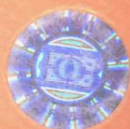


有色金属工业标准汇编

金相检验方法和无损检验方法

中国标准出版社第二编辑室 编

中国标准出版社



有色金属工业标准汇编

金相检验方法和无损检验方法

中国标准出版社第二编辑室 编

中国标准出版社

有色金属工业标准汇编
金相检验方法和无损检验方法

中国标准出版社第二编辑室 编
责任编辑 叶伊兵

*

中国标准出版社出版
北京复兴门外三里河北街16号
邮政编码:100045

电话:68523946 68517548

中国标准出版社秦皇岛印刷厂印刷
新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

开本 880×1230 1/16 印张 31 字数 949 千字
2001年8月第一版 2001年8月第一次印刷

*

ISBN 7-5066-2464-8/TF·089
印数 1—2 500 定价 84.00 元

网址 www.bzcbs.com

版权专有 侵权必究
举报电话:(010)68533533

出版说明

近年来,国家质量技术监督局及有色金属行业主管部门对一大批有色金属国家标准和行业标准进行了制定或修订,为及时跟踪有色金属标准制修定的进展情况,查阅和使用最新的标准文本,我们编辑了《有色金属工业标准汇编》系列。

本册汇编《有色金属工业标准汇编 金相检验方法和无损检验方法》主要收集了铝合金、镁合金、硬质合金等的金相检验标准;铝合金、铜合金、钛合金等的金属无损检验方法及其相关标准。其中国家标准 51 个,行业标准 2 个。

本汇编收集的国家标准的属性已在本目录上标明(GB 或 GB/T),年号用四位数字表示。鉴于部分国家标准是在国家标准清理整顿前出版的,现尚未修订,故正文部分仍保留原样;读者在使用这些国家标准时,其属性以本目录上标明的为准(标准正文“引用标准”中标准的属性请读者注意查对)。

本汇编所包括的标准由于出版年代不同,其格式、符号代号、计量单位乃至名词术语不尽相同。这次汇编时,只对原标准中技术内容上的错误以及其他方面明显不妥之处做了更正。

收入本汇编中的所有国家标准和行业标准都是现行的、有效的。

编 者

2001 年 5 月

A-59/04

目 录

金相检验方法

GB/T 3246.1—2000	变形铝及铝合金制品显微组织检验方法	3
GB/T 3246.2—2000	变形铝及铝合金制品低倍组织检验方法	20
GB/T 3488—1983	硬质合金 显微组织的金相测定	41
GB/T 3489—1983	硬质合金 孔隙度和非化合碳的金相测定	46
GB/T 4296—1984	镁合金加工制品显微组织检验方法	53
GB/T 4297—1984	镁合金加工制品低倍组织检验方法	58
GB/T 5168—1985	两相钛合金高低倍组织检验方法	71
GB/T 6624—1995	硅抛光片表面质量目测检验方法	93
GB/T 7998—1987	铝合金晶间腐蚀测定方法	96
GB/T 8360—1987	金属点阵常数的测定方法 X射线衍射仪法	99
GB/T 8755—1988	钛及钛合金术语金相图谱	106
GB/T 8756—1988	锆晶体缺陷图谱	120
GB/T 8760—1988	砷化镓单晶位错密度的测量方法	177
GB/T 13298—1991	金属显微组织检验方法	182
GB/T 14145—1993	硅外延层堆垛层错密度测定 干涉相衬显微镜法	188
GB/T 15749—1995	定量金相手工测定方法	191
GB/T 17169—1997	硅抛光片和外延片表面质量光反射测试方法	200

无损检验方法

GB/T 1554—1995	硅晶体完整性化学择优腐蚀检验方法	211
GB/T 1786—1990	锻制圆饼超声波检验方法	221
GB/T 3310—1999	铜合金棒材超声波探伤方法	227
GB/T 4058—1995	硅抛光片氧化诱生缺陷的检验方法	233
GB/T 4156—1984	金属杯突试验方法(厚度 0.2~2 mm)	242
GB/T 5126—1985	铝及铝合金冷拉薄壁管材涡流探伤方法	246
GB/T 5193—1985	钛及钛合金加工产品超声波探伤方法	250
GB/T 5248—1998	铜及铜合金无缝管涡流探伤方法	255
GB/T 6519—2000	变形铝合金产品超声波检验方法	263
GB/T 8651—1988	金属板材超声板波探伤方法	270
GB/T 8752—1988	铝及铝合金阳极氧化 薄阳极氧化膜连续性的检验 硫酸铜试验	277
GB/T 10119—1988	黄铜耐脱锌腐蚀性能的测定	279
GB/T 11343—1989	接触式超声斜射探伤方法	282
GB/T 11344—1989	接触式超声波脉冲回波法测厚	286
GB/T 12969.1—1991	钛及钛合金管材超声波检验方法	291
GB/T 12969.2—1991	钛及钛合金管材涡流检验方法	294

GB/T 14142—1993	硅外延层晶体完整性检验方法 腐蚀法	297
GB/T 14143—1993	300~900 μm 硅片间隙氧含量红外吸收测量方法	302
GB/T 14144—1993	硅晶体中间隙氧含量径向变化测量方法	306
GB/T 16544—1996	球形储罐 γ 射线全景曝光照相方法	311

相关标准

GB/T 5616—1985	常规无损探伤应用导则	319
GB/T 9445—1999	无损检测人员资格鉴定与认证	322
GB/T 11346—1989	铝合金铸件 X 射线照相检验针孔(圆形)分级	335
GB/T 12604.1—1990	无损检测术语 超声检测	337
GB/T 12604.2—1990	无损检测术语 射线检测	370
GB/T 12604.3—1990	无损检测术语 渗透检测	393
GB/T 12604.4—1990	无损检测术语 声发射检测	405
GB/T 12604.5—1990	无损检测术语 磁粉检测	413
GB/T 12604.6—1990	无损检测术语 涡流检测	425
GB/T 12604.7—1995	无损检测术语 泄漏检测	435
GB/T 12604.8—1995	无损检测术语 中子检测	454
GB/T 12604.9—1996	无损检测术语 红外检测	461
GB/T 14480—1993	涡流探伤系统性能测试方法	468
GB/T 14693—1993	焊缝无损检测符号	476
YB/T 143—1998	涡流探伤信号幅度误差测量方法	483
YB/T 144—1998	超声探伤信号幅度误差测量方法	487

注：本汇编收集的国家标准的属性已在本目录上标明(GB 或 GB/T)，年号用四位数字表示。鉴于部分国家标准是在国家标准清理整顿前出版的，现尚未修订，故正文部分仍保留原样；读者在使用这些国家标准时，其属性以本目录上标明的为准(标准正文“引用标准”中标准的属性请读者注意查对)。

金相检验方法

前 言

本标准是按照 GB/T 1.1—1993 的格式要求编制的。设置了前言;第 1 章 范围;第 2 章 试样的制备;第 3 章 试样浸蚀;第 4 章 组织检查;第 5 章 晶粒度的测定。本标准是由 GB/T 3246—1982《铝及铝合金加工制品显微组织检验方法》经修订而成。

与前版相比,主要有下列一些修订:

1. 原标准适用于铝及铝合金加工制品,修订为适用于铝及铝合金材料、制品(包括铸轧板)。
2. 补充了显微试样的精抛方法及国外的浸蚀剂。
3. 对淬火试样的检验提出了“高温氧化”的概念,以适应材料检验标准的需要。
4. 引进了国际通用的显微晶粒度的测量方法(主要是法、美两国的)。
5. 补充了铸锭、铸轧板及高温氧化等组织标准图片。

本标准从生效之日起,代替 GB/T 3246—1982。

本标准由国家有色金属工业局提出。

本标准由中国有色金属工业标准计量质量研究所归口。

本标准主要起草单位:东北轻合金有限责任公司。

本标准主要起草人:佟长清、王 涛、汪 洋、邵玉田。

本标准于 1982 年首次发布。

中华人民共和国国家标准

变形铝及铝合金制品显微 组织检验方法

GB/T 3246.1—2000

代替 GB/T 3246—1982

Wrought aluminium and aluminum alloys
products inspection method for microstructure

1 范围

本标准规定了变形铝及铝合金材料、制品显微组织检验的试样制备、浸蚀、组织检验及晶粒度测定等。

本标准适用于变形铝及铝合金材料、制品显微组织检验。

2 试样的制备

2.1 试样切取

2.1.1 铸锭试样,根据种类、规格和试验目的要求,选取有代表性部位的横截面。

2.1.2 加工制品试样,根据有关标准或技术协议的规定及制品的种类、热处理方法、使用要求,选取有代表性的部位。例如,检验过烧试样应在加热炉的高温区、制品变形量较小的部位截取;检验包覆层厚度在带卷头尾横向截取。

2.2 试样数量及尺寸

取样数量应根据标准或技术协议的规定以及试验的要求而确定。试样尺寸可参照表1。

表 1

类 型	长	宽	高
	mm		
块试样	25	15	15
板试样	30	30	—

2.3 测量包覆层厚度和铜扩散深度的试片应采用夹样法或镶样法。夹样法试片间及样夹外层试片的外侧必须垫上退火状态的纯铝板材,保证夹紧试样后使试样间无缝隙和样夹外层试片磨面平整。

2.4 试样粗加工

试样的被检查面用铣刀(或锉刀)去掉1~3mm,铣或锉成平面。然后在研磨机上用150~180号砂纸垂直刀痕方向进行粗磨,推荐采用煤油进行冷却和润滑。磨掉全部刀痕,将试样转90°,再用380号左右较细的砂纸进行细磨,磨去所有粗磨痕为止。

2.5 机械抛光

将磨好的试样用水冲洗干净,在抛光机上进行抛光。通常抛光机的转数在400~600r/min。精抛光时,转数在150~200r/min为宜。

2.5.1 粗抛:在装有粗呢子的抛光盘上进行粗抛。用浓度大、粒度较粗的三氧化二铬(或三氧化二铝或其他抛光材料)粉与水混合的悬浮液做粗抛光剂。垂直于磨痕抛光到磨痕全部消失,磨面平整光亮无脏

国家质量技术监督局2000-06-09批准

2000-11-01实施

物为止。

2.5.2 细抛:将粗抛好的试样用水冲洗干净后,在装有细呢子(或其他纤维细软的丝织品)的抛光盘上细抛。用浓度较稀、粒度较细的三氧化二铬(或三氧化二铝或其他抛光材料)粉与水混成的悬浮液做细抛光剂。垂直于粗抛光痕迹抛到表面光亮无任何痕迹和脏物。在显微镜上可观察到清晰的组织为止。

2.5.3 精抛:对特殊需要高质量显微图片的试样,细抛后可在慢抛光机上用鹿皮和极细的三氧化二铝粉进行精细抛光。

2.5.4 如工业纯铝和高纯铝试样细抛后难以完全去掉抛光痕迹,可采用电解抛光。

2.6 电解抛光

经细砂纸或机械抛光后的试样,用 20% (V/V) 硝酸溶液洗去表面油污,用水冲洗。再用无水乙醇擦干表面后,方可进行电解抛光。

2.6.1 电解抛光装置示于图 1。电解液的成分为 70% (V/V) 的高氯酸 10mL 与无水乙醇 90mL 的混合溶液。

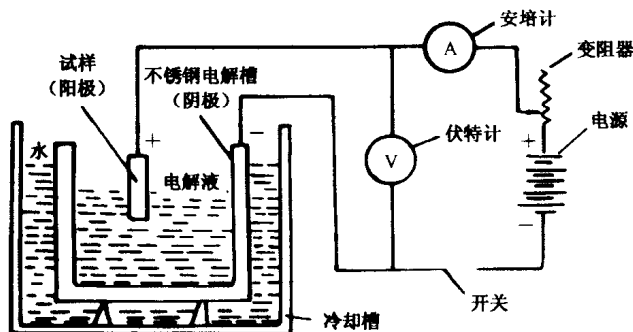


图 1 电解抛光装置示意图

2.6.2 电解抛光工艺参数

- a) 起始电压 25 ~ 60V;
- b) 电解时间 6 ~ 35s;
- c) 电解液温度低于 40℃。

2.6.3 电解过程中可摆动试样,抛光面不得脱离电解液。所用阴极为铅板或不锈钢板。电解后试样用水冲洗,然后在 30% ~ 50% (V/V) 硝酸溶液中清洗表面上的电解产物,最后用水冲洗,酒精棉擦干。

3 试样浸蚀

根据合金成分、材料状态及检验目的,选择适当的浸蚀剂。浸蚀剂应采用化学纯试剂及蒸馏水配制。

3.1 试剂

- a) 氢氟酸(HF, ρ 1.15g/mL);
- b) 盐酸(HCl, ρ 1.19g/mL);
- c) 硝酸(HNO₃, ρ 1.40g/mL);
- d) 硫酸(H₂SO₄, ρ 1.84g/mL);
- e) 磷酸(H₃PO₄, ρ 1.70g/mL)。

3.2 浸蚀剂的成分及用途见表 2。

表 2

编号	成分及比例	用 途
1	HF 1mL H ₂ O 200mL	显示工业高纯铝及工业纯铝的一般组织
2	HF 50mL H ₂ O 50mL	显示工业高纯铝、工业纯铝及 Al-Mn 系合金的晶粒组织
3	HF 2mL HCl 3mL NH ₄ OH 5mL H ₂ O 190mL	显示： a) 铝及铝合金的一般组织； b) 硬铝合金的晶粒组织
4	HF 10mL HCl 5mL HNO ₃ 5mL H ₂ O 380mL	显示硬合金的包铝及铜扩散
5	HNO ₃ 25mL H ₂ O 75mL	辨别工业纯铝、防锈铝、锻铝、硬铝及超硬铝合金中的相
6	H ₂ SO ₄ 10 ~ 20mL H ₂ O 80 ~ 90mL	识别工业纯铝、硬铝、防锈铝及锻铝合金中的相
7	H ₃ PO ₄ 10mL H ₂ O 90mL	a) 辨别硬铝、防锈铝及锻铝合金中的相； b) 显示防锈铝和锻铝合金中的一般组织
注：“在不降低质量的前提下，也可采用其他浸蚀剂”		

3.3 浸蚀方式及时间应根据浸蚀剂的特点、用途及合金状态而定，一般规律是铸态短于加工状态，加工状态短于淬火状态，硬合金短于软合金。

3.4 浸蚀后的试样在水中冲洗后，除了需要鉴别合金中的相以外，均应用 5% ~ 25% (V/V) 的 HNO₃ (V/V; 65% ~ 68%) 溶液洗去表面的浸蚀产物，再用水冲洗干净，最后用酒精棉轻轻擦净吹干，即可进行观察。

4 阳极化制膜

在偏光下观察铸锭、退火状态制品的晶粒及加工变形材料的显微组织，抛光后的试样应进行阳极化制膜处理(参见图 2、图 3、图 4)。纯铝及软合金试样阳极化制膜前可进行电解抛光以提高制膜质量。

4.1 阳极化装置同图 1。在制膜过程中试样表面(阳极)与阴极板表面保持适当距离，并且不能摆动试样。

4.2 纯铝、铝-镁及铝-锰系等软合金的制膜液成分和制膜工艺参数为：

a) 制膜液成分

95% ~ 98% (V/V) 的硫酸	38mL
85% (V/V) 的磷酸	43mL
水	19mL

b) 制膜工艺参数

电压	20 ~ 30V
电流密度	0.1 ~ 0.5A/cm ²
时间	1 ~ 3min

温度 < 40℃

4.3 其他铝及铝合金制膜液成分及制膜工艺参数为:

a) 制膜液成分

氟硼酸(HBF_4) 5g
水 200mL

b) 制膜工艺参数

电压 20 ~ 45V
电流密度 0.1 ~ 0.5A/cm²
时间 1 ~ 3min
温度 < 40℃

c) 氟硼酸溶液

称取 117g 硼酸(H_3BO_3)于塑料容器内,加入 500mL 水,333mL 氢氟酸($\rho 1.15\text{g/mL}$),待硼酸溶解完全后冷却,用水稀释至 1L,即配成所需氟硼酸溶液(16.8g/L)。

5 组织检查

在显微镜上观察的试样表面,应洁净干燥无水痕,组织清晰真实,无过蚀孔洞。

5.1 铸锭的显微组织检查

通常在未浸蚀试样上观察合金中相的形态和疏松、夹杂物等缺陷,在浸蚀试样上观察枝晶结构、鉴别相组分以及观察均火状态的过烧组织。

5.2 加工制品淬火及退火试样检查

5.2.1 在制备好的试样上检查晶粒状态和过烧组织,通常放大 200 ~ 500 倍进行观察与照像。

5.2.2 铝合金过烧组织的判别

金属温度达到或高于合金中低熔点共晶的熔点或固相线,使共晶或固熔体晶界产生复熔的现象叫过烧。在显微组织中,出现下述特征:

- a) 复熔共晶球;
- b) 晶界局部复熔加宽;
- c) 在三个晶粒交界处形成复熔三角形。

图 4 ~ 图 8 分别为铸锭正常与过烧组织。

图 9 ~ 图 12 为铸轧板显微组织。

图 13 ~ 图 21 分别为加工制品淬火与过烧组织。

5.3 高温氧化

在较高温度处理铝合金材料时,由于炉内空气湿度大,热处理后材料表面起泡或靠近表面内层沿晶界出现气孔,此现象称为高湿氧化(HTO)。

高温氧化的组织特征见图 25。

5.4 包覆层

在合金板材的表面,为提高抗腐蚀性能或某种工艺性能的需要,而包覆的一层铝或合金,称为包覆层。见图 22、图 23。

5.4.1 检查包覆层时,应取板材横向截面,采用夹样或镶样法进行抛光,保持包覆层不被磨损。

5.4.2 应在试样的包覆面取 5 ~ 10 点,测量包覆层厚度,计算其平均值,按式(1)计算包覆层厚度百分数:

$$\text{包覆层厚度百分数} = \frac{\text{包覆层厚度平均值}(\text{mm})}{\text{板材总厚度}(\text{mm})} \times 100\% \quad \dots\dots\dots (1)$$

5.5 铜扩散

指 Al-Cu-Mg 系合金包铝板材,经高温长时间加热处理,使合金中的铜原子沿晶界扩散到包铝层,见图 24,铜扩散深度越大,抗腐蚀性能降低越严重。

5.5.1 铜扩散深度检查用试样采用电解抛光,观测两面包铝层中铜扩散的最大深度。

6 晶粒度的测定

6.1 晶粒度

在铝及铝合金材料中,晶粒度通常是指基体(铝固溶体)的晶粒尺寸,对于少量的相、夹杂物和其他附加物,在晶粒度测定中通常不予考虑。

6.2 测量方法

晶粒度的测量方法有三种:

- a) 比较法(见 6.4);
- b) 平面晶粒计算法(见 6.5);
- c) 截距法(见 6.6)。

6.3 试样的选择、制备及测量

根据标准或技术条件规定的部位、方向或试验研究的需要选取试样。

抛光过程中应保证试样无发热或明显的冷作硬化,推荐采用电解抛光。

在每个截面上应测定三个或更多个有代表性面积内的晶粒数。代表性是指试样上所有部位都对测定结果作出贡献,而不是主观有意选定。

应按照第 2 章和第 3 章制备和腐蚀试样。

6.4 比较法

比较法适用于含有等轴晶(近似等轴晶)的完全再结晶晶粒和铸造材料晶粒。

6.4.1 本方法是将在被检查试样上所观察到的晶粒图像,与已知晶粒大小的标准图像相比较,得到被检查试样的晶粒度(或通过简单计算)。

6.4.2 图 26~图 33 是铝及铝合金晶粒度标准评级图,放大 100 倍,每个图下的表内给出不同放大倍数及相应的晶粒级别指数 G 。

6.4.3 在标准图所给出的放大倍数中选择适当的倍数,观察被检试样的晶粒图像,与标准图相比,由等同晶粒标准图下的表内查出 G 值。在表 3 上查出与 G 值对应的单位面积平均晶粒数 n_A (个/ mm^2),即是测定结果。由此可计算出晶粒平均面积 $\bar{a} = \frac{1}{n_A}$ ($\text{mm}^2/\text{个}$),晶粒的平均直径 $d_n = \sqrt{\bar{a}}$ (mm)。

表 3

晶粒度级别指数 G	-3	-2.5	-2	-1.5	-1	-0.5	0	0.5
单位面积的平均晶粒数,个/ mm^2	1	1.41	2	2.83	4	5.66	8	11.31
晶粒度级别指数 G	1	1.5	2	2.5	3	3.5	4	4.5
单位面积的平均晶粒数,个/ mm^2	16	22.63	32	45.25	64	90.5	128	181
晶粒度级别指数 G	5	5.5	6	6.5	7	7.5	8	8.5
单位面积的平均晶粒数,个/ mm^2	256	362	512	724	1024	1448	2048	2896
晶粒度级别指数 G	9	9.5	10	10.5	11	11.5	12	12.5
单位面积的平均晶粒数,个/ mm^2	4096	5793	8192	11583	16384	23170	32768	46341
晶粒度级别指数 G	13	13.5	14					
单位面积的平均晶粒数,个/ mm^2	65536	92682	131072					

6.4.4 如果被观察图像在两个相邻标准图之间, G 值可取中间值或靠近的标准图的 G 值。

注: G 值的含义为: 当已知检测面积 $A(\text{mm}^2)$ 上的晶粒数为 N , 放大倍数 100 倍时, 显微晶粒级别指数 G 与 A 、 N 有下列关系:

$$G = 1.0000 + \log_2(N/A) = 1.0000 + 3.3219 \lg(N/A)$$

G 值实质上与所用的计算方法和测量单位无关。

6.5 平面晶粒计算法

在显微镜的毛玻璃或照片上划一个直径为 79.8mm 的圆, 面积近似 5000mm^2 , 选定放大倍数 g , 使该圆内至少有 50 个晶粒。

6.5.1 计算单位面积的平均晶粒数 n_A

圆内的晶粒总数 n_g = 圆内完整晶粒数 n_1 和圆周边所切晶粒数 n_2 一半的和:

$$\text{当 } n_2 \text{ 为偶数: } n_g = n_1 + \frac{n_2}{2};$$

$$\text{当 } n_2 \text{ 为奇数: } n_g = n_1 + \frac{n_2 + 1}{2}。$$

由此得到

$$n_A = \frac{n_g}{5000/g^2} = 2 \left(\frac{g}{100} \right)^2 n_g \dots\dots\dots (2)$$

6.5.2 非等轴晶, 应在纵向、横向和高向三个互相垂直的平面内进行晶粒计算, 这三个平面内的晶粒数分别为 n_x 、 n_y 和 n_z 。每立方毫米内的晶粒数 $n_v = \sqrt{0.8 n_x \cdot n_y \cdot n_z}$ 。

可参考表 4 给出测量结果对应的晶粒级别指数 G 和相关数据。

6.6 截距法

截距法推荐用于不均匀的等轴晶粒组织, 对于各向异性组织, 可分别测定三个主要方向上的晶粒度, 在适当的情况下可较合理地测定平均晶粒度。本方法可借助各种类型的试验仪器来完成测量与计算。例如, 定量金相显微镜和图像分析仪等。

6.6.1 用截距法测量晶粒度, 是在毛玻璃上或在试样的代表性视场内, 通过计算被一根或数据直线(称检测线)相截的晶粒数(在直线的总长度上不应少于 50 个相截晶粒), 或计算平均截距的方法测定晶粒度。

6.6.2 应对随机选定的、分离较远的 3~5 个视场进行晶粒测量, 以得出该试样合理的晶粒度平均值。

6.6.3 平均截距 l 按下式计算:

$$l = \frac{\text{一条或多条检测线的总长度}}{\text{总截点数} \times \text{所用放大倍数}} \dots\dots\dots (3)$$

平均截距 l 的长度, 略低于晶粒的平均直径尺寸, 在通常测量时, 可以认为是晶粒的平均直径。可参考表 4 给出相关晶粒度数据。

6.6.4 对于非等轴晶, 如果在纵向上被直线交截的每一毫米上的平均晶粒数为 n_e , 在横向上记为 n_x , 在高向上记为 n_z , 则每一立方毫米内的晶粒数可按下式计算:

$$n_v = 0.566 \times n_e \cdot n_x \cdot n_z \dots\dots\dots (4)$$

可参考表 4 评定计算结果对应的晶粒级别指数 G 和相关数据。

表4 用于均匀任意取向等轴晶粒计算的显微晶粒度关系

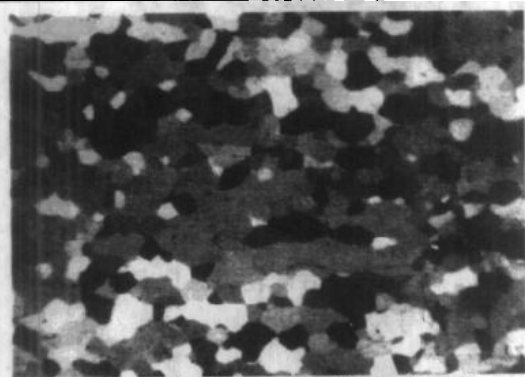
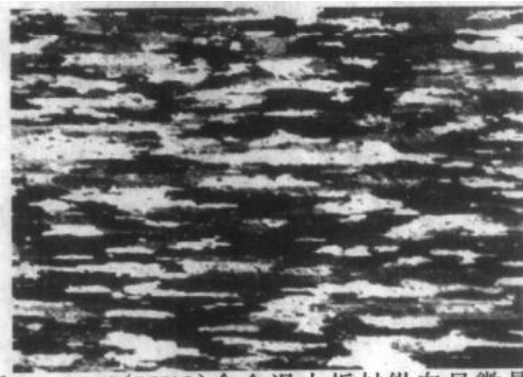
显微晶粒度 级数指数 G	平均晶粒截面的 “直径” ¹⁾		平均截距 l mm	每毫米检测线 上的截点数 $1/l$	平均晶粒 截面面积 $\bar{a}$ mm ²	每立方毫米 晶粒计算数 $n_v^{2)}$	单位面积的平均晶粒数 n_A	
	名义直径 d_n mm	Feret 直径 d_f mm					1 倍下每 平方毫米 晶粒数	100 倍下 每平方英 寸晶粒数
00A	0.51	0.570	0.453	2.210	0.258	6.11	3.88	0.250
0	0.36	0.303	0.320	3.125	0.129	17.3	7.75	0.500
0.5	0.30	0.339	0.269	3.716	0.0912	29.0	11.0	0.707
1.0	0.25	0.285	0.226	4.42	0.0645	48.8	15.50	1.000
1.5	0.21	0.240	0.190	5.26	0.0456	82	21.9	1.414
...	0.200	0.226	0.177	5.64	0.0400	100	25.0	1.613
2.0	0.18	0.202	0.160	6.25	0.0323	138	31.0	2.00
2.5	0.15	0.170	0.135	7.43	0.0228	232	43.8	2.828
3.0	0.125	0.143	0.113	8.34	0.0161	391	62.0	4.000
...	0.120	0.135	0.106	9.41	0.0144	463	69.4	4.480
3.5	0.105	0.120	0.095	10.51	0.0144	657	87.7	5.657
...	0.100	0.113	0.089	11.29	0.0100	800	100	6.452

显微晶粒度 级数指数 G	平均晶粒截面的 “直径” ¹⁾		平均截距 l μm	每毫米检测线 上的截点数 $1/l$	平均晶粒 截面面积 $\bar{a}$ $\times 10^{-3} \text{ mm}^2$	每立方毫米 晶粒计算数 $n_v^{2)}$	单位面积的平均晶粒数 n_A	
	名义直径 d_n μm	Feret 直径 d_f μm					1 倍下每 平方毫米 晶粒数	100 倍下 每平方英 寸晶粒数
4.0	90	101	80.0	12.5	8.07	1105	124	8.000
4.5	75	85	67.3	14.9	5.70	1859	175	11.31
...	70	79	62.0	16.1	4.90	2331	204	13.17
5.0	65	71	56.6	17.7	4.03	3126	284	16.00
...	60	68	53.2	18.8	3.60	3708	278	17.92
5.5	55	60	47.6	21.0	2.85	5258	351	22.63
...	50	56	44.3	22.6	2.50	6400	400	25.81
6.0	45	50	40.0	25.0	2.02	8842	496	32.00
...	40	45	35.4	28.2	1.60	12500	625	40.32
6.5	38	42	33.6	29.7	1.43	14871	701	45.25
...	35	39	31.0	32.2	1.23	18659	816	52.67
7.0	32	36	28.3	35.4	1.008	25010	992	64.00
...	30	34	26.6	37.6	0.900	29630	1111	71.68
7.5	27	30	23.8	42.0	0.713	42061	1403	90.51
...	25	28	22.2	45.1	0.625	51200	1600	100.23

表 4(完)

显微晶粒度 级数指数 G	平均晶粒截面的 “直径” ¹⁾		平均截距 l μm	每毫米检测线 上的截点数 $1/l$	平均晶粒 截面面积 $\bar{a}$ $\times 10^{-6}\text{mm}^2$	每立方毫米 晶粒计算数 $n_v^{2)}, \times 10^6$	单位面积的平均晶粒数 n_A	
	名义直径 d_n μm	Feret 直径 d_f μm					1 倍下每 平方毫米 晶粒数, $\times 10^3$	100 倍下 每平方英 寸晶粒数
8.0	22	25	20.0	50.0	504	0.0707	1.98	128.0
...	20	23	17.7	56.4	400	0.1000	2.50	161.3
8.5	19	21	16.8	59.5	356	0.1190	2.81	181.0
9.0	16	18	14.1	70.7	252	0.200	3.97	256.0
...	15	17	13.3	75.2	225	0.237	4.44	286.8
9.5	13	15	11.9	84.1	178	0.336	5.61	362.0
10.0	11	13	10.0	100	126	0.566	7.94	512.0
...	10	11.3	8.86	113	100	0.800	10.00	645.2
10.5	9.4	10.6	8.41	119	89.1	0.952	11.22	724.1
...	9.0	10.2	7.98	125	81.0	1.097	12.35	796.5
11.0	8	8.9	7.07	141	63.0	1.600	15.87	1024
...	7.0	7.9	6.20	161	49.0	2.332	20.41	1317
11.5	6.7	7.5	5.95	168	44.6	2.692	22.45	1448
...	6.0	6.8	5.32	188	36.0	3.704	27.78	1792
12.0	5.6	6.3	5.00	200	31.5	4.527	31.71	2048
...	5.0	5.6	4.43	226	25.0	6.40	40.0	2581
12.5	4.7	5.3	4.20	238	22.3	7.61	44.9	2896
13.0	4.0	4.2	3.54	283	15.8	12.80	63.5	4096
13.5	3.3	3.7	2.97	336	11.1	21.54	89.8	5793
...	3.0	3.4	2.66	376	9.0	29.6	111.1	7168
14.0	2.8	3.2	2.50	400	7.88	36.2	127	8192
...	2.5	2.8	2.00	451	6.25	51.2	160	10323

1) $d_f = \bar{a}\sqrt{l}$, d_n 和 d_f 值为修约后的数值。
2) n_v 是根据球形的平均晶粒计算($n_v = 0.566 \cdot l^{-3}$)

图 2 纯铝退火板材显微晶粒组织
阳极制膜偏光 $\times 100$ 图 3 2A12(LY12)合金退火板材纵向显微晶粒
组织阳极制膜偏光 $\times 100$