解程度和性質的影响也会增大，因为随着壓縮的增加，大部分固溶体畢竟也会进行分解。

若外应力較小时，合金在高速下的变形比在低速下少些，这主要是固溶体不仅在变形过程中而且在变形后时效时的分解程度較小的原

因。此外，在高速下变形的歪扭显然是不太稳定的（11~13），因此，由于扩散而引起的松弛應該起較大的作用。

結合上述原因，就能解釋在新鲜沾火状态下高速变形試样机械性能显著降低的原因。

正如我們所認為的一样，时效温度的提高应是所观察效应增加的结果（預先变形試样机械性能的降低），因为随着温度的提高就加强了質点的凝聚，通常这种凝聚能引起机械性能的降低，而且在預先变形的試样中應該进行得比較强烈些。

在不同时效温度下試驗的資料証明情况相反，假若塑性变形时，固溶体的个别部分在一般的加速分解情况下，能产生促使这些部分稳定性提高的应力时，这就可以得到解釋。过渡到較高的时效温度，能促使这些应力的消除和上述部分固溶体的分解。在加热过程中，消除部分应力时所产生的塑性滑移同样也能够促使分解程度的提高和机械性能的增加。

我們仍然認為：时效温度并非对所有时效合金都有同样的影响，当質点的凝聚对机械性能的影响比“阻滯”过程剧烈一些时，很显然，提高时效温度将会促使新鲜沾火状态变形試样变形阻力的下降效应提高。

一系列的研究〔12~14〕証明，金屬塑性变形的条件，尤其是变形速度，能影响这些金屬在同一变形速度下二次变形时的机械性能。这种影响也常在这种情况下出現，即在不同的速度下經第一变形达同一程度后的試样由于二次变形前的松弛而出現相同的变形阻力时〔15〕。本試驗証明：塑性变形条件（速度和程度）同样能影响时效合金的性能及接着变形时效后的机械性能。

作者对 M. A. 波里莎尼娜教授經常关心这一研究并参加結果的討論和草稿的审閱表示感謝。

陈林保譯 鉄浪校