

ICS 27.100

F 24

备案号: 13634-2004



中华人民共和国电力行业标准

DL / T 884 — 2004

火电厂金相检验与评定技术导则

Power plant metallography inspection and assessment guideline

2004-03-09 发布

2004-06-01 实施

中华人民共和国国家发展和改革委员会 发布

目 次

前言	II
1 范围	1
2 规范性引用文件	1
3 一般准则和要求	1
4 金相检验方法	3
5 表面复型	7
6 电厂金相（表面复型）分析	11
附录 A（资料性附录） 复型设备和用品	18
附录 B（规范性附录） T91 钢组织老化评定级别图	19
附录 C（规范性附录） 10CrMo910 钢蠕变损伤评定级别图	20

前 言

本标准是根据原国家经贸委电力行业标准计划项目〔电力（1999）40 号文〕的安排而制订的，制订的目的是为了对火力发电厂设备维修过程中有关金相检验技术工作的操作方法、分析过程及评定原则进行规范，以保证金相分析结果的可靠性。

1984 年，原电力部基建司组织电力建设研究所等单位编制了《电力建设金相检验导则》，于 1984 年 11 月 14 日以（84）电基火字第 146 号形式颁布，满足了当时电力建设金相检验工作的需要，但适合电厂使用的金相检验相关标准一直没有制定，大多数电厂检验人员在金相检验和分析评定时深感不便。长期以来各单位在开展金相分析时采用的基本操作方法不统一，分析和评定程序不规范，导致检验结果的可靠性和可比性较差，也妨碍了与国内外同行的有效交流。随着近年来一些先进电厂金相分析技术的引入和发展，随着我国电厂金相检验人员素质的不断提高，金相检验技术已成为一种设备状态检验和评估的基本手段，制定电厂金相检验与评定导则的需求越来越迫切。

本导则在制订过程中，在注重引用国外成熟方法，与国际通用标准和方法靠拢的同时，充分考虑了国内金相检验技术的发展特点和习惯，重点对现场复型金相检验方法进行了规范，并对现场复型完成后的分析和评估过程进行了详细说明，将对电厂金相检验和评定工作的规范起到良好作用。

本标准中附录 A 是资料性附录，附录 B、附录 C 是规范性附录；

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：国电热工研究院。

本标准主要起草人：李耀君。

火电厂金相检验与评定技术导则

1 范围

本标准规定了使用金相学方法进行部件检验的基本要求、主要操作步骤，规定了金相分析基本过程及评定标准。

本标准适用于火电厂高温部件的现场及实验室金相检验分析与评定。

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 226 钢的低倍组织及缺陷酸蚀试验法
GB/T 1979 结构钢低倍组织缺陷评级图
GB/T 4236 钢的硫印检验方法
GB/T 6394 金属平均晶粒度测定法
GB/T 13298 金属显微组织检验方法
GB/T 13299 钢的显微组织评定法
DL 439 火力发电厂高温紧固件技术导则
DL/T 674 火电厂用 20 号钢珠光体球化评级标准
DL/T 773 火电厂用 12Cr1MoV 钢球化评级标准
DL/T 787 火电厂用 15CrMo 钢珠光体球化评级标准
YB47 塔形车削发纹检验法

3 一般准则和要求

3.1 金相检验获得的基本特征信息

电厂部件在高温条件下长期使用，部件材料将发生蠕变及其他与时间有关的变化，在整个服役期内都将发生显微组织的不断老化和宏观性能的逐渐劣化。对低合金钢而言，蠕变机理导致的失效主要有以下两个原因：

- a) 服役期内显微组织的老化导致宏观强度的逐渐降低；
- b) 以沿晶蠕变孔洞为主要特征的蠕变损伤的发展。

通常这两个变化过程是同时发生的，其变化程度和速度取决于原始材料的组织状态和成分，部件使用应力和温度、使用时间等条件。在部件状态评估和寿命评估时采用金相学方法，主要是为了得到这两类组织状态变化过程中的特征信息。

3.2 主要特征参数

金属材料在长期高温和应力作用下发生组织老化的特征可由碳化物相的一系列变化来表征，检验和分析时必须考虑组织形态改变、相成分改变、碳化物粗化和相结构改变等四个方面：

- a) 组织形态改变。珠光体中的碳化物相在使用中逐渐变为球状，称之为球化现象，这一现象是碳化物分布形态变化的一个基本特征。形态的变化形式还有贝氏体晶粒位向、再结晶及更复杂的微观位错结构变化等，直接与材料的老化过程相关。

- b) 相成分改变。碳化物相的成分变化与基体中合金元素的转移现象有关。长期使用中, 在同一类碳化物相中, 其组成元素 Fe、Mn、Cr、Mo、V 等逐渐发生着量的变化, 这种相成分改变现象是一个重要的材料老化特征。
- c) 碳化物相粗化。碳化物粒子尺寸在使用过程中将发生变化, 即出现粗化现象, 其粗化过程直接与材料的老化过程相关。
- d) 相结构改变。钢中的多种碳化物在使用过程中将发生结构转变, 即由简单结构的 M_2C 、 M_3C 相等碳化物类型转变为复杂结构的 $M_{23}C_6$ 、 M_6C 相。碳化物结构的转变也是一个重要的材料老化特征。

3.3 金相检验和评定的主要结果

随着分析测试技术的发展, 上述的四个基本老化特征均能够定性或定量地给出测试结果, 因而只要采用正确的金相分析方法, 一般可评定出部件和材料的老化程度。同时, 当运行时间已知时, 由测定的老化特征参数, 可以推导出部件和材料老化的平均老化速度。

3.4 影响部件老化与损伤的因素

显微组织的老化导致了强度下降等材料性能变化, 强度的持续下降最终使部件由于强度不足而导致失效。碳化物形态等特征参数的变化可通过直接金相观察或间接由硬度测量结果定量评定。部件的材料显微组织老化状态对温度条件变化较为敏感, 金相检验的结果可用来评定部件温度状况。

电厂部件常见的蠕变损伤特征主要有沿晶蠕变孔洞和晶粒变形, 可直接采用金相观察方法测得。部件的蠕变损伤状态对应力条件变化较为敏感, 金相检验的结果也可用来评定部件的应力状况。

3.5 现场金相检验

电厂金相检验一般通过取样或者非破坏性现场复型方式实施。大部分电厂部件都能取出样品, 在不易取样的部位, 或取样会影响到部件完整性, 或者需要在部件上进行重复性研究时, 现场复型进行显微组织评价的方法常常是唯一可行的方法。

表面复型技术的两种主要应用是: ①使用表面复型技术与光学金相、电子金相、定量金相技术相结合, 研究显微组织的老化和蠕变损伤; ②使用萃取复型技术识别和检验细小的第二相粒子的微观结构和尺寸, 如晶内碳化物粒子间距的检验。

3.6 金相分析方法的选择原则

适用于电厂部件的金相检验技术和方法较多, 根据分析目的的不同, 可按照一般性金相检验、状态检验、寿命评估等 3 个层次选择金相检验与分析的具体方法, 对检验结果的可靠性要求也不一样。

一般性金相检验是指以常规组织形态分析为主的检验, 其检验内容一般包括评定金相组织、球化(老化)程度、夹杂物级别、晶粒度级别等标准项目, 检验点数量一般较少, 通常对检验结果不进行详细统计或定量分析, 只限于对标准规定的评判。可用于电厂部件定期常规检验和锅炉、压力容器定检等, 一般不能得到综合的状态评估和寿命评估结果。

状态检验是指采用适当的金相检验方法, 对部件材料状态进行检验并评估的技术, 其状态检验内容一般包括标准项目和非标准项目, 如材料老化状态、蠕变损伤状态、腐蚀氧化状态、脆化状态、表面状态、开裂状态等的检验和评估, 要求适度的数据可靠性。依据单一或综合的状态检验结果, 结合以往部件状态变化规律研究结果进行定性(或定量)分析, 可给出部件状态的明确评定结论。

寿命评估是指在准确掌握部件材料状态的基础上, 运用各种金相检验的结果, 结合部件制造状态、运行状态、维修状态等进行深入的综合分析, 数据的可靠性要求较高。并应用寿命评估原理对部件的状态和寿命进行定量评估, 可给出部件状态和寿命的明确评定结论。

3.7 表面复型检验和评定的基本特征信息

表面复型是电厂金相检验方法中特有的一种非破坏性检验技术, 能提供有关部件材料的表面状态信息, 原则上可在任何需要检验的部位进行。而取样方法则可提供全壁厚的完整信息, 但检验位置和数量都受到限定。

由复型检验结果可获得的主要信息包括：

- a) 材料老化状态：碳化物析出长大和球化程度等；
- b) 材料损伤状态：蠕变孔洞和开裂倾向的程度等；
- c) 使用温度状态：部件金属的当量温度等。

本导则给出了对复型结果进行定性和定量分析评估的基本方法，可分别用于进行部件状态评估和寿命评估。基本金相检验方法见第 4 章，表面复型的基本操作过程见第 5 章。复型结果的基本分析过程在第 6 章中叙述。

3.8 金相分析方法的使用范围

各种金相检验和评定技术的应用范围有很大的差异，不同方法可获得的信息是不同的。

金相检验和分析的结果与检验工艺的正确与否有很大关系，取样或检测点位置、数量、角度、制备过程、观察区域和倍数、照片制备等过程都会对结果产生重大影响，金相检验和分析人员均应通过相应的专业技术培训。

本导则给出的基本分析方法，其相关研究与应用尚集中于低合金钢。另外，导则中所述的这些技术主要与蠕变寿命损耗机理有关，不适用于疲劳寿命损耗等其他损伤方式的分析和评估。

4 金相检验方法

4.1 宏观检验方法

宏观检验是指肉眼或 10 倍以下放大镜所进行的检验和分析。

4.1.1 低倍组织检验

低倍组织检验用于检查材料宏观质量，评定宏观缺陷，检验工艺过程和进行失效分析。检验前，一般用 400~600 号砂纸打磨表面，然后浸蚀。常用浸蚀方法有热酸浸法、冷酸浸法及电解腐蚀法，常用低倍浸蚀剂见表 1。低倍组织检验可区分树枝晶、焊接区、偏析、疏松、宏观粗晶等。具体操作应按照 GB/T226 进行。低倍组织缺陷评定应按照 GB/T1979 标准进行。螺栓钢的粗晶检验应按照 DL439 标准进行。

表 1 常用低倍浸蚀剂

序号	浸蚀剂成分	浸蚀条件	适用范围	备 注
1	50mL 蒸馏水 50mL 盐酸（密度 1.19）（浓度可变）	5min~30min 65℃~80℃	碳钢和合金钢，检验组织和偏析	
2	90mL 酒精 10mL 硝酸（密度 1.40）（浓度可变）	1min~5min	铁和钢，检验增碳或脱碳层、偏析	Nital 试剂
3	10g~15g 过硫酸铵 100mL 蒸馏水	2min~10min	碳钢和低合金钢，或与 2 号试剂共用	
4	120mL 蒸馏水 20g 氯铜酸铵	2min~10min	低碳钢，检验磷偏析、焊缝区域组织，纤维方向	Heyn 试剂
5	50mL 盐酸（密度 1.19） 25mL 硫酸铜饱和水溶液	几秒至几分钟	奥氏体钢和耐热钢	Marble 试剂
6	15%~20% 盐酸水溶液	电压 20V，电流（0.1~1） A/cm ² ，5min~30min	碳钢和合金钢	
7	120mL 蒸馏水 30mL 盐酸（密度 1.19） 10g 氯化铁（浓度可变）	几分钟	铜及铜合金	

4.1.2 发纹检验

钢中的发纹是指磨面上肉眼可见的由针孔、气孔、夹杂等引起的缺陷（细小裂纹）。采用塔形车削试样，使用酸蚀法或磁力探伤法检验，具体方法应按 YB47 进行。

4.1.3 硫印检验

硫在钢中以硫化物形式存在。用 2%~10% 的硫酸水溶液浸润的光面印相纸，紧贴于细磨过的钢材受检截面上 2min~5min，然后揭下，定影、水洗并干燥，即可获得硫印。根据相纸上棕色斑点的大小、数量、形状及分布状态、色泽深浅，可评定硫的分布和浓度。具体方法应按 GB/T 4236 进行。

4.2 光学金相方法

4.2.1 样品制备要求

实验室光学金相检验的基本方法可参考相关标准 GB/T 13298、GB/T 13299。

微观检验的金相样品要求能够表征材料本身的特征，即具有代表性，同时要求组织清晰，边缘平整，不允许有因制备方法不当而引起的相变、变形、剥落、划痕及模糊等缺陷。

4.2.2 样品制备过程

4.2.2.1 取样

应根据分析目的，选择适当的取样方法。焊接接头的取样一般应包括焊缝、热影响区及母材。对将进行焊接的管段，必要时可在开坡口前截取三角试样。

4.2.2.2 镶嵌

对形状不规则或较软、细小、易碎或要求边缘保护的样品要镶嵌起来，也可用特殊夹具固定。

4.2.2.3 磨光与抛光

机械磨光和抛光是最常用的方法。磨光用砂纸有干砂纸和水砂纸两类，常用的国产干砂纸编号及磨粒尺寸见表 2，水砂纸编号及磨粒尺寸见表 3。常用的抛光磨料性能和适用范围见表 4。磨光及抛光后，样品应彻底清洗。

表 2 干砂纸编号与磨粒尺寸关系

序 号	编 号	粒度标号	磨粒尺寸 μm	备 注
1	—	280	50~40	一般钢铁材料用 280、W40、W28、 W20 4 个粒度标号干 砂纸磨光
2	0	W40	40~28	
3	01	W28	28~20	
4	02	W20	20~14	
5	03	W14	14~10	
6	04	W10	7~10	
7	05	W7	5~7	
8	06	W5	3.5~5	
9	—	W3.5	2.5~3.5	

表 3 水砂纸编号与粒度尺寸关系

序 号	编 号	粒度标号	磨粒尺寸μm	备 注
1	320	—	—	一般钢铁材料用 240、360、400、600 4 个粒度标号水砂纸 磨光
2	360	220	50~63	
3	380	240	40~50	
4	400	280	28~40	
5	500	320	—	
6	600	360	20~28	
7	700	400	—	
8	800	600	14~20	
9	900	700	—	
10	1000	800	—	

表 4 抛光磨料性能与适用范围

序号	磨 料	莫氏硬度	性 能	适用范围
1	氧化铝（刚玉、人造刚玉）	9	白色透明， α 氧化铝粒子平均尺寸 0.3 μm ，外形呈多角形。 γ 氧化铝粒度为 0.01 μm ，外形呈薄片形，压碎后成更细小的立方体	粗抛光和精抛光
2	氧化镁	8	白色，粒度极细且均匀，外形锐利呈八面体	适于铝、镁及其合金和钢中非金属夹杂物的抛光
3	氧化铬	9	绿色，具有很高的硬度，比氧化铝抛光能力差	适于淬火钢、合金钢、铁合金的抛光
	氧化铁	8.5	红色，颗粒圆细无尖角，引起变形层厚	抛光光学零件
4	碳化硅（金刚砂）	9.5~9.75	绿色，颗粒较粗	用于磨光和粗抛光
5	金刚石粉（包括人造金刚石粉）	10	颗粒尖锐、锋利，切削作用极佳，寿命长，变形层少	适用于各种材料的粗抛光和精抛光，是最理想的磨料

4.2.2.4 浸蚀

抛光好的样品，应进行金相组织显示。化学浸蚀显示法迅速简便，用途最广。常用的化学浸蚀试剂见表 5。

表 5 常用的化学浸蚀试剂

序号	名 称	成 分	规 范	备 注
1	硝酸酒精溶液（Nital 试剂）	硝酸 1mL~10mL，酒精 100mL	几秒至几分钟	纯铁、碳钢、合金钢和灰铸铁。识别马氏体与铁素体，偏析时可能有不均匀浸蚀
2	苦味酸酒精溶液（Pikral 试剂）	苦味酸 2g~4g，酒精 100mL	几秒至几分钟	碳钢及低合金钢。有偏析时也能均匀浸蚀
3	盐酸苦味酸酒精溶液	盐酸 5mL，苦味酸 1g，酒精 100mL	几秒至几分钟	显示回火组织、高合金钢组织
4	氯化铁盐酸水溶液	三氯化铁 5g，盐酸 50mL，水 100mL	几秒至几分钟	显示不锈钢组织
5	过硫酸铵溶液	过硫酸铵 10g，蒸馏水 100mL	几秒至几分钟	低碳钢、低合金钢、高合金钢，铜合金、Ag-Ni 合金
6	饱和苦味酸水溶液	苦味酸 100g，蒸馏水 100mL（适当加入海鸥洗净剂等湿润剂）	30s~60s 75℃~85℃	调质钢及渗碳钢的原奥氏体晶界
7	盐酸酒精溶液	盐酸 20mL，酒精 100mL	5min~30min	识别马氏体，耐热钢
8	硝酸盐酸酒精溶液	硝酸 1mL~5mL，盐酸 1mL~10mL，酒精 85mL	1min~5min	热处理钢晶界、铬合金钢
9	硝酸盐酸混合液	硝酸 10mL，盐酸 30mL	几分钟	显示高合金钢、不锈钢组织
10	苦味酸乙醚溶液	苦味酸 200mg，乙醚 25mL，水 100mL	几分钟	显示奥氏体晶界
11	氢氧化钠水溶液	氢氧化钠 1g，水 10mL	几秒至几分钟	铝及铝合金
12	氯化铁盐酸水溶液	三氯化铁 5~10g，盐酸 20mL~50mL，水 100mL~120mL	几秒至几分钟	铜及铜合金
13	硝酸氢氟酸水溶液（Kroll 试剂）	氢氟酸 1mL~3mL，硝酸 2mL~6mL，水 100mL	3s~10s	钛及钛合金

4.2.3 观察照相

制备好的金相试样和复型薄膜可在光学显微镜下观察和拍照，也可在透射电子显微镜或扫描电子显微镜下分析和拍照。

4.3 定量金相方法

4.3.1 图像分析仪

定量金相学检验包括手动检验、自动检验等方法。图像分析仪是用来对金相图像进行自动定量测量的仪器。其基本工作原理是根据定量金相的线分析法和面分析法进行测量，采用水平和垂直扫描线，将图像分解为单个小像素，利用网格像素尺寸测量图像面积。图像面积 S 为：

$$S = n_1 \alpha^2 + n_2 \beta \alpha^2 \quad (1)$$

式中：

α ——像素的边长；

β ——小于或等于 1 的正数；

n_1 、 n_2 ——像素个数。

用折线测量曲线长度，它是采用近旁折线逼近曲线的方法。曲线长度 L 为：

$$L = n_1 \alpha + n_2 \sqrt{2} \alpha \quad (2)$$

测量结果经分析处理后给出统计结果。图像中不同组成相之间的边界，是根据相同相有相近的光学灰度这一特点而加以区分的。

4.3.2 主要测量参数

图像分析仪可直接测量组织或照片中相的个数、周长、面积、平均弦长、截距长、直径、投影长、最大长度、宽度、位置坐标、形状因子、灰度等。通过定量金相计算，可给出许多有用的显微组织特征参数。

4.3.3 晶粒度测定

金属和合金的晶粒度包括奥氏体晶粒度、铁素体晶粒度，宏观晶粒度等。测定方法有计算法和比较法两类。比较法是将照片或毛玻璃屏上所要检验的图像与标准晶粒度图片相比较，晶粒度级别应按照 GB/T 6394 进行评定。根据下式定义微观晶粒度级别指数 G ：

$$n = 2^{G-1} \quad (3)$$

式中：

n ——100 倍时 6.45cm^2 内所含的晶粒数目。

4.4 彩色金相方法

4.4.1 着色方法

4.4.1.1 化学染色法

化学染色法是薄膜干涉方法的一种。根据电化学反应原理的不同，试剂分为阳极试剂、阴极试剂和复合试剂 3 类。其中常用的阳极试剂配方和用途见表 6。

4.4.1.2 恒电位法

恒电位法是在电解浸蚀过程中维持电位恒定，使阳极试样表面形成氧化薄膜，获得不同色彩，是一种常用的显示彩色组织的方法。

4.4.1.3 热氧化法

将试样置于热处理炉中加热，在空气中氧化一定时间形成氧化薄膜，使组织着色。

4.4.2 检验

着色完成后，其他微观检验方法同上述。

表 6 常用阳极试剂配方与用途

序号	配 方	用途与特点
1	焦亚硫酸钠 1g, 蒸馏水 100mL	各种铁碳合金。在马氏体、贝氏体、奥氏体上沉积, 碳化物、氮化物不沉淀, 呈白色
2	焦亚硫酸钾 3g, 蒸馏水 100mL (Beraha 试剂)	碳钢、合金钢。铁素体晶粒着色, 显示带状组织
3	冷饱和硫代硫酸钠水溶液 50mL, 焦亚硫酸钾 1g (Klemm 试剂)	铸铁和碳钢, 铁素体着色, 碳化物、磷化物、氮化物呈白色
4	冷饱和硫代硫酸钠水溶液 50mL, 焦亚硫酸钾 5g (Klemm 试剂)	高锰钢、锰铬钢。ε-马氏体呈白色, 铁素体着色, 碳化物、磷化物、氮化物不着色
5	焦亚硫酸钾 3g, 氨基磺酸 1g, 蒸馏水 100mL (Beraha 试剂)	铸铁、碳钢、合金钢和锰钢。铁素体着色, 碳化物、磷化物、氮化物呈白色, 使用 3~4h 试剂失效
6	焦亚硫酸钾 3g, 氨基磺酸 1g~2g, 氟化氢铵 0.5g~1g, 蒸馏水 100mL (Beraha 试剂)	铁素体及奥氏体不锈钢、锰钢、工具钢。铁素体或奥氏体着色
7	盐酸 20mL, 蒸馏水 100mL, 焦亚硫酸钾 0.5g~1g (Beraha 试剂)	奥氏体不锈钢、马氏体时效钢及沉淀硬化钢

5 表面复型

5.1 目的

良好的表面制备是得到令人满意的表面复型的必要条件。本导则提供的制备方法适用于蠕变孔洞检验等电厂金相特殊需求, 可满足对蠕变范围内运行的高温部件进行状态检验和寿命评估的要求, 一般性金相检验亦可参照本方法进行或适当简化。

5.2 健康和安全要求

制作过程中涉及磨光、化学制品使用和经常在空间/高度受到限制的部位工作等问题。应特别注意在所有时间内保证操作人员的安全:

- 使用的全部化学制品 (溶液和浸蚀液) 都应有安全使用说明;
- 全部复型操作过程都应在通风良好的工作区域进行;
- 磨光时, 应采用适当的眼睛/耳朵和呼吸保护措施。

5.3 准备工作

5.3.1 现场复型设备

现场复型所需携带的设备和用品参见附录 A。

5.3.2 准备工作

5.3.2.1 磨光用具

使用电动角向磨光机、拍打式磨光机等。制备工序通常需要用 80 号和 180 号砂轮 (砂盘)。

使用手持式电钻, 加特制磨光头固定砂纸片 (或条), 采用 120, 240, 400, 500, 600 (800) 粒度标号砂纸以垂直或水平方向进行细磨。

5.3.2.2 磨光头

手电钻打磨用特制磨光头的推荐制作工艺如下: 选用适当大小的橡胶瓶塞, 用刀片将小头的直径进一步消减至 $\phi 25\text{mm}$ (一般同时制备 $\phi 15$ 、 $\phi 20$ 、 $\phi 30$ 等不同尺寸磨头, 以备在各种场合使用); 在大头的中心用钻床加工 $\phi 6\text{mm}$ 的孔, 深度约 20mm; 选择长 70mm 一段 $\phi 6\text{mm}$ 钢棒, 在橡胶瓶塞孔内滴入少量 502 等强力快干胶, 将钢棒插入迅速固定, 待完全干燥后即可使用。磨光头加工尺寸示意图见图 1。使用时在磨光头的头头粘贴磨光砂纸。

由于部件形状和空间的限制, 有时采用侧面粘贴磨光砂纸的方法磨光部件, 这时的磨光头侧面加

工成等直径的柱状。

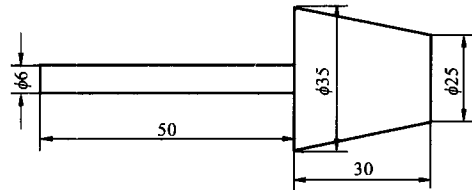


图 1 磨光头加工示意图

5.3.2.3 抛光准备

常用的抛光方法有机械抛光、化学抛光和电解抛光等多种。一般性金相检验时可采用化学抛光方法，选用表 7 的试剂及规范进行抛光操作。采用金相方法进行状态检验和寿命评估时则一般不使用化学抛光方法。常用的电解抛光试剂及规范见表 8。

机械抛光可使用上述或其他特制磨光头进行。在呢子布上分别用 14 μ m（可选）、7 μ m（或 5 μ m）、1.5 μ m（或 1 μ m）金刚石抛光膏依次抛光。研磨膏有针式或喷雾式两种，效果相似。

5.3.2.4 浸蚀剂

现场金相浸蚀剂与普通实验室金相检验完全相同。典型的低合金铁素体钢浸蚀剂是 2%~4%硝酸酒精溶液（Nital）。一般采用擦拭式浸蚀。

表 7 常用化学抛光试剂

序号	抛光液成分	适用材料	备 注
1	硝酸 30mL，氢氟酸 70mL，蒸馏水 300mL	铁及低碳钢	温度 60℃
2	草酸 250g，过氧化氢 10mL，硫酸 1 滴，蒸馏水 100mL	碳钢	抛光 6min
3	草酸 7g，过氧化氢 5mL（30%），蒸馏水 100mL	低、中、高碳钢	
4	氢氟酸 14mL，过氧化氢 100mL，蒸馏水 100mL	碳钢及低合金钢	抛光 8s~30s，立即水洗

表 8 常用电解抛光试剂及规范

序号	抛光液成分	抛光规范	适用材料	备 注
1	高氯酸 15%~20%，酒精 80%~85%（可加 10%甘油或水）	电流密度（0.1~0.3）A/cm ² ，小于 50℃，时间 15min~90min	钢铁	配制时缓慢加入，要求较高的槽压，抛光温度不能太高
2	磷酸 38%，甘油 53%，铬酐 6%，水 14%	电流密度（0.5~1.5）A/cm ² ，时间 3min~7min，温度 50℃~100℃	不锈钢	
3	磷酸 65%，硫酸 15%，铬酐 6%，水 14%	电流密度 1A/cm ² ，时间 2min~10min，温度 70℃~80℃	合金钢	
4	醋酸 700mL，铬酸 200mL，水 100mL	电流密度（0.1~0.2）A/cm ²	钢及铸铁	
5	磷酸 88mL，硫酸 12mL，铬酐 6g	电流密度（1~2）A/cm ² ，时间 1min~105min，温度 70℃~90℃	铝	

5.3.2.5 复型用溶剂

复型清洗剂用来清洗抛光残留物和浸蚀剂，包括水、丙酮、甲醇或乙醇等。在磨光和抛光阶段，可用水或工业酒精进行清洗，但在浸蚀和复型期间则只能使用分析纯溶剂，以免弄脏表面。采用金刚石抛光膏抛光时，建议用丙酮做最终清洗剂。

复型溶解剂一般应使用丙酮，当部件表面温度高于 60℃ 时，应使用乙基醋酸溶液。

5.3.2.6 复型材料

复型材料推荐使用醋酸纤维素薄膜，厚度约 35μm~50μm。也可使用有机载波片，厚度应小于 1.0mm。

5.3.2.7 复型保存

可使用生物载波片，在载波片的一面覆上双面不干胶带，在载波片的一端用记号笔编号（或在另一面覆上胶粘的标识纸条），用橡皮筋将两个载波片固定，以备保存复型用。

5.4 机械抛光的制备工序

5.4.1 焊缝处的复型部位尺寸

焊缝处制备的复型点尺寸应有 20mm~30mm 宽，长度延伸至两端母材至少 20mm。一般应显示母材/热影响区/焊缝金属/热影响区/母材的整体组织，一般性金相检验时也可只制备和显示单侧焊缝金属/热影响区/母材组织，接管座焊缝处的复型点宽度可降低到 20mm 以下。

5.4.2 磨光/抛光要求

采用手工或砂纸条磨光时，每道磨光/抛光工序后都应变动约 90° 磨抛方向。这样可方便地观察到任何来自前道工序的残余划痕。当手电钻磨光时，应在每道磨光/抛光工序后变换顺时针/逆时针移动方向。直到全部划痕（或前道浸蚀层）都被完全去除后，才能进行下道工序。记录划痕全部去除所需的时间，然后以相同时间完成磨光/抛光的下道工序。

避免抛光工具的过度用力，减少样品表面的变形。

5.4.3 表面层去除

打磨时，要求得到较平整的表面，后面的磨光/抛光工序则会使之越来越平整。另外，必须彻底去除任何表面氧化和脱碳层，一般应磨去表面约 0.5mm 深度，露出金属基体。当蠕变损伤不严重时，受损伤区域主要集中在外表层，这时应注意不能打磨过深。在厚壁焊缝部件上，焊接接头一般应去除加强层。在薄壁部件上，全部打磨后的减薄量应不超过原厚度的 5%。特别是薄壁锅炉管，必要时使用超声波测厚仪监测打磨厚度的变化。若不去除足够的材料就不能显示真实微观组织时，则最好取样。

5.4.4 粗磨（平整）

使用 80 号及 120 号砂纸（或砂轮），将表面打磨痕迹去除掉，在部件几何形状不允许时，可使用特殊尺寸的磨光砂轮。

5.4.5 细磨

粗磨后的工序是使用 240、400、500（甚至 600、800）号磨光砂纸进行反复细磨。

5.4.6 预浸蚀

细磨完成后，为了有助于去除材料变形层，应进行预浸蚀工序，尤其是焊缝，必须进行预浸蚀，以便清楚地显示出热影响区。一般使用表 1 给出的金相宏观浸蚀剂，浸蚀的时间取决于材料成分、状态和环境温度，浸蚀时间一般是 10s~30s。通常预浸蚀程度应较重些。

5.4.7 抛光

复型点制备的最终工序是用 14（10）μm、7（5）μm 和 1.5（1）μm 金刚石研磨膏进行抛光。14μm 金刚石研磨膏可视部位和细磨程度选用。1μm 抛光工序最少应重复一次，尤其是检验蠕变孔洞时细抛应充分（也可细抛+浸蚀交替进行），以便彻底去除变形层。在焊缝部位复型时，最终的抛光应在垂直于焊缝界面的方向上进行，以减少划痕和污染。

5.4.8 抛光后复型点的清洗

在复型点表面检验之前，使用清洗剂浸泡的棉球进行清洗。通常需使用几个棉球，每次擦拭均使用清洁的棉球。为了避免污染，擦拭应从复型点的中心开始向外环绕进行。擦拭时还应避开任何灰尘的污染。

5.5 浸蚀与复型

5.5.1 浸蚀

一般性金相检验只浸蚀一次，而用于状态检验和寿命评估时则至少应在不同浸蚀程度下进行 3 次浸蚀和复型。

第一次复型点浸蚀的程度应是轻度，以保证复型膜在充分照明条件下其组织变化状况能良好显示。象普通实验室金相检验一样采用擦蚀的方法用浸蚀剂进行浸蚀，浸蚀的时间一般是大约 7s~10s。浸蚀后使用溶剂彻底而均匀地清洗截面。

5.5.2 第一次复型

复型时把丙酮溶液用滴管滴到浸蚀后的复型点上，迅速而平整地覆上醋酸纤维素膜。表面张力的作用将保证膜与复型点表面紧密结合。当膜覆盖在点上后，尽快从一端开始，用手将复型里的气泡挤出。几何形状复杂时（如管子的接管座焊缝），用手指轻压是必要的，以保证复型与表面的紧密接触，注意不能用力过大。也可将丙酮滴于复型膜而不是部件上，然后再进行复型操作。如果部件或环境温度太高，可使用挥发性小的甲醇类溶剂。

5.5.3 复型揭取和保存

在复型膜干燥后，很容易被揭取。周围的环境条件决定了揭取复型的时间，通常的时间大约是 5min~15min。揭取后应立即进行标记。

复型膜揭取时应从复型点的一角开始剥离，避免撕裂。使用已经标记好的载波片，适当剪裁后，将复型膜背面直接粘到双面不干胶上，盖上不干胶原有的封纸，用手轻轻压平，并用另一片载波片夹住，用橡皮筋扎紧。

5.5.4 多次复型

第一次复型去除后，至少还应进行 2 次复型。首先进行“中度”浸蚀，然后进行第二次复型。再进行“重度”浸蚀，进行第三次复型。每次浸蚀时间相应增加 5s~10s。多次复型可保证整个焊缝界面的显微组织变化能良好显示。

焊缝的复型膜一般较长较厚，可从一边开始滴上丙酮使复型膜软化，然后在复型点上进行复型，对复型膜上轻施压力以保证其接触，并减少表面和膜之间的气泡。在足够干燥后去除。在复型上做部件的蒸汽流动方向记号，并且做标识和记录。

有时，如果上述的最终浸蚀仍显得不足时，或在去除复型时不小心将复型膜撕破，则应进行第 4 次复型。

5.5.5 直接观察和照相

在一般性金相检验时，可在浸蚀好的金相截面处用便携式金相显微镜直接观察和拍照。通常可观察最大 500 倍的图像，可拍摄最大 400 倍的照片。

5.5.6 硬度测量

在复型全部完成后，在每个复型点的母材和焊缝区域上进行硬度测量。由于时间制约，在复型之后不能立即进行硬度测量时，可将另一个复型膜覆盖到金相点上，以防止磨光点的氧化。

5.5.7 复型质量

在复型膜上，应无肉眼可看到的任何变色斑、折缝或气泡，以及划痕、油污、灰尘、表面变形等其他假象。

5.6 记录

5.6.1 复型标识

复型膜应确认编号是唯一的，在去除复型的同时必须立即进行标识。标识应包括下列信息：

- 复型号；
- 部件名称；
- 部位（焊缝）编号；

- 复型点部位；
- 取向；
- 试验人员；
- 浸蚀程度。

可用适当的缩写方式来书写复型标签。

5.6.2 现场记录

每个复型膜揭取的同时，应立即做详细记录。全部复型过程的详细叙述都应记录到现场记录本中。复型记录也应按顺序进行编号，并且有与复型膜对应的唯一编号。

任何与复型检验有关的现场过程和现象都应当记录下来，包括：几次复型情况；在复型制备时发现的裂纹、缺陷或其他的表面现象；特殊的焊缝界面形貌或焊缝修复的证据等。

5.7 电解抛光制备与复型

5.7.1 电解抛光制备过程

5.7.1.1 表面制备

表面制备与机械抛光基本相同，用 240 号~400 号砂纸进一步磨光。在细磨时，压力应减小，以使硬化效果减少到最小。在焊缝处进行宏观浸蚀以发现熔合线，然后使用便携式电解抛光机进行抛光，常用的电解抛光试剂见表 8。抛光机用磁铁固定于工件上，由泵输入电解抛光液，使之流过抛光表面，用水流动冷却。具体操作可参考仪器使用说明书。

5.7.1.2 浸蚀和复型

用浸蚀剂在复型部位上轻轻的擦蚀 25s~30s，当在母材上复型时，浸蚀时间较短（大约 25s）；当在熔合线上浸蚀复型点时，浸蚀时间应稍长些（大约 30s）。

复型方法同上。

5.7.1.3 抛光方法的比较

机械抛光可得到比电解抛光大复型的区域。在全部焊缝区域抛光后需做 2~3 个复型即可覆盖全焊缝的 5 个区域。

与机械抛光比较，电解抛光使复型检查的时间有明显的减少。在几何形状复杂时，电解抛光通常比机械抛光简便。焊缝处可挨个进行几个点的抛光。

如果发现裂纹，采用机械抛光复型是适合的。另外，在复杂情况下，也建议进行机械抛光复型。在大部分部件上，机械抛光和电解抛光同样适用于对蠕变孔洞和显微组织的老化进行评估。

6 电厂金相（表面复型）分析

6.1 定性分析

6.1.1 组织老化分析

6.1.1.1 常见珠光体钢的组织老化评定

在光学显微镜下，表面复型观察和照相使用的放大倍数一般为 400×。如果在电子显微镜（TEM）上检验，通常应镀金，或者镀金后喷碳以产生阴影，然后将复型浸于丙酮中，使醋酸膜溶解，留下复型的喷镀层，以便进行检验。

低合金钢显微组织的变化主要取决于服役温度下的使用时间，温度和时间差异往往造成使用后组织有明显差异。最明显的老化特征是碳化物析出粒子的粗化和珠光体球化。对 20G、15CrMo、12Cr1MoV 等珠光体钢材料，其球化评定可采用相关电力行业标准 DL/T674、DL/T773、DL/T787。精确的评价还必须参考其原始组织状态，如 12Cr1MoV 钢就有两种典型的铁素体/珠光体、铁素体/贝氏体组织，其变化规律在 DL/T773 标准中分别给出，见表 9。若已知或辨别得出其原始状态（铁素体/珠光体、铁素体/贝氏体），可对照相应的显微组织球化级别标准图片进行评级，珠光体钢一般分为 1~5 级。

表 9 12Cr1MoV 钢球化组织特征

球化程度	球化级别	组 织 特 征
未球化（原始态）	1	聚集形态的珠光体（贝氏体），珠光体（贝氏体）中的碳化物并非全部为片层状，有灰色块状区域存在
轻度球化	2	聚集形态的珠光体（贝氏体）区域已开始分散，其组成仍然较为致密，珠光体（贝氏体）保持原有的区域形态
中度球化	3	珠光体（贝氏体）区域内的碳化物已显著分散，碳化物已全部成小球状，但仍保持原有的区域形态
完全球化	4	大部分碳化物已分布在铁素体晶界上，仅有极少量的珠光体（贝氏体）区域的痕迹
严重球化	5	珠光体（贝氏体）区域形态已完全消失，碳化物粒子在铁素体晶界上分布，出现双晶界现象

6.1.1.2 非珠光体钢的组织老化评定

对非珠光体钢材料，晶内和晶界碳化物分布形态在长期高温服役后逐渐发生着变化，可采用综合考虑晶粒和晶界区域不同变化状况的方法进行老化评级，其变化也分为 5 级，如图 2 所示。其详细叙述见表 10。

表 10 非珠光体钢老化组织特征

老化程度	老化级别	组 织 特 征
未老化（原始态）	1	晶内析出大量细小弥散碳化物粒子，运行初期逐渐增多，晶界则较干净，贝氏体（马氏体）位向完整清晰
轻度老化	2	晶内碳化物粒子数量减少，且开始逐渐粗化，晶界出现单个细小碳化物，贝氏体（马氏体）位向开始分散
中度老化	3	晶内碳化物粒子数量进一步减少，尺寸粗化。晶界碳化物粒子增多，沿与应力垂直方向有方向性分布倾向，尺寸粗化，贝氏体（马氏体）位向明显分散
完全老化	4	晶内碳化物粒子数量减少，尺寸粗化，晶界碳化物沿与应力垂直方向呈链状分布，贝氏体（马氏体）位向已严重分散，出现大于 0.5 μm 的孔洞
严重老化	5	贝氏体（马氏体）位向严重分散，晶界变粗出现双晶界现象，晶粒破碎出现再结晶现象，出现链状孔洞

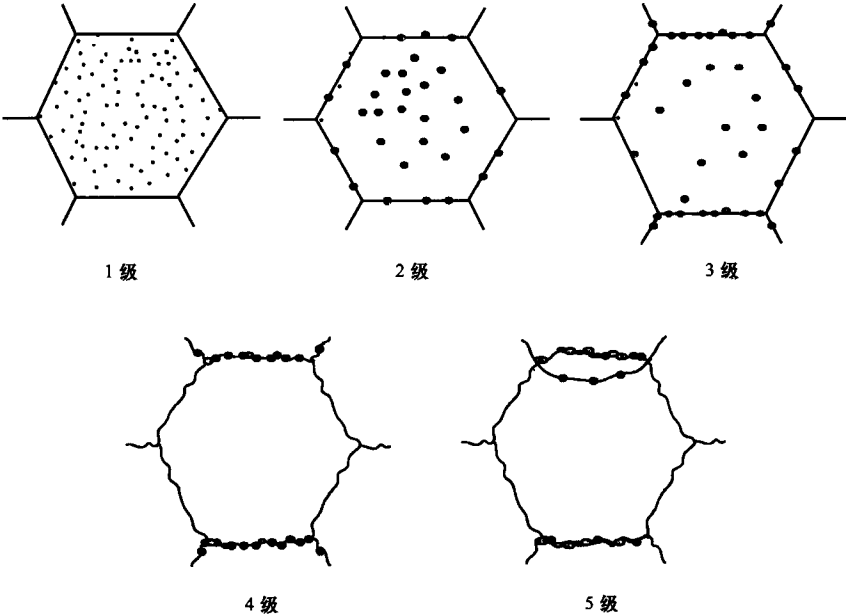


图 2 非珠光体钢综合考虑晶内和晶界变化的老化评级示意图

参照上述低、中合金非珠光体钢组织老化评级方法，附录 B 示出 T91 钢使用后的组织老化级别评定的例子。上述评定方法还可用于焊缝热影响区组织老化的评定。

6.1.2 脆化分析

长期使用的 CrMo、CrMoV、NiCrMoV 钢部件，使用中出現脆化现象，其中 25Cr2Mo1V 螺栓钢的脆化特征十分典型，根据晶界形成的碳化物网状分布形态和程度可评定脆化级别（黑色网状晶界），脆化组织分级及与性能的关系列于表 11。

可采用苦味酸溶液或电化学极化方法定量或半定量评定材料的脆化程度。

表 11 25Cr2Mo1V 螺栓钢脆化组织级别

级别	脆化程度	组织特征	AK J/cm ²	HB
1 级	无脆化	贝氏体或贝氏体+碳化物	≥58.8	≤277
2 级	轻微脆化	贝氏体+碳化物，有轻微的网状晶界	39.2~58.8	≥280
3 级	中等脆化	贝氏体+碳化物，有较细连续的网状或半网状晶界	19.6~39.2	≥320
4 级	严重脆化	贝氏体+碳化物，有较粗且连续的网状晶界	4.9~19.6	≥320

6.1.3 温度评定

研究表明，珠光体组织的球化与温度和时间相关参数（LMP）之间有明显对应关系。通过球化评定可估计部件金属的当量温度。原始组织状态对评定结果有明显的影响，评定时应充分考虑这一点，同时应注意区别向火面和背火面的差异。不同材料的组织老化动力学评定关系式如下。

a) 碳钢

球化级别分为 5 级，此时有：

$$E=20.0896 - 0.0010937LMP \tag{4}$$

$$LMP=T(15+lg\,t) \tag{5}$$

式中：

E ——球化级别；

T ——部件金属温度，K；

t ——使用时间，h；

LMP ——温度时间相关参数。

b) 15CrMo（1Cr-0.5Mo）钢

球化级别分为 5 级，此时有：

$$E=28.2944 - 2.241LMP \tag{6}$$

$$LMP=12370/T - lg\,t \tag{7}$$

c) 12Cr1MoV 钢

球化级别分为 5 级，此时有：

$$E=23.92 - 1.6LMP \tag{8}$$

$$LMP=14550/T - lg\,t \tag{9}$$

6.1.4 蠕变孔洞损伤评级

定性的蠕变损伤评级方法可用于下列显微组织区域：焊缝金属、粗晶热影响区、母材。也可部分应用于细晶热影响区，一般不适用于内部沿晶类裂纹（IV 型裂纹）和异种钢焊缝损伤区域。

采用国际上较普遍的评级方法，将蠕变损伤进一步细分为 5 级，一般按照不同材料和微观组织的适用范围分别给出评级，评级原则列于表 12。附录 C 示出 10CrMo910 钢蠕变损伤评级图的例子，可直接将实际组织形貌与标准照片进行比较评级。

评定时，在最高至 1000 倍下选择蠕变损伤最严重的 3 个视场，参考表 12 进行综合评级，允许将多种方法产生的蠕变孔洞评级结果相互比较后综合进行评定。

表 12 蠕变孔洞评级

级别	组织及损伤状况
0	未经运行的原始样
1	组织有所变化，但还未出现孔洞
2a	组织明显老化，有少量孤立的孔洞
2b	组织老化严重，有很多无方向性的孔洞
3a	蠕变损伤，有大量方向性的孔洞
3b	明显的蠕变损伤，孔洞呈链状或晶界分离
4	严重的蠕变损伤，有微裂纹出现
5	蠕变损伤非常严重，有宏观裂纹出现

6.2 定量分析

6.2.1 显微组织老化定量评定

显微组织的分布及形态变化主要取决于使用温度和时间，高温锅炉管由于使用温度较高，炉管的老化速度相应较快，老化特征也较明显，采用显微组织分析的方法可较准确地描述其材料老化状态和寿命消耗的过程。

主蒸汽管道等使用温度相对较低的部件，其老化过程相当长，变化速度相当缓慢，长期观察珠光体球化现象几乎没有明显改变，仅用球化来估计设备的使用状态是不够的。通过对晶内、晶界碳化物相的析出、粗化、方向性分布，以及晶粒变形和蠕变孔洞损伤等组织老化特征的变化分析，可掌握管道长期使用后的老化状态。

显微组织的老化可采用碳化物粒子尺寸变化的规律定量描述。晶粒内碳化物粒子高温下长大的规律为：

$$d_t^3 - d_0^3 = Kt \quad (10)$$

式中：

d_t ——使用 t 时间后粒子尺寸， μm ；

d_0 ——原始未使用时粒子尺寸， μm ；

K ——粒子长大速率；

t ——使用时间，h。

原始未使用时的粒子尺寸一般应实测，如无原始材料数据，电厂常用低合金钢材料可采用 $0.3\mu\text{m} \sim 0.36\mu\text{m}$ 平均值。

碳化物长大速率主要受使用温度的影响，即：

$$K = K_0 \exp(BT) \quad (11)$$

或

$$\ln K = \ln K_0 + BT \quad (12)$$

式中：

K_0 、 B ——材料常数。

由式 (12) 可知， $\ln K$ 与使用温度呈正比关系。式中材料常数可通过试验求得，从而给出碳化物长大动力学方程。

对于主蒸汽管道，可设其金属等效温度为一定，则其碳化物长大速率基本恒定不变，尤其是使用中后期相当稳定。因此，测定碳化物粒子尺寸大小可用来判断组织老化程度，而测定碳化物粒子粗化

速率则可用来判断组织老化速率。

设蠕变失效时碳化物粒子极限尺寸为 d_r ，有：

$$d_r^3 - d_0^3 = Kt_r \quad (13)$$

式中：

t_r ——部件蠕变寿命时间，h。

定义显微组织老化度用 Φ_d 表示（相当于蠕变损伤度），部件蠕变寿命为 t_r ，有：

$$\Phi_d = \frac{t}{t_r} \times 100\% \quad (14)$$

可推导出：

$$\Phi_d = \frac{1}{1 + \frac{d_r^3 - d_t^3}{Kt}} \quad (15)$$

由式（15）可知，若能通过试验准确测定各材料的碳化物粗化极限尺寸 d_r 值，则可采用上式定量评定部件的老化程度，计算蠕变寿命。电厂常用低合金钢材料的 d_r 值可取为 $0.5\mu\text{m} \sim 0.55\mu\text{m}$ 。

6.2.2 温度评定

碳化物粗化行为与温度和应力等条件有关，当应力一定时，则主要与温度因素相关，由此可评定部件金属的当量温度。评定时应注意区别向火面和背火面的差异。以下给出不同材料碳化物粗化动力学评定关系式。

a) 对 15CrMo (1Cr-0.5Mo) 有：

$$\ln K = 0.0375T - 44.3985 \quad (16)$$

b) 对 12Cr1MoV 有：

$$\ln K = 0.0344T - 42.507 \quad (17)$$

c) 对 T22 (2.25Cr-1Mo) 有：

$$\ln K = 0.0139T - 23.3219 \quad (18)$$

6.2.3 蠕变损伤定量评定

6.2.3.1 评定方法

蠕变损伤的定量评定主要有蠕变孔洞评定和晶粒变形评定两种。

蠕变孔洞的定量评定方法可应用于焊缝微观结构不同区域的分析（焊缝金属、粗晶热影响区、母材、细晶热影响区）。

6.2.3.2 A 参数方法

A 参数的定义为，在平行于最大主应力方向的割线上孔洞晶界的数量分数。

A 参数用光学显微镜进行测量，一般使用绿色光、40×物镜，配合 10×或 12.5×带有十字线的目镜，使总放大倍数为 400×或 500×。

使用带微米刻度的载物台，将复型放置在载物台上，沿着最大主应力方向直线移动载物台，如图 3 所示。将移动时与目镜十字线相交的每个晶界都按照规则计数为损伤的或无损伤的晶界，评定时使用以下规则。

规则 1：

计数的晶界仅为横截线与晶界相交点上下两侧所观察到的第一个三叉点之间的晶界。如果晶界延伸至观察的视场之外，则视场消失处也被看作为三叉点，即该晶界也是计数晶界。如图 3 中，晶界截点 J 示出了计数晶界的定义，该晶界位于首先遇到的 2 个三叉交点之间。

规则 2：

如果沿着所计数的晶界上含有一个以上的孔洞（或者微裂纹），包括占据三叉点位置的孔洞，则该晶界被评为损伤晶界，否则评为无损伤晶界。如果无法确定是否有孔洞，则不计数。图 3 中，根据本规则，晶界截点 A、B 和 C 属损伤晶界，晶界截点 D、G 和 J 是无损伤晶界。

规则 3：

同一晶界多次被截线相交时，每一交点均计数一次，并用整个晶界的损伤状态来进行评级。图 3 中，晶界截点 H 和 I 是在相同的晶界上被计数二次，必须评定为相同的损伤状态，即均为无损伤状态。

规则 4：

截线正好与三叉点相交时，可看作一个晶界截线而进行计数。其损伤或非损伤晶界的评定由三叉晶界中多数晶界的损伤状态来决定。图 3 中，晶界截点 E 和 F 是三叉点截线评级的例子，根据本规则“考虑多数情况原则”评定，E 为损伤晶界，而 F 为无损伤晶界。

统计损伤晶界的数量和无损伤的晶界的数量，可得到孔洞晶界分数 A 为：

$$A = \frac{N_D}{N_D + N_U} \quad (19)$$

式中：

A——孔洞晶界分数；

N_D ——损伤晶界的数量；

N_U ——无损伤的晶界。

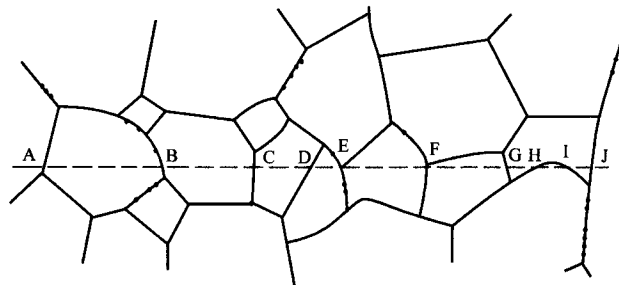


图 3 A 参数测量示意图

为了保证 A 参数评定的精度，通常最低计数 400 个晶界，可采用一个系列平行截线阵，分别在多个视场中完成。

首先分别计算单个截线上的 A_i 值，然后比较多个截线上测量结果的标准差，以便估计计数的准确性和观察区域的均匀性。为便于进行寿命计算，最终结果应统计给出 A 的平均值和其标准差。评定时应该注意：

- a) 视场中微观组织不均匀的每个区域都应分别进行评定；
- b) 应保证测量的视场中包含有损伤最严重的区域；
- c) 某一横截线的计算结果为最大值时，应该对该截线位置重新进行计数复验。

如果这些计算结果不能满足需要的精度时，则需要增加检验数量。

6.2.3.3 晶粒变形

电厂常用的 CrMo 钢等材料韧性较好，在长期的蠕变应力作用下，其晶粒很容易发生变形，并且变形主要集中于晶粒内，如图 4 所示。由于其变形是非常缓慢而微小的，必须采用定量分析的方法才能进行评定。

定义晶粒变形程度 W 和晶粒取向程度 E 为：

$$W = (L_a - L_v) / (L_a + 0.571L_v) \times 100\% \quad (20)$$

$$E = (P_v - P_a) / (P_v + 0.571P_a) \times 100\%$$

(21)

- 式中：
- W——晶粒变形程度；
 - E——晶粒取向程度；
 - L_a ——与应力方向平行的截线上测得的平均晶粒弦长；
 - L_v ——与应力方向垂直的截线上测得的平均晶粒弦长；
 - P_a ——与应力方向平行的截线上测得的晶界数量；
 - P_v ——与应力方向垂直的截线上测得的晶界数量。

测量时显微镜的基本要求同 A 参数测量，采用固定长度的测试网格，如图 5 所示，其总的截线长度是已知的。首先将网格截线方向（长度方向）与最大主应力方向平行进行测量，得到每条截线的晶界数量计数结果或平均晶粒弦长结果。然后旋转 90° 测量垂直方向的晶界数量或弦长。由式（20）、式（21）计算晶粒变形程度 W 和晶粒取向程度 E。如不能确定应力方向时，一般在轴向、周向及径向分别进行测量，以确定最大应力方向。

晶粒变形与显微组织老化度（蠕变损伤度）的关系列于表 13。若 E 和 W 的评定级别不一致时，以严重者为准则。

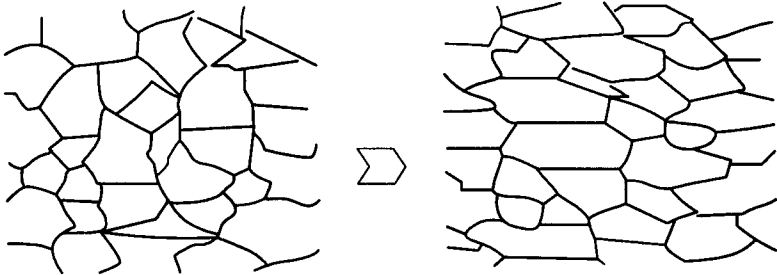


图 4 晶粒变形示意图

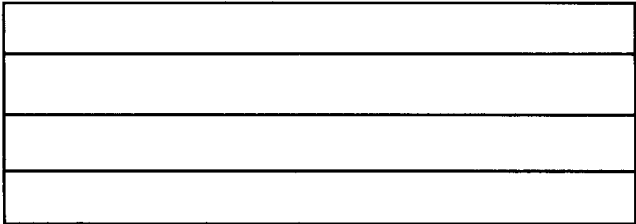


图 5 测试网格示意图

表 13 晶粒变形与材料老化的关系

晶粒变形级别	$E\%$	$W\%$	老化度%
1	$E \leq 5$	$W \leq 5$	0~50
2	$5 \leq E \leq 12$	$5 \leq W \leq 12$	50~65
3	$12 \leq E \leq 20$	$12 \leq W \leq 20$	65~80
4	$E > 20$	$W > 20$	80~100

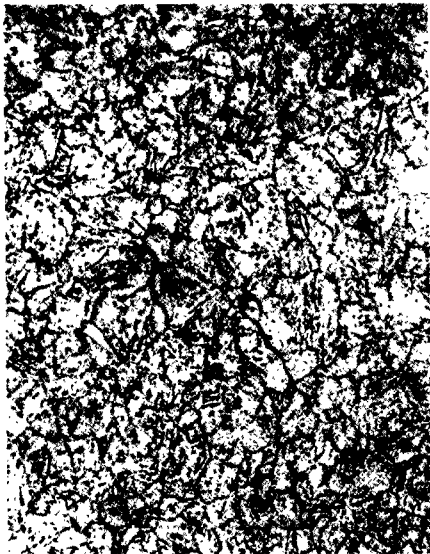
附 录 A
(资料性附录)
复 型 设 备 和 用 品

- A.1 人员安全设备(带护目镜的头盔/安全眼镜等)
- A.2 手套/耳塞子/防尘罩等
- A.3 角向磨光机(包括扳手/活扳手)
- A.4 砂纸振动磨光机或橡胶盘
- A.5 手电钻/电动或气动抛光机械
- A.6 电解抛光机
- A.7 电解抛光的辅助设备
- A.8 电线/插头
- A.9 吊灯/头灯/手电筒等照明设备
- A.10 常用小工具及记录本
- A.11 照相机+闪光灯
- A.12 复型材料(醋酸纤维素膜等)
- A.13 微型塑料袋/纸袋
- A.14 不粘胶标签/记号笔
- A.15 14(10)、7(5)、(2.5)、1.5(1)微米金刚石研磨膏/抛光喷雾剂
- A.16 80号、120号磨光砂轮
- A.17 片状或带状抛光机用120, 240, 400, 500, 600(800)号单面不干胶水砂纸/金相砂纸
- A.18 片状或带状单面不干胶呢子/长毛绒抛光布
- A.19 磨头/砂带轮
- A.20 棉球
- A.21 滴管
- A.22 甲醇/乙醇
- A.23 丙酮
- A.24 浸蚀剂
- A.25 喷射式清洗用塑料瓶
- A.26 带刻度的浸蚀剂盛放玻璃容器

附录 B

(规范性附录)

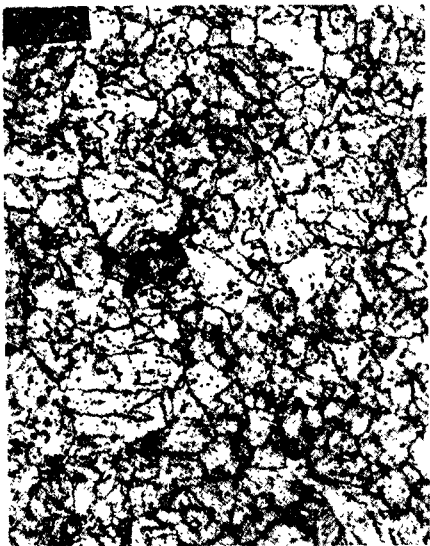
T91 钢组织老化评定级别图



2 级 200×



3 级 300×



4 级 400×



5 级 500×

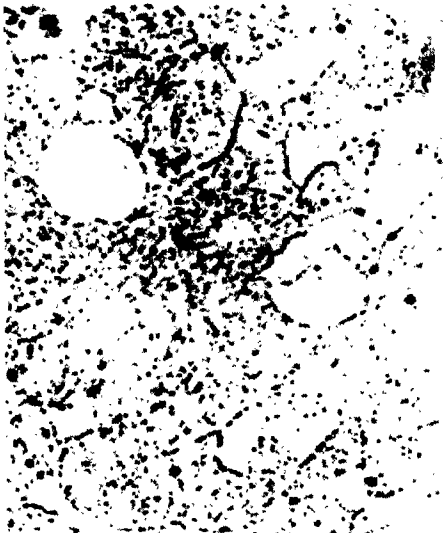
附 录 C
(规范性附录)
10CrMo910 钢蠕变损伤评定级别图



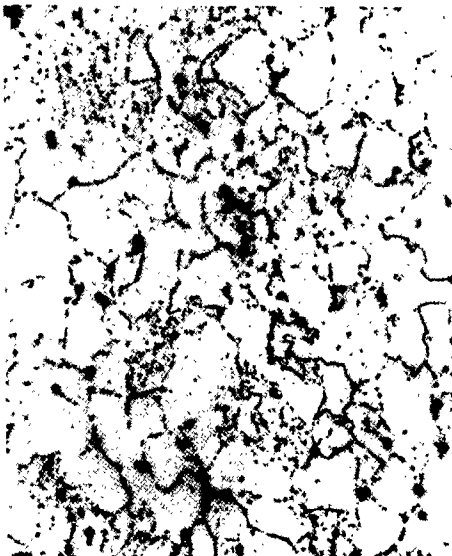
1 级 400×



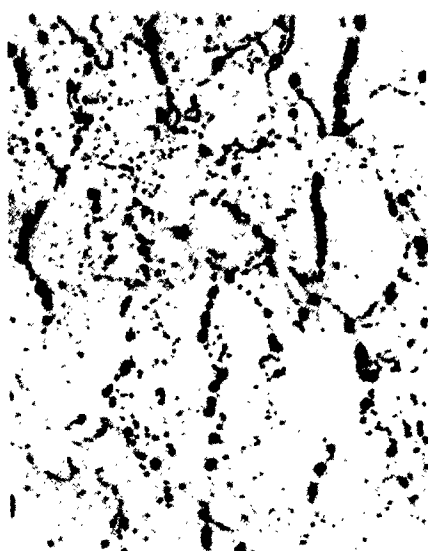
2a 级 400×



2b 级 400×



3a 级 400×



3b 级 400×
