

金属和合金的组织

张信钰 编

科学出版社

金属和合金的织构

张信钰 编

科学出版社

1976

内 容 简 介

金属和合金材料经过锻、挤压、拉丝、轧制等加工后,材料内的晶粒就会沿着加工方向成一定晶体学位向排列,这称为择优取向或织构。通过对织构的了解,可以控制金属和合金在生产过程中的工艺条件和化学成分,因此对提高材料的性能有一定的意义。

本书主要介绍金属和合金的板材和丝材织构;探讨不同晶系的金属和合金形成机理和不同工艺对织构的影响;讨论初次再结晶和二次再结晶的形成理论,以及金属和合金由于织构的存在而产生的各向异性在实际中的应用等。

本书可供有关金属和合金材料加工工厂的技术人员,从事冶金学、压力加工学、金属学及金属物理等方面工作的专业人员以及有关科技院校的师生参考。

金属和合金的织构

张 信 钰 编

*

科 学 出 版 社 出 版

北京朝阳门内大街 137 号

中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

1976 年 7 月 第 一 版 开本: 787×1092 1/32

1976 年 7 月 第一次印刷 印张: 7 1/16

印数: 0001—19,720 字数: 159,000

统一书号: 15031·108

本社书号: 553·15—2

定 价: 0.74 元

前 言

在毛主席无产阶级革命路线指引下,我国社会主义建设事业欣欣向荣。随着国民经济的迅速发展,工业、农业和国防工业等部门对金属和合金材料的使用量日益增长,对材料性能的要求也越来越高。因此,改善金属和合金的性能是一个十分重要的问题。

金属和合金经过锻、挤压、拉丝、轧制等加工后,材料内的晶粒就会沿着加工方向成一定的晶体学位向排列。这称为择优取向或织构。当金属和合金具有织构时,由于晶体有各向异性的特征,所以沿着材料不同方向的性能也有差别。一般说来,在有色金属板材内不希望存在织构,否则在加工时易产生“制耳”,这样就增多了消除制耳的手续,耗费材料,经济上是不合算的。但在电机和电讯工业中大量使用的硅钢片和坡莫合金,却需要沿着晶体的易磁化方向形成很强的织构,这对材料的磁性极为有利。合金钢以及应用于原子能方面的铍、锆、铀等金属,由于织构类型的差异,对材料的性能也有影响。因此,通过对材料内织构的了解,可以控制金属在生产过程中的工艺条件和化学成分,这对于改善材料性能有一定的意义。

测定金属和合金织构的方法有: X射线法、磁转矩法、中子衍射法、光学测角仪法以及腐蚀穴法等等。在这些实验技术中, X射线法较为有效。近二十余年来,使用了 X射线衍射仪计数器技术,使测定织构的方法更为精确。最近,利用带有电子计算机的全自动极图测量仪,更使工作时间缩短。

本书重点叙述立方系金属和合金板材的织构;探讨金属

和合金组织的形成理论和不同工艺对组织的影响；讨论初次再结晶和二次再结晶组织的形成，以及金属和合金由于组织的存在而产生的各向异性在实际上的应用，等等。为便于读者在实际工作中应用，书末还附有附录。

金属和合金经过各种不同的加工过程后的变化是复杂的。如恩格斯所已指明的，“同样的辩证法的运动规律在无数错综复杂的变化中发生作用”。金属在加工后，能量存储在金属晶体内，通过回复和初次再结晶，以及二次再结晶，使能量释放和转化而形成不同的晶粒取向。因此，本书所讨论的金属和合金组织的转变，也是能量的转化过程，研究这个过程有其重要的意义。

在本书编写过程中，承北京钢铁研究院戴礼智、何忠治及上海冶金研究所许顺生等同志提出宝贵意见，在此一併致谢。

毛主席教导我们：“知识的问题是一个科学问题，来不得半点的虚伪和骄傲，决定地需要的倒是其反面——诚实和谦逊的态度。”作者在写作过程中常记住这一指示。但由于作者水平有限，书内不当之处，在所难免，希读者指正。

编 者

目 录

第一篇 金属的形变织构

第一章	面心立方金属形变织构	1
§ 1.	多晶体纤维织构	1
§ 2.	多晶体轧制织构	4
§ 3.	单晶体轧制织构	9
第二章	体心立方金属形变织构	18
§ 1.	多晶体纤维织构	18
§ 2.	多晶体轧制织构	18
§ 3.	单晶体轧制织构	25
第三章	六角密积金属和铀的轧制织构	34
第四章	金属形变织构形成理论	40
§ 1.	面心立方金属形变织构的形成	40
§ 2.	体心立方金属形变织构的形成	57
§ 3.	六角密积金属形变织构的形成	68
§ 4.	正交 α 轴形变织构的形成	69
第五章	金属的表面织构	70
§ 1.	面心立方金属的表面织构	70
§ 2.	体心立方金属的表面织构	71
第一篇参考文献		73

第二篇 金属的退火织构

第六章	面心立方金属退火织构	79
§ 1.	面心立方金属纤维织构	79

§ 2. 面心立方金属和合金轧制多晶体的退火织构	81
§ 3. 面心立方金属轧制单晶体的退火织构	90
第七章 体心立方金属退火织构	91
§ 1. 体心立方金属纤维织构	91
§ 2. 体心立方金属和合金轧制多晶体的退火织构	94
§ 3. 体心立方金属和合金轧制单晶体的退火织构	99
第八章 再结晶织构形成理论	103
第九章 二次再结晶织构	129
§ 1. 体心立方金属二次再结晶	129
§ 2. 面心立方金属二次再结晶	136
第二篇参考文献	143

第三篇 织构与各向异性的关系

第十章 织构与力学性能的各向异性的关系； 制耳效应	149
§ 1. 织构与力学性能的各向异性的关系	149
§ 2. 制耳效应	157
第十一章 织构与磁各向异性的关系	159
第三篇参考文献	162
附录	164
I. 织构测定方法	164
II. 立方晶系晶面间角度表	187
III. 六角晶系晶面间角度表	193
IV. 立方晶系晶面投影图	195
V. 六角晶系晶面投影图	214
VI. 乌氏网	219

第一篇 金属的形变组织

第一章 面心立方金属形变组织

§ 1. 多晶体纤维组织

多晶体金属发生范性形变后, 每个晶粒内点阵取向都发生转动, 沿着流变方向成一定位向排列。金属和合金经过拉丝、锻造、挤压及压缩加工后, 发生单向应变, 从而形成组织。这样所产生的组织与天然纤维材料所具有的组织情况类似, 所以通常称为“纤维组织”。在理想条件下, 纤维组织与材料的流变方向对称地排列。因此, 所产生的纤维组织的最简单应力系统为等轴受压或等轴受张。

早期工作结果指出^[1]: 一些面心立方金属经过拉丝形变后获得表 1 的结果。这些结果常在一些书中可以见到, 但实际上, 是存在一些问题的, 如: (1) 早期测定纤维组织是采用圆

表 1 一些面心立方金属拉丝组织

金 属	平行于拉丝轴组织成分(%)	
	$\langle 100 \rangle$	$\langle 111 \rangle$
铝	0	100
铜	40	60
金	50	50
银	75	25

筒照相法,这不如以后采用的平板照相法,当然更比不上衍射仪方法;(2)表内有些金属如金丝,实际上含16%的银和9%的铜,这是合金,而不是纯金属;(3)样品的拉丝形变率不很大。

W. R. Hibbard 曾将金(纯度为 99.994%)、银(纯度为 99.993%)、铜(高纯度)、镍(纯度为 99.31%)和钯(纯度为 99.999%),经过大于 98%形变率拉丝后,测定了这些纯金属的纤维组织,获得主要的 $\langle 111 \rangle$ 组织和次要的 $\langle 100 \rangle$ 组织。他以为其中 $\langle 111 \rangle$ 是最终组织,而 $\langle 100 \rangle$ 为过渡组织。这种过渡组织是金属在形变时由于再结晶而引起的^[2]。

H. Ahlborn 和 G. Wassermann^[3]对铝、金、镍、铜和银丝(纯度均大于 99%)用照相法和衍射仪方法测定了纤维组织。获得这些金属丝具有 $\langle 111 \rangle$ 和 $\langle 100 \rangle$ 二种纤维组织。当形变率大时(大于 99%),各种金属内的 $\langle 100 \rangle$ 成分有所不同,其结果见表2。

表 2 面心立方金属丝的组织

金 属	平行于拉丝轴组织成分(%)		金 属 纯度(%)
	$\langle 100 \rangle$	$\langle 111 \rangle$	
铝	8	92	99.5
铜	34	66	电解纯
金	16	84	99.999
镍	27	73	99.5
银	54	46	99.99

他们提出 $\langle 111 \rangle$ 和 $\langle 100 \rangle$ 纤维组织成分的变化是与样品内杂质、加工条件、形变温度及材料内原始取向有关。上述结果是比较可靠的。

以后对银丝又作了进一步的研究^[4]。银经过拉丝后首先形成 $\langle 100 \rangle$ 和 $\langle 111 \rangle$ 组织。随着形变量的增大,则这二种成分发

生变化,并且与形变温度有关.发现在 $-190, -60, 100^{\circ}\text{C}$ 形变温度下,银丝内的 $\langle 100 \rangle$ 织构成分比 0°C 的要多.在 $-190, -60^{\circ}\text{C}$ 温度下, $\langle 100 \rangle$ 织构增多,而 $\langle 111 \rangle$ 减少,这是由于机械孪晶所引起,并且还产生一种过渡型织构 $\langle 115 \rangle$.另方面,在 100°C 温度下形变时, $\langle 100 \rangle$ 增多,这是由于再结晶的影响.这一结果在金丝内也得到了证实^[5].

G. J. McHargue 等^[6]将 99.99% 的纯铝在不同温度下(454, 343, 232, 24°C),以二种形变速率(18.7 米/分、112.5 米/分)作挤压试验.在低速形变时,所有温度下的压缩织构均为 $\langle 111 \rangle + \langle 100 \rangle$.如果以高速形变,在温度 343°C 时为 $\langle 115 \rangle$ 织构;而在 454°C 温度时则为 $\langle 118 \rangle$ 织构.实验指出, $\langle 100 \rangle$ 织构主要也是由于再结晶引起. H. Stadelmaier 和 B. F. Brown^[7a]提出,形变时产生的弹性应力对形成 $\langle 100 \rangle$ 再结晶晶核特别有利.因为 $\langle 100 \rangle$ 织构的位错密度比 $\langle 111 \rangle$ 织构要低.

铝-0.9% 镁合金丝经过 96% 形变率拉成丝材后也获得 $\langle 111 \rangle + \langle 100 \rangle$ 织构.机械孪晶对 $\langle 100 \rangle$ 织构有影响.这种合金的取向晶粒是由许多亚晶粒组成^[7b].

从力学观点看来,纯张力织构与拉丝织构是有差别的.在拉丝形变时,除纵向受拉外同时与模壁四周成径向受压.一些作者用高纯铝和工业铝作拉力试验^[8],实验的主要困难是在断裂之前能获得足够的伸长.克服这一困难是将样品每经过 15% 拉伸后作低温软化处理(回复过程,而不是再结晶过程),并且不影响取向的变化.最大拉伸率达 75%.以后在样品截面上测定张力织构的形成.结果得到这二种铝样的张力织构的最终取向是在 $[111]$ 和 $[100]$ 之间的 (011) 晶带上.这就是说:在面心立方铝金属内,张力织构是位于 $[211]$ 到 $[311]$ 的最终取向位置间.

面心立方金属受压缩后一般具有 $\langle 100 \rangle$ 织构及一些弱的

织构,铝即为其中一例。经过 98% 压缩率的铝, $\langle 110 \rangle$ 最强, $\langle 100 \rangle$ 较弱; 从 $\langle 110 \rangle$ 到 $\langle 113 \rangle$ 区域也有, 如图 1 所示。黄铜的压缩织构却不同, 无 $\langle 100 \rangle$ 织构, 大部分晶粒是 $\langle 110 \rangle$ 取向, $\langle 111 \rangle$ 也有些; 从 $\langle 110 \rangle$ 到 $\langle 113 \rangle$ 区域内仍有晶粒取向分布^[1](图2)。有人认为, 金属压缩后取向产生较大的偏离度, 是由于在压缩变形时金属表面产生摩擦力所致^[9,10]。

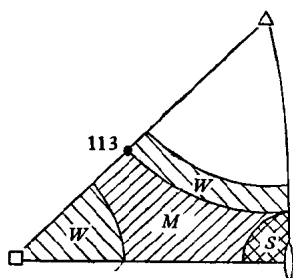


图 1 铝经过 98% 形变率压缩后取向分布^[1]
 $\square$ (001), $\bigcirc$ (110), $\triangle$ (111)
 S 强, M 中, W 弱

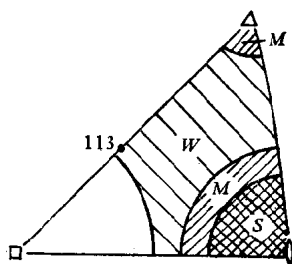


图 2 黄铜(70%铜-30%锌)经过 97% 形变率压缩后的取向分布^[1]

§ 2. 多晶体轧制织构

面心立方金属和合金经过轧制后, 其形变织构可分为二种类型: “铜式”织构和“黄铜式”织构, 亦称“纯金属”织构和“合金”织构。“铜式”织构在 $\{111\}$ 极图内表示出具有“唇式”的特征, 而“黄铜式”织构则有“耳式”的标志。这二种典型的极图见图 3。

根据早期照相法测定结果, 铜、铝、金、镍等金属具有 $\{110\}\langle 112 \rangle + \{112\}\langle 111 \rangle$ 织构。这是属于铜式织构类型。银和铜-锌(70-30)合金具有 $\{110\}\langle 112 \rangle$ 织构, 这是黄铜式织构。胡郇等^[11]首先用衍射仪测定了铝、铜、黄铜织构, 并与早期的照相法结果作了比较, 获得黄铜具有 $\{110\}\langle 112 \rangle$ 织构(亦可写

成 $\{651\}\langle 6.5.10 \rangle^{[12]}$ 和弱的 $\{110\}\langle 001 \rangle$ 结构。对铜、铝来说，可以用四个等同理想取向 $(7\ 12\ 22)[84\bar{5}]$ 表示(亦可写为接近 $(123)[41\bar{2}]$ 取向)，见图 3。像后者这样的一种高指数取向，J. F. H. Guster^[13]称“Z 结构”，Verbraak^[14, 15]称“无理式结构”，刘有照等^[16]称“变移式”结构，作者等认为这是一种“共生式”结构^[17, 18]。

近来利用中子衍射测定了铜的结构，其结果与 X 射线的相同^[19]。

有人利用弹性模量值^[20, 21]计算了铜的轧制结构，以为铜具有 $(110)[1\bar{1}2]$ 和 $(112)[1\bar{1}\bar{1}]$ 二种结构。

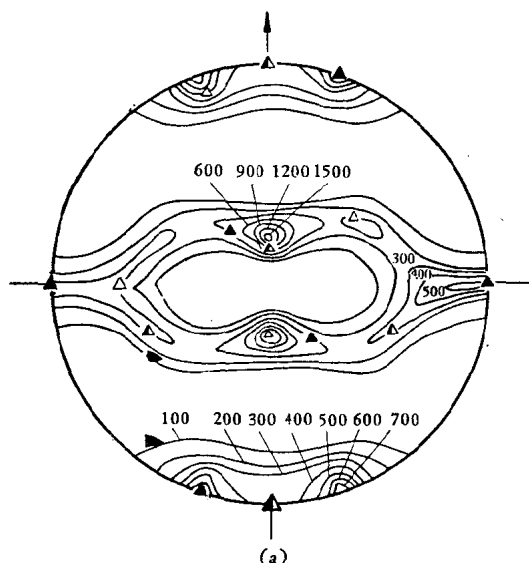


图 3(a) 典型“铜式”或称“纯金属式”结构^[11]
 纯铅经 95% 压延率冷轧后， $\{111\}$ 极图
 ▲ $(110)[1\bar{1}2]$
 △ $(112)[1\bar{1}\bar{1}]$
 △ $(7\ 12\ 22)[8\ 4\ \bar{5}]$ 或 $\sim(123)[41\bar{2}]$

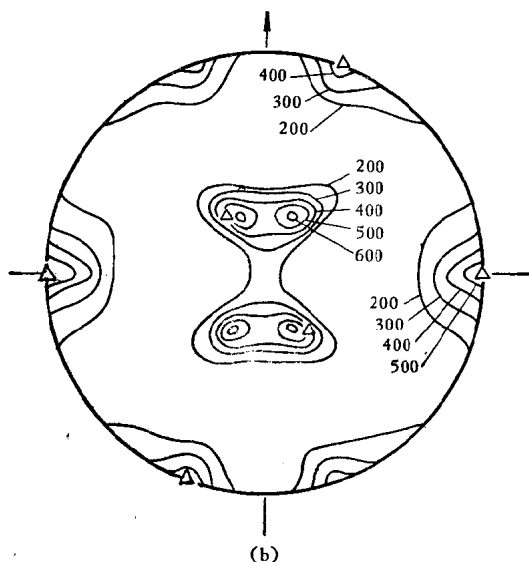


图 3(b) 典型“黄铜式”或称“合金式”织构^[11].70%铜-30%锌
(黄铜)经 95%压延率冷轧后, $\{111\}$ 极图
 $\Delta(110)[\bar{1}\bar{1}2]$

J. Grewen 等提出^[22], 面心立方金属轧制织构不能仅以一些理想取向来考虑, 可用二个 $\langle 111 \rangle$ 和一个 $\langle 100 \rangle$ 限定纤维织构来解析. 这个想法得到了其他作者的支持^[23].

R. E. Smallman 探讨了某些合金的织构^[24]. 他以为对滑移面和温度有关的“超越”现象, 可能对合金织构的变化有影响. N. Brown^[25]提出, 在金属丝内的拉丝织构是与交滑移有关; 而交滑移决定于堆垛层错能量的大小. 这说明晶体缺陷对织构是有影响的.

胡郁等^[26]根据上述想法作了试验. 在高纯银内获得, 由于形变温度的变化, 可以使银式 (或黄铜式) 织构转变为铜式织构. 在 0°C 轧制时, 银具有 $(110)[\bar{1}\bar{1}2]$ 织构; 随着轧制温度

的增高,在 200°C 则转变为 $(123)[41\bar{2}]$ 织构和少量的 $(100)[001]$ 织构。图 4 为银在二种不同温度下轧制后的极图。后来他们又在电解铜内获得^[27],当温度降到 -196°C 时,则从铜的织构转变为黄铜式织构。这个原因主要是铜式织构金属具有较低的层错率,而黄铜式织构金属的层错率较高。在 18-8 不锈钢内也具有类似现象^[28]。

在镍-钴^[29]和镍-钼合金内^[30],也获得这种织构演变现象。当镍内的合金元素钴和钼达到一定含量时,也从铜式织构(镍的织构与铜相同)转变为黄铜式织构。

由于铜式织构和黄铜式织构的极图形式不同[比较图 3(a)和 3(b)],因此根据极图内某些理想取向极点强度的变

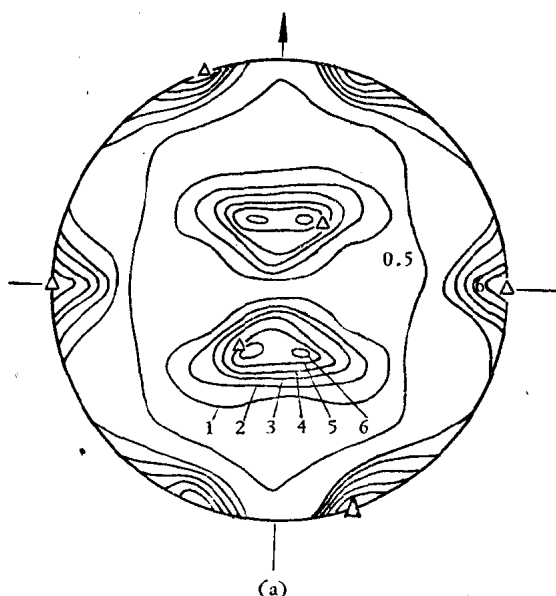


图 4(a) 银在 0°C 轧制后, $\{111\}$ 极图^[26]

Δ $(110)[\bar{1}\bar{1}2]$

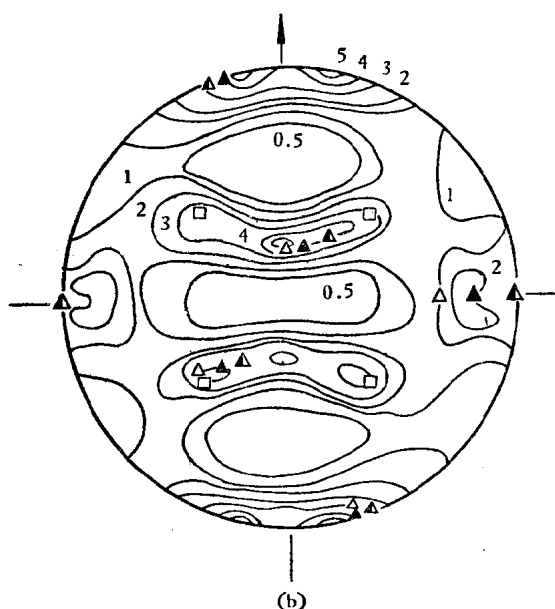


图 4(b) 银在 200°C 轧制后, {111} 极图^[26]

△ (124)[211], ▲ (146)[211],
▲ (110)[112], □ (100)[001]

化也能了解织构转变的过程。例如, 利用 I_{TD}/I_{20° 强度比 (I_{TD} 即在 {111} 极图圆周上横向处的强度, I_{20° 即离轧向 20° 处强度) 测定织构成分的变化。表 3 为铜-锆、铜-铈合金的结果^[31]。当比值达 1.30 后, 织构类型已发生极明显地改变。

铁-镍(50-50)是属于铜式织构类型。当该合金的冷轧压延率为 98.4% 时, 具有 (123) $[41\bar{2}] + (110) [\bar{1}1\bar{2}] + (112) [11\bar{1}]$ 织构。在铁-镍(78.6%)-钼(4.26%)合金内, 当压延率大于 99% 时(样品厚度为 3 微米), 获得 {110} $\langle 335 \rangle$ 和弱的 (110)[001] 织构。后者与一般铜式织构有些差异, 而又不同于黄铜式织构。这种 {110} $\langle 335 \rangle$ 织构实际上是沿着 $\langle 110 \rangle$ 方

表 3 铜内加入锆和砷后织构的变化

金 属	合金元素(%)	压延率(%)	$I_{TD}/I_{20}^{(1)}$	织 构 类 型	
铜	锆	0.11	99.3	0.50	铜式织构
		1.02	99.3	0.55	铜式织构
		1.76	99.3	0.75	过渡式
		3.79	99.2	1.20	过渡式
		5.06	99.2	1.30	黄铜式织构
		7.21	99.4	1.30	黄铜式织构
铜	砷	0.054	99.2	0.40	铜式织构
		0.16	99.4	0.43	铜式织构
		0.28	99.2	0.43	铜式织构
		0.74	99.3	0.63	过渡式
		1.97	99.2	1.15	过渡式
		3.24	99.2	1.35	黄铜式织构
		6.04	99.3	1.35	黄铜式织构

1) 根据极图内强度的估计值。

向与 $\{110\}\langle 112 \rangle$ 织构偏离 5° 。图 5 为该合金 $\{111\}$ 极图。产生这种类型织构的原因,有人以为是该合金内钼和铁在面心立方点阵内溶质和溶剂原子相互之间影响之故^[32]。在纯铜内,经过大压延率后,也得到 $\{110\}\langle 335 \rangle$ 为主的冷轧织构^[33]。显然,在纯铜内没有合金元素的影响。所以说,上述解析是不够全面的。作者认为,在轧制形变过程中,材料所受的应力状态是比较复杂的。一些工艺条件,如轧辊的摩擦力、轧辊的转速、每次轧制时压延率的大小、润滑剂、温度条件等等,这些因素对材料的内部和表面织构(将在第五章讨论)有一定影响。当材料厚度越薄时,效应可能更显著。

§ 3. 单晶体轧制织构

在面心立方金属内,对铜和铝的单晶研究得较多,而对银

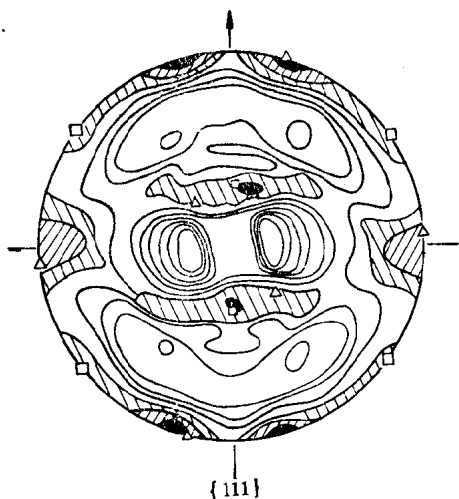


图 5 铁-镍-铝超薄带合金经大于 99% 压延率冷轧后, $\{111\}$ 极图^[32]

$\triangle (110)[\bar{3}35]$, $\square (110)[001]$

和其他面心立方合金单晶研究得较少。我们知道铜和铝形变组织效应是与银和黄铜有差别。根据过去的工作结果^[34], 将

铜、金、银、铝、黄铜等的单晶原始取向分为四组, 如投影图 (图6) 所示, 以下逐一讨论之。

第一组取向晶体

具有 (110) 平面平行于轧面和 $[\bar{1}10]$ 到 $[001]$ 之间的方向平行于轧向。

G. S. Barrett等^[35]

较早地研究了铜晶体内取向的变化。他们将

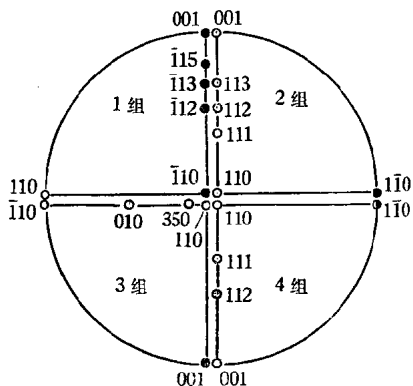


图 6 不同取向面心立方金属单晶体经过轧制后之总结^[34]

○ 轧面, ● 轧向, ◐ 横向