

• 研究简报 •

(22) 118-124

# 铝高速工具钢中夹杂物的研究

## The Study on Non-Metallic Inclusions in High Speed Tool Steel M2Al

周守则  
Zhou Shouze

石功奇  
Shi Gongqi

TG 142.45

(重庆大学冶金及材料工程系, 重庆, 630044)

**A 摘要** 利用金属块样, 电解萃取夹杂样, 通过定量金相, 扫描电镜及化学分析方法对比了 M2Al 和 M2 高速工具钢中夹杂物形态、数量、大小及分布。结果表明 M2Al 中由于铝的加入, 使夹杂物的数量、大小及分布不均匀性都有明显的增加, 夹杂物的增加主要是由铝的氧化物及其复合物的增加所致。

**关键词** 高速工具钢; 夹杂物

中国图书资料分类法分类号 TB302.5

铝  
高速钢, 工具钢

**ABSTRACT** The morphology amount, size and distribution of non-metallic inclusions in high speed tool steels M2Al and M2 have been studied by observing the block sample and electrolytic extracting inclusion powder with quantitative microscope, SEM and chemical analyzing techniques. It was shown that the amount, size and nonuniformity of distribution of inclusions all increase evidently because of the addition of aluminum, and the situation is caused mainly by the increase of the amount of  $Al_2O_3$  inclusion and its composites.

**KEYWORDS** high speed tool steel; inclusion

### 0 引 言

M2Al 高速钢是重庆特殊钢厂等单位研制并纳标的一种高碳超硬无钴高速钢<sup>[1]</sup>。此钢在 M2 钢的基础上提碳加铝(铝含量 1%左右)。该钢具有硬度高、耐磨、热硬性好等优点, 在切削寿命, 特别是切削难加工材料方面具有很好的性能, 而价格却与通用高速钢相当<sup>[2]</sup>, 为此, 该钢是我国超硬高速钢中生产量最大的一种, 同时出口美国代替钴高速钢使用。目前在生产及科研上都受到了广泛的重视。但是成分的改变会影响到钢中夹杂物的数量及钢材的质量, 本文采用定量金相、扫描电镜及化学分析等方法研究了 M2Al 和 M2 钢中夹杂物的形态、数量、大小及分布规律。

• 修改稿收到日期 1994-10-08

## 1 实验材料及实验方法

### 1.1 实验用材料

实验用15种不同炉号的M2A1高速钢、国产M2及进口M2高速钢进行对比分析,具体成份见表1。夹杂物的观察按YB25-77标准的要求进行,试样经1220℃淬火,其观察面为通过钢材轴心的纵断面。

表1 实验用材料的化学成份

炉号	C	W	Mo	Cr	V	Al
1# M2(进口)	0.84	5.84	4.66	3.94	1.87	/
3# M2(国产)	0.85	6.07	4.98	4.05	1.95	/
6-7622	1.14	6.41	4.59	4.16	1.94	1.13
6-7623	1.14	5.84	4.95	3.64	1.81	1.02
6-3497	1.12	5.61	4.87	4.11	1.93	1.09
6-8885	1.15	5.97	4.99	4.05	1.77	1.04
6-8607	1.12	6.19	4.88	3.98	1.88	1.16
6-7607	1.14	5.78	4.72	3.83	1.94	0.94
6-7919	1.15	5.74	4.69	4.84	1.86	1.04
6-8503	1.14	5.88	4.71	4.07	1.88	1.02
6-0069	1.16	6.22	4.73	4.10	1.89	1.01
6-2924	1.13	5.92	4.88	4.12	1.90	1.12
6-2453	1.15	4.68	5.92	4.12	1.83	1.05
6-2939	1.14	6.00	4.72	3.83	1.94	1.94
6-8256	1.16	5.49	4.65	3.90	1.87	1.10

### 1.2 夹杂物的评级及定量研究

夹杂物的评级主要参照YB25-77进行,同时也按美国ASTME45-81检验法进行了对比。夹杂物的定量研究是在Newphot31型显微镜下,随机选50个视场,利用夹杂物在明场、暗场和偏光下的不同光学特性首先区分各种夹杂物,然后逐个统计各个夹杂物的个数及尺寸,从而求得各种夹杂物的面积分数。并利用测得数据进行夹杂物的大小均匀程度 $\delta_n$ 和平均尺寸E的定量计算。

为了增加定量结果的可靠性,在用金相法定量的同量还将试样用化学分析法(电解萃取后再用化学法分离出各类夹杂物),进行定量测定。

### 1.3 夹杂物空间形态观察

采用电解法萃取夹杂物粉末置于铝箔上在TSM-T20型扫描电镜下进行观察,研究夹杂物的空间形态及其差异。同时也将金属块样在相同情况下进行夹杂物的观察。

## 2 实验结果

### 2.1 M2A1和M2高速钢中夹杂物的种类

金相观察及扫描电镜分析结果表明,M2A1和M2高速钢中的夹杂物均主要为 $Al_2O_3$ 、

AIN、Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 和铝硅酸盐,它们在不同光学照明情况下色彩不同,形态也各异。另外,M2Al 中由于铝夹杂物数量的增加,内部还存在有铝、硅的氧化物和氮化物形成的复合夹杂物,这种复合夹杂物尺寸较大。Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 的夹杂物除了分散分布的颗粒之外,个别也有成串分布。

## 2.2 夹杂物的级别

由 YB25—77 评定结果知:进口 M2 钢夹杂物级别为 0.9,国产 M2 钢平均级别为 1.5,而不同炉号的 M2Al 高速钢中夹杂物的级别大部分都在 2.4 级左右。即 M2Al 钢平均级别比 M2 高速钢中夹杂物级别高出约 1 级。M2Al 高速钢中夹杂物主要为一些分散分布的脆性夹杂。

为了与国外的评级法对比,在用 YB25—77 标准评级的同时还对部分试样采用了美国 ASTM E45—81 标准中的方法 A 进行了评级。ASTM E45—81 中的方法 A 是把夹杂物按形态分为 A(短杆状)、B(颗粒集中状)、C(长条状)、D(颗粒分散状)四种。每一种又分为粗、细两个系列共五级。具体方法是将抛光试样在 100 倍下进行观察,将试样上的每一个视场中每一类夹杂物与标准图谱相比较,记录各类(A、B、C、D)夹杂物与标准图谱相似的视场级别,并按粗细两个系列进行。其结果显示:夹杂物的级别都在 1~2 级之间。夹杂物主要是 D 类,其次是 B 类,即集中分布的链状。其实这些均是以 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 为主的夹杂物。在整个评级过程中没有发现平均级别超过 2.5 级、最高级别超过 3 级的现象。

## 2.3 夹杂物的总质量与各类夹杂物的质量分数

M<sub>2</sub>Al 和 M2 高速钢中夹杂物总质量分数及各种夹杂物的质量分数相差很大,定量金相分析和化学分析都充分反映了这一点。表 2 是金相法测出的结果。由表中可看出,除氧化物外,M2Al 和 M2 高速钢中氮化物、硫化物、硅酸盐等其它夹杂物的数量相差不大。但 M2Al 高速钢中氧化物夹杂的数量明显大于 M2,二者相差 2~3 倍,结果使铝高速钢中的夹杂物总量明显高于 M2 高速钢。

表 2 夹杂物定量金相统计结果 %

试样号	夹杂总量	氧化物	硅酸盐	硫化物	氮化物	其它
1# 进口 M2	1.255	0.947	0.003	0.003	0.144	0.274
3# 国产 M2	1.256	0.987	0.000	0.000	0.102	0.167
6—7622	3.096	2.844	0.021	0.019	0.044	0.168
6—7623	2.139	1.347	0.073	0.047	0.088	0.584
6—8497	3.017	2.626	0.038	0.002	0.039	0.320
6—8885	2.612	1.897	0.122	0.032	0.230	0.331
6—8607	2.633	1.785	0.055	0.068	0.173	0.552
6—7607	3.934	3.502	0.014	0.021	0.106	0.291
6—7919	3.158	2.121	0.199	0.026	0.471	0.341
6—8503	2.568	1.678	0.019	0.029	0.639	0.203
6—8609	2.363	2.019	0.000	0.000	0.040	0.304
6—2924	2.895	2.537	0.026	0.000	0.047	0.285
6—2453	2.668	2.363	0.027	0.000	0.028	0.250
6—2939	2.684	2.086	0.008	0.000	0.239	0.261
6—8256	2.328	1.400	0.059	0.000	0.700	0.169

化学分析结果与定量金相分析相比较其变化趋势完全相同, 仍然是 M2A1 高速钢的夹杂物总量及氧化物总量明显高于 M2 高速钢, 而且还可以看出氧化物数量增加的主要原因还是氧化铝夹杂物量增加所致。

#### 2.4 夹杂物尺寸大小及均匀程度

除了钢中夹杂物的数量之外, 钢中夹杂物的大小, 分布均匀程度对钢材的质量有很重要的影响。颗粒粗大, 分布不均匀, 连续成串, 成带分布对钢的基体危害性最大。根据定量金相的统计结果, 结合数理统计的有关概念对夹杂物的平均尺寸大小及尺寸差异程度可进行如下计算:

$$\text{夹杂物的平均面积 } E = \frac{50 \text{ 个试场中的夹杂物总面积}}{50 \text{ 个试场中夹杂物的总个数}}$$

借用尺寸分布的总体标准差  $\delta_N^{[3]}$  来表示夹杂物尺寸大小差异程度:

$$\delta_N = \sqrt{\frac{\sum x^2 - \frac{(\sum x)^2}{N}}{N}}$$

其中  $\delta_N$ —总体标准差, 即夹杂物尺寸大小差异程度;

$X$ —每个视场中各夹杂物尺寸;

$N$ —50 个视场中夹杂物的总颗粒数。

表 3 M2A1 和 M2 钢夹杂物大小及其差异度

炉号	$N$	$10E, \text{mm}^2$	平均尺寸, $\mu\text{m}$	$\delta_N$
1# 进口 M2	200	0.68	8.4	0.336
3# 国产 M2	229	1.45	12.0	0.997
6—762	247	3.20	17.8	1.565
6—7623	258	1.70	13.0	2.229
6—8497	302	2.57	16.00	1.484
6—8885	245	2.72	16.00	1.426
6—8607	154	4.33	20.8	1.497
6—7607	200	5.10	22.6	2.092
6—7919	217	4.07	20.1	1.549
6—8503	200	2.91	17.0	1.577
6—8069	204	3.89	19.7	1.752
6—2924	430	1.80	13.4	4.730
6—2453	471	3.88	19.7	8.267
6—2919	501	1.88	13.7	3.936

计算结果见表 3。由表中可看出, M2A1 比 M2 钢的  $\delta_n$  和 E 均较大, 说明 M2A1 高速钢中不但夹杂物的尺寸较大且大小不均匀性(即尺寸大小差展示程度)也大。图 1 是用电解法萃取的夹杂物粉末在扫描电镜下观察到的形态。由此图也可以看出: M2A1 中夹杂物的尺寸明显大于 M2 高速钢。

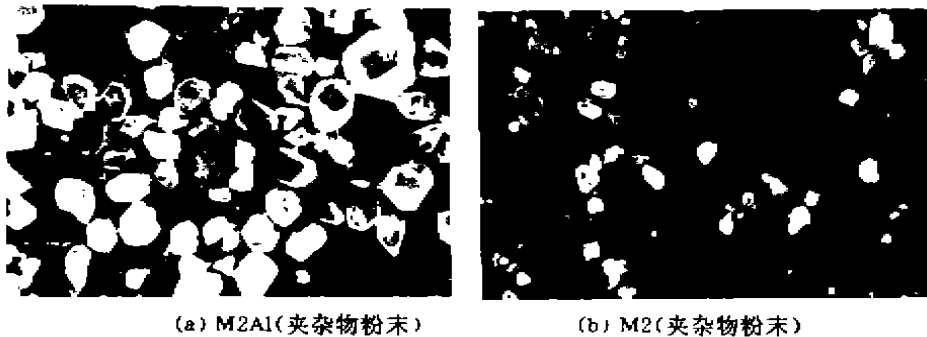


图 1 M2A1 和 M2 钢中夹杂物尺寸大小对比(扫描电镜)800 $\times$

### 2.5 夹杂物的空间形态

对 M2A1 及 M2 钢中的夹杂物形态采用电解法萃取夹杂物的粉末, 然后直接在扫描电镜下观察, 可以很清晰地观察夹杂物的空间形态(图 2)结果表明, 夹杂物的形态很多, 多为不规则状, 但 M2A1 高速钢中的夹杂物往往带有尖角。尤其是其中的复合夹杂物, 由于各种夹杂物的不协调生长, 其尖角及形状的不规则情况更为突出。而 M2 高速钢中夹杂物的形态相对而言要规则一些。

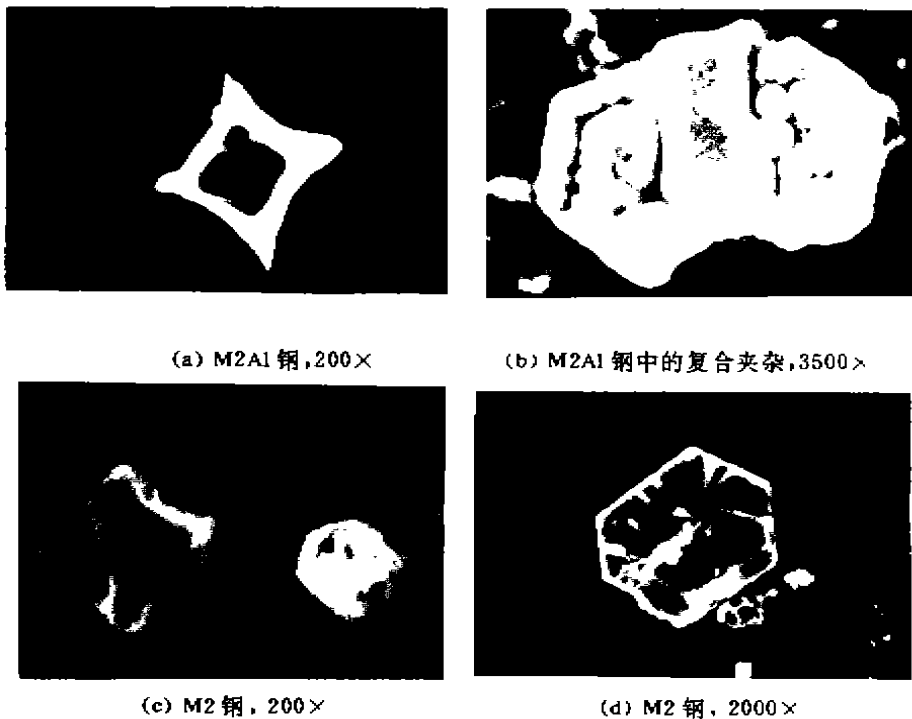


图 2 M2A1 及 M2 钢夹杂物的空间形貌(扫描电镜)

### 3 讨 论

M2Al 高速钢由于含 Al 量较大,从而使钢中夹杂物发生了变化。与 M2 相比相比,M2Al 中夹杂物数量明显增加,而其中主要是氧化铝的增加。这与钢中夹杂物的形成过程及铝的加入量增大有关。

钢中的非金属夹杂物主要分为两大类:一类是钢在冶炼和凝固过程中由于一系列的物理及化学反应生成的,这叫内生夹杂。例如冶炼过程中由于脱氧剂的加入而形成的氧化物及硅酸盐等,当它来不及完全上浮进入钢渣而在钢中存留下来,典型的代表是用 Al 脱氧形成的氧化铝夹杂、用硅脱氧形成的氧化硅夹杂,这些夹杂可以单独存在,但若与 FeO 或其它氧化物相遇,它还能和这些氧化物形成复合夹杂。此外,钢在凝固过程中某些元素如氮、硫等由于溶解度的降低而形成硫化物和氮化物等,这些夹杂也必将存留在钢中。另一类夹杂物是钢在冶炼或浇注过程中,由于耐火材料的混入而造成的,这类叫外来夹杂物,它们的特点是无一定形状且尺寸较大,因此比较容易发现。钢中夹杂物的存在使钢的金属整体的均匀连续性发生中断,故它们在钢中的形态、含量和分布状况都不同程度地影响着钢的各种性能。但在目前这种生产工艺条件下,不管是内生夹杂还是外来夹杂的产生和存在都是不可避免的,如果控制得当减少其量、改善其状况则是能实现的。

M2Al 钢中由于含有 1% 左右的铝,因此钢液地脱氧及合金化过程中要加入比 M2 高速钢更大的铝量。从热力学的观点看,大量铝的加入则增加了铝与氧化合的机遇,大量生成  $Al_2O_3$  是必然的结果。而夹杂物从钢液中排除的主要方式是上浮,如果夹杂物能顺利上浮至钢渣中,钢中夹杂则减少。因此钢中夹杂物的多少除取决于热力学条件外,主要还取决于夹杂上浮的动力学条件。夹杂物颗粒上浮去除的速度遵循斯托克斯定律<sup>[4]</sup>:

$$V = \frac{2}{9} g \cdot r^2 \left( \frac{\rho' - \rho}{\eta} \right)$$

式中  $V$ —上浮速度 cm/s;  
 $r$ —夹杂颗粒的平均半径 cm;  
 $\rho', \rho$ —颗粒及钢液的密度 g/cm<sup>3</sup>;  
 $g$ —981 cm/s<sup>2</sup>;  
 $\eta$ —钢液的粘度系数 g/cm·s

从这个公式可以看出,决定于夹杂物上浮速度的条件有三:主要的是夹杂颗粒的尺寸,因它是平方关系,其次是钢液的粘度和钢液密度与夹杂物密度之差。

显然,炼钢过程中所产生大量氧化物中那些颗粒大的则因上浮速度快为优势而进入渣中,其余的则因尺寸因素和时间关系被保留在钢中。即在相同工艺条件下,决定夹杂上浮与否存在一个夹杂颗粒尺寸的临界值,当颗粒尺寸大于某一临界值时则夹杂能从钢液中排除而进入渣中,相反则排除不去而残留下来成为钢中的夹杂。对于 M2Al 钢与 M2 钢相比,由于铝的加入使钢液密度变小,钢液粘度增大而恶化了上浮条件,或者说它提高了上浮颗粒的临

界尺寸,使得那些本来在 M2 钢中能够上浮的较大夹杂颗粒而在 M2A1 中却不能上浮并被保留下来,结果造成钢中夹杂物的量及尺寸变大。总之,不管是从热力学还是从动力学的角度出发 M2A1 钢中夹杂物的数量和尺寸均比 M2 钢大。

为了改善钢的质量,减少钢中夹杂特别是因铝的加入而带来的夹杂,其关键还是创造一个良好的有利于夹杂物上浮的条件,为此提出以下几条措施:

1) 在冶炼中控制好加铝前后钢液的温度、含氧量,合理调整加铝量及时间,控制好出钢温度。为夹杂物的上浮创造一个良好的条件。

2) 为了有利于夹杂物的上浮,减少钢中夹杂物量,适当延长钢液在炉内或盛钢桶内的静置时间是必要后。

3) 在需要和有条件的情况下可采用真空冶炼、炉外精炼、电渣重熔、盛钢桶吹氩等手段,这对去除钢中气体和夹杂,改善钢的质量都十分有利。对于铝高速钢来说也同样有效。

## 4 结 论

1) M2A1 高速钢中夹杂物主要有  $Al_2O_3$ 、 $AlN$ 、 $Cr_2O_3$ 、硅酸盐及铝的复合夹杂物等,形态各异。夹杂物的平均级别小于 2.4 级,比 M2 钢高出约 1 级。

2) M2A1 高速钢中夹杂物的数量明显高于 M2 钢。夹杂物的增加主要是由于氧化铝夹杂增加所致。

3) 与 M2 高速钢相比,M2A1 高速钢的夹杂物的平均尺寸较大,且尺寸均匀程度也较差。

4) 造成 M2A1 钢中夹杂增多,尺寸偏大的主要原因是由于 Al 加入量的增加,产生了大量的  $Al_2O_3$ ;同时钢中铝含量的增加恶化了夹杂物上浮的条件,增大了夹杂上浮的临界尺寸,使那些本来在 M2 钢中可以顺利上浮的较大夹杂而在 M2A1 钢中却不能上浮而被保留下来。

5) M2A1 钢中的夹杂物量虽高于 M2 钢,但其级别并未超过标准的规定,从这点出发,对钢的质量不会产生明显的不良影响。

## 参 考 文 献

- 1 中华人民共和国冶金工业部标准,高速工具钢技术条件,YB12--77,1978
- 2 喻勇青. M2A1 高性能高速钢组织和性能研究. 北京科技大学硕士学位论文,1983
- 3 秦国友. 定量金相. 四川科技出版社,1987.
- 4 陈永一. 钢冶金. 北京:冶金工业出版社,1980