

ICS 91.080.10

F 23

备案号: 17679-2006

DL

中华人民共和国电力行业标准

DL/T 439 — 2006

代替 DL 439 — 1991

火力发电厂高温紧固件技术导则

The technical guide for high-temperature bolt
of fossil-fired power plant

2006-05-06 发布

2006-10-01 实施

中华人民共和国国家发展和改革委员会 发布

火力发电厂紧固件技术导则

前言	II
1 范围	1
2 规范性引用文件	1
3 选材原则	1
4 检验与更换报废	2
5 螺栓的紧固与拆卸	4
6 技术档案管理	6
附录 A (资料性附录) 常用螺栓材料的化学成分、力学性能	8
附录 B (资料性附录) 常用螺栓材料的热处理工艺和应力松弛曲线	10
附录 C (资料性附录) 20Cr1Mo1VNbTiB 高温螺栓钢的晶粒级别、力学性能和验收准则	11

本标准规定了火力发电厂紧固件的选材原则、检验与更换报废、紧固与拆卸、技术档案管理的要求。

本标准适用于火力发电厂紧固件的选材、检验、更换、紧固与拆卸、技术档案管理。

本标准由电力行业提出，归口归口单位：中国电力企业联合会。

本标准起草单位：西安热工研究院有限公司。

本标准主要起草人：刘树峰、陈树峰、人等。

本标准首次发布时间：1991年9月18日。本次为第一次修订。

本标准自发布之日起实施之日起代替 DL 439—1991。

3 选材原则

3.1 选材原则

3.2 检验与更换报废

3.3 紧固与拆卸

3.4 技术档案管理

前 言

本标准是根据《国家发展改革委办公厅关于下达 2003 年行业标准项目补充计划的通知》（发改办工业〔2003〕873 号文）的安排，对 DL 439—1991《火力发电厂高温紧固件技术导则》进行修订的。

高温紧固件是关系火力发电厂安全运行的主要零部件，为把好紧固件的设计、制造、安装、运行、检修、监督等环节特制订本标准。

DL 439—1991 自颁布实施以来，对高温紧固件的生产制造、运行监督起到了十分积极有效的作用，并积累了丰富的经验，同时也提出了一些新的问题。

本标准与 DL 439—1991 比较，主要有以下一些变化：

- 本标准改为推荐性行业标准；
- 增加充实了紧固件用钢号；
- 对原标准体例作了较大幅度的修订，删减了原标准的结构、连接特性、失效和防止措施等章节内容，一些章节进行了合并。

标准的附录 A、附录 B、附录 C 为资料性附录。

本标准由中国电力企业联合会提出。

本标准由电力行业电站金属材料标准化技术委员会归口并解释。

本标准起草单位：西安热工研究院有限公司

本标准主要起草人：刘树涛、陈吉刚。

本标准首次发布时间：1991 年 9 月 16 日，本次为第一次修订。

本标准自实施之日起代替 DL 439—1991。

火力发电厂高温紧固件技术导则

1 范围

本标准规定了火力发电厂高温紧固件的检验内容、方法和处理措施，并对螺栓的紧固与拆卸提出了要求。

本标准适用于工作温度 400℃ 以上的汽缸、汽门、各种阀门和蒸汽管道法兰的螺栓、螺母和垫片的检验和处理。对于工作温度 400℃ 及以下的紧固件可参照执行。

2 规范性引用文件

下列文件中的条款通过本标准的引用而成为本标准的条款。凡是注日期的引用文件，其随后所有的修改单（不包括勘误的内容）或修订版均不适用于本标准，然而，鼓励根据本标准达成协议的各方研究是否可使用这些文件的最新版本。凡是不注日期的引用文件，其最新版本适用于本标准。

GB/T 2 紧固件 外螺纹的末端

GB/T 3 普通螺纹收尾、肩具、退刀槽和倒角

GB/T 90.1 紧固件 验收检查

GB/T 90.2 紧固件 标志与包装

GB/T 98 止动垫圈技术条件

GB/T 196 普通螺纹 基本尺寸

GB/T 197 普通螺纹 公差

GB/T 231.1 金属布氏硬度试验方法 第 1 部分：试验方法

GB/T 5779.1 紧固件表面缺陷 螺栓、螺钉和螺柱 一般要求

GB/T 5779.2 紧固件表面缺陷 螺母

GB/T 6394 金属平均晶粒度测定方法

GB/T 17394 金属里氏硬度试验方法

DL/T 441 火电厂高温高压蒸汽管道蠕变监督规程

DL/T 694 高温紧固螺栓超声波检验技术导则

DL/T 884 火电厂金相检验与评定导则

JB 4730 压力容器无损检验

3 选材原则

3.1 较好的抗松弛性，使螺栓在较低的预紧应力下，经过一个设计运行周期后，其残余紧应力仍高于最小密封应力。

3.2 强度和塑性的良好配合，蠕变缺口敏感性小。一般要求螺栓材料在 8000h~10000h 以上光滑试样的持久塑性分别为：新材料大于 5%；已运行材料不应低于 3%。

3.3 组织稳定，热脆性倾向小。

3.4 良好的抗氧化性能，防止长期运行后因螺纹氧化而发生螺栓和螺母咬死现象。

3.5 螺母强度宜比螺栓材料低一级，硬度低 20HBW~50HBW。用于各工作温度等级的常用螺栓材料列于表 1，表中螺栓材料用作螺母时，可比表 1 中所列温度高 30℃~50℃。常用螺栓材料的化学成分、力学性能参见附录 A，热处理工艺参见附录 B。

3.6 原则上同一法兰的紧固件应采用相同的钢号、强度等级和结构形式。当在同一法兰上要安装不同材料和强度等级的紧固件时，则应考虑计算由不同线膨胀系数和抗松弛性能引起的影响。

表 1 各工作温度下选用的常用螺栓材料

最高使用温度 ℃	牌 号
400	35（螺母用材）
400	45
400～413	42CrMo
480	20CrMo（螺母用材）
480	35CrMo
510	25Cr2MoV
550	25Cr2Mo1V
550	20Cr1Mo1V1
570	20Cr1Mo1VNbTiB（推荐使用钢材）
570	20Cr1Mo1VTiB（推荐使用钢材）
570	C-422（2Cr12NiMo1W1V）（推荐使用钢材）
677	R-26（Ni-Cr-Co 合金）
677	GH4145（Ni-Cr 合金）

4 检验与更换报废

4.1 使用前的检验

- 4.1.1 使用前应逐根检验。
- 4.1.2 到货验收时应根据 GB/T 90.1、GB/T 90.2 的要求检查包装质量，根据产品标准的规定检查产品的标识、数量和产品质量检验单（包括化学成分、低倍和高倍组织、力学性能）。
- 4.1.3 进行几何尺寸、表面粗糙度及表面质量的检查，应符合 GB/T 2、GB/T 3、GB/T 98、GB/T 196、GB/T 197、GB/T 5779.1、GB/T 5779.2 等标准和图样要求。螺纹表面应光滑，不应有凹痕、裂纹、锈蚀、毛刺和其他会引起应力集中的缺陷。
- 4.1.4 对大于和等于 M32 的螺栓均应依据 DL/T 694 的要求，进行 100% 超声波探伤，必要时可按 JB 4730 进行磁粉、着色检查及其他有效的无损检验方法。
- 4.1.5 螺栓和螺母坯料或粗加工半成品进行调质处理后，方可加工成成品。
- 4.1.6 合金钢、高温合金螺栓、螺母应进行 100% 光谱检验，检查部位为螺栓端面，分析结果应与材料牌号相符，对高合金钢或高温合金的光谱检查斑点应及时打磨消除。
- 4.1.7 螺栓材料的理化检验按照相应材料的技术条件或制造厂标准执行。对螺栓材料的一些特殊要求则按协议书执行。
- 4.1.8 M32 规格及以上螺栓应按 GB/T 231.1 进行 100% 硬度检验。检查部位为螺栓光杆或端面 1/2 半径处，硬度检验首选直接进行布氏硬度检验。在无法使用布氏硬度计测试时，可使用按 GB/T 17394 便携式里氏硬度计测试，但应努力减小各种因素对试验结果的影响。螺栓硬度要求参见附录 A 的表 A.2。对镍基合金螺栓进行硬度试验时，应注意加工硬化倾向对试验结果的影响。
- 4.1.9 对大于 M32 的螺栓应按 DL/T 884 进行金相组织抽验，每种材料、规格的螺栓抽检数量不应少于一件，检查部位可在螺栓光杆或端面处。铁素体类钢的螺栓材料正常组织为均匀回火索氏体；镍基合金螺栓材料的正常组织为均匀的奥氏体；带状组织、夹杂物严重超标、方向性排列的粗大贝氏体组织、粗

大原奥氏体黑色网状晶界均属于异常组织。

4.1.10 当硬度不合格时，可通过解剖螺栓进行力学性能试验判定。

4.1.11 对 20Cr1Mo1VNbTiB 钢螺栓，组织性能规定如下（检验与评级参见附录 C）。

- 硬度：252HBW~302HBW。
- U 形缺口冲击功：小于 M52 的螺栓， $A_k \geq 63J$ ；等于或大于 M52 的螺栓， $A_k \geq 47J$ 。
- 对刚性螺栓的 U 形缺口冲击功应比柔性螺栓高 16J。
- 按晶粒形态和尺寸将组织分为 7 级（参见附录 C 的表 C.1），根据螺栓的结构和使用条件，允许使用的级别见表 2。

表 2 20Cr1Mo1VNbTiB 钢允许使用的晶粒级别

序号	使用条件	螺栓结构	允许使用级
1	原设计螺栓材料为 20Cr1Mo1VNbTiB 钢	柔性螺栓	5
2	引进大机组代用 20Cr1Mo1VNbTiB 钢	柔性螺栓	5
3	原设计为 540℃ 等级，容量在 200MW 以下的机组螺栓，如果用该钢种	柔性螺栓	3、4、5、6、7
		刚性螺栓	4、5

4.1.12 所有高温螺栓、螺母应在外露端打出材料标记，以便辨认。

4.1.13 抽取高压内缸每种规格、每种材料的 20% 螺栓（但不应少于两根）作为蠕变监督螺栓，使用前分别在该螺杆两端面打上样冲眼，测量样冲眼之间的距离，将此距离作为蠕变测量的初始长度。测量工具为专用卡尺，测量方法见 DL/T 441。

4.2 投运后的检验

4.2.1 检验的内容应根据制造厂提供的技术规范进行，或按本技术导则的规定要求，并根据机组设备的特点，制订相应的检验规定，应加强对以下螺栓的监督和检验。

- 蒸汽温度 510℃ 以上而具有热脆倾向的 25Cr2MoV 和 25Cr2Mo1V 钢螺栓。
- 已断裂的螺栓组中，尚未断裂的螺栓。
- 高压汽缸高温段螺栓，调速汽门和主汽门螺栓。
- 检验发现有黑色网状奥氏体晶界的螺栓。

4.2.2 大修时，对大于 M32 的高温螺栓应拆卸进行 100% 无损探伤，检测方法及要求见 4.1.4 的规定。

4.2.3 累计运行时间达 5 万 h，对 M32 及以上的高温螺栓，应根据螺栓的规格和材料，至少抽查 1/3 数量螺栓进行硬度检验，当抽查比例不足一件时，抽取一件。以后抽查周期约 3 万 h~5 万 h。硬度检查的部位在螺栓光杆处，硬度检测方法及要求见 4.1.8 的规定。

4.2.4 累计运行时间达 5 万 h，对 M32 及以上的高温螺栓，应根据螺栓的规格和材料，抽查 1/10 数量螺栓进行金相组织测试，当抽查比例不足一件时，抽取一件。以后抽查周期约 3 万 h~5 万 h。金相检查的部位在螺栓光杆处，金相检测方法及要求见 4.1.9 的规定。

4.2.5 每次大修时应进行蠕变监督螺栓的长度测量，然后算出蠕变变形量。测量位置、工具、方法见 4.1.13 的规定。

4.2.6 对 CrMoV 钢、多元强化 CrMoV 钢和强化的 12% 铬型钢制螺栓的蠕变变形量达到 0.7% 时，或螺栓累计运行时间达到 8 万 h~10 万 h，未进行蠕变变形测量的，应进行解剖试验。解剖试验至少从螺栓组中选择一根有代表性的螺栓进行解剖试验。抽验螺栓应是工作温度最高，或应力最大，或材料质量有问题的螺栓。

4.2.7 在任何情况下，断裂的螺栓均应进行解剖试验和失效分析。

4.2.8 经检验的螺栓可分为三类：

- 正常螺栓。
- 需重新热处理的螺栓。硬度高于要求的上限或者低于要求下限的螺栓，以及具有粗大原奥氏体黑色网状晶界的螺栓，进行重新热处理的螺栓按已恢复热处理螺栓的等级使用。
- 超过标准需报废的螺栓。

4.2.9 根据上述各项检验结果，进行综合分析，对运行螺栓的安全性作出评定，并提出改进措施和需扩大检查的内容与数量。

4.3 更换与报废

4.3.1 对运行后检验结果符合下列条件之一者应进行更换，更换下的螺栓可进行恢复热处理，检验合格后可继续使用。如已完成运行螺栓的安全性评定工作，则可根据评定报告继续使用。

- a) 硬度超标。
- b) 金相组织有明显的黑色网状奥氏体晶界。
- c) 25Cr2Mo1V 和 25Cr2MoV 的 U 形缺口冲击功：
 - 1) 调速汽门螺栓和采用扭矩法装卸的螺栓， $A_k \leq 47J$ ；
 - 2) 采用加热伸长装卸或油压拉伸器装卸的螺栓， $A_k \leq 24J$ 。

4.3.2 符合下列条件之一的螺栓应报废：

- a) 螺栓的蠕变变形量达到 1%；
- b) 已发现裂纹的螺栓；
- c) 经二次恢复热处理后发生热脆性，达到更换螺栓的规定。¹⁾
- d) 外形严重损伤，不能修理复原；
- e) 螺栓中心孔局部烧伤熔化。

5 螺栓的紧固与拆卸

5.1 一般要求

5.1.1 在紧固和拆卸过程中，应注意尽量改善紧固接触面的润滑状态，防止使用过大的冲击力，以减小螺栓所承受的扭矩。

5.1.2 对于 M52 及以上的螺栓、螺母、球面垫圈、特殊厚度的垫圈和螺栓孔应做好配对和编号，每次紧固时仍按原来的号码配对就位。罩螺母拧到底后，螺母顶部应留有 3mm 左右的空隙。

5.1.3 新螺栓和螺母应事先使螺纹配合适当，并有一定的间隙。使用过的螺栓和螺母再次安装前，应清洗螺纹。螺纹处有毛刺、氧化皮破裂严重的应研磨螺纹，应用手能轻松拧进螺母。

5.1.4 无论使用何种紧固方法和工具，应选择合理的松紧顺序，拧紧螺栓顺序以消除法兰结合面缝隙为原则，松螺栓顺序以防止法兰变形力集中到最后拆卸的一个螺栓位置为原则。图 1 表示几种不同形状法兰面螺栓的松紧顺序。

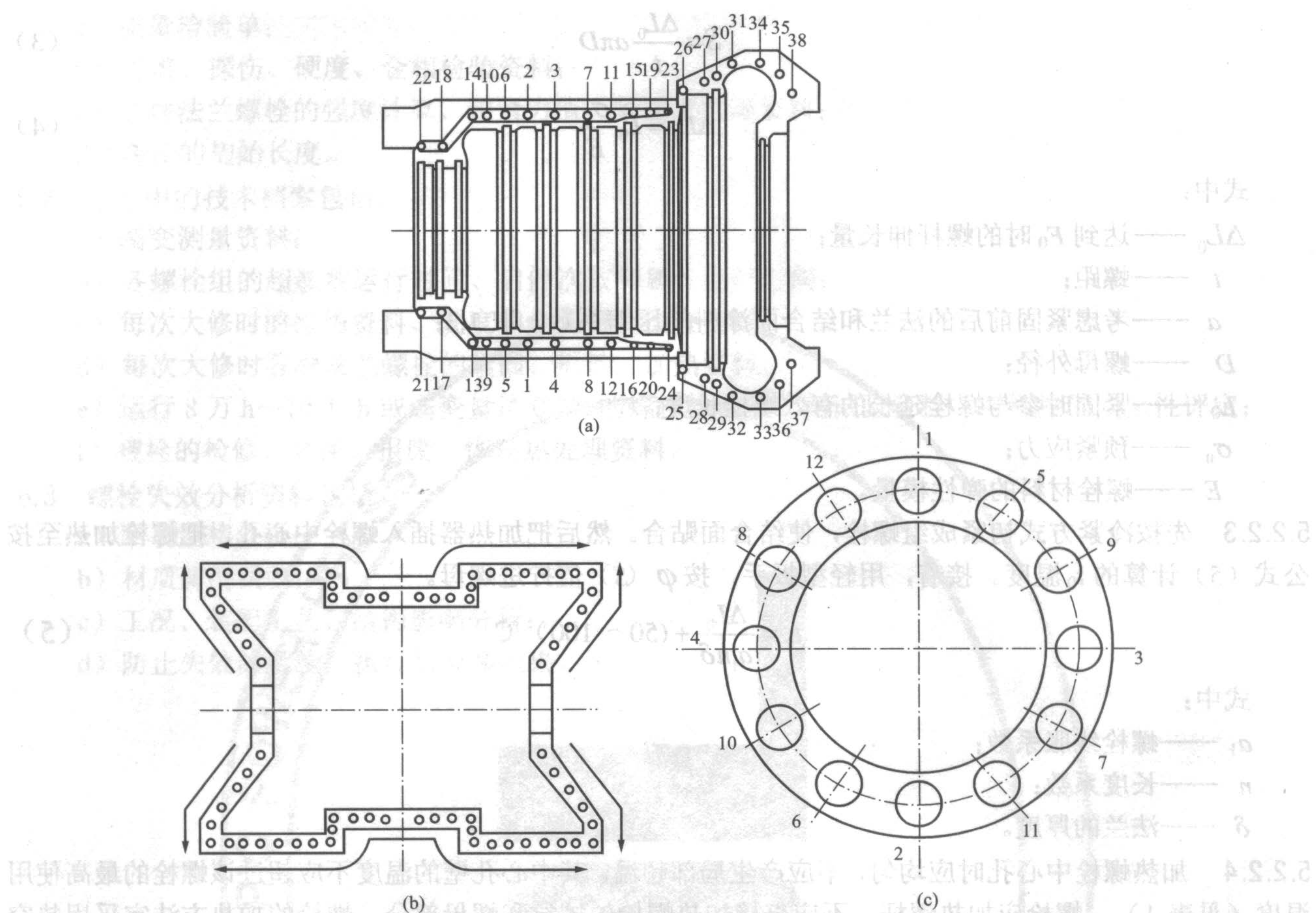
5.1.5 螺栓和螺母对号试拧。螺母与法兰接触后，用塞尺检查螺母支承面和法兰的接触情况，全周用 0.04mm 塞尺通不过时表示接触良好。试拧合格的螺栓和螺母，可用优质黑铅粉反复摩擦螺纹部分，至螺纹牙表面发出乌黑光泽为止。再用压缩空气吹去多余的黑铅粉。

5.1.6 螺栓要先进行初紧，待整个结合面螺栓紧固后再进行第二次紧固。

5.1.7 原则上贯穿式螺栓和螺柱，不应在同一法兰上相邻排列。如果必须这样做，则应要求螺柱的应变和应力松弛特性近似等于贯穿式螺栓的应变和应力松弛特性。

5.1.8 根据施工要领、特点、紧力偏差、被连接件的重要性和现场条件，应选用适宜的紧固方法。一般来说，高压汽缸和调速汽门螺栓应采用紧力偏差较低的紧固方法。

1) 新成品螺栓又经一次调质处理的按一次恢复热处理对待。



(a) 高压缸法兰；(b) 双排汽低压缸法兰；(c) 阀门圆法兰

图1 几种不同形状法兰面螺栓的松紧顺序

5.2 紧固

5.2.1 扭矩法

5.2.1.1 扭矩法是利用转动螺母的扭矩和螺栓紧力之间的关系拧紧螺栓。用公式(1)算出达到预紧力 F_0 所需的扭矩 M_t ，即

$$M_t = KdF_0 \quad (1)$$

式中：

d ——螺栓公称直径；

K ——扭矩系数。

5.2.1.2 施工时把编号配对螺栓、螺母和垫圈按法兰上的编号就座，用加套筒扳手（或测力扳手，或风动扳手，或液压扳手）以约 $50\%M_t$ 初紧螺母，然后以 $100\%M_t$ 终紧螺母。

5.2.1.3 紧固时，应尽量采用风动和液压扳手。

5.2.2 加热转角法

5.2.2.1 加热转角法是在螺栓的中心孔加热螺栓螺杆，造成螺栓与法兰的温差，待螺栓长度热胀至规定值后拧进螺母，螺栓冷却收缩后将产生预紧力。

5.2.2.2 根据式(2)和式(3)算出达到预紧力 F_0 时所需的螺母转角 φ 或弧长 S ，即

$$\varphi = \frac{\Delta L_0}{t} a \times 360^\circ$$

$$S = \frac{\Delta L_0}{t} a \pi D \quad (3)$$

$$\Delta L_0 = L_0 \frac{\sigma_0}{E} \quad (4)$$

式中:

ΔL_0 ——达到 F_0 时的螺杆伸长量;

t ——螺距;

a ——考虑紧固前后的法兰和结合面涂料的压缩系数, 取 1.3;

D ——螺母外径;

L_0 ——紧固时参与螺栓延长的有效螺栓长度;

σ_0 ——预紧应力;

E ——螺栓材料的弹性模量。

5.2.2.3 先按冷紧方式初紧成组螺栓, 使结合面贴合。然后把加热器插入螺栓中心孔, 把螺栓加热至按公式 (5) 计算的 t_0 温度。接着, 用轻型扳手, 按 φ (S) 值拧进螺母。

$$t_0 = \frac{\Delta L_0}{a_1 n \delta} + (50 \sim 100) ^\circ\text{C} \quad (5)$$

式中:

a_1 ——螺栓线胀系数;

n ——长度系数;

δ ——法兰的厚度。

5.2.2.4 加热螺栓中心孔时应均匀, 不应产生局部超温。其中心孔壁的温度不应超过该螺栓的最高使用温度 (见表 1)。螺栓应加热螺杆, 不应直接加热螺栓的螺纹和螺母部分。螺栓的加热方法宜采用热空气加热法和电气式加热法。

5.2.3 伸长法

5.2.3.1 伸长法是拧紧螺母使螺栓长度伸长至规定值, 从而获得预紧力。

5.2.3.2 根据公式 (4), 算出螺栓达到预紧力 F_0 时的螺栓伸长量 ΔL_0 。

5.2.3.3 测量每根螺栓的长度, 并做好记录。随后按号装入螺栓、垫圈和螺母, 按顺序进行初拧, 使法兰结合面贴合。最后安装基准棒和千分表 (或超声波测长仪), 然后拧紧螺母, 螺栓的伸长量至 ΔL_0 终拧即告结束。

5.2.3.4 本方法适用于两端外露的螺栓和一端外露带中心孔的螺栓; 不适用于带罩螺母的螺栓。伸长螺栓的方法有: 冷紧、加热伸长或用油压拉伸器拉长螺栓。

5.3 拆卸

5.3.1 不应在高温状态拆卸螺栓, 对于汽缸螺栓应等调节级处壁温降到 80°C 以下, 对于各种阀门和管道的法兰应等温度降到 100°C 以下才可拆卸。

5.3.2 拆卸螺母通常用加热法, 使螺栓伸长, 紧力下降, 以便转动螺母。拆卸螺栓前, 应向螺纹内注入润滑剂, 用适当的力矩来回活动螺母, 并可敲振, 使螺母松动。防止由于螺纹咬死而强行松螺母引起螺纹拉毛或扭断螺栓。

5.3.3 当确实无法拆卸时, 可用氧—乙炔切开螺母。切割时应严防螺栓螺纹损坏或过热。当拧入法兰体的螺栓断裂时, 可用钻孔方法取出锈死螺杆, 以保证法兰体内螺纹完整无损。

5.3.4 当螺杆仍拧在下法兰体而进行起吊汽缸大盖或阀门盖时, 应防止碰伤裸露在外的螺栓螺纹。

6 技术档案管理

6.1 使用前的高温紧固件技术档案包括:

- a) 质量检验单;
- b) 光谱、探伤、硬度、金相检验资料;
- c) 各种法兰螺栓的强度计算、预紧力值、紧固工艺等资料;
- d) 螺栓的初始长度。

6.2 运行中的技术档案包括:

- a) 蠕变测量资料;
- b) 各螺栓组的超参数运行时间、启停次数和累计运行时间;
- c) 每次大修时的探伤资料、硬度和金相组织检查资料;
- d) 每次大修时各种法兰螺栓的紧固、拆卸、加热资料;
- e) 运行 8 万 h~10 万 h 或蠕变量达 0.7% 的螺栓检验和解剖试验资料, 对螺栓的安全性评定;
- f) 螺栓的检修、更换、报废、恢复热处理资料。

6.3 螺栓失效分析资料包括:

- a) 断裂金相分析;
- b) 材质解剖试验;
- c) 工况、装配工艺、结构影响分析;
- d) 防止失效的措施, 执行情况 and 效果。

附录 A
(资料性附录)

常用螺栓材料的化学成分、力学性能

A.1 螺栓材料的化学成分见表 A.1。

表 A.1 螺栓材料的化学成分

牌号	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	W	V	Nb	Ti	Al	Cu	B
35	0.32~0.40	0.17~0.37	0.50~0.80	≤0.035	≤0.035	≤0.25	≤0.25	—	—	—	—	—	—	—	—
45	0.42~0.50	0.17~0.37	0.50~0.80	≤0.035	≤0.035	≤0.25	≤0.25	—	—	—	—	—	—	—	—
20CrMo	0.17~0.24	0.17~0.37	0.40~0.70	≤0.035	≤0.035	≤0.30	0.80~1.10	0.15~0.25	—	—	—	—	—	—	—
35CrMoA	0.32~0.40	0.17~0.37	0.40~0.70	≤0.025	≤0.025	≤0.30	0.80~1.10	0.15~0.25	—	—	—	—	—	≤0.25	—
42CrMoA	0.38~0.45	0.17~0.37	0.50~0.80	≤0.025	≤0.025	≤0.30	0.90~1.20	0.15~0.25	—	—	—	—	—	≤0.25	—
25Cr2MoVA	0.22~0.29	0.17~0.37	0.40~0.70	≤0.025	≤0.025	≤0.30	1.50~1.80	0.25~0.35	—	0.15~0.35	—	—	—	≤0.25	—
25Cr2Mo1VA	0.22~0.29	0.17~0.37	0.50~0.80	≤0.025	≤0.025	≤0.30	2.10~2.50	0.90~1.10	—	0.30~0.50	—	—	—	≤0.25	—
20Cr1Mo1V 1A	0.18~0.25	0.17~0.37	0.30~0.60	≤0.025	≤0.025	≤0.40	1.00~1.30	0.80~1.10	—	0.70~1.10	—	—	—	≤0.25	—
20Cr1Mo1V NbTiB	0.17~0.23	0.40~0.60	0.40~0.65	≤0.025	≤0.025	≤0.30	0.90~1.30	0.75~1.00	—	0.50~0.70	0.11~0.22	0.05~0.14	—	≤0.25	0.001~0.005
20Cr1Mo1V TiB	0.17~0.23	0.40~0.60	0.40~0.60	≤0.025	≤0.025	≤0.30	0.90~1.30	0.75~1.00	—	0.45~0.65	—	0.16~0.28	—	≤0.25	0.001~0.005
2Cr12NiMo1 W1V (C-422)	0.20~0.25	≤0.50	0.50~1.00	≤0.025	≤0.025	0.50~1.00	11.00~12.50	0.90~1.25	0.90~1.25	0.20~0.30	—	—	—	≤0.25	—
R-26	≤0.08	≤1.50	≤1.00	≤0.030	≤0.030	35.0~39.0	16.0~20.0	2.50~3.50	Co18.0~22.00	Fe 余量	—	2.50~3.00	≤0.25	—	0.001~0.01
GH4145	≤0.08	≤0.35	≤0.35	≤0.015	≤0.010	≥70	14.0~17.0	Mg≤0.010	Zr≤0.050	Fe5.0 9.0	Co≤1.00	2.25~2.75	0.40~1.00	≤0.50	≤0.01

A.2 常用螺栓材料的力学性能见表 A.2。

表 A.2 常用螺栓材料的力学性能

牌号	室温力学性能（不低于）					HBW	高温强度		
	$R_{p0.2}$ MPa	R_m MPa	A %	z %	A_k J		试验温度℃	σ_{10}^{-5} MPa	σ_{10}^5 MPa
35	265	510	18	43	55	146~196	400	118	—
45	353	637	16	40	39	187~229	400	81	186
20CrMo	490	637	14	40	55	197~241	470	137	255
35CrMo（>50mm）	590	765	14	40	47	241~285	475	—	167
35CrMo（≤50mm）	686	834	12	40	47	255~311	—	—	—
42CrMo（>65mm）	660	790	16	50	47	248~311			
42CrMo（≤65mm）	720	860	16	50	47	255~321			
25Cr2MoV	686	785	15	50	47	248~293	500	78	196
25Cr2Mo1V	685	785	15	50	47	248~293	550	53	139
20Cr1Mo1V1	637	735	15	60	59	248~293	—	—	—
20Cr1Mo1VNbTiB	735	834	12	45	39	252~302	550	182	210
20Cr1Mo1VTiB	685	785	14	50	39	255~293	570	—	172
C-422（20Cr12NiMoWV）	760	930	14	32	—	277~331	566	124	138
R-26（Ni-Cr-Co 合金）	555	1000	14	20	—	262~331	—	—	—
GH4145	550	1000	12	18	—	262~331	570	456	566

附录 B
(资料性附录)

常用螺栓材料的热处理工艺和应力松弛曲线

B.1 螺栓材料的热处理工艺见表 B.1。

表 B.1 螺栓材料的热处理工艺

牌 号	热 处 理 工 艺
35	840℃~860℃空冷
45	(1) 840℃~860℃空冷, 580℃~630℃空冷; (2) 840℃±10℃ 水冷, 580℃~600℃空冷
20CrMo	880℃~900℃水或油冷, 580℃~600℃ 回火
35CrMo	850℃~870℃油或水冷, 540℃~620℃回火
42CrMo	850℃油或水冷, 580℃回火
25Cr2MoV	920℃~940℃油冷, 640℃~690℃回火
25Cr2Mo1V	(1) 1030℃~1050℃空冷, 950℃~970℃空冷, 680℃回火 6h 后空冷; (2) 950℃~980℃空冷, 680℃6h 回火
20Cr1Mo1V1	1000℃淬火, 700℃回火
20Cr1Mo1VNbTiB	1020℃~1040℃油冷, 700℃~720℃回火 6h 后空冷
20Cr1Mo1VNbB	1030℃~1050℃油冷, 700℃回火 6h
C-422 (20Cr12NiMoWV)	980℃ 油冷, 680℃回火
R-26 (Ni-Cr-Co 合金)	1025℃±13℃1h 油冷, 815℃±8℃20h 冷到 730℃±8℃20h 后空冷
GH4145	1100℃~1140℃油冷, 845℃±10℃24h 冷到 707℃±10℃20h 后空冷

B.2 几种常用螺栓钢的应力松弛曲线见图 B.1。

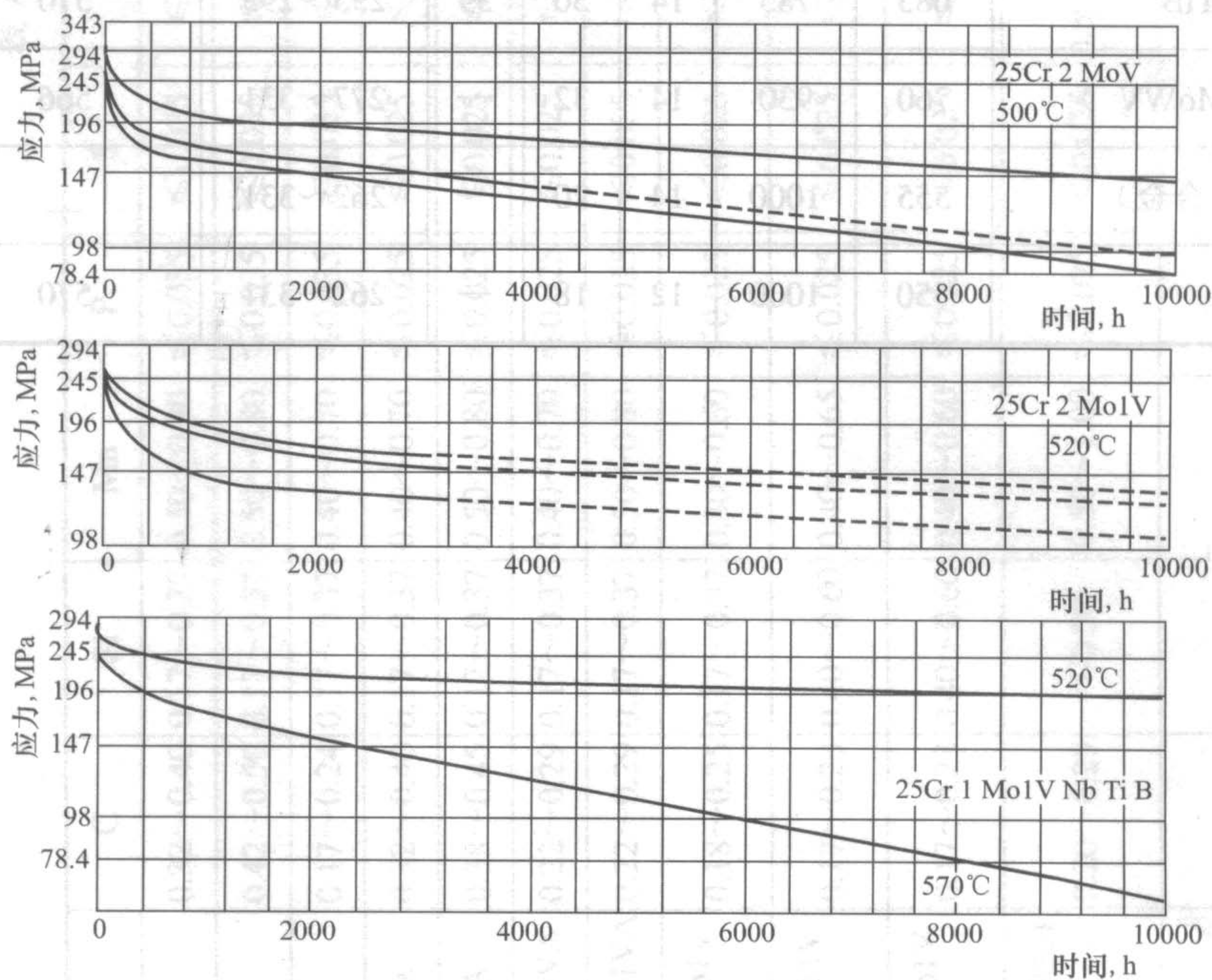


图 B.1 几种常用螺栓钢的应力松弛曲线

附录 C

(资料性附录)

20Cr1Mo1VNbTiB 高温螺栓钢的晶粒级别、力学性能和验收准则

C.1 适用范围

C.1.1 20Cr1Mo1VNbTiB 贝氏体耐热钢具有优良的综合性能,用于工作温度小 570℃ 的火力发电厂的高温螺栓。该钢对热处理比较敏感,如热加工控制不当,螺栓材料易出现肉眼可见的晶粒(粗晶)。

C.1.2 本准则适用于经过调质处理的 20Cr1Mo1VNbTiB 钢新螺栓,对已运行螺栓可参照本准则。

C.1.3 执行本准则时,有关低倍组织、晶粒尺寸的测量和硬度试验的方法及技术要求,应遵照 GB 226、GB 6394、GB 231 和 GB/T 17394。

C.2 名词及定义

C.2.1 实际晶粒度:在交货状态及经不同热处理后,螺栓钢所得到的实际晶粒大小。紧固件材料的力学性能与实际晶粒度有关。

C.2.2 宏观粗晶:晶粒平均直径大于 0.5mm。

C.2.3 微观粗晶:钢材的实际晶粒度为 2 级~0 级。

C.2.4 微观中等粗晶:钢材的实际晶粒度为 5 级~3 级。

C.2.5 微观细晶:钢材的实际晶粒度等于或大于 6 级。

C.2.6 套晶:钢材的低倍组织为宏观粗晶,而实际晶粒大小为微观细晶。即在一个宏观粗晶里包含许多细小的晶粒。

C.2.7 混晶:在钢材的截面上,一些区域为微观细晶,另一些区域为宏观粗晶(或套晶)。

C.3 试验项目及方法

C.3.1 宏观组织检验

C.3.1.1 项目

显示钢材的宏观晶粒形态和尺寸,评定钢材的晶粒形态和尺寸的等级。

C.3.1.2 试验方法

C.3.1.2.1 被检面为螺栓的两端面之一,检查面积为 100%。

C.3.1.2.2 被检面的粗糙度应根据检验要求而定。如仅进行肉眼观察,则用砂纸磨至 280 号砂纸即可;如需进行近拍,则应用不同粒度的粗细砂纸逐级磨到 500 号砂纸或 02 号金相砂纸。

C.3.1.2.3 被检面研磨深度要求有效地去除机加工形变层。

C.3.1.2.4 低倍组织的浸蚀剂为 15% 硝酸酒精溶液或 15% 的过硫酸铵水溶液,用擦蚀法。待组织显示清晰后用水清洗,然后用酒精浸润被检面,最后用干净棉花擦干或热风吹干。

C.3.1.2.5 低倍组织样品制备好后,要及时进行检验、评定和拍照,检查工具为肉眼或低于 20 倍的放大镜。

C.3.1.2.6 如果低倍组织为混晶,当宏观粗晶(或套晶)的面积大于 5% 时,则整个被检面按宏观粗晶(或套晶)评定。当宏观粗晶(或套晶)的面积等于或小于 5% 时,如果宏观粗晶(或套晶)处于被检面的边缘,则整个被检面按宏观粗晶(或套晶)评定;如果宏观粗晶(或套晶)处于被检面的中间,则不按宏观粗晶(或套晶)对待。

C.3.1.2.7 评定完毕,用稀的碱性溶液冲洗被酸沾污的螺栓表面和螺纹。如果低倍组织检验后仍需进行微观组织检验,该工序在微观组织评定后进行。

C.3.2 微观组织检验

C.3.2.1 项目

检验钢材的显微组织形态和测定实际晶粒度，判断螺栓材料的晶粒形态和尺寸级别。

C.3.2.2 试验方法

C.3.2.2.1 在已进行低倍组织检验的螺栓端面上，选取有代表性的部位做微观组织检验。如果低倍组织为混晶状态，则应在细晶区和宏观粗晶区分别做微观组织检验。

C.3.2.2.2 被检面磨至 600 号砂纸或 03 号金相砂纸，然后进行抛光（机械、电解、化学方法均可）。

C.3.2.2.3 浸蚀剂采用 4% 硝酸酒精溶液，或 2% 硝酸酒精溶液 + 2% 苦味酸酒精溶液。浸蚀后，用酒精清洗和吹干。

C.3.2.2.4 微观组织检验可采用大型工件金相检查仪或金相显微镜，放大倍数为 $100\times$ 。如需进一步观察组织细节，则可放大至 $400\times$ 。

C.3.3 硬度试验

C.3.3.1 项目

检测螺栓材料的硬度，控制硬度值在一定的范围，保证螺栓安全使用。

C.3.3.2 试验方法

在将要进行低倍组织检验的螺栓端面上，做硬度试验。建议在磨制面上进行硬度试验。

C.4 晶粒形态和大小的分级

C.4.1 分级的原则。根据钢材的宏观及微观组织形态和晶粒平均直径大小进行分级。

C.4.2 在 20 倍以下进行低倍组织检查，在 100 倍下进行微观组织检查，然后对照级别图（见图 C.1～图 C.7），按比较法确定钢材的晶粒形态和大小的分级。

C.4.3 分级。把晶粒形态和大小分为七级。1 级～5 级为非套晶结构；6、7 级为套晶结构。各级的晶粒形态特征、晶粒平均直径和组织特征列于表 C.1 中。

C.4.4 在 2、3、4 级中，微观组织会出现晶粒直径相差悬殊的现象，如果细晶的面积不超过 40%，则按粗晶级别评定。

C.5 晶粒级别、硬度和冲击韧性的关系

C.5.1 晶粒大小影响材料的冲击韧性。当硬度大于 260HBW 时，晶粒越粗大，冲击功越低。在相同晶粒级别下，冲击功与硬度值有关，硬度越高，冲击韧性越低。因此，当确定钢材的晶粒级别和硬度值后，即可估算其冲击功。

C.5.2 硬度和冲击功的关系式为

$$A_k = (a + b \times \text{HBW}) \times 9.8 / 0.8 \quad (\text{C.1})$$

式中：

A_k —— U 型缺口冲击功，J；

a, b —— 材料系数，与晶粒级别有关；

HBW —— 布氏硬度值。

各晶粒级别的硬度和冲击功表达式如下：

1 级 $A_k = (30.0 - 0.0867 \text{ HBW}) \times 9.8 / 0.8$

2 级 $A_k = (41.2 - 0.1127 \text{ HBW}) \times 9.8 / 0.8$

3 级 $A_k = (40.0 - 0.1055 \text{ HBW}) \times 9.8 / 0.8$

4 级 $A_k = (33.5 - 0.0812 \text{ HBW}) \times 9.8 / 0.8$

5 级 $A_k = (31.9 - 0.0722 \text{ HBW}) \times 9.8 / 0.8$

6 级 $A_k = (42.9 - 0.1041 \text{ HBW}) \times 9.8 / 0.8$

7 级 $A_k = (35.0 - 0.0846 \text{ HBW}) \times 9.8 / 0.8$

各级别表达式的适用范围为 180HBW~340HBW。

表达式中 HBW 和 A_k 均指三个以上试验数据的平均值。

C.6 晶粒级别、持久强度和持久塑性的关系

C.6.1 随着晶粒尺寸的增大，材料的持久强度有所升高，但晶粒级别对持久强度的影响程度不大，用持久强度分散带的下限来进行螺栓强度计算是安全的。

C.6.2 套晶材料的持久强度低于粗晶或细晶材料的持久强度。

C.6.3 钢材的持久塑性与实际晶粒度有关，细晶材料具有较高的持久塑性；粗晶材料的持久塑性较低。

表 C.1 晶粒分级和各级的特征

级别	晶粒形态		晶粒平均直径 mm	组织特征
1 级	非套晶结构	宏观晶粒粗大	≥ 2	2×：不同位向的晶粒之间有较强的反差。 15×：粗大的框架状贝氏体结构。 100×：晶内排状贝氏体交叉分布，呈发达的框架状结构
2 级		宏观粗晶	1.5~0.5	2×：不同位向的晶粒之间有较强的反差。 15×：多数晶粒具有框架状贝氏体结构。 100×：框架状贝氏体结构，束状铁素体变短
3 级		微观粗晶	0.353~0.177	2×：可隐约辨别晶粒。 15：在部分较大晶粒上可见到细小的框架状结构。 100×：大部分晶粒为排状贝氏体，少部分晶粒为框架结构
4 级		微观中等粗晶	0.125~0.062	2×：不能分辨晶粒，被检面呈银灰色粗瓷状。 15×：晶粒隐约可辨，看不到框架状结构。 100×：以排状贝氏体为主，框架状结构很少
5 级		微观细晶	≤ 0.044	2×：不能分辨晶粒，被检面呈银灰色细瓷状。 15×：晶粒细，不能分辨晶内组织。 100×：细晶状贝氏体
6 级	套晶结构	宏观粗晶 微观细晶	宏观 1.5~0.5 微观不大于 0.062	2×：宏观粗晶的形态，但晶粒之间的反差小。 15×：晶粒细，不能分辨晶内组织。 100×：细晶状贝氏体
7 级		宏观晶粒粗大 微观细晶	宏观不小于 2 微观不大于 0.062	2×：宏观晶粒粗大的形态，但晶粒之间的反差小。 15×：晶粒细，不能分辨晶内组织。 100×：细晶状贝氏体

C.7 验收准则

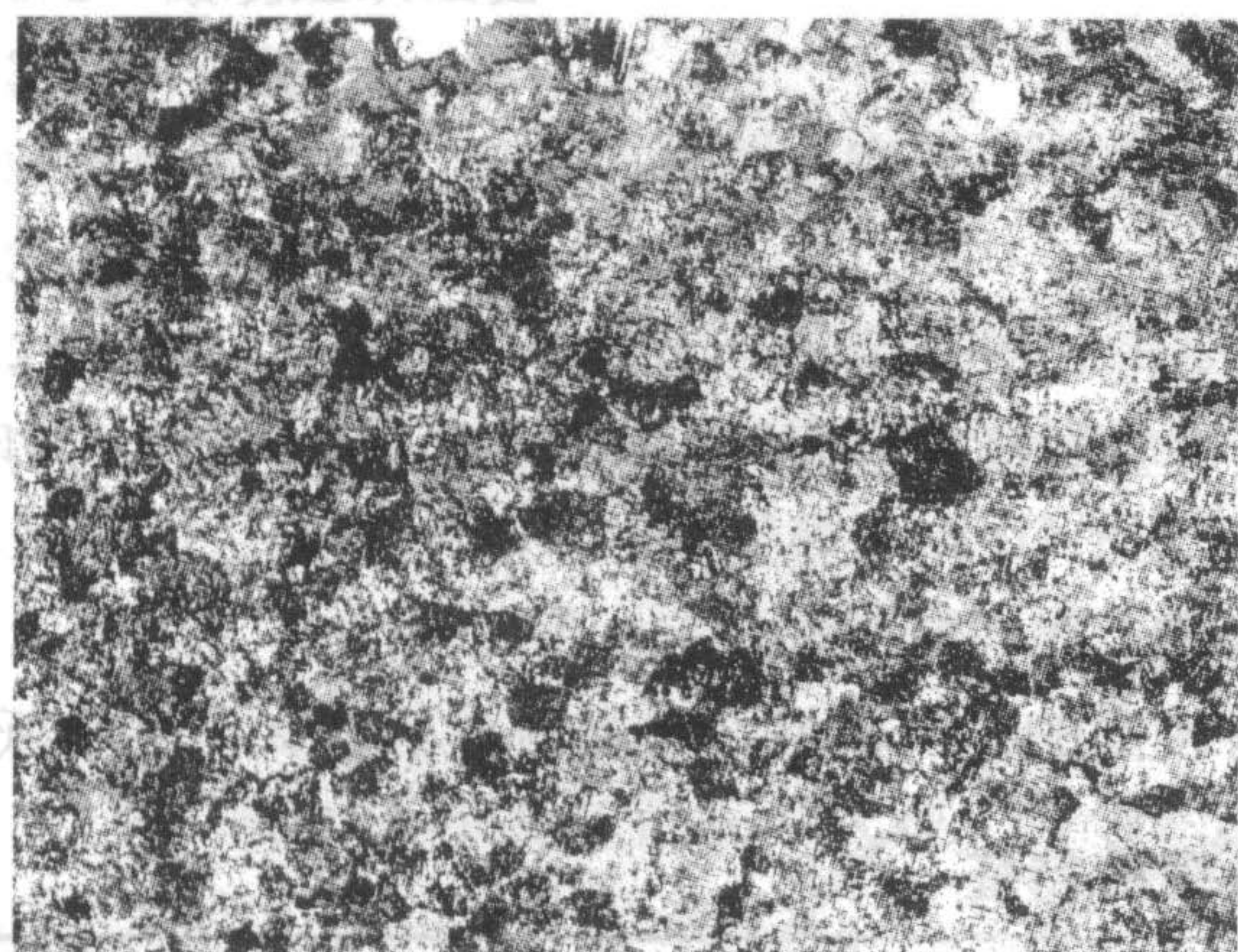
C.7.1 原设计螺栓材料为 20Cr1Mo1VNbTiB 钢和引进大机组采用该钢种螺栓时，晶粒级别应为 5 级。

C.7.2 原设计为 510、540℃温度等级，容量在 200MW 以下的机组，如改用该钢种，对采用不同结构的螺栓允许使用的级别如下。

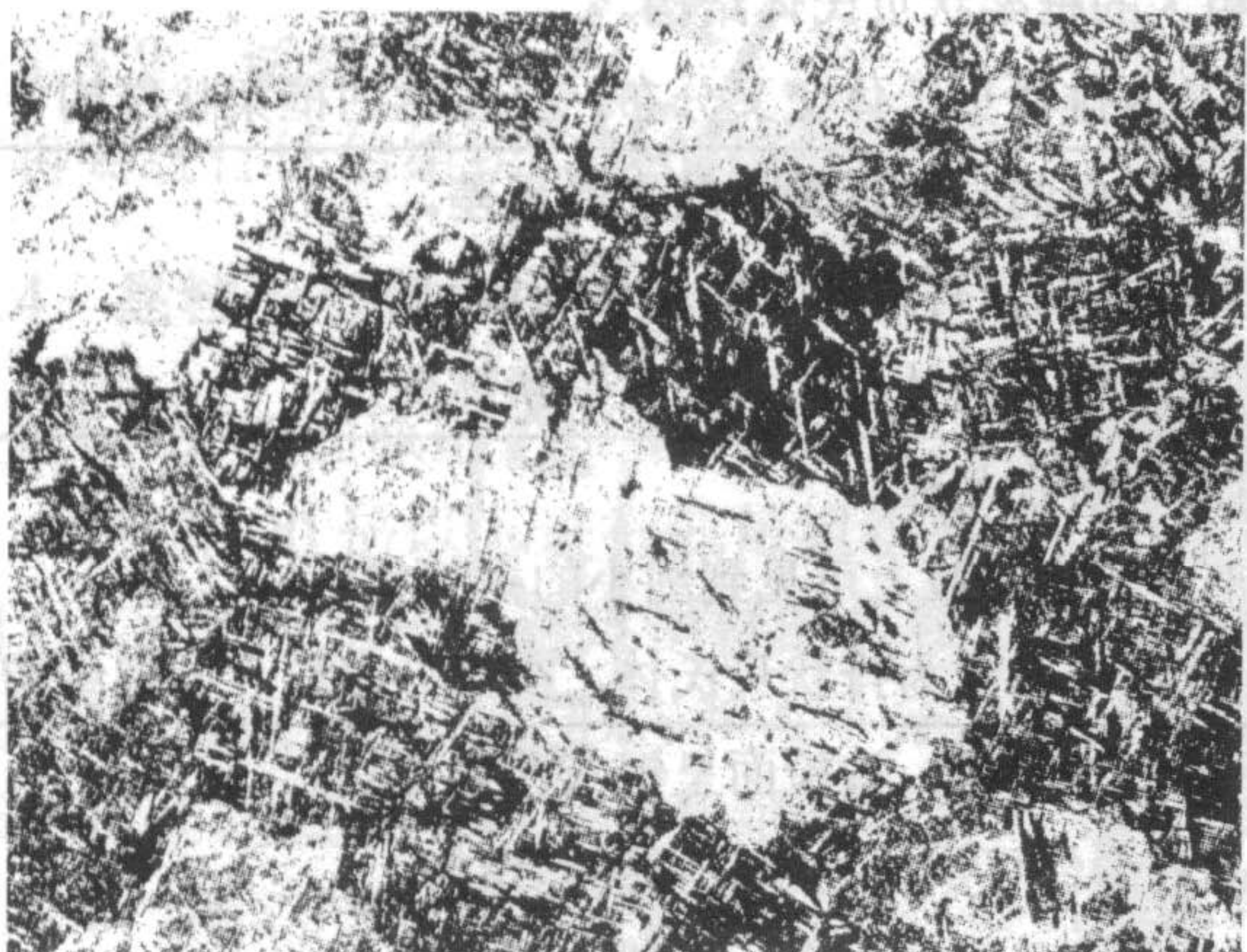
a) 柔性（细腰）螺栓，5、4、3、6、7 级；

b) 刚性（直筒）螺栓，5、4 级。

C.7.3 晶粒级别为 1、2 级的螺栓应报废。



(a)



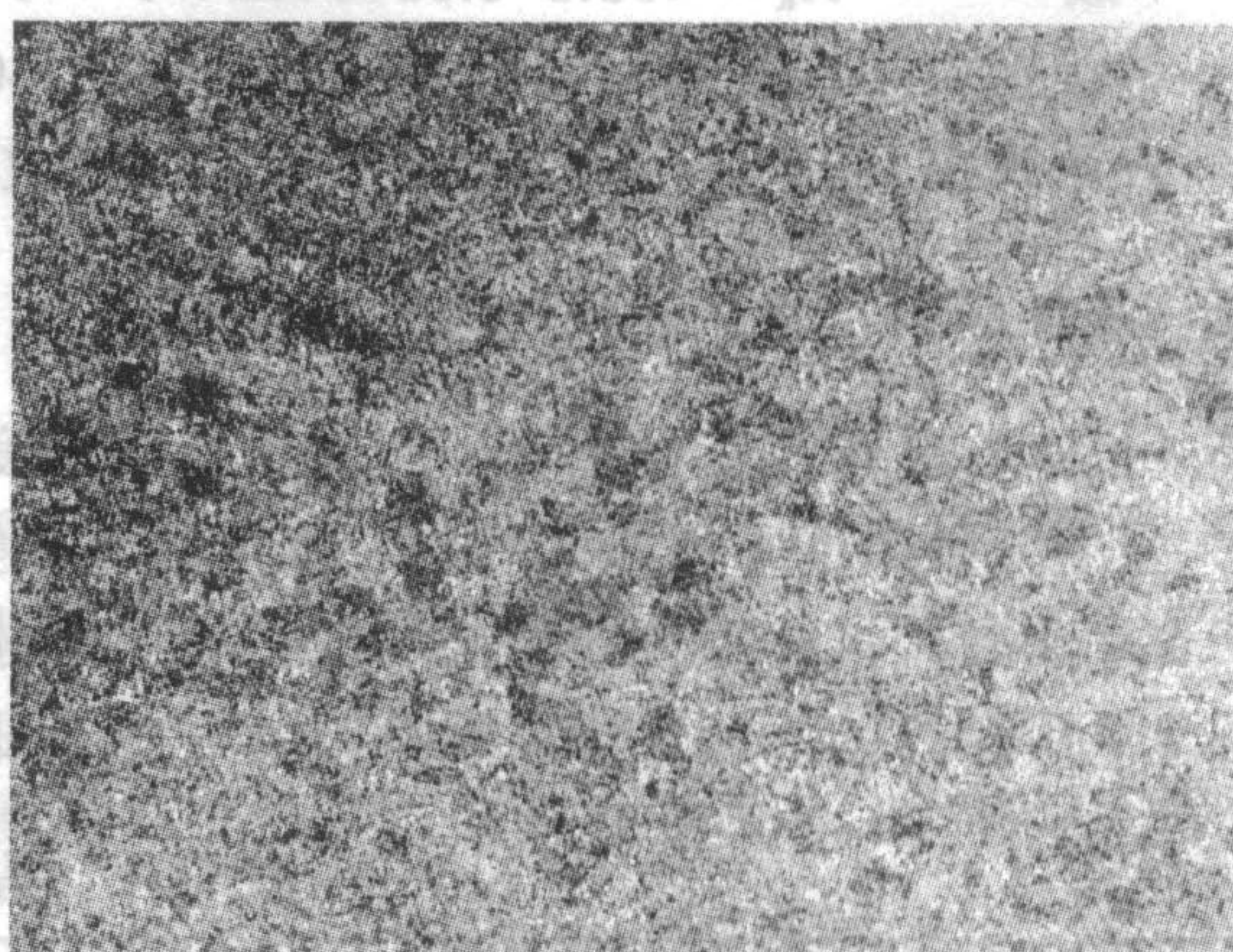
(b)



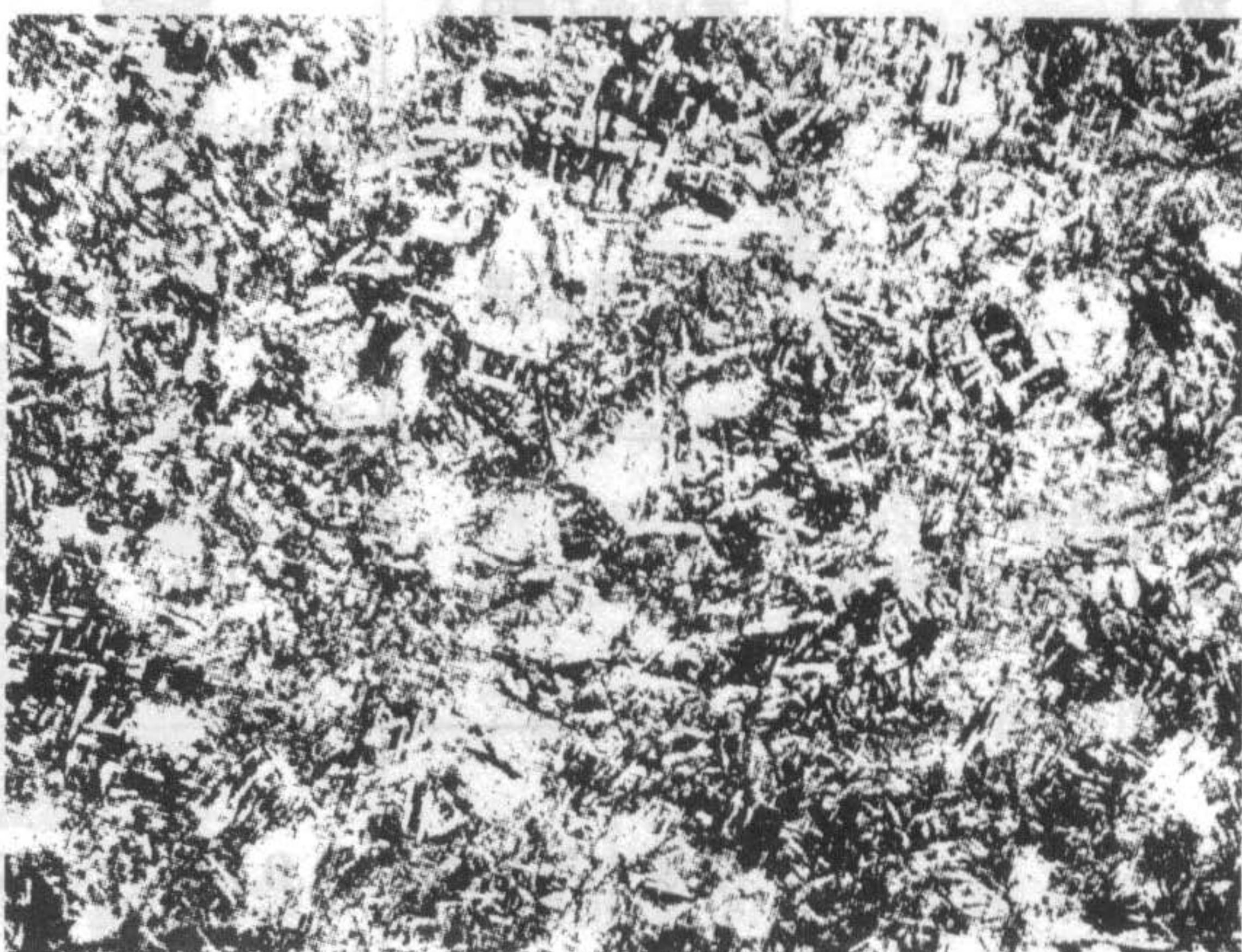
(c)

(a) 2×; (b) 15×; (c) 100×

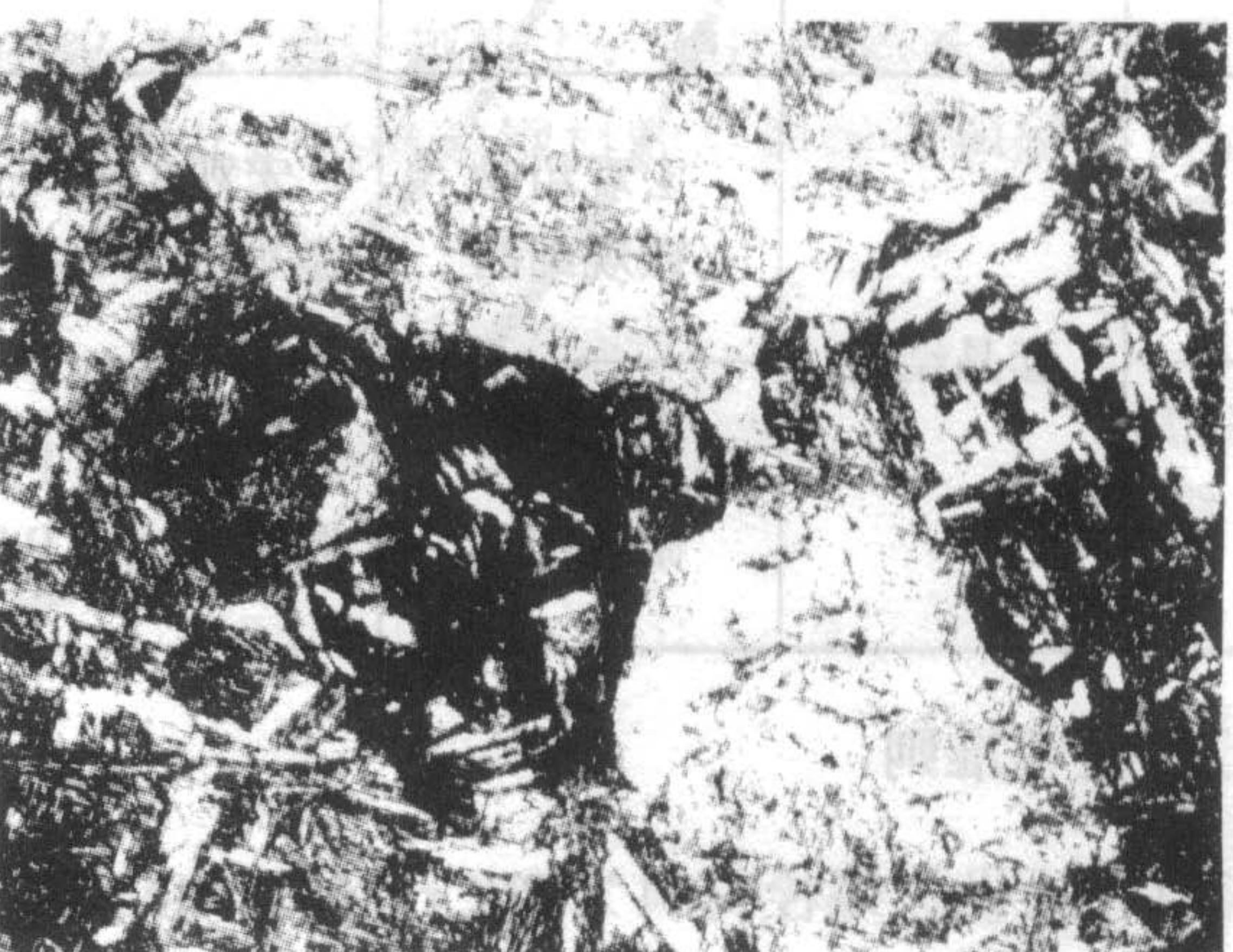
图 C.1 1 级



(a)



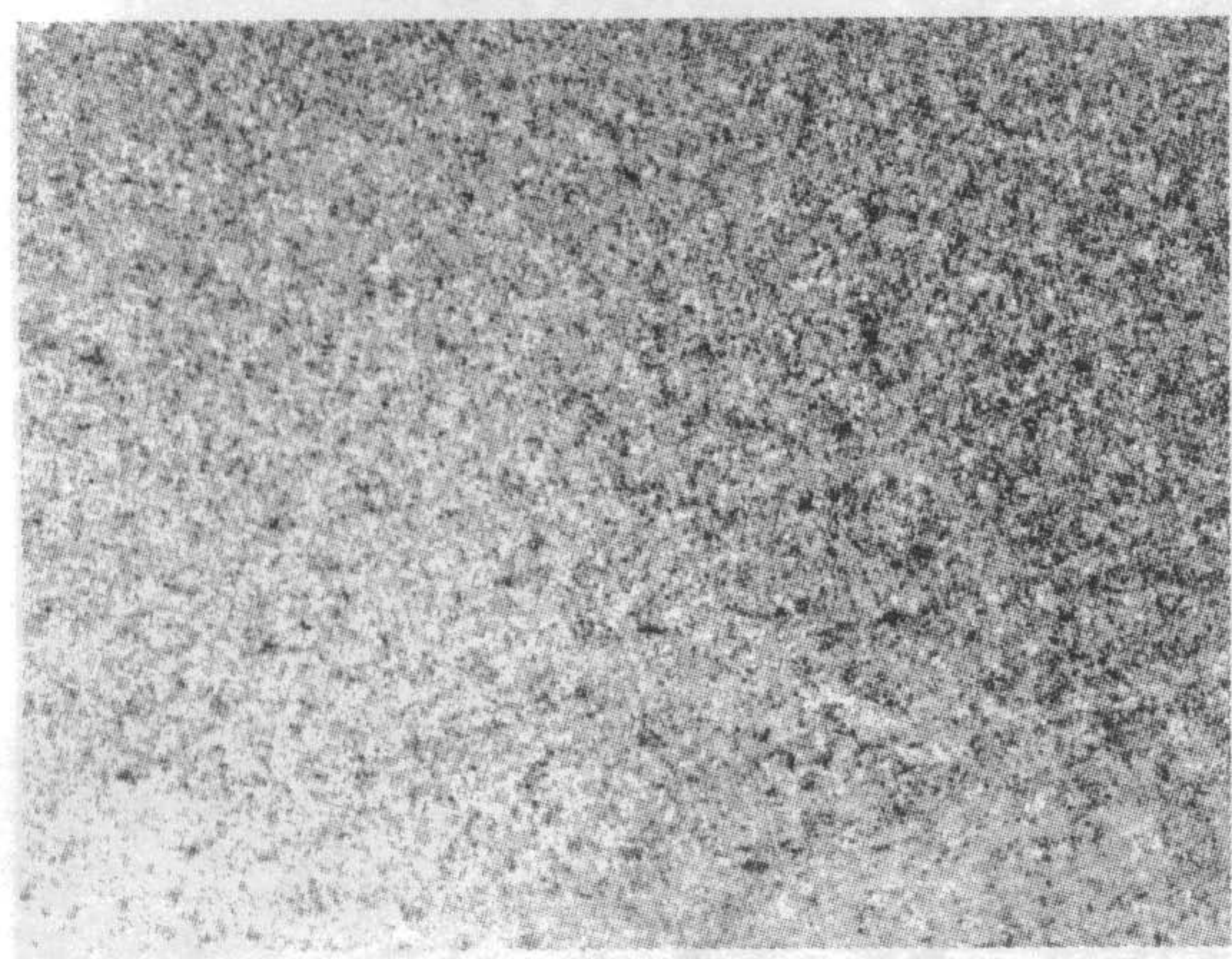
(b)



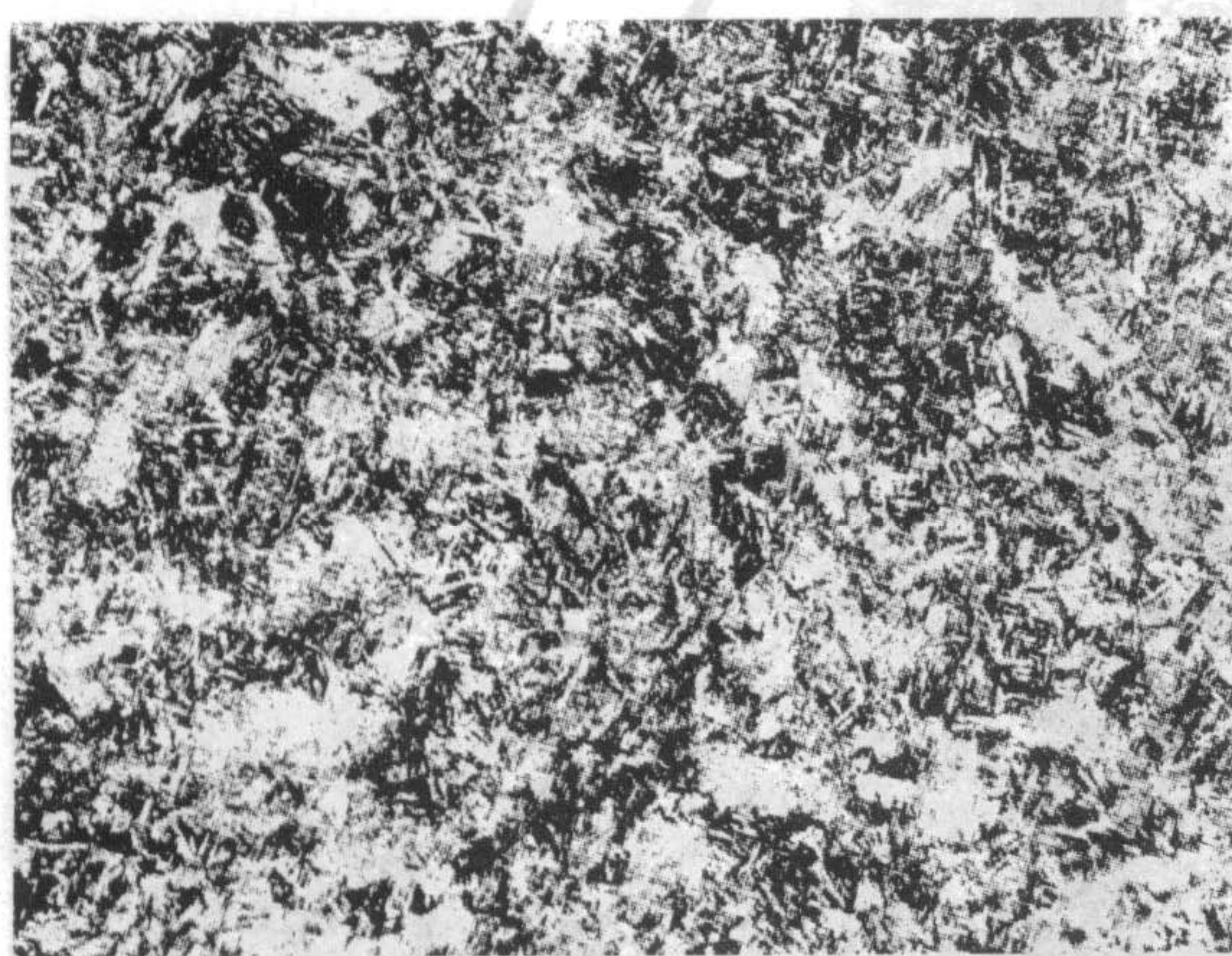
(c)

(a) 2×; (b) 15×; (c) 100×

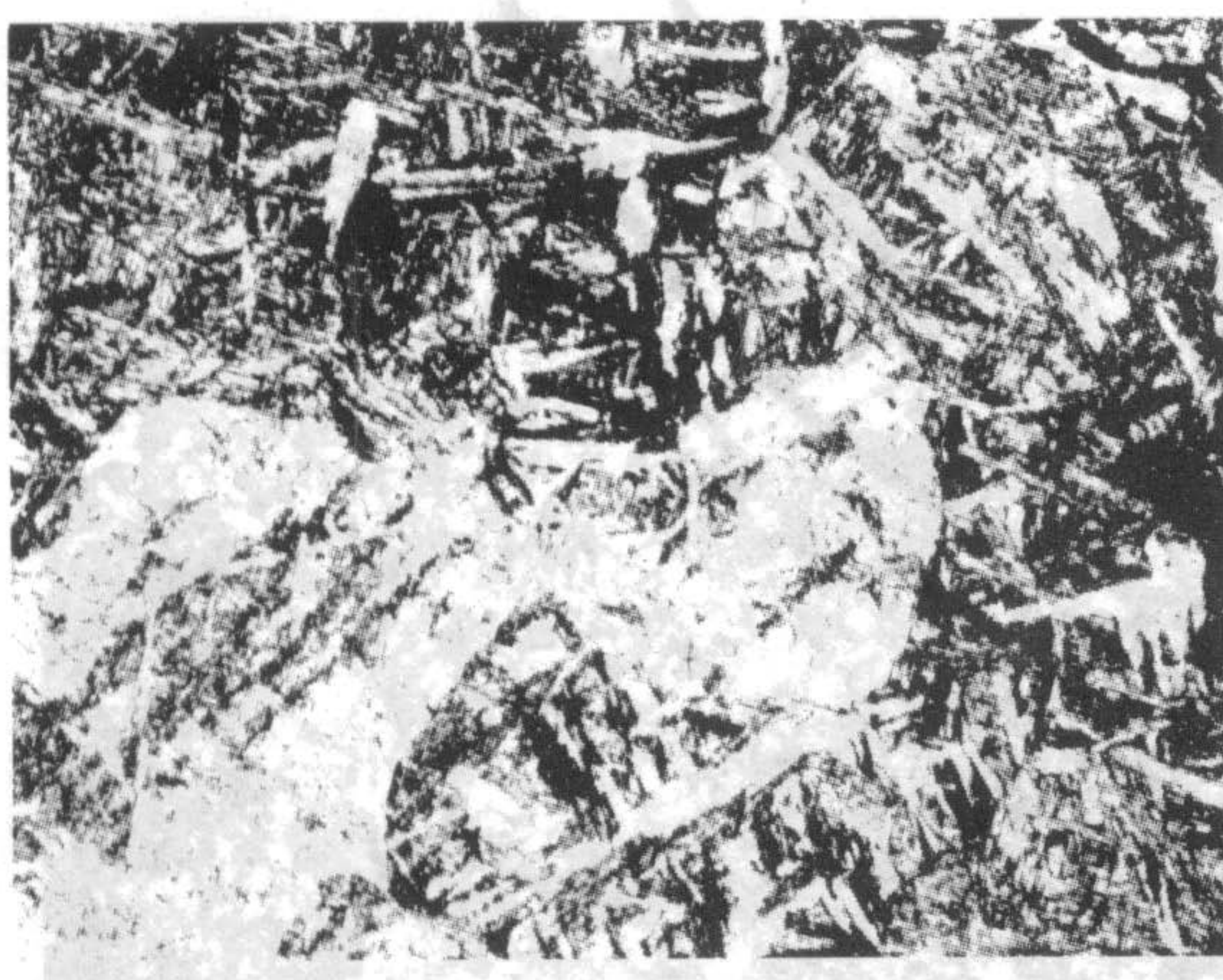
图 C.2 2 级



(a)



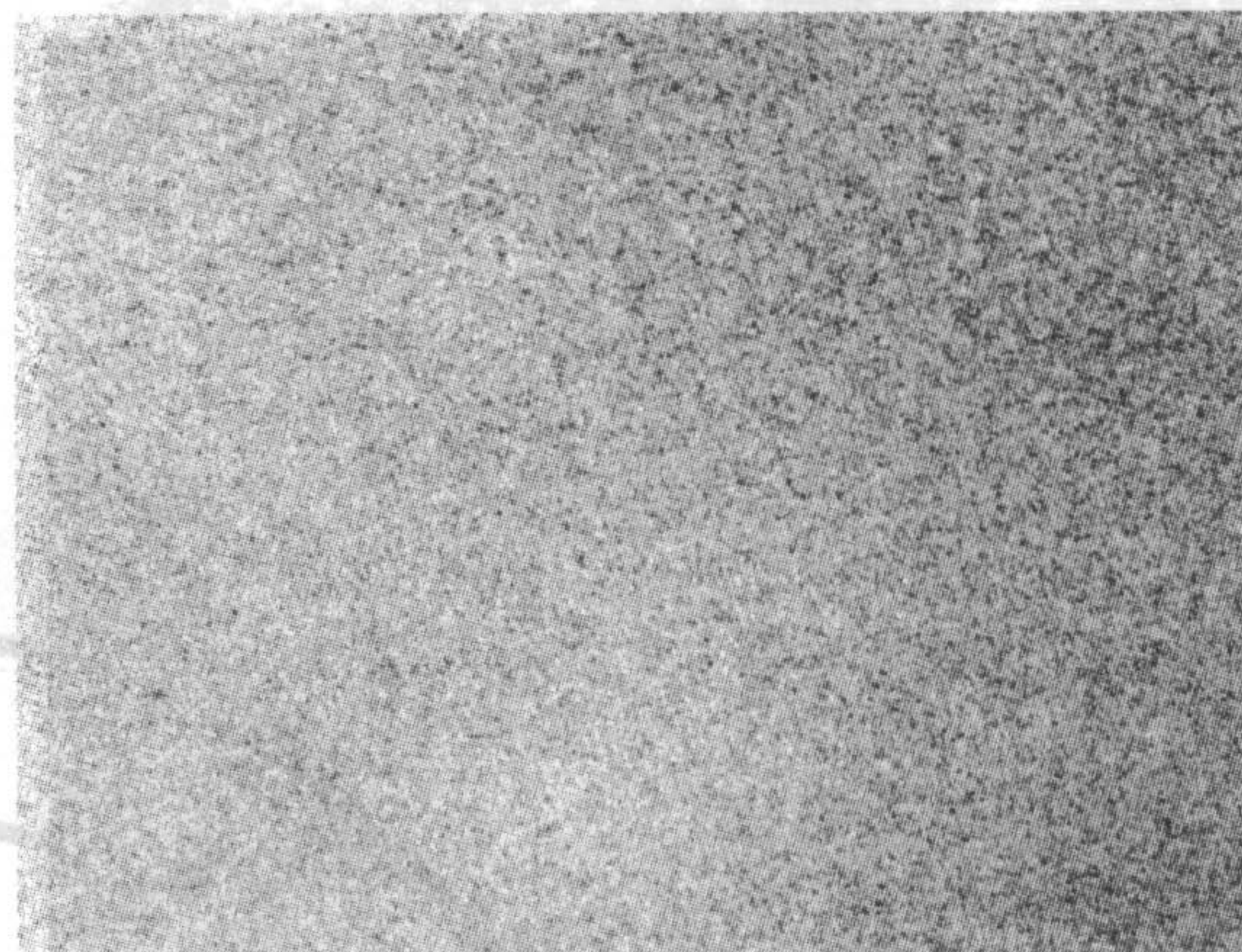
(b)



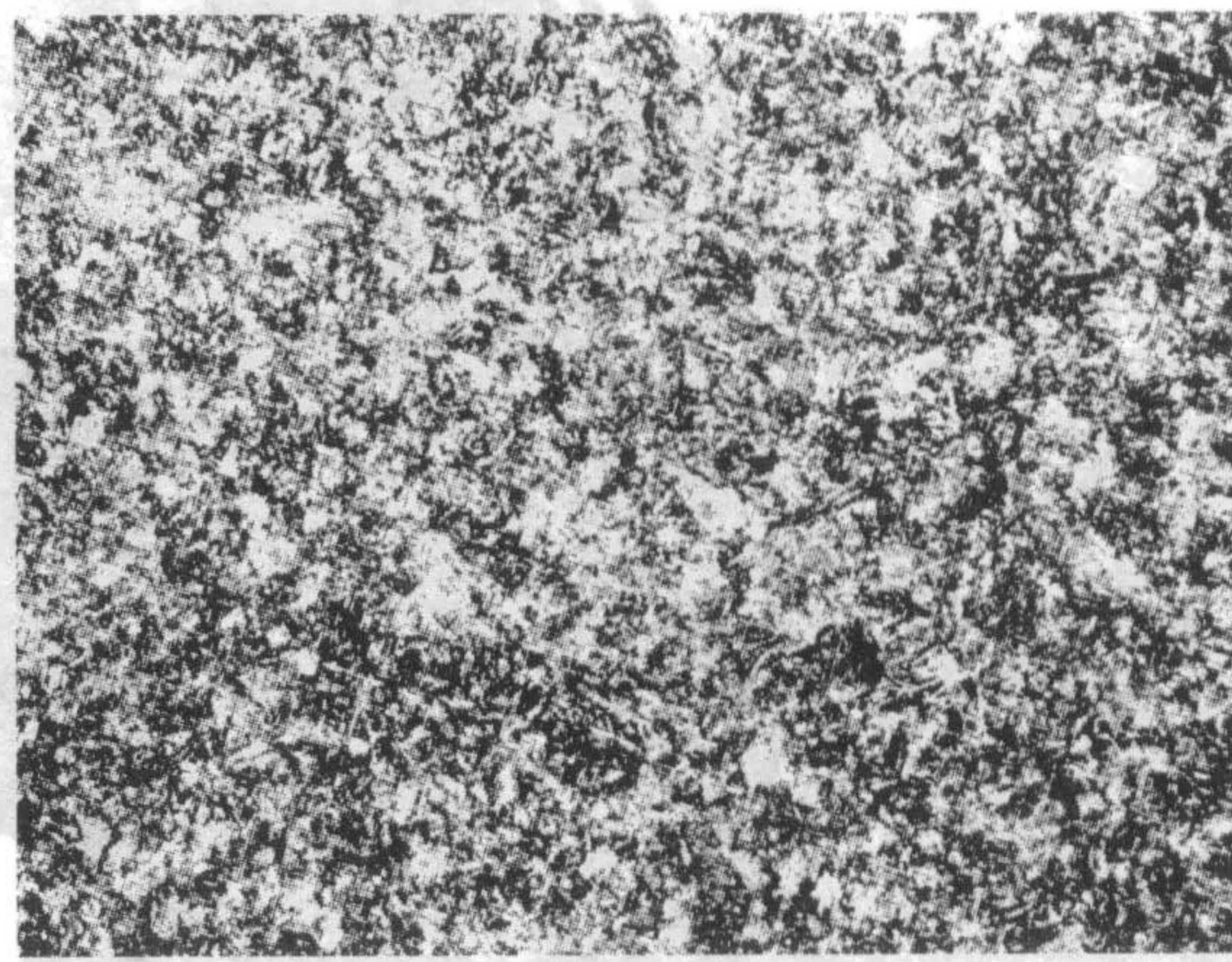
(c)

(a) 2×; (b) 15×; (c) 100×

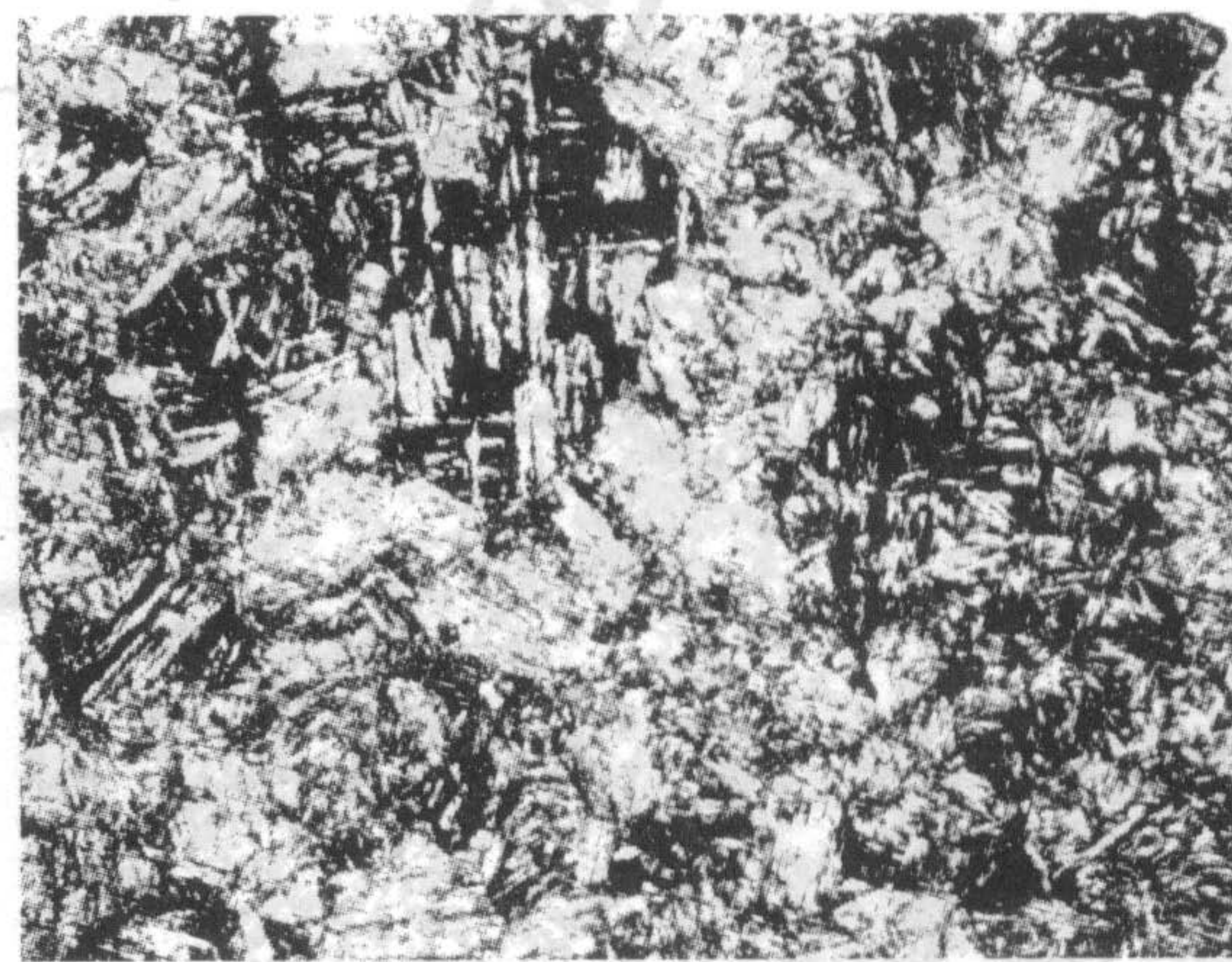
图 C.3 3 级



(a)



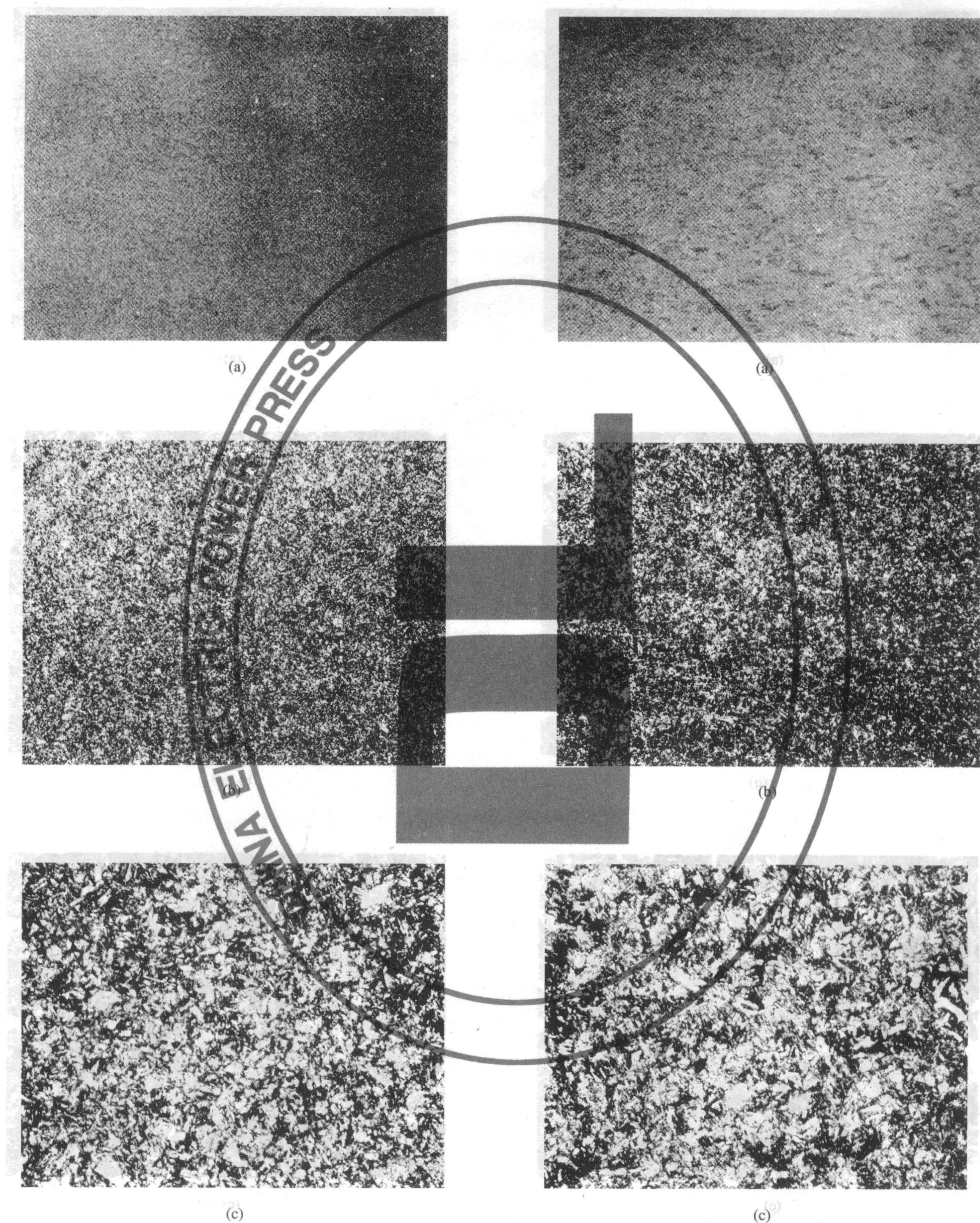
(b)



(c)

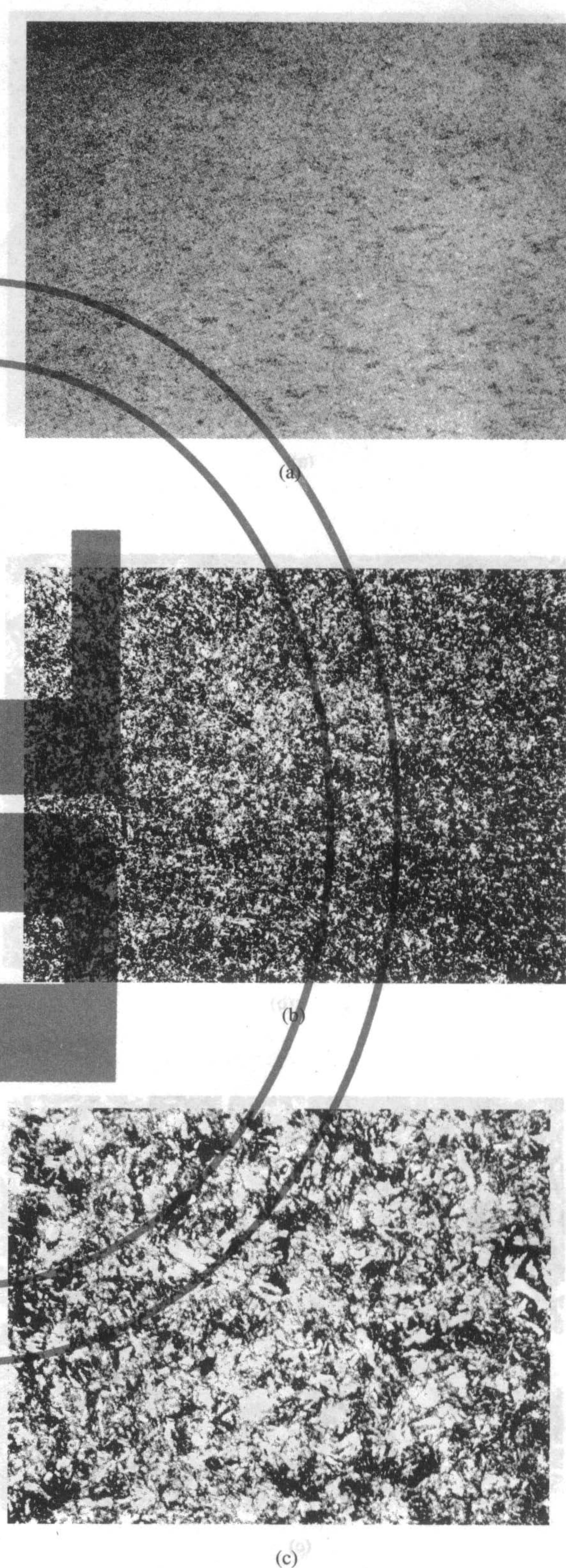
(a) 2×; (b) 15×; (c) 100×

图 C.4 4 级



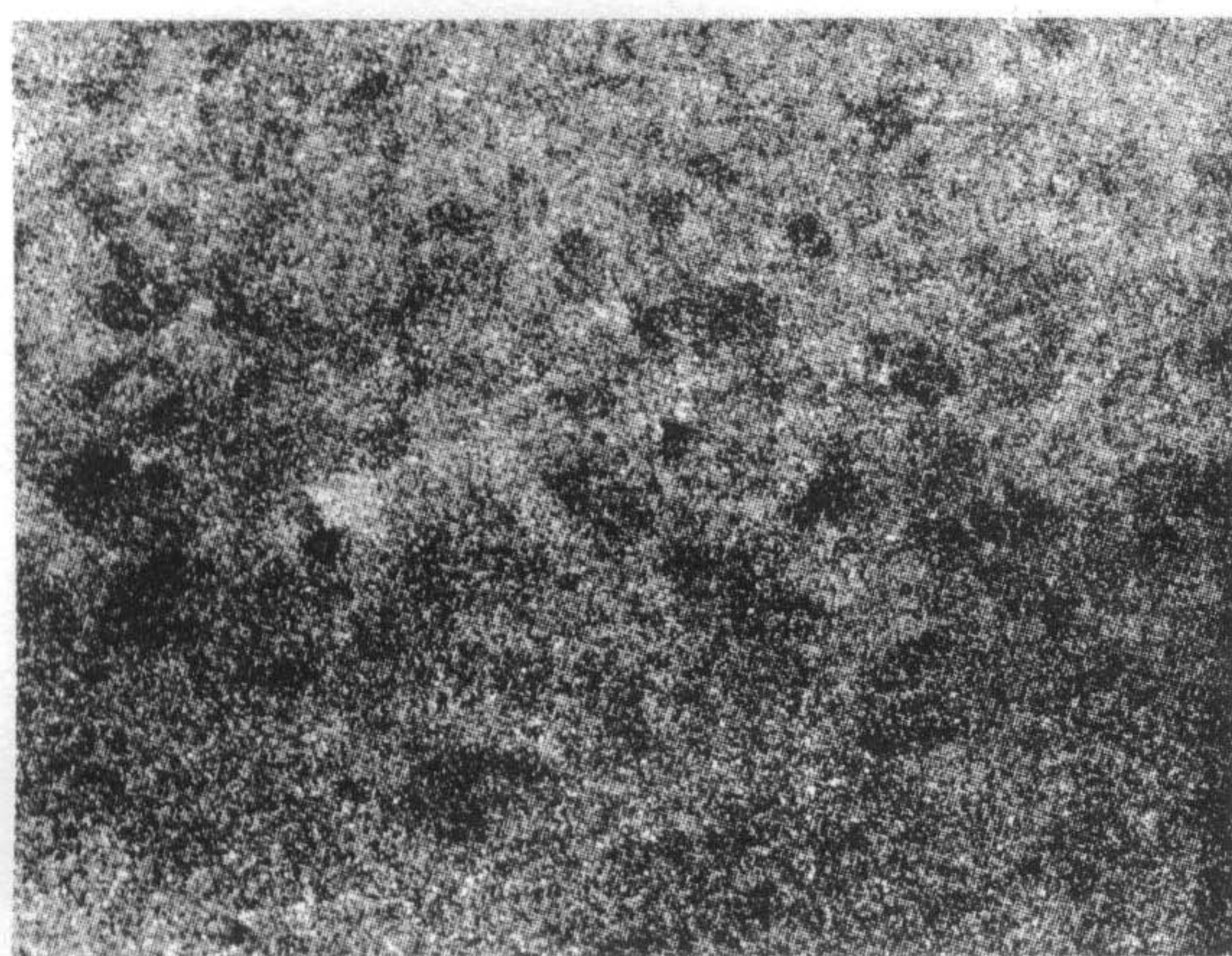
(a) 2×; (b) 15×; (c) 100×

图 C.5 5 级

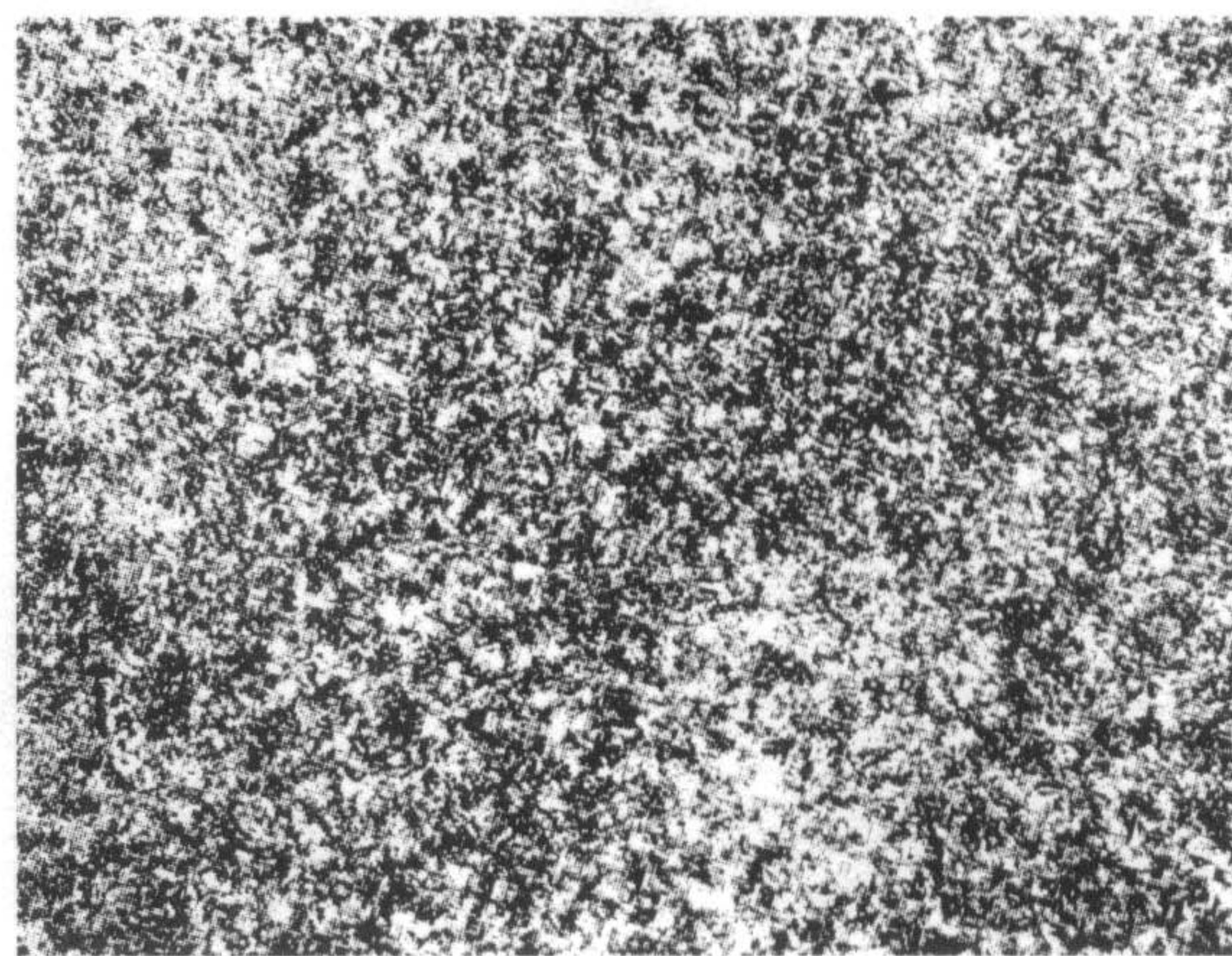


(a) 2×; (b) 15×; (c) 100×

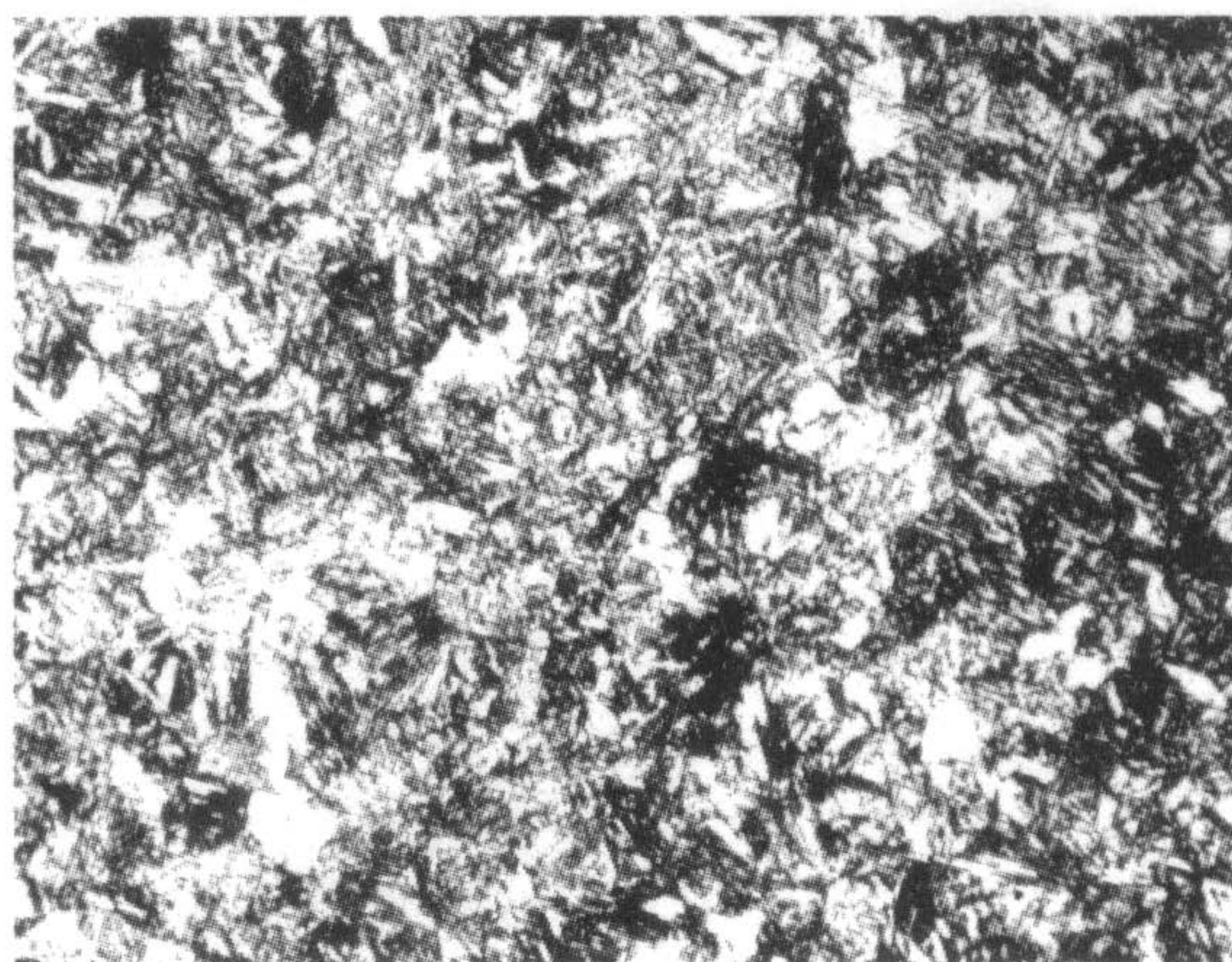
图 C.6 6 级



(a)



(b)



(c)

(a) 2×; (b) 15×; (c) 100×

图 C.7 7 级

中 华 人 民 共 和 国
电 力 行 业 标 准
火力发电厂高温紧固件技术导则
DL/T 439 — 2006

*

中国电力出版社出版、发行
(北京三里河路6号 100044 <http://www.cepp.com.cn>)
航远印刷有限公司印刷

*

2006年9月第一版 2006年9月北京第一次印刷
880毫米×1230毫米 16开本 1.25印张 35千字
印数 0001—3000册

*

统一书号 155083 · 1475 定价 6.00元

版 权 专 有 翻 印 必 究

(本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换)



155083.1475

销售分类建议: 规程规范