



中华人民共和国国家标准

GB/T XXXXX-202X

变形铝合金铸锭显微疏松测定方法

Determination of microporosity of aluminum and aluminum alloy ingot

(送审稿)

在提交反馈意见时，请将您知道的相关专利连同支持性文件一并附上

××××-××-××发布

××××-××-××实施

国家市场监督管理总局 发布
国家标准化管理委员会

前 言

本文件按照 GB/T 1.1-2020《标准化工作导则 第1部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。

请注意本文件的某些内容可能涉及专利。本文件的发布机构不承担识别专利的责任。

本文件采信中国有色金属工业协会发布的T/CNIA 0179-2023《变形铝合金铸锭显微疏松测定方法》。

本文件由中国有色金属工业协会提出。

本文件由全国有色金属标准化技术委员会（SAC/TC 243）归口。

本文件起草单位：

本文件主要起草人：

引 言

变形铝合金产品质量 80%取决于铸锭的质量，而现有标准主要对航空用铝合金的化学成分、氢含量、渣含量、组织均匀性等进行评价，对显微疏松的控制和评价要求还沿用国家标准 GB/T 3246.2。但观察铸锭内部，尚存在一定量由于枝晶间金属补缩不足或氢含量控制过高而形成的显微疏松，其尺寸范围通常在几微米到几百微米之间。这类存在于枝晶组织间的显微疏松会破坏金属微观结构的连续性，并能部分或全部遗传给加工制品，并作为疲劳裂纹萌生源，对加工制品的疲劳性能、断裂韧性等产生不利影响。显微疏松尺寸越大，其加工制品的疲劳强度越低。

为了严格控制铸锭显微疏松对高端铝合金产品，尤其是航空产品、轨道交通产品和压力容器产品质量的影响，本标准给出了采用金相法与工业 CT 法进行变形铝合金铸锭显微疏松测定和评级的方法，两种方法相互支撑、优势互补。金相法采用全截面观察方法进行显微疏松面积统计，优于其他标准采用的选取特定视场的统计方法及评级方法，设备普及、操作便捷，适用于生产过程的日常监控与快速筛查。工业 CT 法突破了二维截面信息片面、代表性不足的局限，首次实现显微疏松形貌、尺寸、分布的三维还原与三维定量分析，尤其适用于高端产品认证、工艺优化等场景。工业 CT 法填补了铝合金铸锭显微疏松三维无损检测方法标准的空白。两种方法共同构成“二维快速筛查+三维精准定级”的完整评价体系，显著提升了显微疏松检测的科学性与可靠性。

本标准的制定，为国内企业生产的高端铝合金铸锭产品提供显微疏松评价与分级参考，并通过标准的引领作用，提升我国变形铝合金铸锭产品质量，从铸锭源头控制并提高航空航天、轨道交通、压力容器等产品的综合性能，带动高端制造业对变形铝合金产品的良好应用。有利于大幅提高我国高端铝合金产品的质量，增强我国航空用高强韧铝合金铸锭的国际竞争力，同时提高轨道交通、民用铝材铸锭产品质量，减少废品率，推动我国高端制造业的发展，为铝加工行业绿色低碳发展做出贡献。

变形铝合金铸锭显微疏松测定方法

1 范围

本文件给出了采用金相法和工业计算机层析成像仪法（以下简称“工业CT法”）测定变形铝合金铸锭显微疏松的方法。

本文件金相法适用于2XXX系、3XXX系、4XXX系、5XXX系、6XXX系、7XXX系铝合金铸锭显微疏松的测定和评级，工业CT法适用于2XXX系、7XXX系铝合金铸锭显微疏松的测定和评级。其他系铝合金的显微疏松评定也可参照本方法。2XXX系、7XXX系铝合金铸锭显微疏松的仲裁测定和评级采用金相法。

2 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。其中，注日期的引用文件，仅该日期对应的版本适用于本文件；不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

GB/T 3246.1 变形铝及铝合金制品组织检验方法 第1部分：显微组织检验方法

GB/T 6682 分析实验室用水规格和试验方法

GB/T 8170 数值修约规则与极限数值的表示和判定

GB/T 12604.12 无损检测 术语 第12部分：工业射线计算机层析成像检测

GB/T 29069 无损检测 工业计算机层析成像（工业CT）系统性能测试方法

3 术语和定义

GB/T 3246.1和GB/T 12604.12界定的术语和定义适用于本文件。

4 金相法

4.1 方法概述

利用金相显微镜对试样显微组织进行观察，找出异常区域，与基体及第二相比对，通过景深、形貌或颜色判定是否为显微疏松。利用图像处理软件定量分析计算显微疏松面积，依据显微疏松面积与检验面总面积的比值进行显微疏松等级判定。

4.2 材料

4.2.1 砂纸：材质为碳化硅，粒径为 68 μm ~100 μm 。

4.2.2 砂纸：材质为碳化硅，粒径为 18 μm ~35 μm 。

4.2.3 砂纸：材质为碳化硅，粒径为 6.5 μm ~10 μm 。

4.2.4 抛光剂：二氧化硅悬浮液，粒径为 0.02 μm 。

4.2.5 抛光剂：金刚石悬浮液，粒径为 3 μm 。

GB/T XXXXX-202×

4.2.6 抛光剂：金刚石悬浮液，粒径为 9 μm 。

4.2.7 研磨膏：金刚石，粒径为 2.5 μm 。

4.3 仪器设备

4.3.1 金相（光学）显微镜

4.3.2 放大倍数宜为 50 倍~500 倍。

4.3.3 应具备明场和暗场两种照明方式。

4.3.4 应配备有图像采集系统，并定期对图像分析软件的系统标尺进行校验。

4.3.5 其他应符合 GB/T 3246.1 的规定。

4.3.6 金相抛光机

应符合 GB/T 3246.1 的规定。

4.4 试样

4.4.1 取样

4.4.1.1 按 GB/T 3246.1 的规定切取试样。应避免取样对组织造成的影响（如变形、过热等）。

4.4.1.2 对试样进行标识，标识至少应包含牌号、炉次号等内容。

4.4.2 制样

采用手动或自动工艺对试样进行研磨和抛光。手动制样工艺应符合表 1 的规定，自动制样工艺应符合表 2 的规定。

表 1 手动制样典型工艺

制样步骤	磨抛工艺	磨抛材料	磨抛介质	磨抛时间 min	磨盘转速 rpm
1	粗磨	砂纸 (5.1)	自来水 ^a	0.5	200
2		砂纸 (5.2)	自来水 ^a	1~2	150
3		砂纸 (5.3)	自来水 ^a	2~5	100
4	粗抛	呢子布	研磨膏 (5.7)	5~10	300
5	精抛	橡胶布	抛光剂 (5.4)	2~5	150

^a 当怀疑自来水会对试样造成腐蚀时，可采用符合 GB/T 6682 的三级水。

表 2 自动制样典型工艺

制样步骤	磨抛工艺	磨抛材料	磨抛介质	加载载荷 N	磨抛时间 min	磨盘转速 rpm
1	粗磨	砂纸 (5.1)	自来水 ^a	10	1~2	200
2	细磨	砂纸 (5.2)	自来水 ^a	10	2~5	200
3	粗抛	编织布	抛光剂 (5.6)	20	5	150
4	中抛	丝绒布	抛光剂 (5.5)	20	5	150
5	精抛	橡胶布	抛光剂 (5.4)	20	2~5	150

^a 当怀疑自来水会对试样造成腐蚀时，可采用符合 GB/T 6682 的三级水。

4.5 试验步骤

4.5.1 在金相（光学）显微镜下观察试样检验面，观察倍数宜为 100 倍，找出异常区域，与基体及第二相比对，通过景深、形貌、颜色判定是否为显微疏松（典型图示见附录 A）。对显微疏松进行拍照。对于不易辨识的区域，可调整放大倍数进行确认，典型示例见附录 B。

4.5.2 利用图像分析软件，对采集到的图像进行亮度、对比度调节，以增大显微疏松与基体的对比度，调节程度不宜过大。

4.5.3 采用测微尺对图像的实际放大比例进行标识。

4.5.4 采用图像分析软件对单张照片观察到的显微疏松总面积进行自动测量和统计，显微疏松总面积计算参见附录 C。

4.6 试验数据处理

显微疏松面积占比 A ，数值以百分数表示，按公式（1）计算：

$$A = \frac{\sum S_i}{S} \times 100\% \dots \dots \dots (1)$$

S_i ——单张照片观察到的显微疏松总面积，单位为平方微米（ μm^2 ）；

S ——检验面总面积，单位为平方微米（ μm^2 ）。

计算结果表示到小数点后三位。数值修约按 GB/T 8170 的规定进行。

4.7 显微疏松等级评定

根据显微疏松面积占比，按表 3 评定显微疏松等级。

表 3 显微疏松等级评定

等级	显微疏松面积占比 %			
	2XXX系	3XXX系、4XXX系、6XXX系	5XXX系	7XXX系
I 级	≤ 0.010	0	≤ 0.020	≤ 0.015
II 级	$> 0.010 \sim 0.020$	$> 0 \sim 0.010$	$> 0.020 \sim 0.100$	$> 0.015 \sim 0.050$
III 级	> 0.020	> 0.010	> 0.100	> 0.050

4.8 试验报告

试验报告至少应包括以下内容：

- 被检样品信息（样品名称、牌号、状态、炉次号、尺寸规格）；
- 本文件编号；
- 仪器设备型号[金相（光学）显微镜、金相抛光机]；
- 试验结果（显微疏松等级）；
- 试验人员；
- 试验日期。

5 工业 CT 法

5.1 方法概述

利用工业计算机层析成像仪对试样进行扫描，由于试样中显微疏松区域与基体的密度和原子序

数差异,从而造成试样中各个部位对 X-射线的吸收率不同的特点,使得在测试设备探测器上形成不同灰度的投影图,收集不同角度的投影图并重构得到试样的三维形貌(见附录 D)。利用图像分析软件提取显微疏松区域,并定量计算其三维尺寸数据,对显微疏松等级进行判定。

5.2 仪器设备

5.2.1 工业计算机层析成像仪,具有机械误差辅助校准功能,由以下部件组成:

- 射线源,使用微焦点 X 射线源,能量范围应覆盖试样的穿透需求(推荐电压 100kV~150kV),焦点尺寸不大于 10 μ m;
- 探测器,使用数字平板探测器,动态范围不小于 16bit,像素尺寸不大于 100 μ m,应具备坏像素校正功能和热噪声抑制功能;
- 载物台,直径不小于 50mm,能绕中心轴转动,转动定位精度不大于 0.1°,载重能力不小于 1kg;
- 夹具宜选用对 X 射线吸收较弱的材料。
- 计算机系统支持三维图像重建及孔隙分析算法,具备孔隙统计分析功能。

5.2.2 工业CT按GB/T 29069的规定定期检定,每年不少于1次。

5.2.3 在设备安装调试、维修或更换主要部件后,应对空间分辨率及密度分辨率等主要性能指标进行校准。

5.3 试样

5.3.1 按GB/T 3246.1的规定切取试样。

5.3.2 将试样加工为正圆柱体,宜使用线切割方式,试样直径/高度根据表4选择。日常检测试样直径宜选择5.0mm和10.0mm,进行金相法对比时试样直径宜选择20.0mm。

5.3.3 清洁试样表面,应无油污、无氧化层。

5.3.4 对试样进行标识,至少应包含试样编号、牌号、炉次号等内容。

表 4 试样直径/高度选择表

试样直径/高度 mm	分辨率 μ m	透过率 %	需要识别的最小结构特征 μ m
5.0+0.1	5	25	10~30
10.0+0.1	10	30	30~50
20.0+0.1	20	35	50~100

5.4 试验步骤

5.4.1 检测准备

逐项检查确认设备状态良好(包括但不限于:射线源状态、探测器校准、载物台运动精度、夹具稳固性、安全联锁装置有效性、软件运行正常等)。

5.4.2 参数设置

5.4.2.1 能量选择

依据试样厚度调整 X 射线管电压,确保 X 射线穿透试样后,探测器接收到的灰度值透过率落在 20%~80%的线性响应区间内。

5.4.2.2 空间分辨率优化

根据目标分辨率要求，调整射线源焦点尺寸和几何放大倍数 M (M 为探测器像素尺寸/焦点尺寸)。

5.4.2.3 采样设置

设置单帧投影曝光时间(不小于 1s)、总投影数量(不小于 1000 幅)，投影数据的信噪比(SNR)不小于 40 dB。

5.4.2.4 其他参数设置

参照 GB/T 44524 或设备手册，设置扫描角度范围、滤波片、探测器增益等辅助参数。

5.4.3 扫描

5.4.3.1 将试样安装到夹具上，试样检测区域中心靠近转台中心。

5.4.3.2 将夹具固定在设备载物台中心位置，使试样中心靠近转台旋转中心。夹具不宜进入扫描界面。若夹具进入扫描视野，在分析时应进行去除或屏蔽。

5.4.3.3 确认所有安全措施到位后，启动扫描程序，系统自动采集试样在设定角度范围内的投影数据。

5.4.3.4 当试样尺寸超出扫描视场时，应进行分区扫描。

5.4.3.5 扫描完成后，将获取的原始投影图像数据按标准格式(如 DICOM、TIFF、RAW、VTK 或供需双方认可的格式)输出并妥善保存。

5.4.4 重建

5.4.4.1 对扫描获得的投影数据进行三维重建，生成试样的体数据(三维灰度图像)。

5.4.4.2 重建后，在图像中选取已知的纯铝基体区域和试样外部的空气区域，分别获取其平均灰度值作为基准。利用这两个基准值对图像进行灰度标定，以消除密度漂移误差。标定后，纯铝基体与空气区域的灰度值之比应处于 3.0~5.0 之间。

5.4.5 孔隙识别

5.4.5.1 利用多阈值分割技术，在重建后的三维图像中区分出材料基体、显微疏松孔隙区域，孔隙区域阈值范围设定为铝基体灰度值的 1/5~1/3。

5.4.5.2 系统自动计算分析区域的总体积。

5.4.5.3 系统自动识别并计算单个疏松的体积 V_i 。

5.5 试验数据处理

孔隙率 A 以体积占比计，数值以百分数表示，按公式(2)计算：

$$A = \frac{\sum V_i}{V} \times 100\% \dots \dots \dots (2)$$

V_i ——单个疏松的体积，单位为立方微米 (μm^3)；

V ——分析区域的总体积，单位为立方微米 (μm^3)。

计算结果表示到小数点后三位，数值修约按 GB/T 8170 的规定进行。

5.6 试验结果有效性判定

同一试样三次检测的孔隙率相对偏差应不大于 10%；若检测结果超出允许范围，应重新取样进

行测试。

5.7 显微疏松等级评定

根据孔隙率体积占比，按表 5 评定显微疏松等级。附录 E 给出了 CT 法测定铸锭显微疏松等级评定示例。

表 2 显微疏松等级评定

等级	孔隙率 %	
	2XXX 系铝合金	7XXX 系铝合金
I级	≤0.010	≤0.010
II级	>0.010~0.050	>0.010~0.050
III级	>0.050~0.100	>0.050~0.100
IV级	>0.100	>0.100

5.8 试验报告

试验报告至少应包括以下内容：

- a) 试样信息（牌号、状态、炉次号、尺寸规格）；
- b) 本文件编号；
- c) 设备参数（设备型号、射线源电压、射线源电流、探测器类型、放大倍数、分辨率等）；
- d) 重建算法
- e) 扫描张数；
- f) 试验结果（显微疏松等级，需方要求时附显微疏松形貌图）；
- g) 试验人员；
- h) 试验日期。

附录 A

(资料性)

典型显微疏松形貌示例

A.1 典型显微疏松形貌

A.1.1 直径为 630mm 的 7085 铝合金均匀化态圆铸锭芯部显微疏松形貌示例见图 A.1。

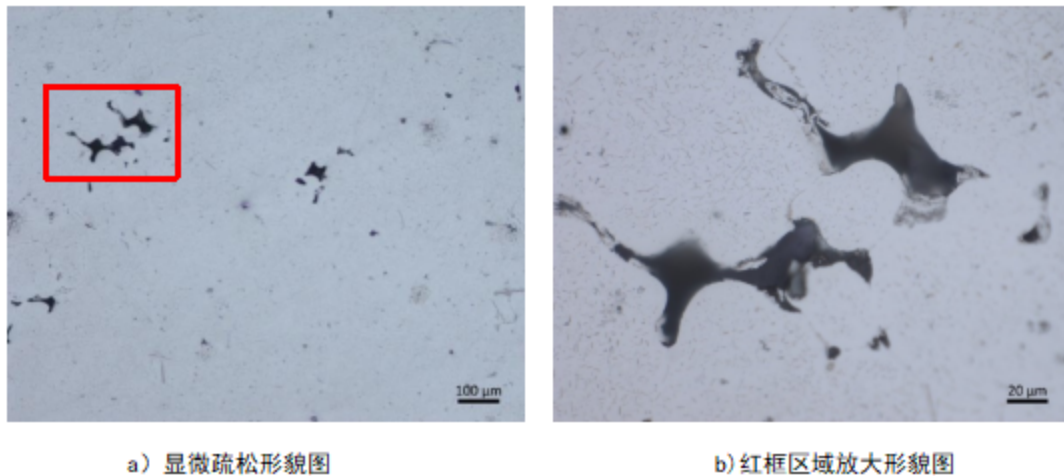


图 A.1 直径为 630mm 的 7085 合金均匀化态圆铸锭芯部典型显微疏松形貌

A.1.2 尺寸规格为 400mm×1320mm 的 7050 铝合金均匀化态扁铸锭芯部显微疏松形貌示例见 A.2。

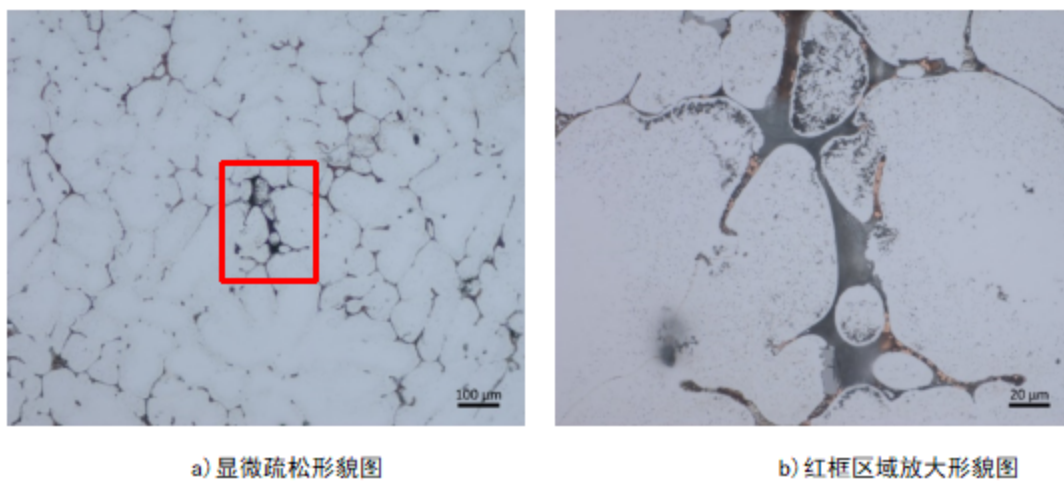
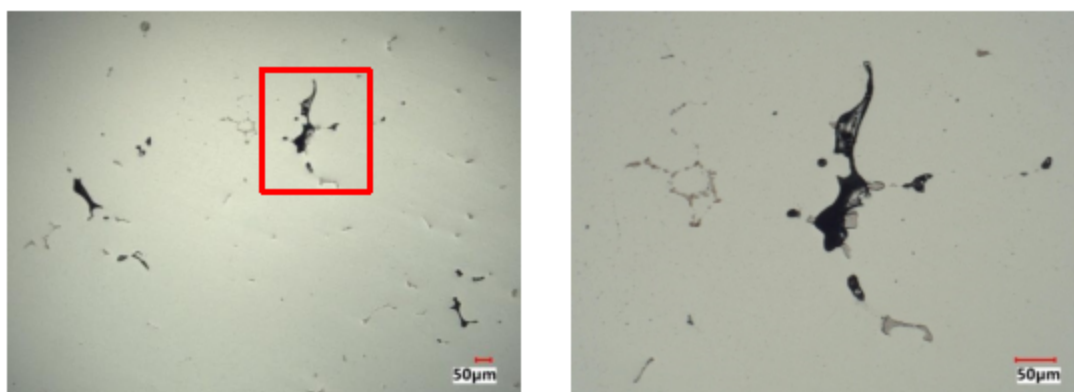


图 A.2 尺寸规格为 400mm×1320mm 的 7050 铝合金均匀化态扁铸锭芯部典型显微疏松形貌

A.1.3 尺寸规格为 490mm×1580mm 的 7050 铝合金均匀化态扁铸锭芯部显微疏松形貌示例见 A.3。

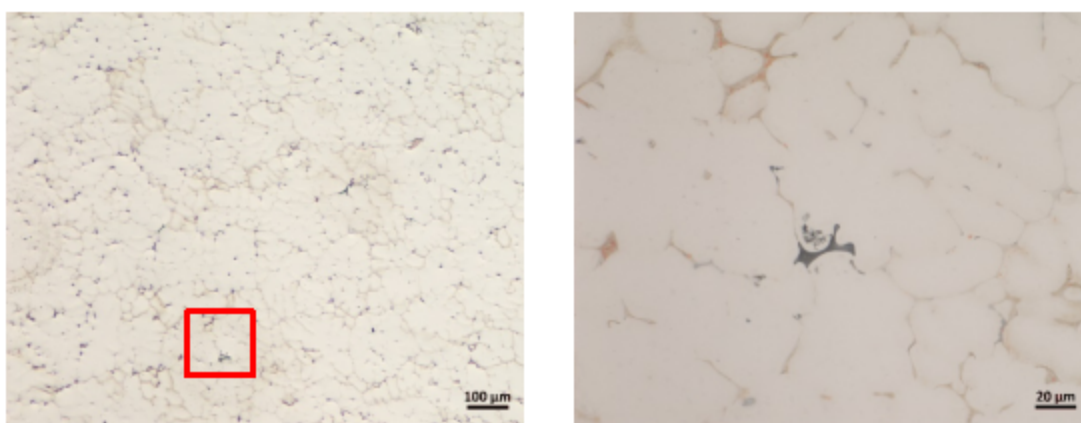


a) 显微疏松形貌图

b) 红框区域放大形貌图

图 A.3 尺寸规格为 490mm×1580mm 的 7050 铝合金均匀化态扁铸锭芯部典型显微疏松形貌示意图

A.1.4 直径为 152mm 的 7075 铝合金均匀化态圆铸锭芯部显微疏松形貌示例见 A.4。

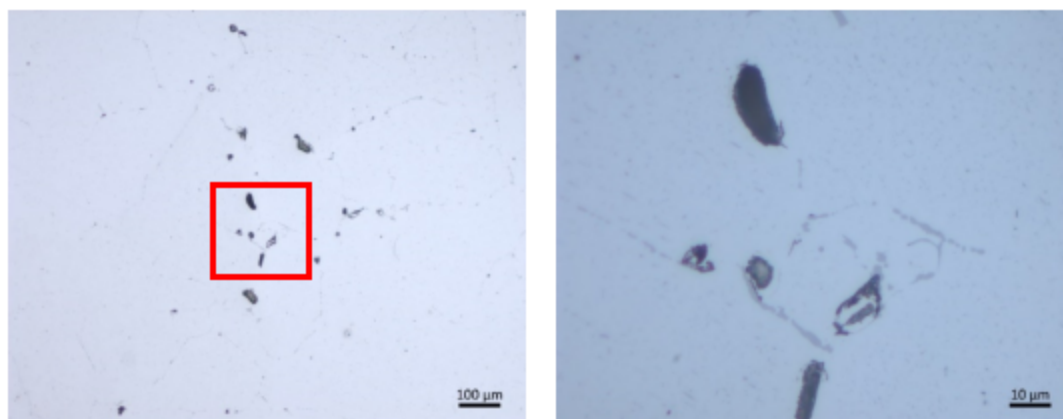


a) 显微疏松形貌图

b) 红框区域放大形貌图

图 A.4 直径为 152mm 的 7075 铝合金均匀化态圆铸锭芯部典型显微疏松形貌示意图

A.1.5 直径为 254mm 的 6013 铝合金圆铸锭芯部显微疏松形貌示例见 A.5。

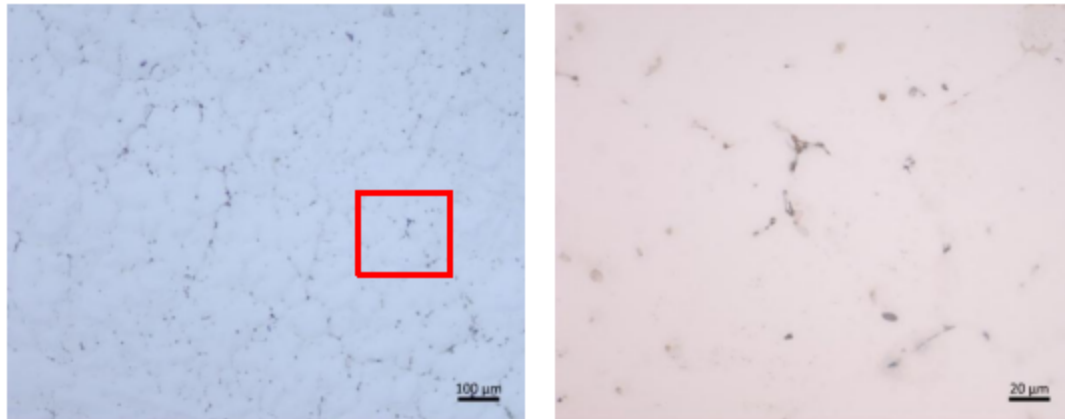


a) 显微疏松形貌图

b) 红框区域放大形貌图

图 A.5 直径为 254mm 的 6013 铝合金圆铸锭芯部显微疏松形貌示意图

A.1.6 直径为 228mm 的 7R03 铝合金圆铸锭芯部显微疏松形貌示例见 A.6。

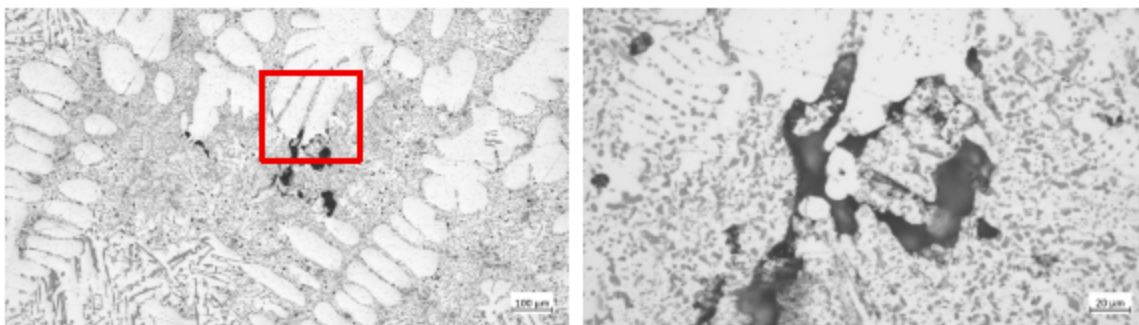


a) 显微疏松形貌图

b) 红框区域放大形貌图

图 A.6 直径为 228mm 的 7R03 铝合金圆铸锭芯部显微疏松形貌示意图

A.1.7 直径为 482mm 的 4032 铝合金圆铸锭芯部显微疏松形貌示例见 A.7。

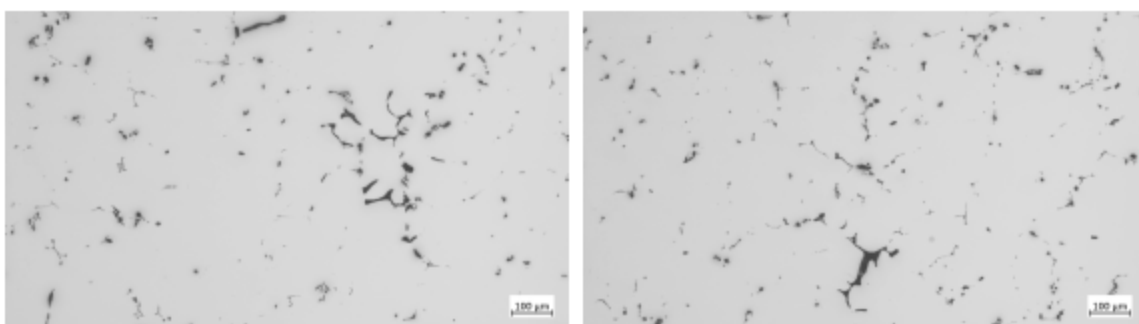


a) 显微疏松形貌图

b) 红框区域放大形貌图

图 A.7 直径为 482mm 的 4032 铝合金圆铸锭芯部显微疏松形貌示意图

A.1.8 尺寸规格为 640mm×1760mm 的 5182 铝合金扁铸锭芯部显微疏松形貌示例见 A.8。



a) 显微疏松形貌图 1

b) 显微疏松形貌图 2

图 A.8 尺寸规格为 640mm×1760mm 的 5182 铝合金扁铸锭芯部显微疏松形貌示意图

GB/T XXXXX-202×

A.2 不同合金各级别典型显微疏松形貌

A.2.1 2XXX 系铝合金各级别显微疏松形貌示例

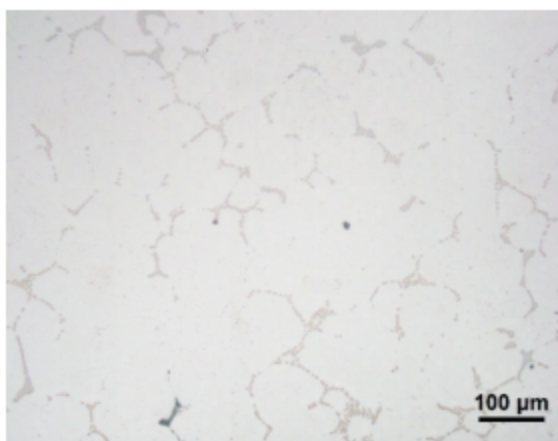


图 A.9 2XXX 系铝合金 I 级显微疏松形貌示例

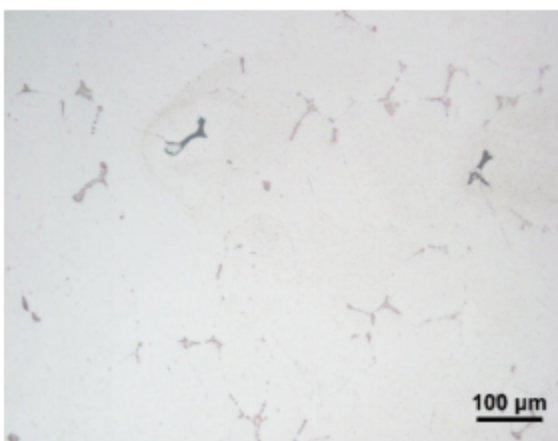


图 A.10 2XXX 系铝合金 II 级显微疏松形貌示例

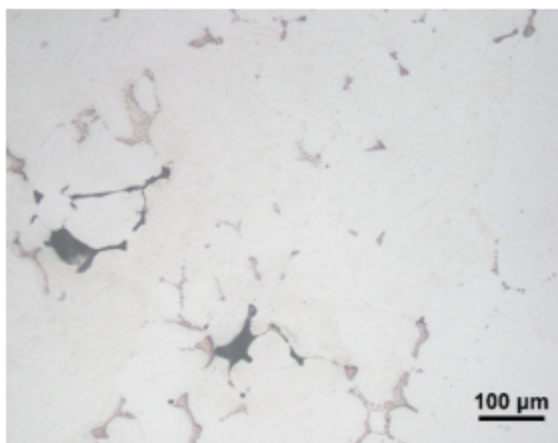


图 A.11 2XXX 系铝合金 III 级显微疏松形貌示例

A.2.2 3XXX 系铝合金各级别显微疏松形貌示例

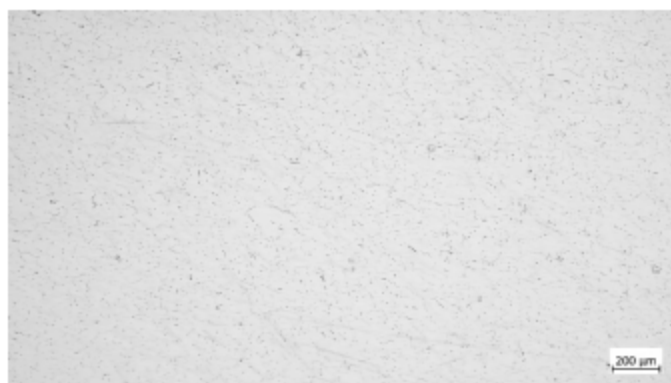


图 A.12 3XXX 系铝合金 I 级显微疏松形貌示例



图 A.13 3XXX 系铝合金 II 级显微疏松形貌示例

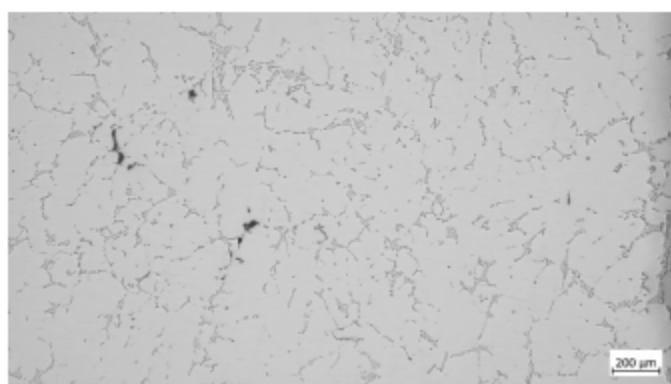


图 A.14 3XXX 系铝合金 III 级显微疏松形貌示例

A.2.3 4XXX 系铝合金各级别显微疏松形貌示例

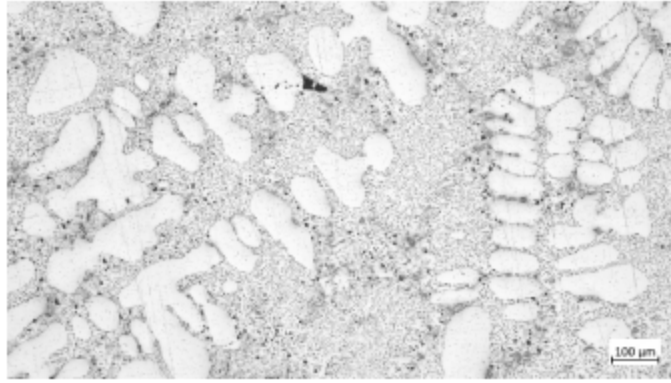


图 A.15 4XXX 系铝合金 I 级显微疏松形貌示例

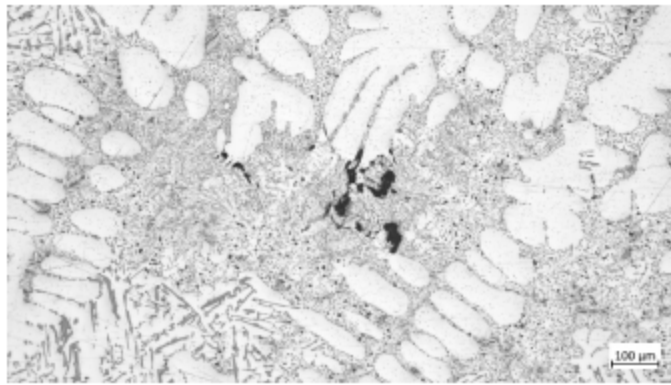


图 A.16 4XXX 系铝合金 II 级显微疏松形貌示例

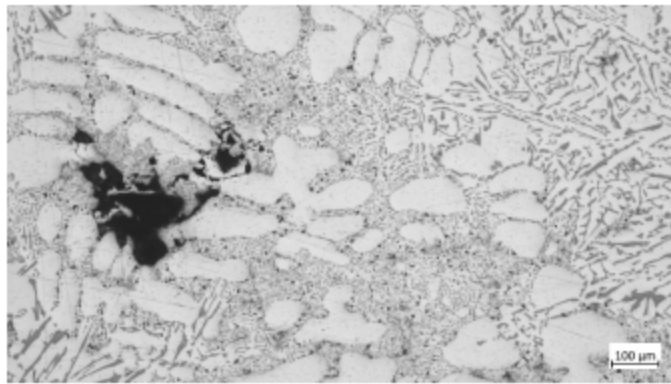


图 A.17 4XXX 系铝合金 III 级显微疏松形貌示例

A.2.4 5XXX 系铝合金各级别显微疏松形貌示例

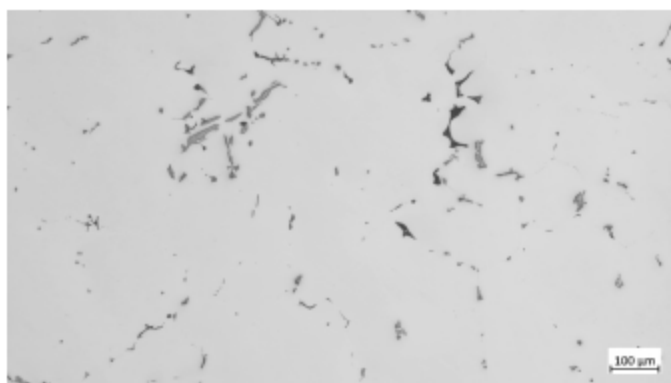


图 A. 18 5XXX 系铝合金 I 级显微疏松形貌示例

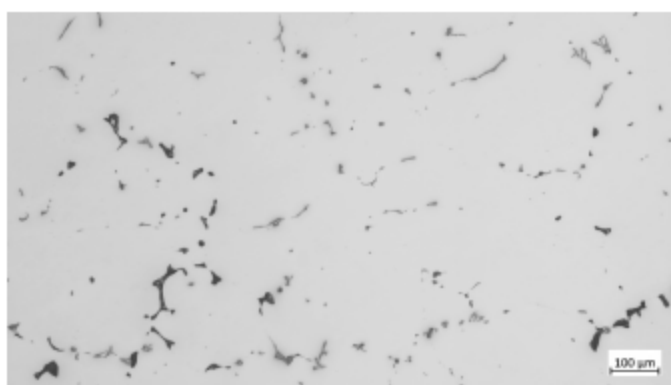


图 A. 19 5XXX 系铝合金 II 级显微疏松形貌示例

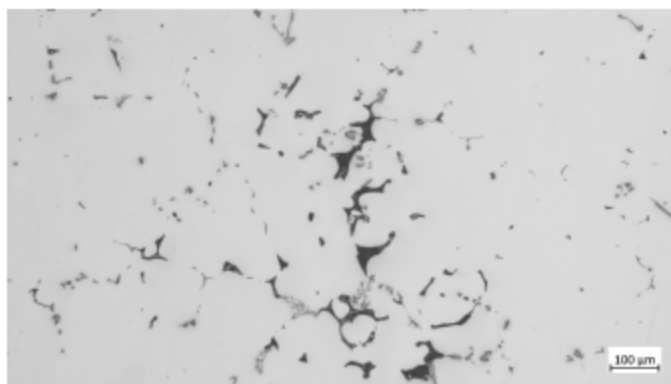


图 A. 20 5XXX 系铝合金 III 级显微疏松形貌示例

A. 2.5 6XXX 系铝合金各级别显微疏松形貌示例

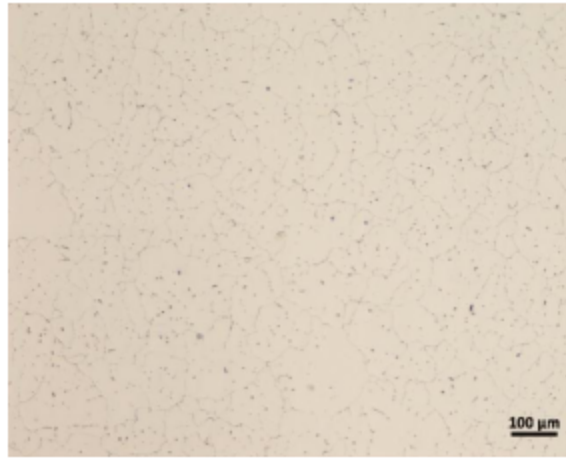


图 A. 21 6XXX 系铝合金 I 级显微疏松形貌示例

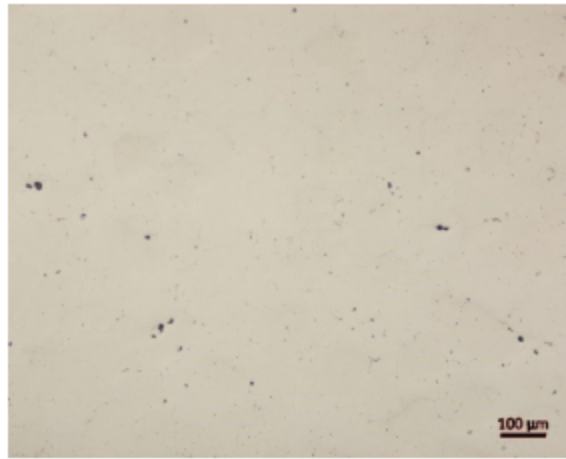


图 A. 22 6XXX 系铝合金 II 级显微疏松形貌示例

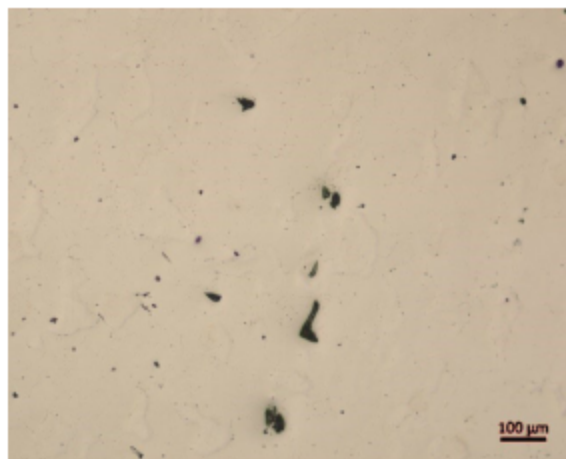


图 A. 23 6XXX 系铝合金 III 级显微疏松形貌示例

A. 2. 6 7XXX 系铝合金各级别显微疏松形貌示例

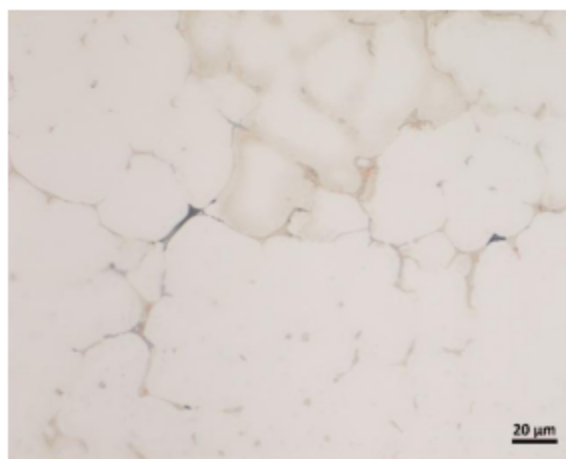


图 A. 24 7XXX 系铝合金 I 级显微疏松形貌示例



图 A. 25 7XXX 系铝合金 II 级显微疏松形貌示例

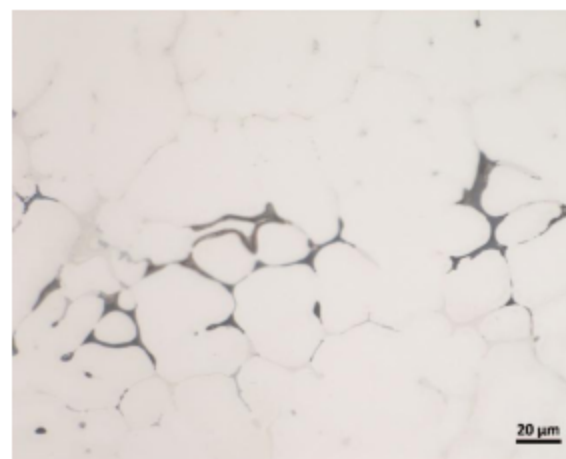


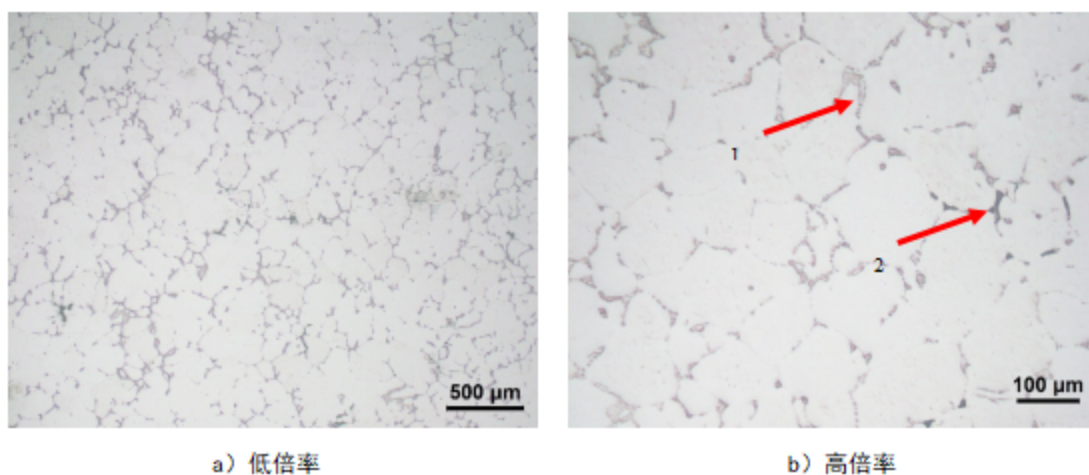
图 A. 26 7XXX 系铝合金 III 级显微疏松形貌示例

附录 B

(资料性)

显微疏松判定示例

当显微疏松比较小，在 50 倍或 100 倍下进行观察时，由于化合物团聚在一起，也呈现黑色，导致显微疏松显示不清，可以放大到 200 倍或 500 倍进行观察辨识。显微疏松呈黑色，有尖角；化合物随所含元素不同呈现红棕色、浅灰色或红褐色。显微疏松判定典型示例见图 B.1~图 B.4。



a) 低倍率

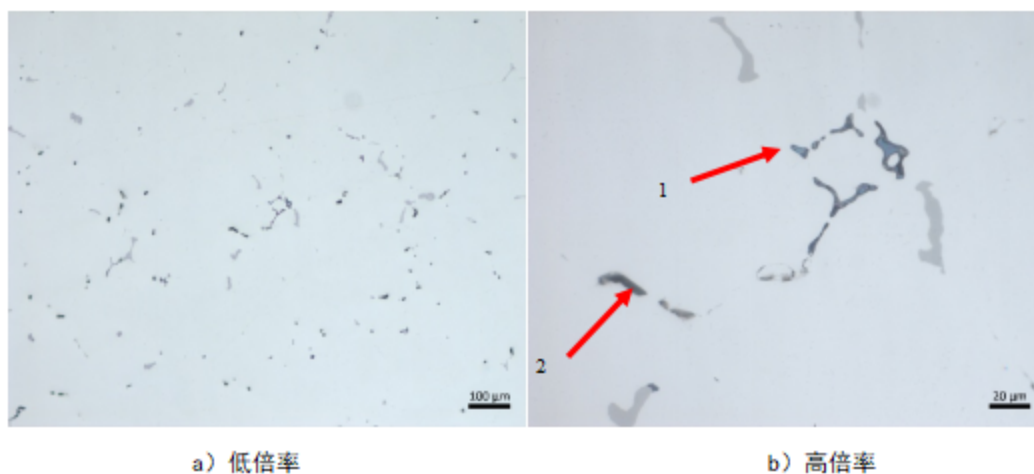
b) 高倍率

标引序号说明:

1—金属间化合物;

2—显微疏松。

图 B.1 2XXX 系铝合金不同放大倍率下显微疏松和化合物差异图



a) 低倍率

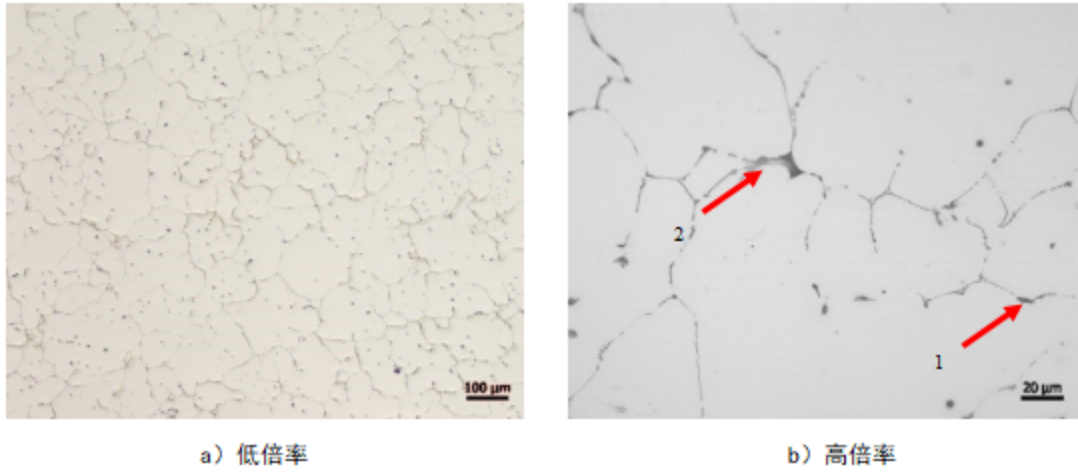
b) 高倍率

标引序号说明:

1—金属间化合物;

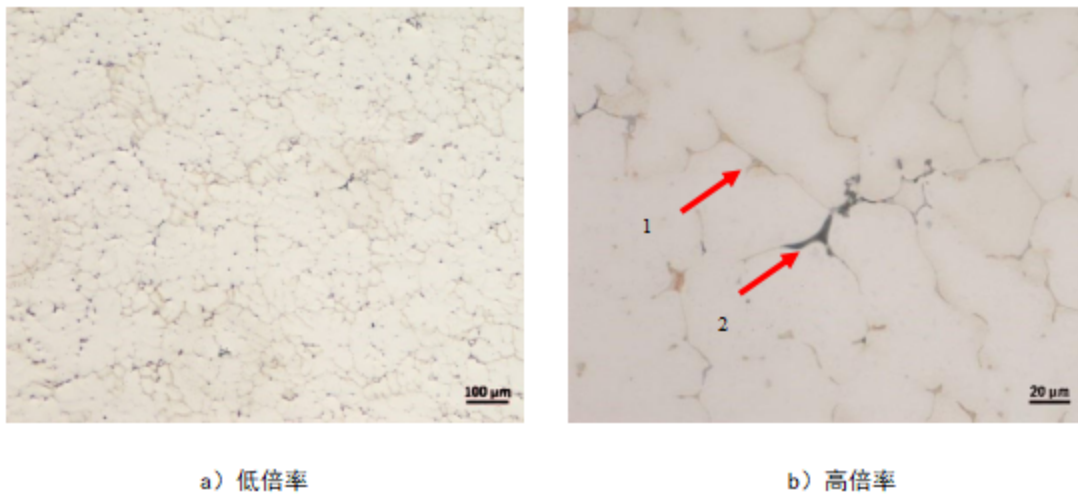
2—显微疏松。

图 B.2 5XXX 系铝合金不同放大倍率下显微疏松和化合物差异图



标引序号说明：
1—金属间化合物；
2—显微疏松。

图 B.3 6XXX 系铝合金不同放大倍率下显微疏松和化合物差异图



标引序号说明：
1—金属间化合物；
2—显微疏松。

图 B.4 7XXX 系铝合金不同放大倍率下显微疏松和化合物差异图

附录 C

(资料性)

显微疏松总面积计算示例

C.1 在显微镜下观察检验面，对存在显微疏松的位置进行拍照保存。

C.2 利用图像分析软件对所保存图片中的显微疏松进行提取（提取示例见图 C.1），自动计算显微疏松面积。

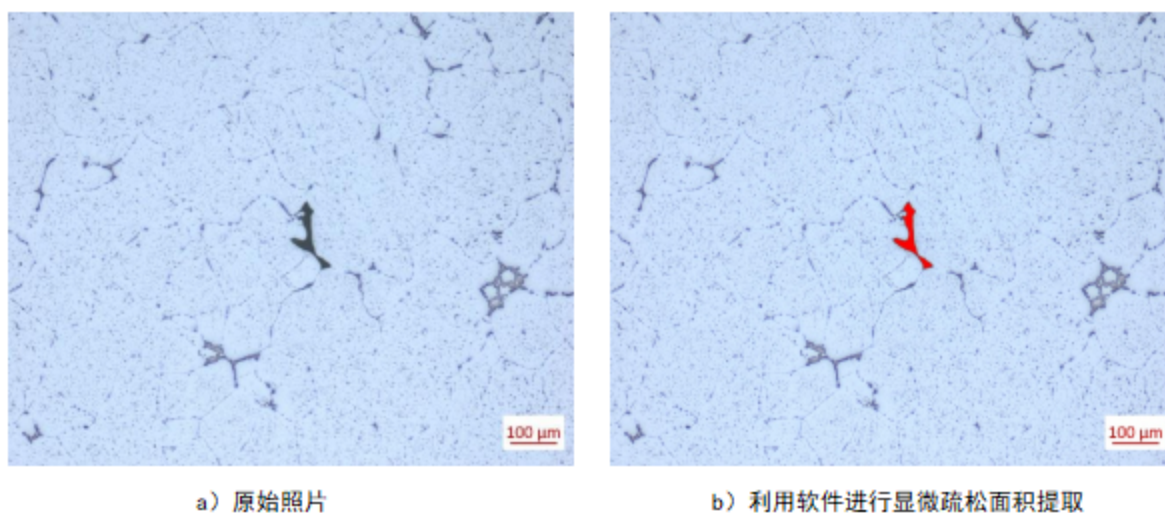


图 C.1 2024 扁铸锭显微疏松面积提取示例

C.3 采用 C.2 中的方法对同一试样的其他显微疏松照片进行显微疏松面积提取与计算。

C.4 对同一试样的所有显微疏松面积进行统计，计算该试样的显微疏松总面积。

附录 D

(资料性)

工业 CT 法测定铸锭显微疏松形貌示例

D.1 2024 铸锭中显微疏松的典型形貌

D.1.1 尺寸规格为 550mm×2270mm 的 2024 铝合金均匀化态扁铸锭芯部显微疏松形貌示例见图 D.1。

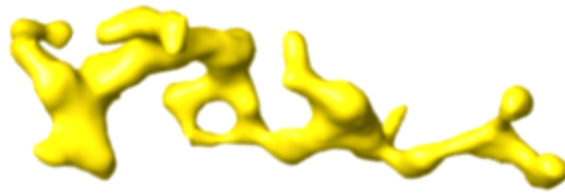


图 D.1 尺寸规格为 550mm×2270mm 的 2024 铝合金均匀化态扁铸锭芯部典型显微疏松形貌

D.1.2 尺寸规格为 550mm×2270mm 的 2024 铝合金均匀化态扁铸锭边部显微疏松形貌示例见图 D.2。

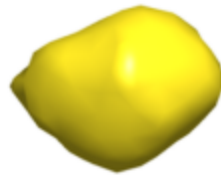


图 D.2 尺寸规格为 550mm×2270mm 的 2024 铝合金均匀化态扁铸锭边部典型显微疏松形貌

D.2 7050 铝合金铸锭中显微疏松的典型形貌

D.2.1 尺寸规格为 420mm×1420mm 的 7050 铝合金均匀化态扁铸锭芯部显微疏松形貌示例见图 D.3。

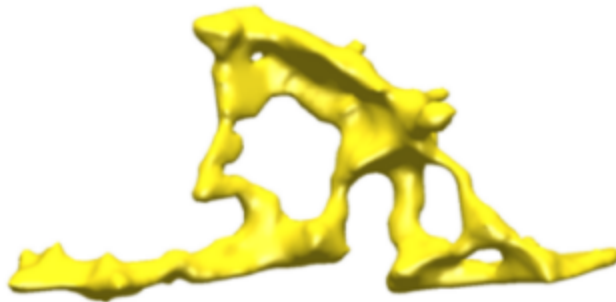


图 D.3 尺寸规格为 420mm×1420mm 的 7050 铝合金均匀化态扁铸锭芯部典型显微疏松形貌

D.2.2 尺寸规格为 420mm×1420mm 的 7050 铝合金均匀化态扁铸锭边部显微疏松形貌示例见图 D.4。



图 D.4 尺寸规格为 420mm×1420mm 的 7050 铝合金均匀化态扁铸锭边部典型显微疏松形貌

附录 E

(资料性)

工业 CT 法测定铸锭显微疏松等级评定示例

E.1 铸锭显微疏松等级Ⅰ级，直径为 360mm 的 2024 铝合金均匀化态圆铸锭芯部试样，显微疏松体积占比 0.004%。

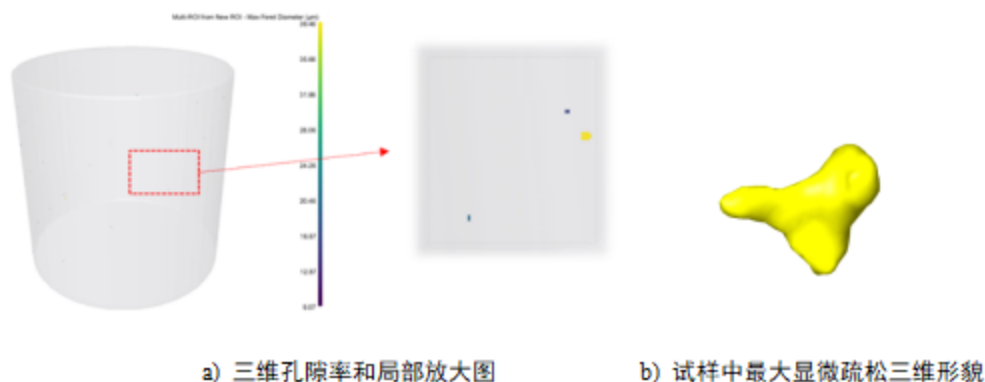


图 E.1 直径为 360mm 的 2024 铝合金均匀化态圆铸锭芯部试样

E.2 铸锭显微疏松等级Ⅱ级，尺寸规格为 400mm×1320mm 的 7050 铝合金均匀化态扁铸锭芯部试样，显微疏松体积占比 0.017%。

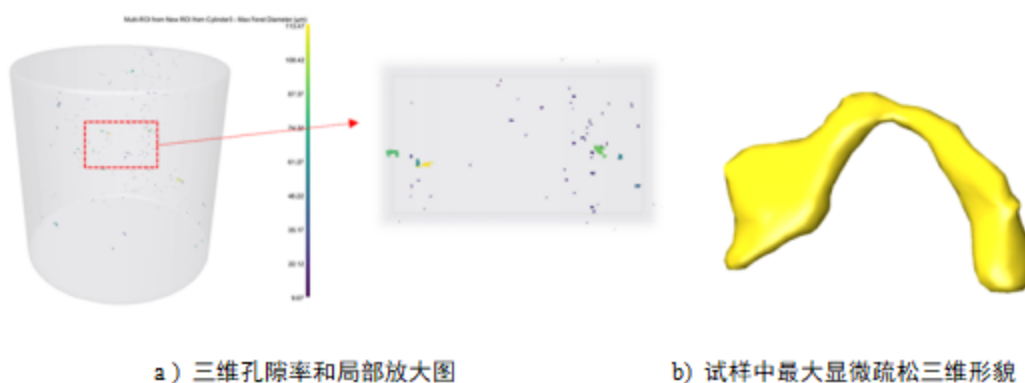
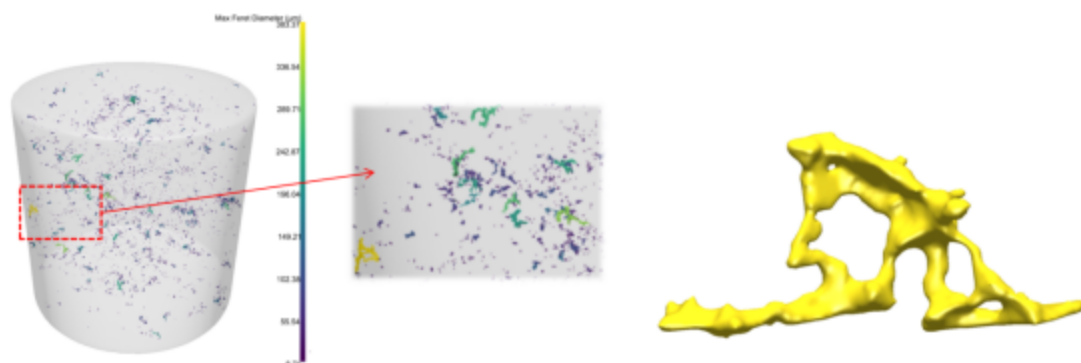


图 E.2 尺寸规格为 400mm×1320mm 的 7050 铝合金均匀化态扁铸锭芯部试样

E.3 铸锭显微疏松等级Ⅲ级，尺寸规格为 520mm×1620mm 的 7050 铝合金均匀化态扁铸锭芯部试样，显微疏松体积占比 0.059%。

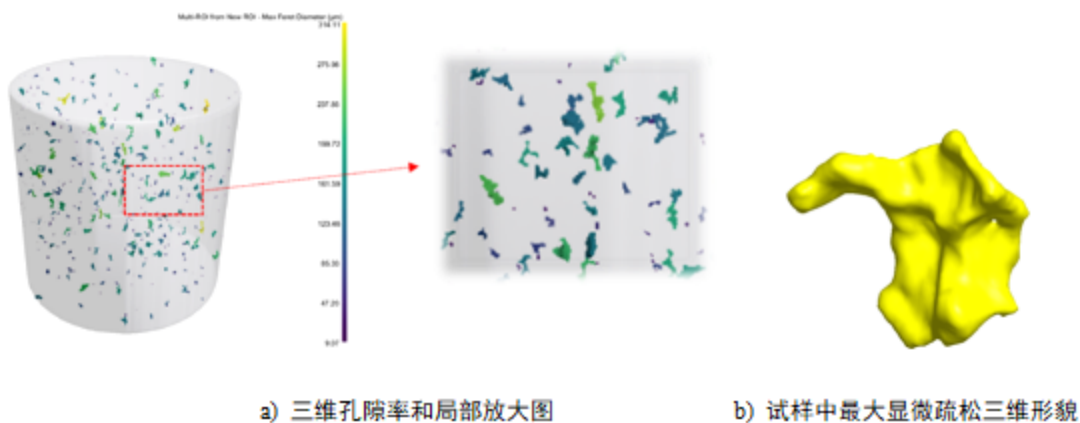


a) 三维孔隙率和局部放大图

b) 试样中最大显微疏松三维形貌

图 E.3 尺寸规格为 520mm×1620mm 的 7050 铝合金均匀化态扁铸锭芯部试样

E.4 铸锭显微疏松等级IV级,尺寸规格为 550mm×2270mm 的 2024 铝合金均匀化态扁铸锭芯部试样,显微疏松体积占比 0.106%。



a) 三维孔隙率和局部放大图

b) 试样中最大显微疏松三维形貌

图 E.4 尺寸规格为 550mm×2270mm 的 2024 铝合金均匀化态扁铸锭芯部试样

参考文献

- [1] GB/T 44524 增材制造金属制件孔隙率工业计算机层析成像
-