

# 球铁试棒拉伸断口分析

刘复荣 彭 青 孙 兵

(潍柴动力股份有限公司)

〔摘要〕本文对球铁曲轴试棒拉伸断口存在的黑灰区问题加以分析研究,找出影响试棒力学性能的原因,并提出改进措施。

〔关键词〕球铁 拉伸断口 力学性能

## Analysis of Spheroidal Graphite Cast Iron Test Stick Tension Section

〔Digest〕This paper analyses and studies the Black-region areae existing in tensile fracture of graphite cast iron crankshaft test bar, and finds out some reasons affecting bar mechanical property and makes improvement measures.

〔Key words〕Spherulitic iron Stretch mechanics function

### 1 引言

我厂生产的中速柴油机曲轴,依其对使用性能要求的不同,分别采用了QT700-2、QT800-2、QT900-2三种牌号的珠光体球铁制造而成。作为验收依据的力学性能是通过铸造后经正火处理的性能试棒来测定。在对这些性能试棒进行拉伸试验过程中,常常发现在其断口上存在着大小不同的黑灰区。通过对这些断口做宏观分析、金相组织观察以及借助扫描电镜作微区分析,找出其影响力学性能的某些规律,及时发现生产中存在的不稳定的工艺因素,使产品质量得到进一步的提高。

### 2 拉伸试验正常断口

正常的珠光体球铁试棒,其基体组织为珠光体+铁素体,球状石墨,拉伸断口宏观表现为银灰色。随着抗拉强度的提高,断口颜色变浅,晶粒也变得致密;微观上经扫描电镜观察,有少量石墨球裸露在断口上,表现为珠光体被拉断的断口形貌,如照片1所示。产生此类断口的试棒,其抗拉强度一般都能达到牌号的要求,其较高的抗拉强度的获得主要依赖于珠光体占基体组织的绝大多数(一般 $>85\%$ ),当珠光体的相对量达到 $85\%$ 以上时,试棒在外力作用下,虽然基体组织中的铁素体也要产生一定的滑移,但由于这种滑移总要受到珠光体的牵制,其断裂是以珠光体的断裂方式为主。由于珠光体是铁素体和渗碳体的共折混合物,所以珠光体在断裂前会由于铁素体的变形而产生少量的塑性变形。当应力达到铁素体和珠光体的相界面时,由于位错塞积使相界面形成很大的微观应力场。而渗碳体最硬脆相,当应力超过一定限度时它会被折断形成裂纹,并将

应力传到相邻的铁素体片上,使之产生滑移,并通过铁素体片又传递到新的渗碳体片相界面。如此进行下去,裂纹不断扩展,当应力达到一定值,裂纹达到一定长度后,便迅速扩展造成脆断。由于珠光体的断裂是沿铁素体和渗碳体片内部的某些晶面劈开,而石墨球只有一少部分保留在断面上,因此断口对光的反射作用较强,宏观表现为银灰色,且色泽均匀无黑灰区。

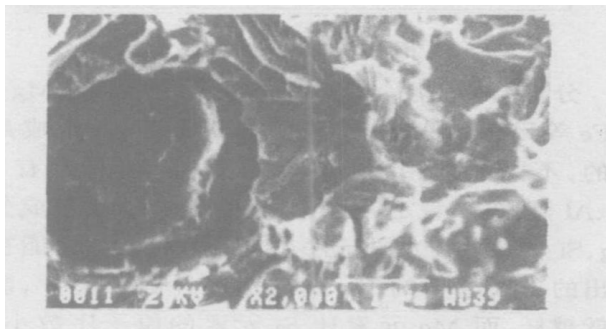


图1 拉伸正常断口( $\times 200$ )

### 3 拉伸试验异常断口

球铁试棒拉伸断口的黑灰区一般分两种情况:一种区域面积较小,通常小于 $9\text{mm}^2$ ;另一种区域面积较大,通常在 $9\sim 50\text{mm}^2$ 左右。通过组织观察表明:第一种情况下,基体组织中的珠光体含量一般 $>85\%$ ;而第二种情况下珠光体含量一般 $<85\%$ ;甚至成为铁素体基体,下面分别就较小和较大黑灰区域分别加以分析;

1 在黑灰区域较小时,经扫描电镜观察表明:夹渣、球化不良及孕育衰退、疏松等都会表现为宏观可见的黑灰区。

1.1 以夹渣为主要特征的黑灰区域, 其二次电子图象如图 2 所示。

可以看出, 夹渣体积较小, 分布无规律。影响其分布的因素很多, Mg 和稀土的氧化物、硫化物、氢化物及  $\text{SiO}_2$ 、FeO 等都是夹渣的组成部分。为了确定夹渣形成的原因, 必须对其进行成份分析, 选择有代表性的部位做能谱分析, 如图 3 所示。



图 2 拉伸异常断口(×200)

石墨。断口上出现此类黑灰区时由于基体的有效面积率减小, 石墨的缺口作用增大, 使得试棒的塑韧性大大降低。在力学性能不合格时, 通过热处理也无法挽回。

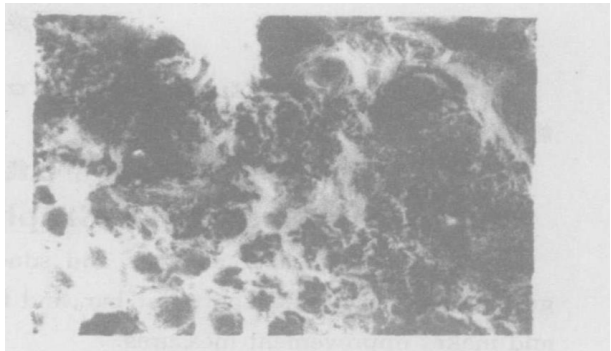


图 4 球化不良、孕育衰退二次电子图象(×200)

1.3 由于疏松的影响在断口上出现的黑灰区。这类断口宏观上依然是银灰区与黑灰区共存, 经微观观察, 银灰区为脆断区, 黑灰区为大量树枝晶的自由表面, 如图 5 所示。它主要产生在收缩过程当中, 这类缺陷形成的原因, 一般认为与球铁的凝固特性有关, 具体原因较为复杂, 经分析认为在平衡其它的工艺因素情况下, 一方面在不致于引起石墨漂浮的前提下适当增加碳含量, 另外, 应该对 Re 残余、Mg 残



图 5 疏松二次电子图像(×200)

分析结果表明: 夹渣中的主要成分包括 Mg、Si、S、Fe 等元素, 对大量夹渣的分析可知, 其组成是复杂的, 不同的点相差也较大, 有的夹渣还含有 Ce、Ca、Al 等, 可以肯定的是, 夹渣中的主要化学成分是 Mg、Si 和 S。因为原子序数越小的元素, 它被激发出的二次电子的  $K\alpha$  线的强度计数就越少, 能谱峰就越低, 而 Mg 元素比 Si 元素的原子序数小, 其强度峰却比 Si 的强度峰高, 这说明 Mg 比 Si 的计数值高, 即夹渣中 Mg 的含量比 Si 高得多, 而且 S 的强度峰也显著, 说明 S 的含量也较高。因此夹渣的成分应该是氧化物和硫化物, 包括  $\text{MgO}$ 、 $\text{SiO}_2$ 、FeO、 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{MnS}$  等, 由于夹渣的存在, 使得基体组织的连续性受到破坏, 抗拉强度明显降低。

1.2 断口黑灰区域表现为球化不良, 孕育衰退的情况。这种断口在各类牌号的球铁中均能发现。宏观上, 当轻微时黑灰区不太致密, 麻麻点点分布在断口上, 严重时几乎将银灰区域覆盖, 甚至产生类似灰口铸铁一样的断口, 其二次电子图像如图 4 所示。可见这种黑灰区内存在大量的团块状、外形不完整的

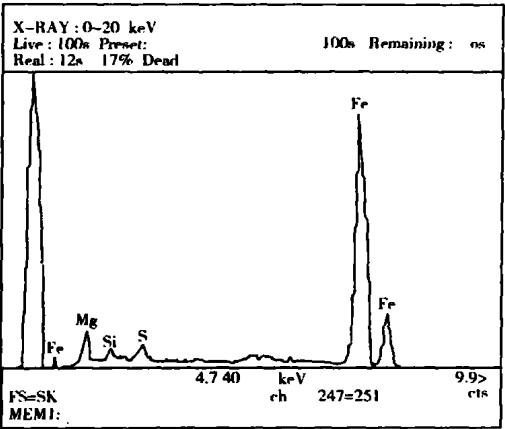
余及 P 等的含量加以控制, 并尽可能减少稳定碳化物的合金元素(钼、铬等)的含量。

以上几方面的缺陷均能影响材料的力学性能, 随着黑灰区域的增大, 抗拉强度、断后伸长率均呈下降趋势。对大量的试验数据进行统计分析, 可以得到黑灰区面积占试棒面积的百分比  $S(\%)$  与抗拉强度  $R_m$  和断口伸长率  $A(\%)$  的关系如下表 1。

表 1

| $S(\%)$ | $R_m(\text{MPa})$ | $A(\%)$   |
|---------|-------------------|-----------|
| $< 10$  | 850 ~ 950         | 4.0 ~ 7.0 |
| 10 ~ 30 | 800 ~ 850         | 3.0 ~ 5.0 |
| $> 30$  | $< 850$           | $< 2.0$   |

图 3 夹渣的能谱峰



2 在黑灰区较大的情况下,这类试样宏观上塑性变形明显,抗拉强度明显低于牌号要求,而

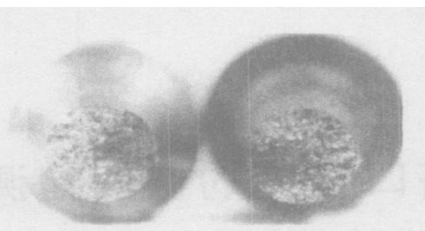


图6 较大黑灰区断口

断后伸长率却比正常断口的高3~5倍,这是基体组织以铁素体为主所决定的。其宏观断口也分为银灰区和黑灰区,如图6所示。

观察断口的微观形貌,黑灰区有明显的塑变滑移呈韧窝状,而银灰区为解理断裂。对银灰区和黑灰区做对比分析,球化级别、石墨球数两者来发现明显区别。再制作金相试样,经观察这种断口的基体组织以铁素体占绝大多数,珠光体只有25%左右,如图7所示。

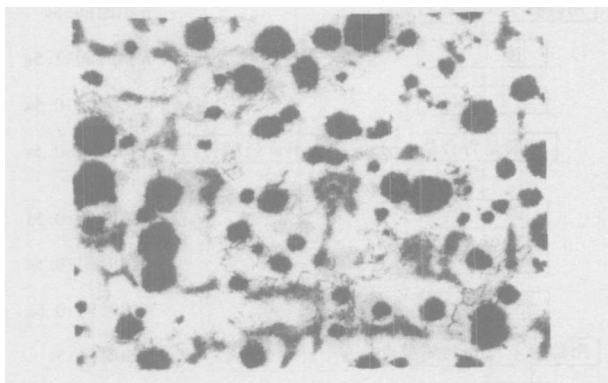


图7  $\times 100$

试棒宏观上表现出的明显的塑性变形,本要是由于铁素体的大量滑移而产生。一部分球状石墨也在应力的作用下剥落,留下了空穴,这些空穴在切应力的作用下被拉长、聚集、连接并产生细小裂纹。此时试棒已经有铁素体的塑性滑移,所以裂纹尖端的应力得不到松弛,相反会造成过大的应力集中,从而使得在外力较低的情况下,裂纹也会迅速扩展,沿某些晶面劈开,形成解理断裂的脆断区,宏观表现为银灰区。而黑灰区则是塑性断裂区,由于大量韧窝和球状石墨的存在,使得对光的反射作用减弱,故呈黑灰色。根据此类断口与正常断口的拉伸试棒统计数据作出基体组织中珠光体含量 $P(\%)$ 与力学性能的关系曲线如图8。

从该曲线可以看出,抗性强度有时偏低,而抗拉强度与珠光体含量紧密相关,只有在珠光体保持 $\geq 85\%$ 时才能可靠保证珠光体的强度,因此必须坚持优质的熔铸和严格的正火工艺。

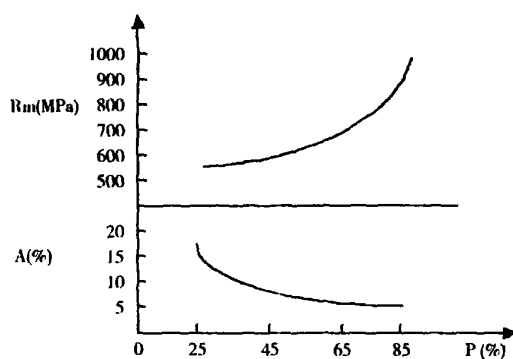


图8 基体组织中珠光体含量 $P(\%)$ 与力学性能的关系曲线

另外,也有试棒经正火后,基体组织中铁素体较多时,几乎见不到明显的塑性变形的情况一下便发生了断裂,宏观断口白亮晶莹,这说明断裂是沿着晶界的,此时晶界强度已明显降低。微观校现为沿基体晶界断裂,光学显微镜下见有大面积铁素体。为了获得珠光体基体,采用正火处理,当正火处理温度低时,磷元素及其它杂质形成的化合物可能从铁素体中析出并沉淀于晶界处,使晶界变脆,从而造成沿铁素体晶界断裂。这种情况下,重新正火使出于晶界的磷化物等重新固溶于基体中,从而脆性消除,恢复应有的抗拉强度和塑性。

## 4 结论

球墨铸铁拉伸试棒正常断口为银灰色,并有少量石墨球保留在断口上,从微观形貌来看,以珠光体断裂的形貌为主,断口色泽均匀,无黑灰区,抗拉强度及伸长率一般能达到牌号的要求,当抗拉强度满足要求;同时塑性指标也较高时,偶尔也见有少量黑灰区存在。

由于夹渣、球化不良、孕育衰退、疏松等的影响,在拉伸断口上会出现不同类型的黑灰区,降低了材料的力学性能。这种黑灰区较小时,如果珠光体含量大于85%且石墨球化良好时,性能指标一般能满足牌号要求。

当大面积黑灰区出现时,往往基体为铁素体,此时塑性有较大提高的同时,抗拉强度会严重下降,如果这种零件进入使用过程,后果将不堪设想,而产生这种情况的原因是热处理工艺规范执行不严,因此应严格控制。

## 参考文献

- 1 《稀土镁球墨铸铁》. 1987
- 2 《金属材料及热处理》. 上海工业大学
- 3 《金属电子》. 上海交通大学