

二元金属鬚的强度和形变特点*

周乃标 葛庭燧

(中国科学院)

提 要

测量了直径 20—300 微米的大量的 Fe 鬚、Fe-Cu 鬚、Fe-Co 鬚、Cu 鬚和 Cu-Co 鬚的室温和高温拉伸强度, 结果指出, 弥散型的二元金属鬚如 Fe-Cu 鬚和 Cu-Co 鬚的强度较高于单元金属鬚, 而固溶型的二元金属鬚如 Fe-Co 鬚则否。根据应力应变曲线的测量和金相观测的结果, 认为弥散型的 Fe-Cu 鬚的强度所以较高, 可能是由于高强度的铁铜弥散混合层的出现, 而它的范性所以较好, 可能是由于这种鬚具有范性较好的铜心轴。

讨论了弥散型和固溶型二元金属鬚在变粗当中所包含的基本过程, 以及与它们所表现的强度和形变特点的联系。并且指出, 生长弥散型混合鬚的原理和方法给制备强度较高和范性较好的复合材料提供了一个值得参考的途径。

一、引 言

极细的金属鬚, 当它的直径是几个微米时, 它的强度可以比大块金属晶体的高一百到一千倍, 但是当鬚的直径增加时, 它的强度又大大降低^[1], 因而如何改进和控制金属鬚的生长方式和方法以得到又粗又长而强度又很高的金属鬚, 是一个在实际上和理论上都很重要的问题。

我们以前的工作指出, 在金属鬚的生长过程中, 有意地掺入杂质, 有时可以显著地提高鬚的强度^[2]。根据这一途径, 我们生出了直径达到 800 微米的铜铁混合鬚, 初步的测量结果指出, 这种混合鬚的强度是较高的^[3]。为了进一步研究这种混合鬚的强度和形变特点, 我们研究了几种较粗的二元金属鬚的强度和组织结构的影响, 并且与单元金属鬚作比较。下面报导关于这方面工作的一些结果。

二、实验装置和手续

生长混合金属鬚所用的方法和装置与以前相同(氯化物氢气还原法)^[4,5]。“杂质”的加入是用两种不同的低价氯化物调配均匀盛在镍槽内, 在约 750—800°C 的温度下一起在氢气中还原。配料比是按照两种氯化物的重量计算的, 例如 Fe-Cu (2:1) 指的是用重量比为 2:1 的 FeCl₂ 和 CuCl 来配料。所用的氯化物都是国产分析纯试剂。

金属鬚的直径是在金相显微镜下测量的, 每次都是把鬚转动几个方向取其平均值, 用这种方法所能测得的最小值约为 0.34 微米。

强度的测量是在 Amsler 厂制造的显微拉伸机上进行的。测量粗大鬚时是用精细夹

* 1962 年 12 月 12 日收到; 1963 年 3 月 5 日收到修改稿。

头来夹持试样,测量较细鬚时则用松香和环氧树脂的混合物来粘結。断裂一般都在试样的中间部分发生,这表示夹持和粘結试样的方法是可靠的。

三、金属鬚和二元金属鬚的拉断强度

金属鬚的强度在很大程度上决定于生长的方式和条件,因而在目前还未能掌握生长

规律和严格控制生长条件的情况下,要比较金属鬚的强度,必须测量大量的金属鬚的强度,从统计的结果来判定强度的高低。因此,我们测量了大量的直径为 20—300 微米的 Fe、Fe-Cu、Fe-Co、Cu 和 Cu-Co 的金属鬚的拉断强度,图 1—5 分别表示 Fe、Fe-Cu(2:1)、Fe-Co(5:1)、Cu-Co(2:1) 和 Cu 鬚的室温拉断强度作为鬚的直径的函数。为了便于比较,也把以前 Brenner^[1] 和 Одинг 等^[6] 所作的较细的鬚的强度数据引入。由各图可以看出,各种鬚的强度都有一种随着鬚直径的增加而降低的趋势,但是当鬚的直径大于 50 微米时,这种趋势已经不很明显。就各图点的整体情况看来,Fe-Cu 鬚的强度显然较高于 Fe 鬚和 Cu 鬚,而 Fe-Co 鬚的强度却与 Fe 鬚的差不多。此外,Cu-Co 鬚的

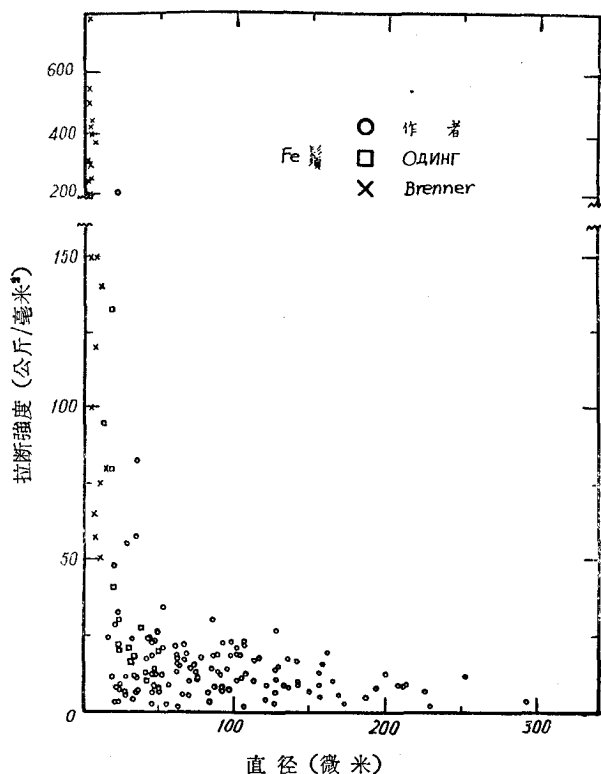


图 1 Fe 鬚的室温拉断强度

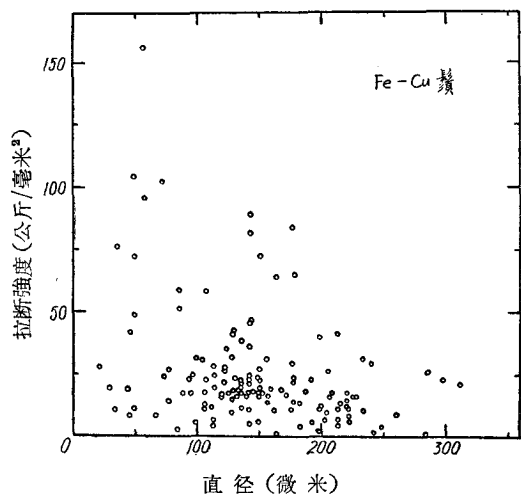


图 2 Fe-Cu (2:1) 鬚的室温拉断强度

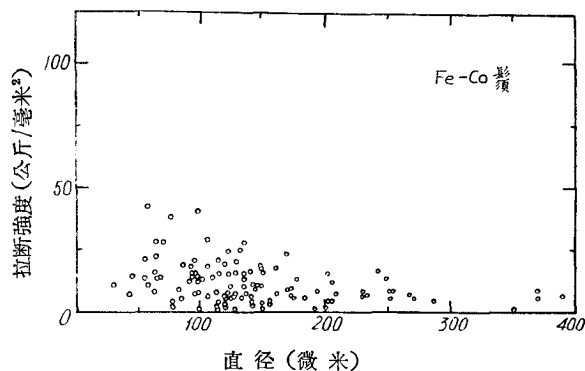


图 3 Fe-Co (5:1) 鬚的室温拉断强度

强度也较高。

根据构成二元鬚的两种金属互溶度来考虑,可知 Fe-Cu 和 Cu-Co 鬚是弥散型的,而 Fe-Co 鬚则是固溶型的。对于二元鬚的截面所进行的金相观测指出,实际的情况确是如此。我们也生长了固溶型的 Fe-Al 鬚,它们的强度也不高。以前我们曾经生长过固溶型的 Cu-Ag 鬚,发现它们的强度也并不提高^[2]。这些结果进一步支持了我们以前所提出的看法^[2],即二元金属鬚的强度的提高是由于弥散强化的作用。

值得注意的是,Fe 鬚和 Cu 鬚的强度尺寸效应是很陡峻的,即强度随着鬚直径的增加而降低得很快,但是 Fe-Cu 和 Cu-Co 混合鬚(即弥散型的二元鬚)的强度尺寸效应却较不显著。它们的强度数据较为分散,但有时鬚的强度很高。例如直径为 155 微米的 Fe-Cu(2:1) 混合鬚的强度可以高达 83 公斤/毫米²,直径为 106 微米的 Cu-Co(2:1) 混合鬚的强度可以高达 47 公斤/毫米²。这表示,在最有利的生长条件下,所生出来的弥散型粗大金属鬚能够具有很高强度。

为了判明所生的粗大金属鬚是否仍然是单晶体,我们对于直径 100 微米以上的 6 根 Fe 鬚和 6 根 Fe-Cu 混合鬚进行了 X 射线劳厄图象分析,结果指出,这些鬚可能是:(1)单晶体;(2)具有亚结构;(3)只含有几个晶粒。在 12 根鬚当中,只有 1 根 Fe 鬚明显看出来是多晶体。

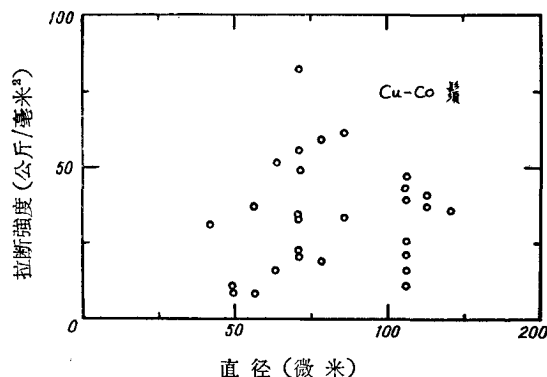


图4 Cu-Co(2:1) 鬚的室温拉断强度

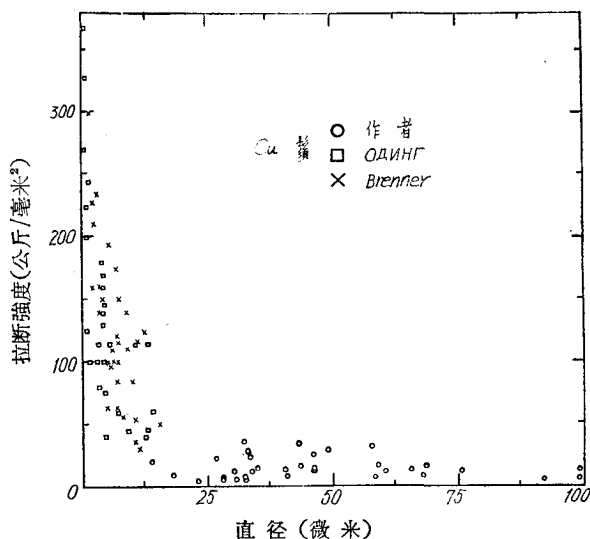


图5 Cu 鬚的室温拉断强度

四、金属鬚和二元金属鬚的高温拉断强度

一般认为,弥散型金属在高温下的强度较高。为了验证上述关于混合金属鬚的强化机理的看法,并且探索弥散型金属鬚在高温下使用的可能性,我们测定了 Fe 鬚、Fe-Cu(2:1) 鬚和 Fe-Co(5:1) 鬚在 450°C 的拉断强度。用熔化的铝把金属鬚试样的两端熔焊在不锈钢杆上,把整个系统悬在通以氩气的电炉里,然后连续地增加载荷(由大小不同的铅粒制成),直到试样断裂为止。这样所测得的断裂强度的误差约为 ± 0.3 公斤/毫米²。图 6, 7, 8 分别表示 Fe 鬚、Fe-Cu(2:1) 鬚和 Fe-Co(5:1) 鬚在 450°C 的拉断强度作为鬚的直径的函数。由图可以看出,弥散型的 Fe-Cu 鬚的高温强度一般地高于 Fe 鬚,而固

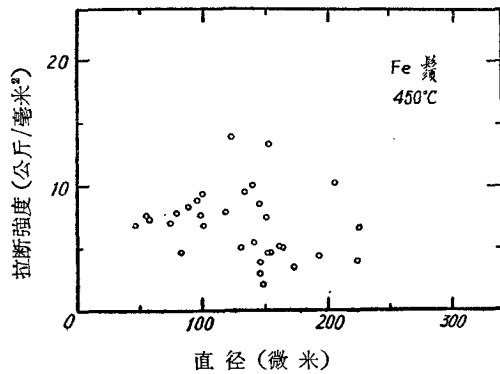


图 6 Fe 鬚在 450°C 的拉断强度

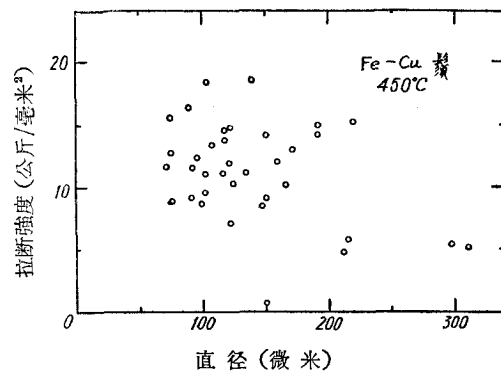


图 7 Fe-Cu (2:1) 鬚在 450°C 的拉断强度

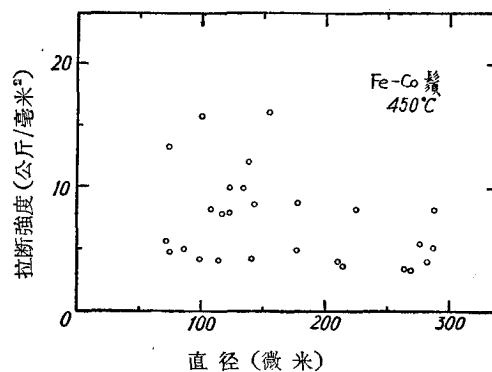


图 8 Fe-Co (5:1) 鬚在 450°C 的拉断强度

溶型的 Fe-Co 鬚的高温强度并不高。

五、二元金属鬚的形变特点

根据文献上的记载, Fe 鬚的断裂类型是脆性的, 即在断裂前所发生的范性形变很小^[1,6]。我们进行了较粗的 Fe 鬚室温拉伸试验, 鬚的直径约从 20 微米到 300 微米, 结果

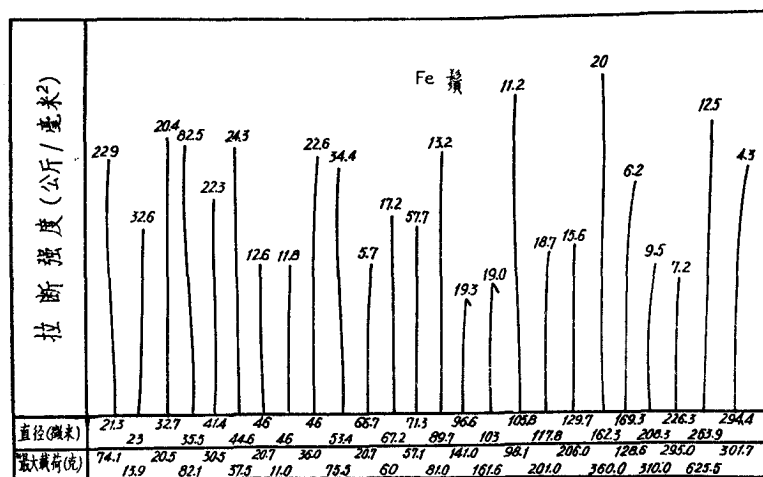


图 9 Fe 鬚的拉伸曲线。图下方所示的最大载荷值(克)表示各该晶鬚在被拉断前所承受的最大载荷

指出,在絕大多數的情形下,鬚的斷裂是脆性的,只在極少數的情形下,在鬚斷裂以前出現不規則的情況。圖 9 所示的是各種不同直徑的 Fe 鬚的拉伸曲綫,每根曲綫頂端所表明的數字是所算出來的斷裂應力(公斤/毫米²)。由於在進行拉伸試驗時用了不同的彈簧;所以拉伸曲綫的縱坐標的絕對值並不表示實際應力的大小。

對於弥散型的 Fe-Cu (2:1) 混合鬚來說,在斷裂以前都出現顯著的范性變形如圖 10 所示。因此,這種混合鬚不但強度較 Fe 鬚為高,而且范性也較好。這種特點是十分值得

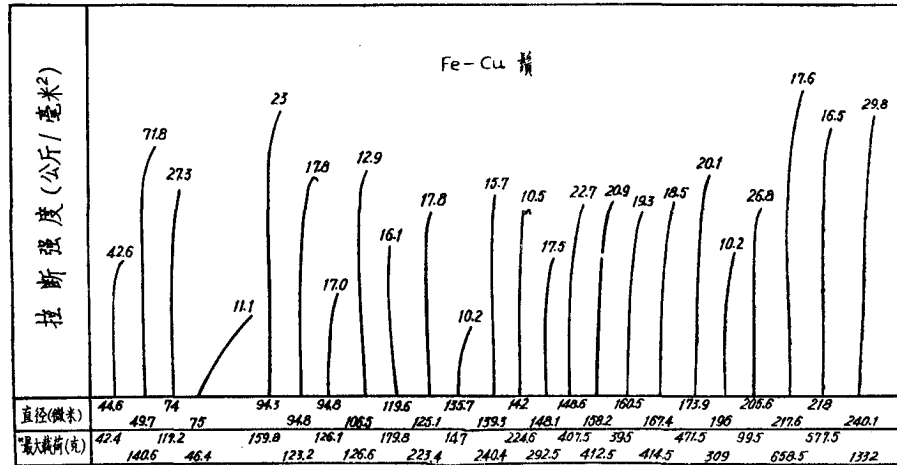


圖 10 Fe-Cu (2:1) 混合鬚的拉伸曲綫

注意的。對於固溶型的 Fe-Co (5:1) 鬚來說,在起始的彈性變形後有顯著的屈服現象出現,接着又發生少量的范性變形,然後斷裂。這些現象曾經過多次的觀察,它們的奇特表現絕大部分是超出實驗誤差以外的(見圖 11)。

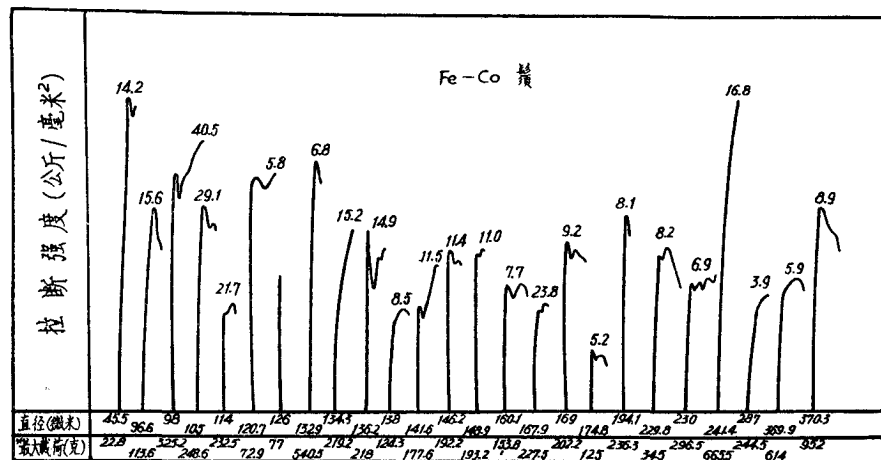


圖 11 Fe-Co (5:1) 鬚的拉伸曲綫

我們也測量了弥散型 Cu-Co (15:1) 混合鬚的拉伸曲綫,結果也指出它比 Cu 鬚具有較好的范性,將拉斷後的試樣進行金相觀測,有明顯的滑移帶出現。

六、二元金属鬚的微硬度

以前关于 Fe-Cu 混合鬚的金相观测结果指出^[2], 在鬚的中央有心轴出现, 在心轴鬚的外面, 铁和铜混合得很紧密, 成为一种弥散混合物. 微硬度测量结果又指出^[3], 混合鬚的心轴的硬度较外层部分为低. 为了找出鬚的硬度与鬚的直径的联系, 我们测量了不同直径的弥散型 Fe-Cu(2:1) 鬚的截面硬度. 图 12 所示的是 Fe-Cu 鬚的中心部分(心轴)的硬度和外层部分(弥散混合物)的硬度. 从一般的趋势看来, 对于各种直径的鬚来说, 外层部分的硬度都比心轴的硬度为高. 为了与此作比较, 我们也测量了 Fe 鬚和固溶型的 Fe-Co(5:1) 鬚的中心部分的硬度如图 13 和图 14 所示. 结果指出, 它们的硬度对于各种直径的鬚来说, 都比弥散型的 Fe-Cu(2:1) 鬚的中心部分(心轴)的硬度为高. 由于在生长 Fe-Cu 鬚时所用的槽是镍槽, 所以鬚的心轴可能是由于铜鬚构成的(Cu 与 Ni 都是具有面心立方结构). 铜鬚的硬度显然要比铁鬚和固溶型 Fe-Co 鬚的为低.

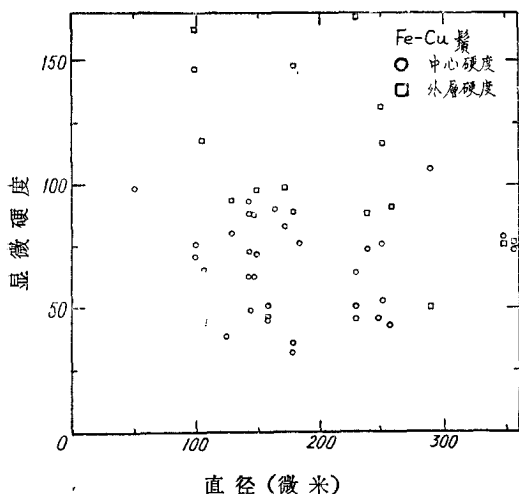


图 12 弥散型 Fe-Cu 鬚的中心部分(心轴)的硬度(用○表示)和外层部分(弥散体)的硬度(用□表示)

值得注意的是, 从图 12, 13, 14 来看, 各种鬚的硬度值(无论是对于中心部分或外层部分来说)并不由于直径的增加而显著地降低.

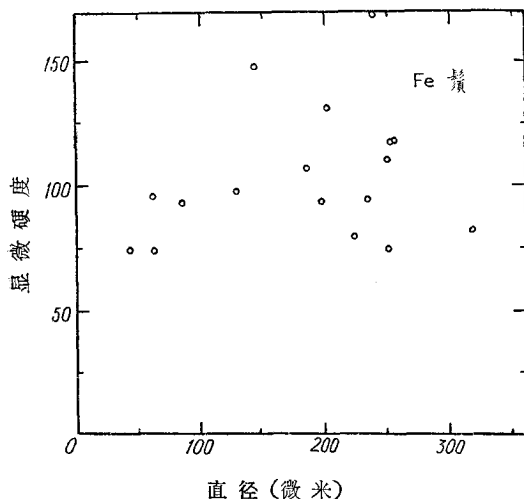


图 13 Fe 鬚的中心部分的硬度

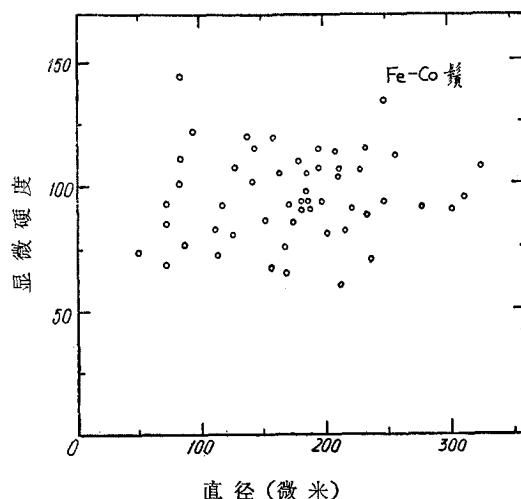


图 14 固溶型的 Fe-Co 鬚的中心部分的硬度

七、实验结果的分析与讨论

1. 关于弥散型混合金属鬚的变粗过程和强度

根据本实验和以前^[3]的金相观测的结果, 弥散型混合金属鬚的生长一般是先形成作

为心軸的单金属鬚,然后围着这心軸鬚包裹上混合金属的弥散体。根据图 12, 13, 14 所示的硬度測量結果来看,这种混合鬚的強度所以較高于单金属鬚,主要是由于弥散层具有高强度。在我們制备粗大 Cu 鬚的工作^[5]中,曾經观察到片状生长和堆垛生长,現在关于 Fe-Cu 混合鬚的工作中,也观察到心軸鬚呈現有規則的、作周期性变化的形状,并且也观察到弥散块开始在心軸鬚上的淀积,图 15 所示的便是这样一段 Fe-Cu (2:1) 鬚的側面照相。值得注意的是,这段心軸呈柱状螺紋的形状,这可能与心軸鬚的生长方式有联系。



图 15 Fe-Cu 混合鬚的表面結構 250 ×

上述的結構特点可以說明为什么 Fe-Cu 混合鬚的范性較高于 Fe 鬚。如所周知, Fe 鬚是脆性的,而 Cu 鬚則具有一定的范性。在 Fe-Cu 混合鬚中,可能由于心軸銅鬚的出現而使整个的混合鬚具有了一定的范性,同时,混合鬚中又可能由于弥散外层的存在而使整体的強度提高。因此,利用生长弥散型混合金属鬚的原理可以得到強度和范性都較好的材料,这給制备复合材料(包括金属与非金属)提供一个有用的参考途径。

从图 1—5 所示的各拉断強度图点看来,当鬚的直径大于約 50 微米时,強度的尺寸效应已經不很显著。从图 12, 13, 14 所示的各硬度图点看来,心軸鬚的硬度以及弥散层的硬度也都不表現显著的尺寸效应。这說明混合鬚的微弱の強度尺寸效应并不决定于心軸鬚和弥散体本身的強度,而可能决定于当混合鬚的直径增大时心軸鬚与弥散层的分布情况的改变。如果这种看法是对的話,那么适当地选择和控制鬚的生长条件,便有可能减小或消除弥散型混合鬚(直径大于 50 微米)的強度的尺寸效应,从而可能得到更粗大的、強度并不降低而范性較好的混合材料。

2. 关于固溶型二元金属鬚的强度和变粗过程

固溶型金属鬚在变粗时一般并不出現层状結構。在这种金属鬚的表面上,常常观察到类似于位錯蝕坑的图象。这种蝕坑的出現可能由于在生长完毕以后的热蝕刻作用^[7]。图 16 所示的是一根 Fe-Co 鬚的表面結構照相。每个蝕坑很可能表示一根位錯綫的露头点之所在。位錯的出現可能与 Fe 中所含的“杂质”(Co)在鬚的生长中所起的作用有关。在我們以前的工作中曾指出^[2], 杂质的存在能够在鬚的生长中导致位錯的形成。如果这

种看法是对的话,可以说明图 11 所示的 Fe-Co 混合鬚的拉伸曲线上所出现的明显屈服点。如果 Fe-Co 鬚中有不少位错存在,那么作为替代式原子的 Co 便能够在位错的周围形

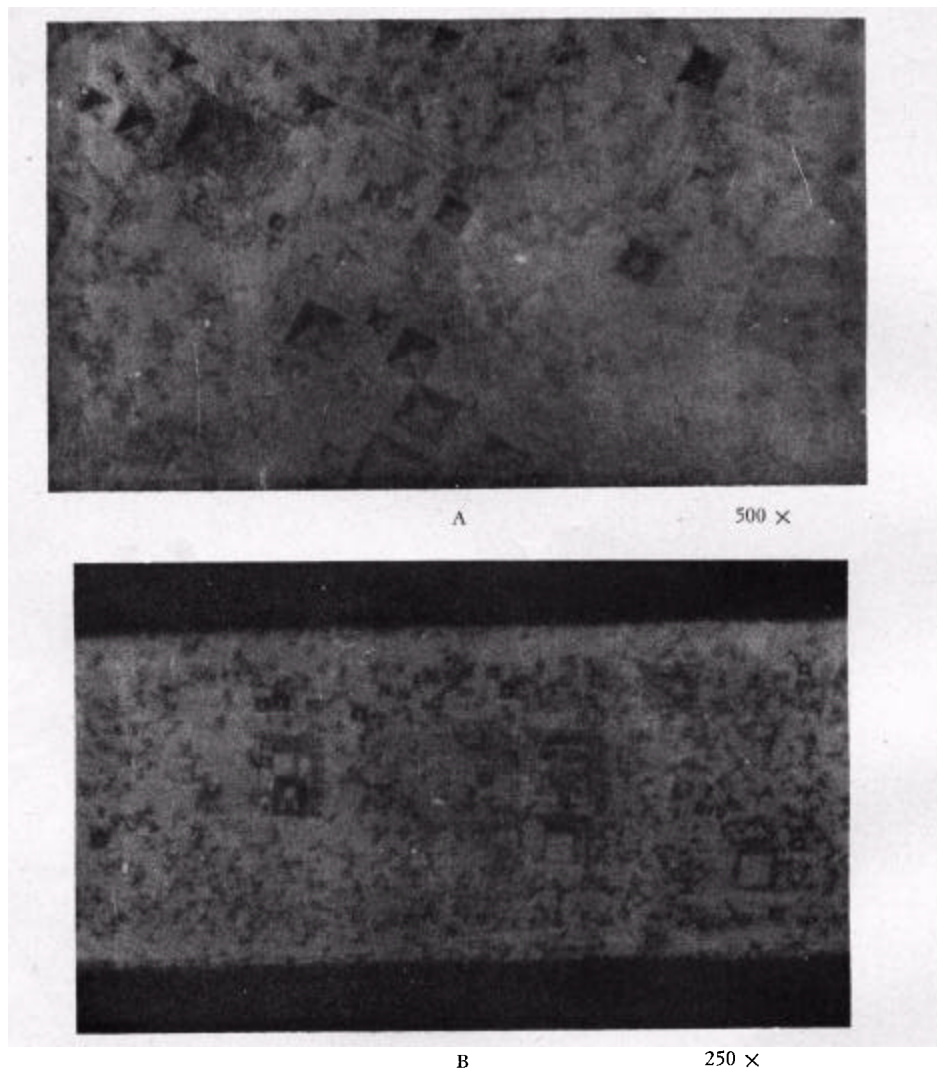


图 16 Fe-Co 鬚的表面结构

成科垂耳气团,从而导致明显的屈服点^[8]。关于替代式原子能够形成气团并且导致明显屈服点的问题,近年来已有不少实验观测^[9]。

固溶型的 Fe-Co 鬚的强度所以不高,可能是一方面由于没有高强度弥散层的出现,一方面由于鬚中有不少的位错存在。

在图 16 的照相里还可以看到不少的堆垛小丘,这种小丘的轮廓在较低倍放大之下呈现得更为明显。我们认为,这种小丘的出现可能与螺型位错在鬚表面上的露头点有关。在一般的情形下,与螺型位错有关的生长台阶呈螺旋线的形状,但是如果有两个异号的螺型位错坐落得很接近,则它们所各自形成的螺旋台阶的臂可能连接到一起,形成闭合的圈状台阶^[10],如同图 16 所示的堆垛小丘的形状。当然,这些堆垛小丘也可能是二维淀积所堆

垛而成的,但是小丘之所以出现在某一地点则可能与该点有位错露头有关。此外,图中所示的位错蚀坑很可能是由于混合型位错所引起的,这些位错也具有螺型的分量。如果这种看法是对的话,则固溶型金属鬚的变粗过程可能就是借着螺型位错机构沿着径向而生长的过程。

关于二元金属鬚的强度和形变特点的工作,万耀光同志曾经进行过一些初步测量,谢宝琛和赵洪星两位同志一直参加了本文所述的实验工作,何怡贞教授和刘民治同志对于本项工作曾经提出过有益的意見和討論,謹此一并致謝。

参 考 文 献

- [1] Brenner, S. S., *J. Appl. Phys.*, **27** (1956), 1484.
- [2] 葛庭燧、万耀光, 物理学报, **17** (1961), 439.
- [3] 葛庭燧、庄应烘、万耀光, 物理学报, **17** (1961), 445.
- [4] Brenner, S. S., *Acta Met.*, **4** (1956), 268.
- [5] 葛庭燧、万耀光, 物理学报, **17** (1961), 296.
- [6] Одинг, И. А., Копьев, И. М., *Металловедение и термическая обработка металлов*, **9** (1961), 44.
- [7] Machlin, E. S., *Dislocation and Mechanical Properties of Crystals* (John Wiley, New York, 1957), p. 164; Suzuki, H., 同前, p. 172.
- [8] Cottrell, A. H., *Report of a Conference on Strength of Solids* (The Physical Society, London, 1948), p. 30.
- [9] Smallman, R. E., Williams, G. K. and Ardley, G., *Acta Met.*, **1** (1953), 126; Ardley, G. W. and Cottrell, A. H., *Proc. Roy. Soc. (London)*, **A219** (1953), 328; Westwood, A. R. C. and Broom, T., *Acta Met.*, **5** (1957), 249.
- [10] 科垂耳, 晶体中的位错和范性流变 (科学出版社, 1960), 88 頁。

STRENGTH AND DEFORMATION PECULIARITIES OF BINARY METAL WHISKERS

CHOU N. P. K& T. S.

(Academia Sinica)

ABSTRACT

The tensile strength of numerous whiskers of Fe, Fe-Cu, Fe-Co, Cu and Cu-Co with diameters ranging from 20 to 300 microns were measured at room temperature and at an elevated temperature. The results show that the strength of the dispersion type of binary metal whiskers such as Fe-Cu and Cu-Co whiskers is higher than that of single-metal whiskers, while the strength of the solution type such as Fe-Co whiskers is not so. On the basis of measurements on stress-strain curves and metallographical observations, it is suggested that the high strength of dispersion type Fe-Cu whiskers may be due to the appearance of a high strength dispersively mixed layer of iron and copper, and the improvement of plasticity may be due to the appearance of an axle whisker of copper having a better plasticity.

A discussion was made on the basic processes involved in the thickening of binary metal whiskers of either type. It is suggested that the procedure adopted in growing dispersion type of binary metal whiskers may serve as a useful guide in preparing high strength composite materials with improved plasticity.