

# 钢的宏观低倍缺陷——轴心碳偏析的研究

武汉重型铸锻厂 夏正良

**【提要】** 针对工厂生产检验中发现的轴心碳偏析缺陷,进行了试验和调查研究。根据试验和调查结果,认为造成轴心碳偏析的原因在于浇注时保护渣的配比和加入方法不当或浇注太快。为防止出现这一缺陷采取相应措施后,缺陷发生率降低到1/7。

## 一、引言

1986年,我们在生产检验低倍试验中,发现有轴心碳偏析缺陷的试片达几十片之多。其钢种既有碳钢,也有合金钢。有的经多次取样试验,缺陷仍然存在,花费了大量的机加工时间,延长了试验周期,影响了生产。人们对该缺陷的本质及其影响的看法也不一致。有的认为轴心偏析只是一般的化学成分偏析,对于大钢锭来说是难以避免的;有的认为该缺陷仅存在于心部,对使用性能影响不大,可不予考虑等。因此,弄清轴心碳偏析的本质,了解其宏观和微观的特征,摸索该缺陷对机械性能、热处理性能的影响程度,同时分析形成该缺陷的原因,提出消除(或减少)该缺陷的改进措施,这对生产和检验无疑是非常必要的。

## 二、试验方案

(1) 调查所有缺陷试片对应炉号的钢锭浇注情况。

(2) 选取某轴冒口端试料部分为研究对象。试料的材料为45钢,已经过锻后热处理,为正火+回火状态。试料取样部位及尺寸如图1所示。

(3) 各种试验按图2~4的示意图取样。图中画有剖面线的试样为拉力试样,未画剖面线的为冲击试样。1/2R和1/3R分别表示距轴表面1/2和1/3半径处。

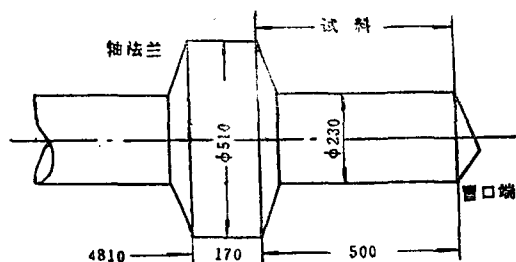


图1 试料取样部位及尺寸

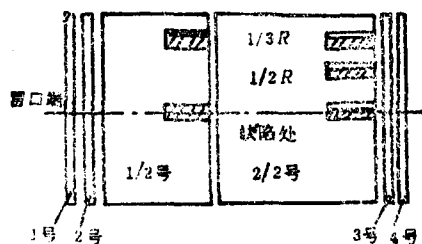


图2 各种试片及纵向性能取样部位

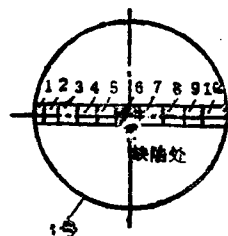


图3 金相及化学取样部位

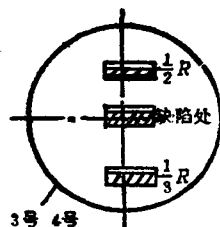


图4 横向性能取样部位

1号试片为低倍试片，金相及化学试验试片。2号试片为低倍试片，纵向断口试片。3号和4号试片为低倍试片，横向机械性能试片。1/2号试片为超声波探伤及热处理试验试片。2/2号试片为纵向机械性能试片。

### 三、试验内容及结果

#### 1. 宏观检验

将1~4号横向试片进行低倍试验（热酸蚀），其结果如表1和图5所示。

将2号试片调质后检验纵向断口，其结果如图6所示。

将1号、4号试片进行硫印试验，其结果如图7所示。

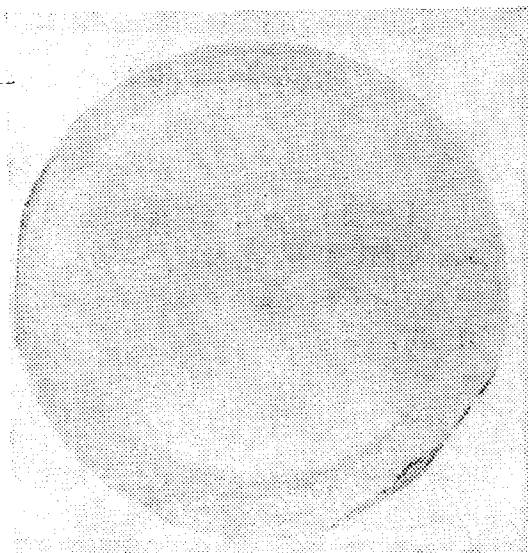


图5 1号试片低倍组织

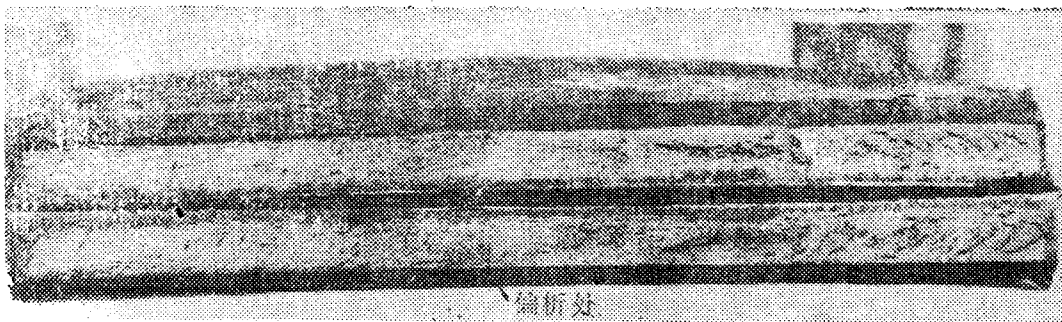


图6 2号试片纵向调质断口



图7 1号试片硫印图

表1 低倍试验结果

试片号	一般疏松	中心疏松	其他缺陷
1号	0.5级	0.5级	轴心碳偏析
2号	0.5级	0.5级	轴心碳偏析
3号	0.5级	0.5级	轴心碳偏析
4号	0.5级	0.5级	轴心碳偏析

试验表明，轴心碳偏析缺陷一般在横向酸浸试片的中心或稍离中心处，有易腐蚀区出现，与基体有明显的界线（有时受成分差异和腐蚀程度的影响，界线不明显）与疏松孔洞无对应关系，也不呈暗黑色小点。该处

的含硫量高。调质断口上，该处的晶粒较基体细。

## 2. 化学成分分析

(1) 在1号试片上按图3取样，在岛津GVM-100直读光谱仪上作化学成分分析，结果如图8所示。

(2) 进一步对缺陷所在试样“6”的碳、硫含量进行分析，其结果如图9所示（所分析的点的位置见图10）。

(3) 在距1号试片约420mm处的缺陷处取样分析，其结果是：C 1.21%，S 0.061%，P 0.018%，Si 0.38%，Mn 0.72%。

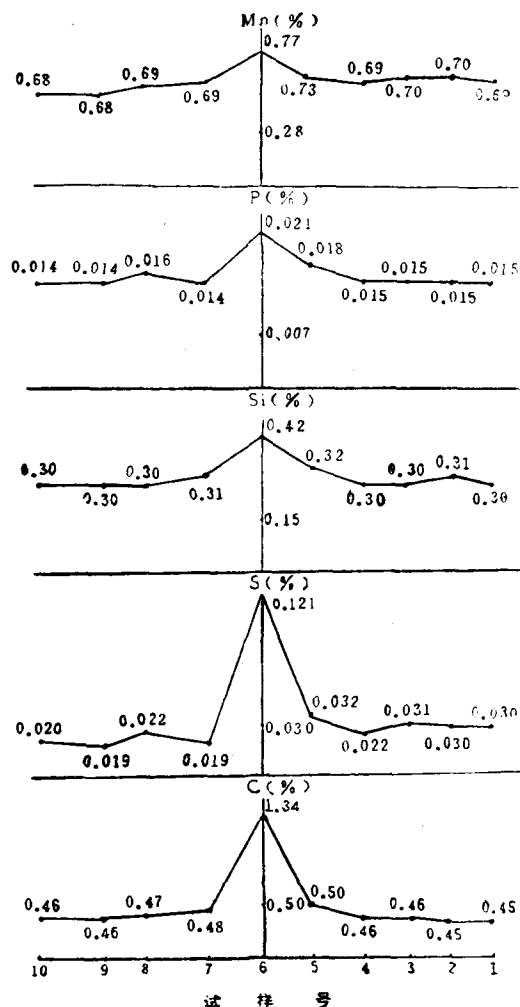


图8 1号试片化学成分沿横截面分布情况

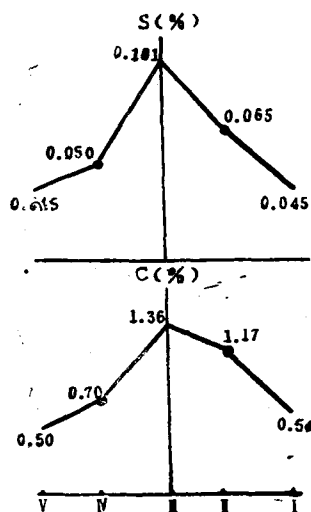


图9 1号样“6”碳、硫分布情况

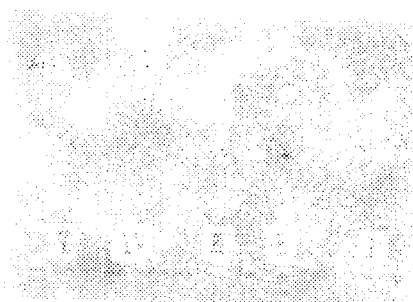


图10 1号样“6”分析碳、硫  
取点位置 1.25×

(4) 分析保护渣的碳、硫含量，结果分别为28.52%及0.101%。

化学分析说明，1号试片的成分偏析是很大的。众所周知，大型钢锭有较大的成分偏析，它是由于钢锭结构及钢液选择结晶的结果。首先凝固的钢液纯度较高，其周围尚未凝固的钢液则会有较多的低熔点成分。成分偏析以C、S、P最严重。据国内解剖55t钢锭资料介绍，偏析最严重的冒口区所在横截面上的C、S、P的偏析率，分别为45%、10%、7%。但是，象图8那样，同一横截面上的C、S、P的偏析率分别为193%、255%、17.5%的严重程度，就不能用钢锭结晶的成分偏析来解释了。造成如此之大的

成分偏析率只能是外来的高碳、高硫物质产生的（成分偏析率为该成分的最大含量与最小含量之差除以技术要求之含量的百分数）。

从图9可以看出，C、S的含量从某点到两边逐渐下降，似有从某点向外扩散的特点，扩散范围约为半径25mm的区域。这再次说明存在有高碳、高硫的物质。

保护渣的成分分析说明其含碳、含硫量均高。

从距1号试片420mm缺陷处的分析结果来看，该轴的轴心碳偏析程度是严重的。

### 3. 机械性能试验

分别在1/2号、2/2号试片上取纵向试样，3号、4号试片上取横向试样作机械性能试验，结果如表2所示。拉棒和冲击断口的形貌见图11~18。

从上表2可以看出1/3R处的纵向、横向

机械性能指标均达到了交货要求，但缺陷处的强度指标大大升高，而塑性指标显著降低： $\delta$ 值下降50%（横向）到80%（纵向）， $\psi$ 值下降45%（横向）到80%（纵向），横向 $\sigma_K$ 值下降80%。这对产品的使用性能显然存在相当大的危险性。

从断口的形貌看，缺陷处的拉伸断口，无论是纵向的还是横向的，无论是正火+回火状态还是调质状态，都是齐平的，呈脆性特征。这说明一旦受到短时应力，将会发生瞬时断裂，是十分危险的。

### 4. 金相检验

观察1号试片样“2”样“3”（约为1/3R处），结果是：非金属夹杂物级别较低，氧化物、硫化物均为1.5级；组织为铁素体+珠光体，晶粒较细，为6~7级（图19）。

表2 机械性能试验值

试片号	状态	取样方向	取样部位	$\sigma_b$ (MPa)	$\sigma_s$ (MPa)	$\delta$ (%)	$\psi$ (%)	拉伸断口形貌	$a_K$ (J/cm <sup>2</sup> )
1/2	正火+回火	纵向	$\frac{1}{3}$ R	621	337	26	46	半杯	51, 51
			$\frac{1}{2}$ R	613	328	27	46	半杯	55, 55
			缺陷处	823	344	4.6	9.5	齐平	42, 45
3 4		横向	$\frac{1}{3}$ R	611	320	22	33	坡形	24, 36
			$\frac{1}{2}$ R	616	316	19	31	坡形	19, 37
			缺陷处	630	335	12	18	齐平	4, 25
2/2	调质	纵向	$\frac{1}{3}$ R	764	501	19	52	半杯	
			缺陷处	109	947	7.4	13	齐平	
交货要求	正火+回火	纵向	$\frac{1}{3}$ R	510	265	18	40		49

观察 1 号试片样“6”(缺陷处), 硫化物夹杂达 4 级(图20), 金相组织特征是: 高碳区为渗碳体+珠光体, 渗碳体颗粒状、小块状, 呈堆集态分布于晶内和晶界; 高碳区周围, 随含碳量的降低而呈过渡性变化的特征, 依次呈网状、半网状分布于晶界的渗碳体+珠光体→全珠光体→铁素体(网状)+珠光体→铁素体(半网、块状)+珠光体,

组织特征如图21所示。为证明高碳区的组织为渗碳体而不是铁素体, 用碱性苦味酸钠热蚀试样, 渗碳体呈暗褐色, 铁素体呈白色(图22)。

金相观察表明, 轴心碳偏析区的金相组织特征是呈过渡性变化的金相组织, 硫化物级别高是轴心碳偏析的特征之一。



图11 1/3R处纵向断口

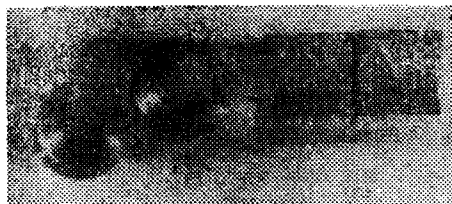


图12 缺陷处纵向断口



图13 1/3R处横向断口

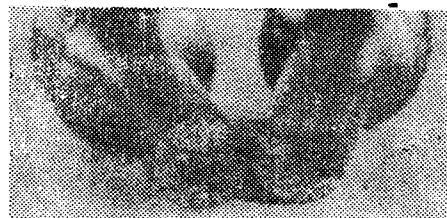


图14 缺陷处横向断口

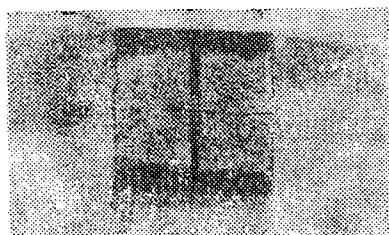


图15 1/3R处横向调质断口

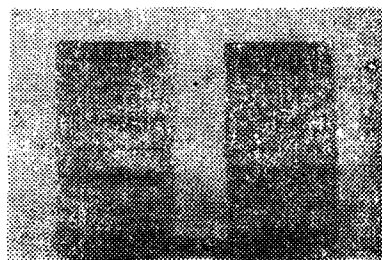


图16 缺陷处横向调质断口

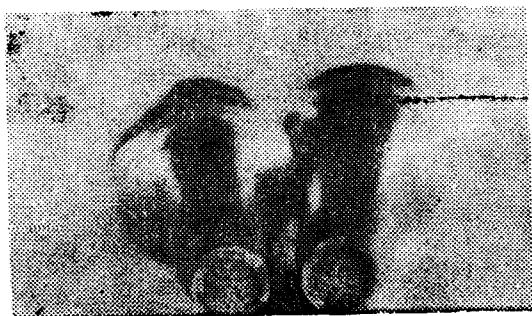


图17 1/3R处纵向调质断口



图18 缺陷处纵向调质断口

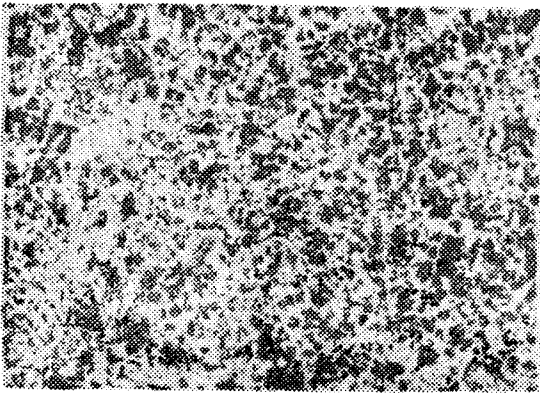


图19 基体组织 100×  
铁素体+珠光体

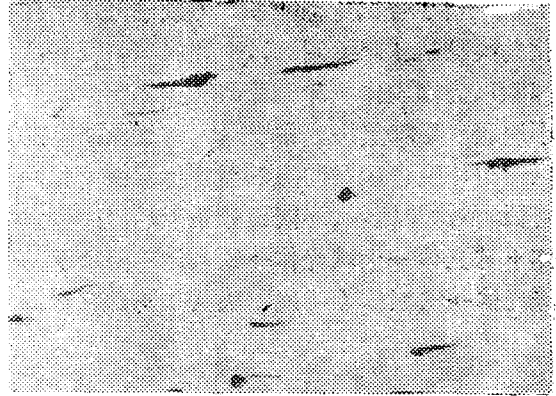
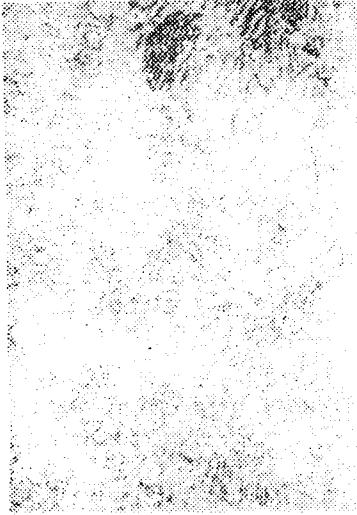
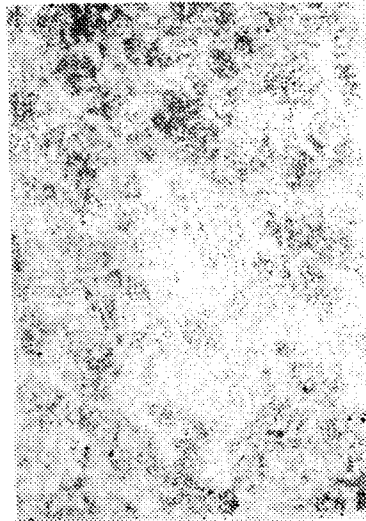


图20 缺陷处的硫化物 100×



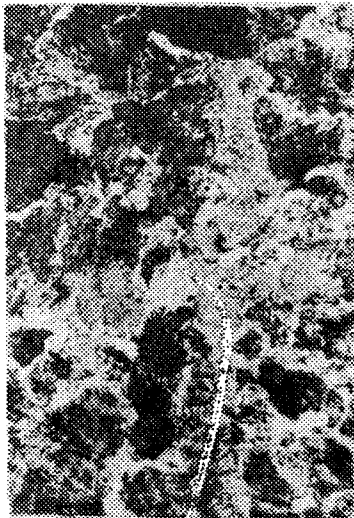
a



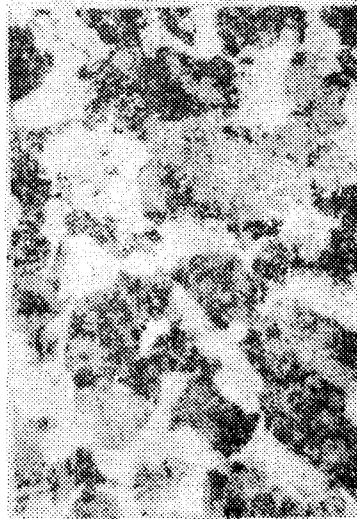
b



c



d



e

图21 轴心碳偏析的  
金相组织特征  
500×

4%硝酸酒精溶液浸蚀

- a—渗碳体+珠光体
- b—渗碳体(半网)+珠光体
- c—珠光体
- d—铁素体(网状)+珠光体
- e—铁素体(块状)+珠光体

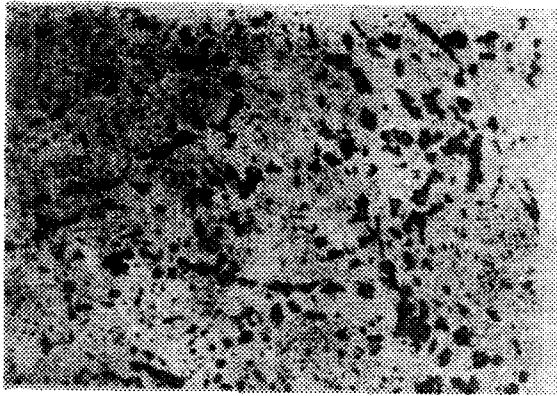


图22 高碳区组织 500×

渗碳体+珠光体  
碱性苦味酸钠溶液热蚀

### 5. 电镜观察

为了了解轴心碳偏析缺陷的断口微观特征，委托武汉钢院作了扫描电镜观察。试验在Camscan-4型机上进行。工作条件为：电压20kV，电流180 $\mu$ A。其结果见图23~28。



图24 缺陷处纵向拉伸断口 1000×

准解理



图23 1/3R处纵向拉伸断口 1000×

韧窝形

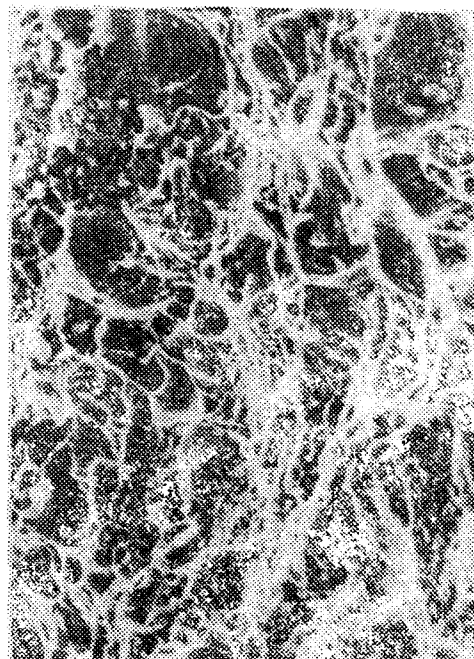


图25 1/3R处横向冲击断口 1000×

韧窝形





图26 缺陷处横向冲击断口 1000×  
准解理+解理



图28 缺陷处调质拉伸断口 1000×  
准解理

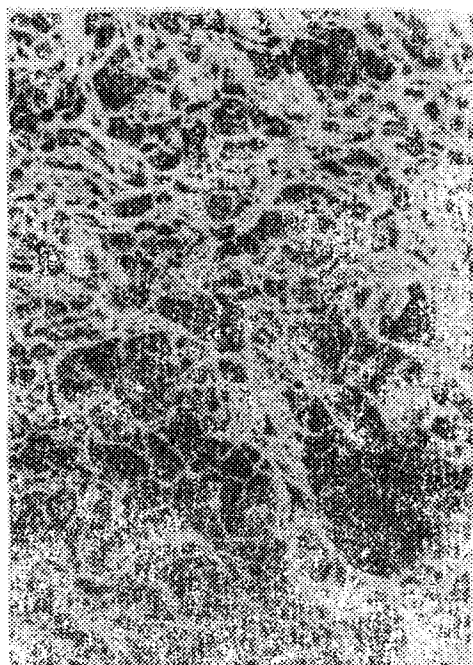


图27 1/3R处调质拉伸断口 1000×  
韧窝形

从断口的微观特征可以看出，轴心碳偏析区与基体区有明显的区别。无论是正火+回火状态（图23~26），还是调质状态（图27~28），基体区的断口微观形态均为韧窝形，轴心碳偏析区的断口微观形态都为准解理+解理。大家知道，准解理属于解理断裂，通常解理断裂总是脆性断裂，脆性断裂在断裂前几乎不产生显著的塑性变形，因而是十分危险的。

从图片对比可以看出，缺陷处的冲击试样断口比拉伸试样断口的解理特征更强。因此，具有轴心碳偏析缺陷的工作，受冲击载荷是更危险的。

#### 6. 热处理试验及超声波探伤

将试片1/2号进行超声波探伤，试验结果未发现缺陷波。试片原为正火+回火状态。为了解高碳区在强制冷却时是否会产生裂纹；也为了对比调质状态的机械性能值，将试片进行调质处理。热处理工艺为



860℃水淬+540℃回火空冷。调质后再探伤，仍未发现缺陷波，其波形见图29~30。

探伤结果说明，超声波探伤发现不了轴心碳偏析缺陷。

观察调质后缺陷处的金相组织为渗碳体+索氏体，晶粒细（图31），说明淬火时的组织状况较好。这可能是淬火未裂的原因之一。

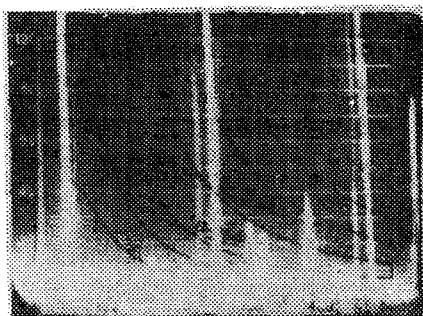


图29 正火+回火态波形

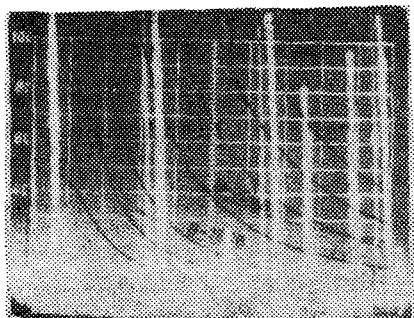


图30 调质态波形

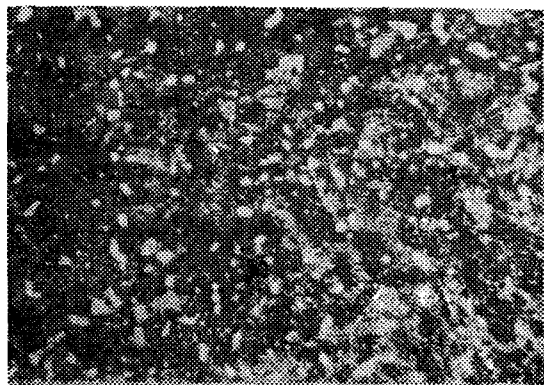


图31 缺陷处调质组织 800×  
渗碳体+索氏体

## 7. 调查冶金因素

据资料介绍，轴心碳偏析是采用发热冒口和保护渣浇注后可能出现的缺陷。我们调查的结果和试验说明，发热剂影响不大，仅仅是由于保护渣的使用不当才造成轴心碳偏析。其理由是：

1) 我们调查几十件缺陷试片所对应的钢锭均为下注钢锭，未发现上注钢锭。大家知道，上注钢锭也要采用发热冒口。

2) 若为发热剂影响，因其含Si量高，缺陷处的含Si量必然大为增加，但分析证明含Si量仅稍有增加，这少量的增Si是保护渣中的 $\text{SiO}_2$ 被CO还原而进入钢中的。

调查中，我们还了解到浇注时有时没有按比例配保护渣成分，保护渣粒度过大，保护渣的放置不当，不是铺放或均匀地撒入，有时甚至用锹加，所以使高碳区延伸到较深的部位，难于在锻造后切头时去掉。

## 四、结论及建议

轴心碳偏析不是一般的化学成分偏析。众所周知，大型钢锭中，成分偏析是难于避免的。国内、外解剖大型钢锭证明，在钢锭的上部A偏析区和冒口区，C、S、P的含量均高，属于正偏析区。但是，其成分偏析率较低。一般来说，显微组织的差异不大。轴心碳偏析是由于高碳的物质与钢水混合，使钢液中局部地区含碳量增高较多（有时为几倍含量）。由于含碳量高，降低钢水的凝固点，最后在冒口部分或冒口以下的心部地区凝固，形成与其他部分不同的显微组织结构，在低倍试验中出现受浸蚀程度不同的区域，这就是轴心碳偏析的本质。

轴心碳偏析的低倍特征是：在横向试片的心部或稍离中心处，有与基体部位受浸蚀程度不同的区域，它与疏松孔洞无对应关系。硫印试验表明该处硫偏析厉害，低倍断口处的晶粒一般比基体细。判断此缺陷的

程度严重与否,不能以受浸蚀程度判定,因为还与浸蚀时间和缺陷处本身的组织有关。为了准确判定该缺陷及其严重程度,唯一的方法是取样作金相观察。

轴心碳偏析的金相组织特征是:显微组织呈过渡性规律,断口的微观形貌为准解理+解理。

轴心碳偏析对材料的性能是有影响的,它将大大地降低塑性、韧性指标,因而对于受冷拉和冲击的工件是十分危险的。由于轴心碳偏析一般存在于中心处,而轴类锻件的机械性能取样在距表面三分之一半径处,所以不能以机械性能试验指标达到与否确定轴心碳偏析的影响程度。

轴心碳偏析对材料的热处理性能是有影响的。由于该处含碳量高,相当于高碳钢,当进行强制冷却时,是很容易产生裂纹的。本次试验未产生裂纹的原因可能是试片为工件的试料部分,锻压比大( $y=18$ ),锻造时碳化物及奥氏体晶粒均得到很好的破碎。淬火前的组织状态好,淬火加热时,未溶的颗粒碳化物阻碍奥氏体晶粒的长大,冷却后形成细小的淬火组织,组织应力小,所以未形成裂纹。而与试料相连的法兰部分,锻造比小( $y=1.6$ ),锻造时,碳化物及奥氏体晶粒得不到很好地破碎,粗大的碳化物若以网状分布于大晶粒的奥氏体晶界上,当淬火时进行强制冷却,淬裂的危险性将相当大。

轴心碳偏析形成的原因是:下注钢锭时,由于保护渣的配比不当,C的含量高,或保护渣的加入方法不当,或浇注时注速太快,使钢液与保护渣混合,局部地区的钢液

被强烈增碳,降低钢水的凝固点,最后在冒口附近地区形成。既然该缺陷仅是在注锭时产生的,那么,只要在浇注时采取一些措施,该缺陷是完全可以消除的。这些措施可以是:降低保护渣中的含碳量;将保护渣散装改为包装;实行保护渣铺放或均匀地加入;浇注时注速不要太快,使钢液平稳上升,特别是浇注冒口时速度要慢。据了解,车间已采取了一些措施。如把散装保护渣改为包装;浇注前先放一袋(约50kg),保护渣不够再少量均匀地加入,注意了注速。今年一季度与去年同期相比,轴心碳偏析发生率为1比7,说明这些措施是行之有效的。

轴心碳偏析是不允许的低倍缺陷,可以按消除残余缩孔的方法将它切尽。但为了保证质量的同时尽量减少机加工工时和缩短试验周期,对于在锻件有效尺寸范围内仍有轴心碳偏析的情况时,是否可以金相检验组织中有、无渗碳体为界?若有渗碳体组织,则只能采取打孔的方法将缺陷去掉。

### 参考文献

- (1)《合金钢物理检验》,武汉大学,大冶钢厂合编
- (2)《大锻件热处理》,机械工业出版社
- (3)《大型锻件的偏析和热处理》,上海科学技术情报研究所
- (4)《大型铸锻件》1982年第4期,二重大型铸锻件研究所
- (5)《电炉炼钢500问》,冶金工业出版社
- (6)《金属手册》第八版,第九卷,机械工业出版社
- (7)《金属的断口分析》上海交通大学
- (8)《铁钢材料便览》日本金属学会、日本铁钢协会编

### 〔英〕用于大型锻件的空心钢锭中偏析现象

制造空心锻件,采用空心钢锭比用传统的普通钢锭具有更多的优点。由于钢锭的中部是空的,所以完全避免了较大和局部的偏析(A偏析),而快速凝固限制了较大的偏析率并获得了较好的材料均质性,因而成品质量得到改善。通过简化锻造操作以及大大降低材料消耗,使得制造成本降低并缩短了生产时间。要取得上述优点,必须全面控制浇注和锻造参数。

钟慧仙摘译自Ironmaking and Steelmaking, 1986, Vol. 13, No. 6