

# 连续缓慢冷却贝氏体转变特征及合金元素分布的影响

Transformation Characteristic of Slowly Continuous Cooling  
Bainite and Effect of Alloy Elements in Microstructures

周洪宝, 蔡庆伍, 武会宾, 张 杰, 陈雨来

(北京科技大学 高效轧制国家工程研究中心, 北京 100083)

ZHOU Hong-bao, CAI Qing-wu, WU Hui-bin, ZHANG Jie, CHEN Yu-lai

(National Engineering Research Center of Advanced Rolling, University of  
Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China)

**摘要:** 利用热膨胀仪对实验用预硬型塑料模具钢不同冷却速率进行热模拟, 观察组织形貌, 并用电子探针显微分析仪对不同组织区域进行定点分析, 发现 Mo, Si 在抑制珠光体转变及粒状贝氏体转变过程中起重要作用。在冷速  $\leq 0.015^{\circ}\text{C}/\text{s}$  冷却条件下, 组织转变较为复杂, 转变过程中有珠光体出现。由于内部合金元素微观分布不均匀, 贝氏体组织分为片状和成团的粒状两种形貌, 珠光体主要在成团粒状区域内出现。

**关键词:** 粒状贝氏体; 连续冷却; 电子探针; 显微组织

**中图分类号:** TG142.2    **文献标识码:** A    **文章编号:** 1001-4381(2011)12-0010-06

**Abstract:** Dilatometric tests were performed on the dilatometer under different cooling rates for the steels and the microstructures were observed. The point analysis of main elements was analyzed with the EMPA. The elements of Mo and Si were important for controlling grain transformation of the pearlite and granular bainite. When cooling rate at  $\leq 0.015^{\circ}\text{C}/\text{s}$ , the variation of the microstructures was more complicated. The pearlite could be observed in the cooling slowly, the elements were heterogeneous distribution. The bainites were not the single microstructures, the morphology of bainites were lamellar and disordered granular. The pearlites presented at disordered granular area mainly.

**Key words:** granular bainite; continuous cooling; EMPA; microstructure

近年来关于贝氏体的研究主要集中在等温和快速冷却转变贝氏体上<sup>[1-5]</sup>, 对于冷速  $\leq 0.015^{\circ}\text{C}/\text{s}$  的低冷速下贝氏体的转变特征研究较少<sup>[6,7]</sup>, 而低冷速下组织的转变对于预硬型塑料模具钢等厚规格尺寸钢材具有更高的实际意义。低冷速下产生的组织通常会含有粒状贝氏体, 20 世纪 50 年代 Habraken<sup>[8]</sup> 首次在低碳钢和中碳钢中发现了粒状贝氏体的存在。国内外学者对粒状贝氏体组织的研究做了许多工作<sup>[4,9]</sup>。方鸿生<sup>[10]</sup> 等将此种组织分为粒状贝氏体和粒状组织, 认为粒状贝氏体与粒状组织均由铁素体基体+岛状组织组成, 粒状贝氏体为中温转变区形成的上贝氏体型铁素体, 粒状组织为先共析温度区形成的等轴铁素体或魏氏组织铁素体, 但未对组织形成的影响因素作进一步的分析。

在连续冷却尤其是慢冷速下, 由于温度范围变化大, 显微组织变化情况更为复杂, 在一个相对恒定的转变温度范围内获得的组织差异很大, 转变组织不易分

类<sup>[4]</sup>。需要将贝氏体钢的连续冷却组织的形态进行分类并分析其形成的影响因素。因此本工作研究了预硬型塑料模具钢缓慢冷却速率下组织的转变及其形貌特征, 并分析了合金元素对组织转变的影响。

## 1 实验方法

实验钢采用 20kg 真空感应炉冶炼, 化学成分如表 1 所示。在  $1200^{\circ}\text{C}$  下锻造成截面  $100\text{mm} \times 100\text{mm}$  的长方形坯料, 然后将试样切成  $\phi 6\text{mm} \times 10\text{mm}$  的圆柱形, 在北京科技大学高效轧制国家工程研究中心热膨胀仪上进行热模拟, 分别在  $900, 1000^{\circ}\text{C}$  奥氏体化 10min, 为保证各组织转变温度在所需冷却速率范围内, 以  $0.5^{\circ}\text{C}/\text{s}$  冷却至  $730^{\circ}\text{C}$ , 然后以不同冷却速率冷却至  $200^{\circ}\text{C}$ , 再以  $0.5^{\circ}\text{C}/\text{s}$  冷却至室温。机械抛光后用 4% 硝酸酒精溶液侵蚀, 对组织进行金相观察和扫描电镜 (SEM)、投射电镜 (TEM) 观察。用 JEOL JXA-8100

电子探针显微分析仪(EPMA)对不同组织区域进行定点分析。

表 1 实验所用合金钢化学成分(质量分数/%)  
Table 1 Chemical composition of alloy selected  
for the study(mass fraction/%)

C	Si	Mn	Ni	Cr	Mo	O	S	P	Fe
0.35	0.29	1.54	1.03	2.10	0.21	0.0046	0.014	0.011	Bal

2 结果与分析

对实验用钢 900℃奥氏体化后,冷速为 0.1,0.05,

0.015,0.01℃/s 的试样光学显微组织如图 1 所示。0.1,0.05℃/s 冷速下组织为马氏体组织,在冷速>0.05℃/s 时未出现珠光体组织。相应的 SEM 照片如图 2 所示。在冷速≤0.015℃/s 后组织变得复杂,出现珠光体,珠光体随着冷速的降低而增加。在光学显微镜下对组织观察发现,除含有部分珠光体外,其余贝氏体组织分为片状和成团的粒状两种形貌,片状区域的贝氏体类似于下贝氏体,在 SEM 下可观察到片状区域内部为细小的颗粒状组织。在片状区域和成团的粒状区域内都分布有少部分的珠光体,而粒状区域珠光体组织比片状区域内多。

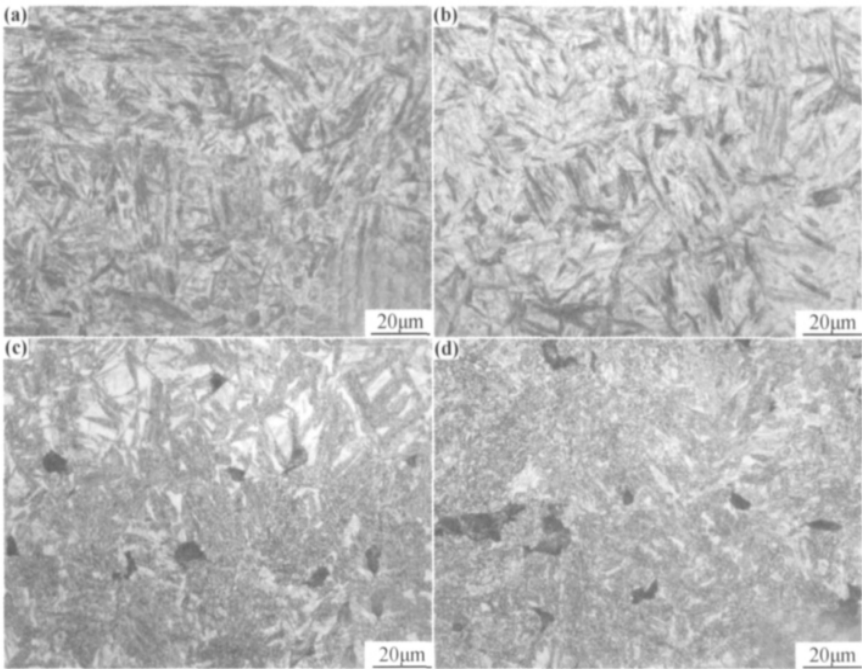


图 1 900℃奥氏体化不同冷速下光学显微组织 (a)0.1℃/s;(b)0.05℃/s;(c)0.015℃/s;(d)0.01℃/s  
Fig.1 Optical micrographs of microstructure in the alloy with cooling rates of 0.1℃/s(a), 0.05℃/s(b), 0.015℃/s(c), 0.01℃/s(d) after austenization at 900℃

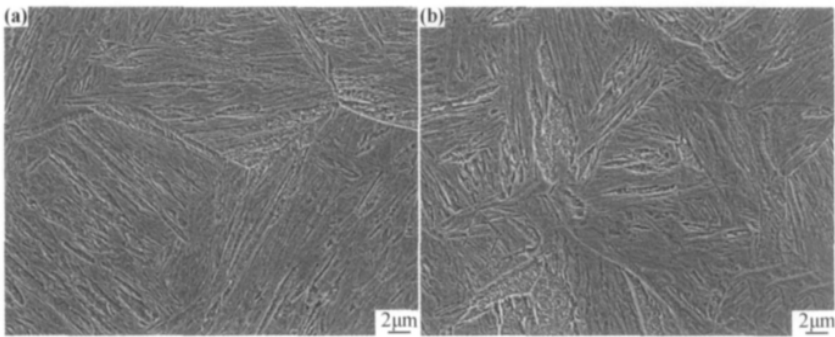


图 2 900℃奥氏体化不同冷速下 SEM 显微组织 (a)0.1℃/s;(b)0.05℃/s  
Fig.2 SEM micrographs in the alloy with cooling rates of 0.1℃/s(a), 0.05℃/s(b) after austenization at 900℃

对 1000℃奥氏体化 10min,0.01℃/s 冷却后的金相组织进行观察,板条内部粒化特征更明显(图 3)。

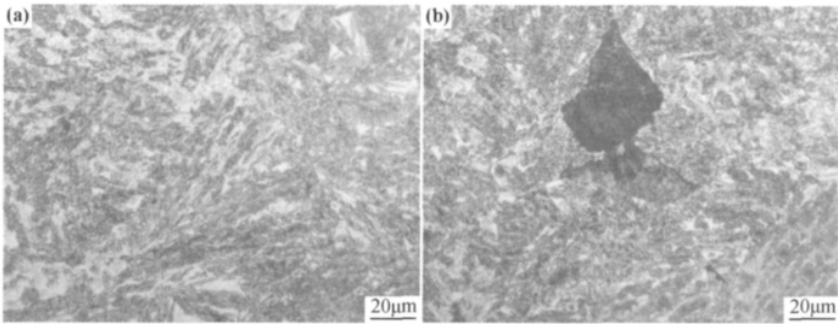


图 3 1000℃奥氏体化冷速 0.01℃/s 下光学显微组织 (a)未含珠光体区;(b)含珠光体区  
Fig. 3 Optical micrographs of microstructure in the alloy with cooling rates of 0.01℃/s after austenization at 1000℃  
(a)area of not containing pearlite;(b)area of containing pearlite

组织的不同必然在转变温度中有所体现,图 1~3 分别为组织转变的起始温度,终了温度和转变温度差值;下角 1,2 为组织第一次和第二次转变。

表 2 不同保温温度和冷速下组织转变温度

Table 2 The transformation temperatures at different temperatures and cooling rates

Cooling rate/(℃·s <sup>-1</sup> )	900℃					1000℃		
	<i>T</i> <sub>s1</sub> /℃	<i>T</i> <sub>f1</sub> /℃	<i>T</i> <sub>s2</sub> /℃	<i>T</i> <sub>f2</sub> /℃	Δ <i>T</i> /℃	<i>T</i> <sub>s</sub> /℃	<i>T</i> <sub>f</sub> /℃	Δ <i>T</i> /℃
0.1	306	179			127			
0.05	354	215			139			
0.015	414	398	350	307	107			
0.01	675	563	398	312	86	412	322	90

可以看出,组织由马氏体逐渐转变为贝氏体,冷速 ≤0.015℃/s 时开始产生珠光体。在 1000℃奥氏体化较 900℃奥氏体化,贝氏体转变温度升高,900℃奥氏体化随着冷速降低,组织转变温度也逐渐升高,但在 0.01℃/s 时,转变温度略有下降,这可能与 0.01℃/s 冷速时珠光体的产生有关。奥氏体化温度增加,相同冷速下,生成的珠光体减少。钢中合金元素对贝氏体起始转变温度 *B<sub>s</sub>* 的影响可用以下经验公式表示<sup>[11]</sup>:

$$B_s(℃) = 830 - 270 \times \%C - 90 \times \%Mn - 37 \times \%Ni - 70 \times \%Cr - 83 \times \%Mo \quad (1)$$

珠光体的产生除带走大量的碳外,也促使合金元素分布的不均匀,因此应为碳和合金元素共同影响的结果。而通过对不同冷速下组织及转变温度的对比,认为片层状组织转变温度较粒状组织转变温度低。

为方便金相组织观察,采用 4%硝酸酒精溶液侵蚀后,将 1%的偏重亚硫酸钠水溶液和过饱和苦味酸酒精溶液按照 1:1 的比例配制,然后将用硝酸酒精侵蚀的试样置于偏重亚硫酸钠和苦味酸的溶液内进行侵蚀染色,得到彩色金相(图 4)。可以看出,除了黑色的珠光体区域外,其余组织在色彩上有所区别。在硝酸酒精侵蚀时出现深色与浅色,深色处彩色金相为褐色,

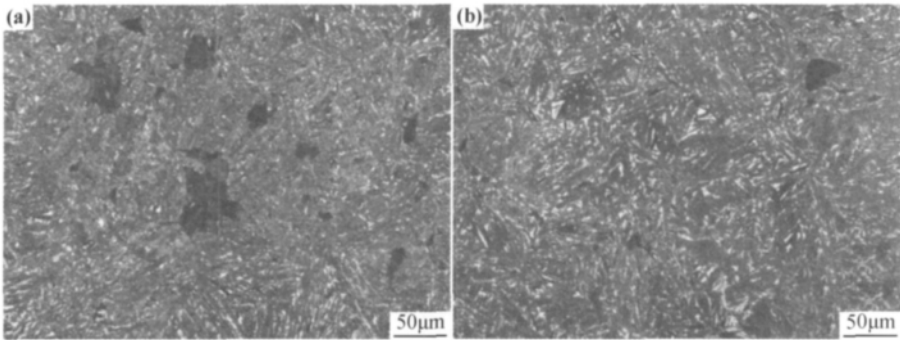


图 4 1000℃奥氏体化冷速 0.01℃/s 彩色金相显微组织 (a)含珠光体区;(b)未含珠光体区  
Fig. 4 Colored metallographs of microstructure in the alloy with rates of 0.01℃/s after austenization at 1000℃  
(a)the area of containing pearlite;(b)the area of not containing pearlite

白色区域少,组织比较杂乱,已看不出片层状结构,从外型上看这些区域跟粒状贝氏体组织比较接近;浅色处彩色金相呈现青色,混合有较多白色区域,组织状态为片层状,从外形上看这些区域跟下贝氏体比较接近。而珠光体主要集中在褐色的粒状贝氏体区域。

对这两种不同形态的组织进行扫描分析和透射分析,结果如图 5、6 所示,可以看出,在成团的粒状区域,

颗粒分布较为杂乱。图 4(b)的片层状结构在扫描照片下外观依然能够呈现规则的片状分布,但片状的区域内分布着细小弥散的颗粒,相对均匀有序,颗粒有序度差别不大。在投射电镜下,可观察到较为杂乱的区域内,颗粒分布、大小长短不一,尺寸差别较大。而在相对较为规则的区域内,颗粒大小差别较小且比较粗大,与片状区的主轴呈现约 45~55°的取向排列。

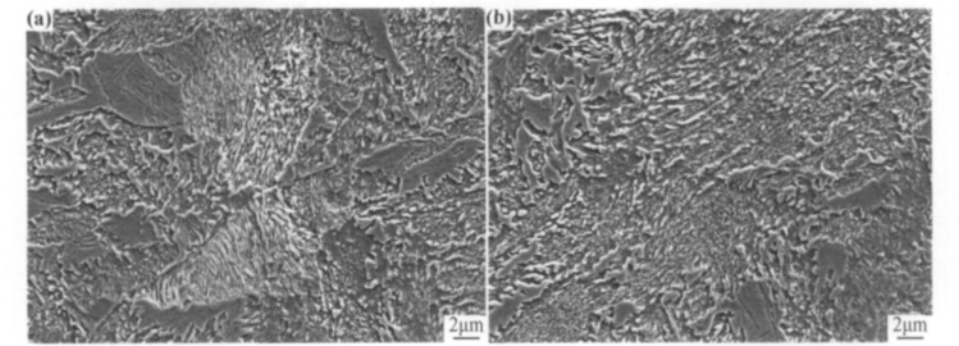


图 5 1000℃奥氏体化冷速 0.01℃/s 不同贝氏体区域 SEM 显微组织 (a)含珠光体区;(b)未含珠光体区  
Fig. 5 SEM micrographs of different position with cooling rates of 0.01℃/s after austenization at 1000℃  
(a)area of containing pearlite;(b)area of not containing pearlite

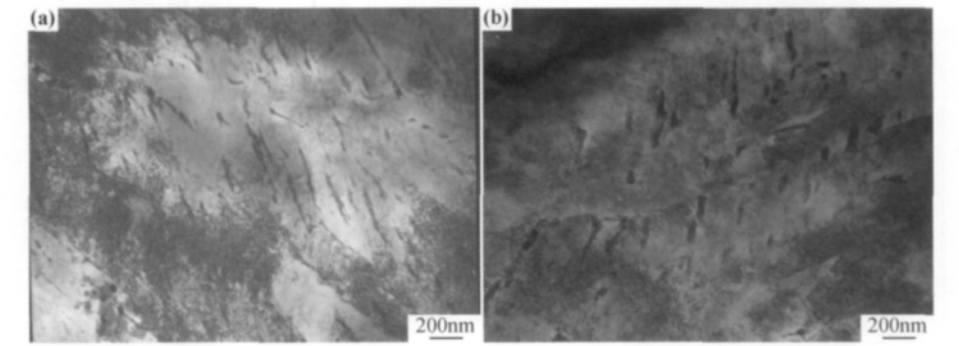


图 6 1000℃奥氏体化冷速 0.01℃/s 不同贝氏体区域 TEM 显微组织 (a)含珠光体区;(b)未含珠光体区  
Fig. 6 TEM micrographs of different position with cooling rates of 0.01℃/s after austenization at 1000℃  
(a)area of containing pearlite;(b)area of not containing pearlite

不同冷却速率及组织对硬度也有一定影响。在不同区域分别选取不少于 5 个点对试样进行硬度测试,然后取各硬度平均值,900℃奥氏体化低冷速冷却时由于出现较多量的珠光体,对不同珠光体区也进行硬度测试。不同温度和冷速下硬度如表 3 所示,通过硬度比较可以看出,在冷速 $\geq 0.05^{\circ}\text{C}/\text{s}$ 时为马氏体组织,冷速 $\leq 0.015^{\circ}\text{C}/\text{s}$ 时为贝氏体。1000℃奥氏体化后的组织由于珠光体区面积太小,已不能得到珠光体区的硬度。可以看出,随着冷速降低,硬度降低,而提高保温温度后,硬度相应提高。一般情况下,组织转变温度越高,硬度越低。而在珠光体出现后,虽然其贝氏体转变温度低于1000℃奥氏体化所生成的贝氏体组织,但其硬度值更低,这除与保温温度有关外,也可能与珠光体的形成从组织中带走部分碳导致贝氏体内含碳量减

表 3 不同保温温度和冷速下组织硬度

Table 3 The microhardness of different temperatures and cooling rates

Holding temperature/℃	Cooling rate/(℃ · s <sup>-1</sup> )	Average hardness
900	0.1	539.7
	0.05	457.4
	0.015	428.3
	0.01(bainite)	404.5
	0.01(pearlite)	261.6
1000	0.01	429.3

少有一定关系。

低冷速下组织形态也不同于回火组织,对实验用钢 900℃淬火,以冷速 0.2℃/s 冷却至室温,经 500℃保温 20min 后,回火组织如图 7 所示。可以看出回火

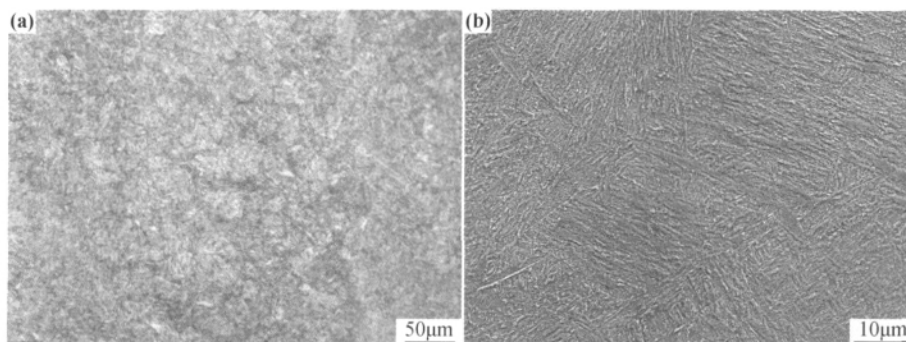


图 7 实验用钢回火组织 (a)光学显微组织;(b)SEM 显微组织

Fig. 7 Tempering microstructure of alloy (a)optical micrograph of microstructure;(b)SEM micrograph

组织由许多细长片状组织组成,上面分布有细小的粒状渗碳体,基体仍保持原组织形貌,分辨不出渗碳体颗粒,这与低冷速下的组织形态明显不同。

### 3 讨论

#### 3.1 温度及冷速对组织转变的影响

在低冷速下粒状贝氏体组织与通常的贝氏体组织有所不同,通过对比可以看出,缓慢冷却条件下贝氏体并不是单一的组织,与文献[6]报道相一致。贝氏体显微组织在一个非常宽的冷却速率范围内得到,但由于温度范围变化大,且转变周期较长,显微组织变化情况变得复杂。在冷速 $\leq 0.015^{\circ}\text{C}/\text{s}$ 时,贝氏体组织部分为成团的粒状组织内部分布有小的颗粒状小岛,而另一部分为片状组织,类似于下贝氏体组织,但内部也分布有粒状小岛,这在光镜下不易于分辨,在 SEM 下可以更清楚地观察到(图 5)。在珠光体周围,组织排列相对较为杂乱,在此区域内观察到的铁素体较多;在浅色区域内,组织在片状区域内排列有一定取向,内部分布有条形分布的粒状组织,而在此区域内观察到的铁素体较少,由此可确定,白色区域含有部分铁素体组织,但并非全部都是铁素体,尚有部分不同取向的粒状区域,由于取向不同在光镜下显示为白色。而铁素体较多区域,组织多呈不规则排列,珠光体也易在不规则排列区域出现。

不同温度下发生贝氏体转变时,随着冷速降低转变起始温度逐渐升高,转变终止温度也随之提高,而转变温度差值在冷速为  $0.05^{\circ}\text{C}/\text{s}$  略有升高后,逐渐降低,转变温度差值  $\Delta T$  分别为 127, 139, 107,  $86^{\circ}\text{C}$ (表 2)。这与文献[6]所描述随着冷速降低,转变温度差值增大有所差异,这可能是由于冷速较慢,碳原子有充分的扩散周期而导致转变温度区间减少。转变产生的不同组织,较高温下为粒状贝氏体,较低温度下为下贝

氏体类型,然而由于在缓慢冷却条件下,在某一温度范围内时间较长,碳原子有充分的时间扩散,碳的浓度梯度及界面处碳浓度均较低,碳化物难于在界面处析出,浓缩成富碳的奥氏体岛而分布在贝氏体铁素体基体上,在继续冷却到室温的过程中,形成岛状结构,最终形成粒状贝氏体组织<sup>[7]</sup>。同时,由于转变温度较低,粒状组织呈现一定的取向分布。因而并非完全的下贝氏体转变,而是含有粒状贝氏体转变特征。

由于冷速较慢,碳化物可以充分扩散,因此在组织里面很难观察到残余奥氏体。残余奥氏体减少导致韧性较差,这与文献[6]的结果相一致,而文献[12]认为,在缓慢冷速下碳从铁素体/奥氏体界面快速扩散,阻碍了板条间渗碳体的形成,在残余奥氏体中增加的碳浓度稳定了奥氏体的形成。残余奥氏体夹杂导致粒状贝氏体形态的形成,与本研所得到的结果相反。

#### 3.2 合金元素对组织转变的影响

贝氏体组织的转变状态除与温度及冷速有关外,与合金元素也有很大的关系。为了确定各元素对缓冷组织形成的影响,用 4% 硝酸酒精对试样进行微侵后放在电子探针显微分析仪下观察,并在适当区域进行测定,测定误差范围 $\leq 5\%$ 。由于组织显示为在微小区域内的不均匀性,甚至在电子探针一个步长之内就出现不同的组织,通过电子探针线扫描观察难以将成分起伏与相应的组织对应,因此决定采用定点分析方法来测定。测试位置示意图如图 8 所示,测得主要元素的质量分数如表 4 所示。

可以看出,珠光体及其附近区域的组织中合金元素含量普遍偏低,以珠光体区所取的点 3 与片状区域所取的点 7 为例,合金元素差值分别为:Si 0.074, Mo 0.098, Ni 0.254, Cr 0.32, Mn 0.463。就其量上来说, Mn 的偏析程度最大。其次是 Cr, Si 和 Mo 最小。但由于合金含量不同,仅仅从元素含量的差值上还难以对比其影响作用的大小,因此以点 3 与点 7 合金元

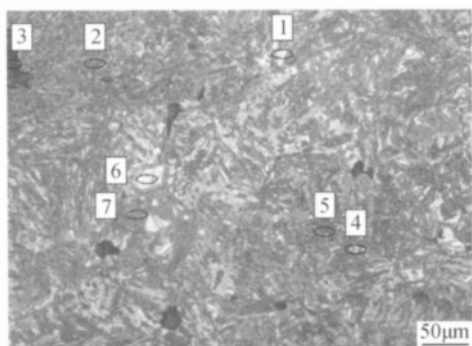


图 8 电子探针测试位置图

Fig. 8 The position of EPMA analysis

表 4 图 8 中不同位置各主要元素含量  
(质量分数/%) (误差范围 $\leq 5\%$ )

Table 4 The main elements content of different position in fig. 8 (mass fraction/%) (error  $\leq 5\%$ )

Element	1	2	3	4	5	6	7
Si	0.191	0.164	0.163	0.178	0.167	0.228	0.237
Mo	0.253	0.140	0.144	0.138	0.113	0.181	0.242
Ni	1.085	0.835	0.853	0.996	0.917	1.074	1.107
Cr	2.869	2.402	2.571	2.599	2.451	2.749	2.891
Mn	1.841	1.430	1.480	1.669	1.565	1.829	1.943
Total	6.239	4.971	5.211	5.580	5.213	6.061	6.420

素比值作为对比,分别为:Mo 0.595, Si 0.688, Mn 0.762, Ni 0.771, Cr 0.889。排除实验误差,可见在这 5 种主要元素中 Mo 的偏析程度相对最大,且 Mo 在出现粒状区域的点 2, 4, 5 处的含量都偏低,在片状区域的点 1, 7 处都偏高。因此可以认为 Mo 对珠光体组织抑制作用最大,其次为 Si,而 Cr 的抑制作用最小。通过点 1 和点 2 的对比可知, Cr 和 Mn 含量的差距较大,而点 1 和点 2 处都为贝氏体,也可以说明 Cr 和 Mn 对珠光体组织的形成影响较小。而点 2 与点 3 处成分更为接近,说明粒状贝氏体的成分更接近于珠光体。

由于成分分布不均匀,在低合金区,首先形成珠光体,当温度低于珠光体转变区时,在珠光体周围形成成分更接近珠光体的粒状贝氏体,在这些区域内,由于转变温度较高,粒状组织活性较大,因此分布较为杂乱(图 3(b))。随着温度的进一步下降,在更低温度下形成类似下贝氏体的片状的贝氏体。

#### 4 结论

(1) 珠光体的出现影响贝氏体转变温度。随着冷速降低,贝氏体转变温度升高。而相同冷速下若出现较多珠光体时,贝氏体转变温度略有下降。

(2) 缓慢冷却条件下贝氏体并不是单一的组织,其

组织不同于快冷条件下的组织,也不同于回火状态下的组织。贝氏体分为成团的粒状区域和片状区域两种不同形态,深色处白色区域少,组织比较杂乱,这些区域跟珠光体组织更接近;浅色处彩色金相呈现青色,白色区域多,组织状态为片层状,跟下贝氏体更接近。

(3) 在缓慢冷却条件下,由于基体内部元素不均匀,抑制珠光体转变元素局部减少,促使珠光体产生。Mo 对珠光体组织抑制作用最大,其次为 Si,而 Cr 和 Mn 的影响最小。同时抑制珠光体形成元素也对粒状贝氏体的出现有一定抑制作用。

#### 参考文献

- [1] AZUMA M, FUJITA N, TALAHASHI M, et al. Modelling upper and lower bainite transformation in steels[J]. ISIJ International, 2005, 45(2): 221-228.
- [2] QUIDORT D, BRECHE T Y J M. Isothermal growth kinetics of bainite in 0.5% C steels[J]. Acta Mater, 2001, 49(20): 4161-4170.
- [3] LAWRYNOWICZ Z. Transition from upper to lower bainite in Fe-C-Cr steel[J]. Materials Science and Technology, 2004, 20(11): 1447-1453.
- [4] BRAMFITT B L, SPEER J G. A perspective on the morphology of bainite[J]. Metallurgical Transactions, 1990, 21A(4): 817-829.
- [5] TAKAHASHI M, BHADESHIA H K D H. Model for transition from upper to lower bainite[J]. Materials Science and Technology, 1990, (7): 592-603.
- [6] QIAO A Z X, LIU A Y C, YU A L M, et al. Formation mechanism of granular bainite in a 30CrNi3MoV steel[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2009, 475(1-2): 560-564.
- [7] 王秉新, 刘相华, 王国栋. 3Cr2Mo 塑料模具钢连续冷却相变行为[J]. 材料科学与工艺, 2010, 18(2): 183-186.
- [8] GUPTA C, DEY G K, CHAKRAVARTTY J K, et al. A study of bainite transformation in a new CrMoV steel under continuous cooling conditions[J]. Scripta Materialia, 2005, 53(4): 559-564.
- [9] 罗毅, 吴晓春, 张洪奎. 大截面非调质和调质预硬型塑料模具钢的组织与相变特性[J]. 机械工程材料, 2009, 33(2): 52-55.
- [10] 方鸿生, 白秉哲, 郑秀华, 等. 粒状贝氏体和粒状组织的形态与相变[J]. 金属学报, 1986, 22(4): 283-290.
- [11] 徐祖耀, 刘世楷. 贝氏体相变与贝氏体[M]. 北京: 科学出版社, 1991. 8-20.
- [12] AARONSON H I, SPAONIS G, REYNOLDS Jr W T. A progress report on the definitions of bainite[J]. Scripta Materialia, 2002, 47(3): 139-144.

收稿日期: 2011-03-29; 修订日期: 2011-08-15

作者简介: 周洪宝(1979—), 男, 博士研究生, 主要研究方向: 塑料模具钢组织与性能研究, 联系地址: 北京市海淀区学院路 30 号北京科技大学高效轧制国家工程研究中心(100083), E-mail: zhouhongbao1104@126.com