

# 紧固件常用金相检验标准解读

文/广州南方紧固件研究所

随着科学技术的进步发展，金相显微镜不论在结构上，还是光学系统上都有很大的改进和提高。GB/T3098.1-2010《紧固件机械性能螺栓、螺钉和螺柱》标准的修订公布，强调对10.9级以上产品材料要求具有良好的淬透性，以保证紧固件螺纹截面的芯部在淬火后、回火前获得约90%的马氏体组织，而对于8.8级螺纹直径超过20mm的紧固件为保证良好的淬透性，需采用对10.9级规定的材料。因此，金相检验在紧固件行业得到快速发展，此文即针对紧固件常用金相检验：钢材的宏观检验、钢的显微组织评定、结构钢的金相检验、自攻螺钉的渗碳层深度等标准来进行解读。



## 概述

金相检验不仅是借助于金相显微镜来研究金属材料的内部组织，而且还通过肉眼或低倍放大镜下进行宏观检验。以前金相样品多采用机械抛光法制备，但随着金相检验技术的快速发展，电解抛光法制备金相样品已显出不可比拟的优势，且国外早已广泛应用该技术。电解抛光不仅可使材料表面平整明亮，还有其他好处，如表面应力降低、除去表面碳和氧化物、降低摩擦等；有必要修订GB/T 13298-1991《金属显微组织检验方法》，以纳入该项技术。

新修订的GB/T 13298-201X《金属显微组织检验方法》标准将适用于金相样品的电解抛光。主要技术内容包括电解抛光的特点及应用、一些常用电解抛光液的工作使用条件、安全防护措施、电解抛光常见问题及改进方法、电解抛光装置的使用及规定、试验方法及检验规则。

每一个相对应的紧固件性能、化学成分、金相组织和力学性能之间的关系，一般来说，随着晶粒尺寸的减小，材料的强度和硬度会提高；随着夹杂物含量的增加，材料的韧性则趋于降低；具有各向异性的晶粒力学性能与晶粒的择优取向有关；表面渗碳有效硬化层的性能取决于硬化层的显微组织和硬化层深度。因此，金相组织鉴别、晶粒度及夹杂物评定、有效硬化层深度测定等常用的金相检验手段成了材料工艺控制、质量保证和失效分析的重要工具。紧固件常用金相检验标准解读应用简述如下：

## 钢材的宏观检验

钢在冶炼或热加工过程中，由于某些因素（例如非金属夹杂物、气体以及工艺选择或操作不当等）造成的影响，致使钢的内部或表面产生缺陷，从而严重影响材料或产品质量，有时还将导致材料或产品报废。钢材中疏松、气泡、缩孔残余、非金属夹杂物、偏析、白点、裂纹以及各种不正常的断口缺陷等，均可以通过宏观检验来发现。宏观检验通常有硫印试验、酸蚀试验、塔形试验、断口检验等，在生产检验中，可根据检验的要求来选择适当的宏观检验方法。

## 酸蚀试验

酸蚀试验是显示钢铁材料低倍组织的试验方法，试验方法按国家标准GB/T226-1991《钢的低倍组织及缺陷酸蚀检验法》进行，这种方法设备简单、操作方便，能清楚显示钢铁材料中存在的各种缺陷，例如裂纹、夹杂、疏松、偏析以及气泡等。

酸蚀试验是利用酸液对钢铁材料各部分侵蚀的不同，从而清晰显示出钢铁的低倍组织及缺陷。根据低倍组织的分布以及缺陷存在的情况，可以知道钢材的冶金质量，通过推断缺陷的产生原因，在工艺上采取可行的措施，以达到提高产品品质的目的。

本标准规定了检验钢的低倍组织及缺陷的热、冷酸浸蚀法和电腐蚀法，本标准适用于钢的低倍组织及缺陷的检验。仲裁检验时，若技术条件无特殊规定，以热酸浸蚀法为准。该标准已实施20年了，钢的低倍酸蚀法及酸蚀液都有很大的更新，**目前中国正在争取将电腐蚀法纳入到ISO标准中，有必要对GB/T226标准进行修订，并为修订ISO 4969:1980国际标准提供技术支撑。**

钢的低倍组织及缺陷评定范围和评定规则可按GB/T1979-2001《结构钢低倍组织缺陷评级图》评定，该标准适用于碳素结构钢、合金结构钢、弹簧钢钢材（锻、轧坯）横截面试样的缺陷评定，该评级图有6套，分别适用于规定不同尺寸钢材的低倍组织和缺陷。钢中常见的宏观缺陷有：①一般疏松；②中心疏松；③锭型偏析；④中心偏析；⑤皮下气泡；⑥内部气泡等等。

评定各类缺陷时，以标准附录所列图片为准，评定时各类缺陷以目测可见为限，为了确定缺陷的类别，允许使用不大于10X的放大镜。当其轻重程度介于相邻两级之间时，可评半级，而对于不要求评定级别的缺陷，只判定缺陷类别。

## 其他

断口检验（GB/T1814-1979《钢材断口检验法》）、硫印试验（GB/T4236-1984《钢的硫印检验方法》）、塔形试验（GB/T15711-1995《钢材塔形发纹酸浸检验方法》）等，也是钢材的宏观检验技术。近年来，由于中国钢铁工业的技术进步，钢材在冶炼或热加工过程中的控制能力提高，钢的内部或表面产生缺陷越来越少，为了减少检验费用，紧固件行业多数企业不再进行此3类专案检查，本文即不再赘述。



## 钢的显微组织评定

### 1、钢中非金属夹杂物

GB/T10561-2005《钢材中非金属夹杂物含量的测定标准评级图显微检验法》规定了利用标准评级图谱评定、压缩比大于或等于3X的轧制或锻制钢材中的非金属夹杂物的显微评定方法、检验方法的选取及结果表示和试验报告等。一般钢中非金属夹杂物采用标准中的ISO评级别图谱进行测定，标准的附录A列出了ISO标准评级别图谱，这些评级图片相当于100X下纵向抛光面上的面积0.5mm<sup>2</sup>的正方形视场。根据夹杂物的形态，标准图谱分A、B、C、D和DS五大类，标准等效采用ISO4967：1998（E）《钢材中非金属夹杂物含量测定--标准评级图显微检验法》。

非金属夹杂物的取样要有代表性，如果取样不合理，就有可能造成非金属夹杂物的漏检。为了保证检验面的平整，避免试样边缘出现圆角，可用夹具或镶嵌的办法加以保护。夹杂物试样应经过砂轮打平、粗磨、细磨（金相砂纸）；试样抛光时，注意防止夹杂物剥落、变形和抛光面被污染，可选用合适的抛光剂和抛光工艺，严格执行操作规范。在显微镜100X下看到的是一个无划痕、无污物的镜面。

### 2、金属平均晶粒度

GB/T6394-2002《金属平均晶粒度测定方法》规定了金属组织的平均晶粒度表示及评定方法。本方法主要适用于单相晶粒组织，但经具体规定后也适用于多相或多组元的试样中特定类型的晶粒平均尺寸的测量。标准中使用晶粒面积、晶粒直径、截线长度的单峰分布来测量试样的平均晶粒度，这些分布近似正态分布，测量方法仅适用于平均晶粒

度的测量，不适用于试样三维晶粒度的测量，即立体晶粒的测量。

晶粒度是指晶粒大小的量度，通常使用长度、面积或体积来表示不同方法的评定或测量晶粒大小，而使用晶粒度级别数表示的晶粒度与测量方法及计量单位无关。晶粒度的测量方法常用比较法、面积法、截点法，实际测量的放大倍数下晶粒度级别评定的规定按照GB/T6394-2002标准。

真正影响钢材使用的是钢的奥氏体实际晶粒度，而不是「本质晶粒度」。晶粒度是奥氏体化温度和时间的函数，评定的不是在某任意规定温度下的晶粒大小，而是在热处理中实际执行奥氏体化的条件下晶粒的大小，这就是常规的「奥氏体晶粒度」。通过适当的显示方法将晶粒显现出来，视晶粒分布情况与状态采用相应的测量方法，美国ASTM标准就设有一系列测量方法的标准。现行的GB/T6394-2002《金属平均晶粒度测定方法》就是参照美国ASTM E112制定的；与即将发行的GB/T××××《测定金相试面上最大晶粒（ALA晶粒度）的试验方法》和GB/T××××《表徵双重晶粒度标准试验方法》（参照ASTM E930和ASTM E1181制定的，也已经有国内相关单位制定或转化为国家标准，并通过审定，有待发布实施），将组成完整晶粒度测量标准系列。

### 3、钢的显微组织评定

GB/T13299-1991《钢的显微组织评定方法》规定了带状组织及魏氏组织的金相评定方法，标准适用于低碳、中碳钢的显微组织评定。评定带状组织和维氏组织的放大倍数为100X，评定视场直径为80mm，采用与标准评级图相比较方法进行。

评定珠光体钢中的带状组织，要根据带状铁素体数量增加，并考虑带状贯穿视场的程度、连续性和变形铁素体晶粒多少的原则确定，含碳量在0.31%~0.50%钢适用C系列带状组织评定图；含碳量在0.16%~0.30%钢适用B系列带状组织评定图（0~5级）组成。

评定珠光体钢过热后的魏氏组织，要求根据析出的针状铁素体数量、尺寸和由铁素体网确定的奥氏体晶粒大小的原则确定，含碳量在0.31%~0.50%钢适用B系列魏氏组织评定图（0~5级）组成。

### 4、钢的脱碳层深度

国家标准GB/T224-2008《钢的脱碳层深度测定法》适用于测定原材料及其螺栓成品的脱碳层深度。脱碳层深度测定可分为金相法、硬度法及化学分析法三种。

#### 金相法

金相法是在光学显微镜下，观察试样从表面到心部随著碳含量的变化而产生的组织变化。

#### ※试样的选取与制备

根据GB/T3098.1-2010《紧固件机械性能螺栓、螺钉和螺柱》，选取的试样在距螺栓螺纹末端约一个公称直径（1d），即磨面为横向1/2截面处，截取试样时不能使检测面受热而发生变化。试样边缘不得倒圆、卷边，试样应该镶嵌或固定在加持器内，用3%硝酸酒精进行腐蚀，以显示钢的组织结构。

#### ※脱碳层的测定

总脱碳层的测定—在中碳钢、低合金钢中是以铁素体与其他组织组成的相对量变化来区分的，借助于测微目镜或直接在显微镜毛玻璃屏上测量从表面到其组织和基体组织已无区别的那一点距离。对每一试样，在最深的均匀脱碳区一个视场内，应随机进行几次测量（至少需5次），以这些测量值的平均值作为总脱碳层深度。全脱碳层的测定—全脱碳层是指试样表面脱碳后得到的全铁素体组织，因此，测量时应从表面测至有渗碳体或有珠光体出现的那一点，或测量产生全铁素体组织的渗度为全脱碳层深度。

#### 硬度法

硬度法测脱碳层分为显微硬度法和洛氏硬度法。



### 显微硬度法

显微硬度法仅适用于螺距P大于1.25mm的螺纹，用300g负荷显微维氏硬度计，测量在螺纹横截面螺纹中径线上，第2点的维氏硬度值应等于或大于第1点硬度值减去30个维氏硬度单位，若低于30个维氏硬度单位，则计算为脱碳层深度。

### 洛氏硬度法

用洛氏硬度计测定时，直接在试样的表面上测定。洛氏硬度法根据GB/T230.1测定洛氏硬度值HRC，只用于判定产品是否合格。

## 5、测定碳含量法

### 化学分析法

用化学分析法测定逐层剥取的金属屑含碳量，以确定脱碳层深度。逐层剥取每一层的深度为0.1mm厚，亦可用光谱分析的方法测定逐层碳含量，直到和心部基体含碳量相同的位置，此位置到表面的垂直距离即为总脱碳层深度。

### 光谱分析法

将平面试样逐层磨削，每层间隔0.1mm，在每一层上进行碳的光谱测定，只适用于具有合适尺寸的平面试样。

表1 马氏体显微组织等级说明

马氏体等级	显微组织
1	隐针马氏体，细针马氏体，铁素体不大于5%
2	细针马氏体，板条马氏体
3	细针马氏体，板条马氏体
4	板条马氏体，细针马氏体
5	板条马氏体，针状马氏体
6	板条马氏体，针状马氏体
7	板条马氏体，粗针马氏体
8	板条马氏体，粗针马氏体

## 中碳钢与中碳合金结构钢马氏体等级

标准JB/T9211-2008《中碳钢与中碳合金结构钢马氏体等级》适用于中碳钢与中碳合金结构钢整体淬火或淬火后200℃以下回火的马氏体组织的检验方法以及马氏体金相图片的比较法。试样制取及侵蚀与一般金相样品相同，该标准规定马氏体组织的等级为1~8级，马氏体照片放大倍数均为500X，在评级过程中只需将样品放大500X后的马氏体组织与标准评级图片进行对比，即可知道该样品的马氏体级别，关于马氏体组织等级说明见表1。

由于奥氏体化温度不同，马氏体形态和大小不一样。1级属于奥氏体化温度偏低，淬火组织是隐针马氏体，细针马氏体和不大于5%的铁素体（体积分数），而8级则属于过热组织，是粗大的板条马氏体+粗片针马氏体。正常淬火时控制在2-4级，其组织为细小的板条马氏体+片状马氏体。

## 结构钢的金相检验

高强度紧固件在淬火加高温回火后具有良好的综合力学性能，有较高的强韧性，经这种热处理后称为调质处理，常用的钢材通常是中碳优质碳素钢、低中合金钢，如SWRCH35K、ML35、35#、45#（生产8.8级螺栓）和40Cr、SCM435、ML35CrMo、30CrMnSi（生产10.9级螺栓）以及35CrMoV、ML42CrMo、40CrNiMo及40CrMnMo（生产12.9级螺栓）钢等。

### 1、调质的金相检验

调质是将钢加热在AC3以上30℃~50℃，当工件淬火温度正常，保温时间足够，且冷却速度也较大，过冷奥氏体在淬火过程中未发生分解，那么淬火后得到的组织应是板条状马氏体和针片状马氏体。在高温回火过程中，马氏体中析出碳化物，获得回火索氏体，回火索氏体组织实际上是在 $\alpha$ 相基体上分布有极小的颗粒状碳化物。回火温度根据高强度紧固件性能要求，一般在450℃~600℃之间，具体范围视钢的化学成分有所区别。因为合金元素的加入会减缓马氏体的分解、碳化物的析出和聚集，以及残余奥氏体的转变等过程，回火温度将移向更高。

### 2、调质组织评级图与评定方法

确保螺栓高强度螺栓淬火时奥氏体化充分、淬火组织均匀，无未溶铁素体及非马氏组织外，应充分重视淬火态组织的金相分析。对10.9级以上高强度螺栓而言，淬火组织的均匀性尤为重要，国外的高强度螺栓热处理很重视充分奥氏体化，确保其组

织的均匀性，以获得最佳的强度与塑性的配合，保障螺栓服役时的安全。中国高强度螺栓制造商对此尚未引起重视，普遍存在的问题是螺栓淬火加热保温不足，奥氏体化不充分。

国家标准GB/T13320-2007《钢质模锻件金相组织评级图与评定方法》，适用于经过调质处理、正火处理、等温正火处理、锻后控冷处理的结构钢模锻件，不适用于锻件脱碳、过热、过烧等组织的评定。标准要求试样应在冷态下用机械方法制取，若用热切时，必须将热影响区完全去除。在制取样品的过程中，不能出现因受热而导致的组织改变现象。试样抛光后用体积分数2%~5%的硝酸酒精溶液侵蚀。

金相组织按1~8级评定，该标准第三组评级图，适用于结构钢调质处理的锻件，尤其是高强度紧固件的调质检验。被评定的调质组织介于级别之间时，以下一级为判定级别，例如大于3级小于4级则判为4级。

调质紧固件的组织在金相显微镜下用500X观察，合格级别由供需双方协商约定，没有约定的以1~4级为合格。生产实践表明，在低温环境下的紧固件，1~3.5级为验收标准。如果在评级时有争议，可以参考力学性能检验结果进行判定。

### 3、弹性垫圈的金相检验

普通常用的弹性垫圈材料是碳素结构钢或低合金碳簧钢，含碳量在0.55%~0.75%范围，常加入Si、Mn、Cr、V等合金元素，Cr和Mn主要是提高淬透性，Si提高弹性极限，V提高淬透性和细化晶粒。常用的材料有60、70、65Mn、60Si2Mn、50CrVA等。

弹性垫圈是利用其弹性变形来吸收和释放外力，要求成品具有高的弹性极限，较高的屈强比，高的疲劳强度和足够的塑性及韧性。一般淬火温度控制在Ac3+ (30°C-50°C)、回火温度控制在400°C~500°C。在实际生产中，奥氏体晶粒的长大通常是由于淬火过热引起，虽然正常回火处理，钢的强度影响不明显，但塑性及韧性则大大降低，以致影响弹性垫圈的正常使用。因此，金相检验时可根据实际情况适当掌握马氏体组织的合格界限。根据日常生产经验，矽锰钢弹性垫圈淬火后马氏体组织为细马氏体或较细马氏体，参考JB/T9211-2008标准1~4级马氏体合格。其奥氏体晶粒应小于5级，大于5级晶粒度的马氏体组织为较粗马氏体或粗大马氏体。检验淬火马氏体时，用3%硝酸酒精溶液侵蚀，在500X进行观察及评定，经正常淬火回火后的组织为回火托氏体，出现的非马氏体组织，未溶铁素体或上贝氏体组织应不大于10%。

## 自攻螺钉的渗碳层深度

自攻螺钉渗碳后对渗层深度的常用测定方法有2种：金相试验法和显微硬度法。

### 1、金相试验法

根据GB/T3098.5-2000《紧固件机械性能自攻螺钉》标准，渗碳层深度试验应在螺纹侧面上进行，测量点应在牙顶和牙底的距离之半处，对小规格则应在牙底上进行试验。过共析层+共析层+1/2亚共析过渡层作为渗碳层总深度，这种测量法与断口法和显微硬度法比较一致，应用较广泛。

### 2、显微硬度法

是从淬火后的牙顶和牙底的1/2处测量显微硬度值的分布梯度。自攻螺钉有效硬化层深度 $\leq 0.3\text{mm}$ ，采用标准GB/T9451-2005《钢件薄表面总硬化层深度或有效硬化层深度测定》仲裁试验，测量位置应在螺纹轮廓上。用试验力为300g的显微维氏硬度法进行，渗碳层深度应自超过实际芯部硬度30HV0.3的点起计算，若是采用碳氮共渗工艺，层深检测方法亦按以上方法操作。

随着材料科学的高速发展，各种新材料在紧固件行业使用，对材料结构强度和抗疲劳强度的要求越来越高，对金相显微镜检测中定量分析的精度要求提出了新的期待。金相分析对检测紧固件材料组织，保证产品质量是不可缺的重要手段。金相组织的分析，不仅有组织识别还有评定，既有定性又有定量、半定量的检测，其依据是相关的国家标准或行业标准。本文所解读的是目前的常用标准，由于标准有时效性，大家在具体应用时请注意标准的有效期。