

· 组织和性能 ·

冷却速率对 M2 高速工具钢铸锭凝固组织的影响

赵志刚^{1,2} 颜慧成² 仇圣桃² 朱荣¹

(1 北京科技大学冶金与生态工程学院,北京 100083;2 钢铁研究总院连铸技术国家工程研究中心,北京 100081)

摘要 试验 M2 钢(成分:0.81C,0.31Si,0.33Mn,4.01Cr,4.57Mo,5.71W,1.77V)由实验室 25 kg 高频真空感应炉熔炼,并浇铸成横截面 50 mm×100 mm 钢锭。研究了水冷铜模和铸铁模浇铸的 M2 钢的低倍组织、晶粒尺寸和碳化物分布。结果表明,快速冷却可有效控制和消除 M2 钢铸锭中的柱状晶,随着冷却速率增大,M2 钢铸锭部分气泡上浮不完全,但中心缩孔显著减小,晶粒更细小且分布更均匀,碳化物更加弥散且细小;铸铁模锭边缘和中心部分的晶粒尺寸分别为 40~57 μm 和 55~62 μm,而水冷铜模锭边缘和中心部分的晶粒尺寸分别为 30~40 μm 和 50 μm。

关键词 M2 高速工具钢 冷却速率 凝固 低倍 晶粒尺寸 碳化物

Effect of Cooling Rate on Solidification Structure of M2 High Speed Tool Steel Ingot

Zhao Zhigang^{1,2}, Yan Huicheng², Qiu Shengtao² and Zhurong¹

(1 School of Metallurgical and Ecological Engineering, University of Science and Technology, Beijing 100083; 2 National Engineering Research Center of Continuous Casting Technology, Central Iron and Steel Research Institute, Beijing 100081)

Abstract The test M2 steel (composition: 0.81C, 0.31Si, 0.33Mn, 4.01Cr, 4.57Mo, 5.71W, 1.77V) is melted by a 25 kg high-frequency induction furnace and cast to cross section 50 mm×100 mm ingots in laboratory. The macro-structure, grain size and distribution of carbides of M2 steel ingot casting by water-cooling copper mould and cast iron mould are studied. Results show that higher cooling rate is available to control and eliminate the columnar crystal in ingot of M2 steel; with increasing the cooling rate the partial bubbles in M2 steel ingot float off incompletely but the central shrinkage of ingot decreases significantly, the grains are fine and uniform distribution, and the carbides in steel are more dispersed and fine; the grain size at edge and center of ingot with cast iron mould process are respectively 40~57 μm and 55~62 μm and that with water-cooling copper mould process are respectively 30~40 μm and 50 μm.

Material Index M2 High Speed Tool Steel, Cooling Rate, Solidification, Macrostructure, Grain Size, Carbide

M2 钢(我国牌号 W6Mo5Cr4V2 钢,简称 6-5-4-2 钢)是我国 20 世纪 70 年代因热轧麻花钻生产的需要,引入的一种钨钼系通用型高速工具钢。20 世纪中期以后,随着科学技术的飞速发展,许多超硬工具材料不断出现,它们在切削速度、效率以及切削难加工材料上有着高速钢无法比拟的优势,但是高速钢的韧性、工具成型性却是任何脆性超硬材料无法相提并论的,因此高速钢仍处于基础地位,M2 钢是世界上应用最广泛的高速工具钢之一^[1]。

由于 M2 钢中合金含量较高,钢的导热性差,变形抗力大,加之其特殊的使用性能,要求其具有优良的组织性能,而凝固过程对铸坯的组织性能有着重要影响,所以合理的冷却制度对得到较好质量的 M2 钢铸锭是相当关键的^[2-3]。

冷却速率对钢的组织性能、碳化物分布有重要影响,合理的冷却制度对避免和减轻铸锭中的裂纹、缩孔、偏析等缺陷有着积极的作用。冷却制度基本

上可分为两种,强冷却和弱冷却制度。对于高速工具钢的冷却国内大多数厂家采用砂型模铸工艺生产,属于一种比较弱的冷却方式。弱冷条件下 M2 钢铸锭枝晶较发达,且中心缩孔较严重,不利于后续的轧制过程。实验采用铸铁模和水冷铜模的方式模铸,对比铸锭的组织结构及碳化物,得出冷却制度对铸锭质量的影响趋势,为 M2 钢铸锭合理生产提供理论参考。

1 实验过程和方法

采用高频真空感应炉(容量 25 kg)熔炼 M2 钢,同时微调成分,待温度达到 1450 ℃(M2 钢液相线温度 $T_{液}$ 为 1430 ℃),且成分合适的情况下(见表 1),浇铸成两块横截面为 50 mm×100 mm 的钢锭。其中一钢锭(1#铸锭)采用水冷铜模冷却至室温;另一钢锭(2#铸锭)采用铸铁模浇铸冷却。下面从铸坯质量(低倍及金相组织)进行分析与探讨,研究不同冷却制度对 M2 钢铸锭质量的影响。

表 1 M2 钢化学成分 / %

Table 1 Chemical composition of M2 steel / %

项目	C	Si	Mn	Cr	Mo	W	V
M2 (ASTM)	0.80 ~ 0.90	0.20 ~ 0.45	0.15 ~ 0.40	3.80 ~ 4.40	4.50 ~ 5.50	5.50 ~ 6.75	1.75 ~ 2.20
M2 (实验)	0.81	0.31	0.33	4.01	4.57	5.71	1.77

在铸铁模冷却条件下,中心缩孔比较严重,这样在轧制过程中将会带来裂纹及断裂的危险。而水冷铜模冷却条件下,中心没有明显的缩孔,但铸坯中存在部分气泡,这是因为实验室条件有限,无法实施有效的保护浇注,随着钢液流会带入大量气泡,同时凝固速度较快,部分气泡没来得及上浮钢液就凝固造成的。

这些气孔可以通过保护浇注消除。

2.2 M2 钢铸态组织

2.2.1 M2 钢铸态组织取样

标记 1# 为水冷铜模冷却, 2# 为铸铁模冷却。在两个小扁锭的底部,沿横向截面各切取 6 个 20 mm 厚试样进行铸态组织观察分析。如图 2 所示,截面尺寸为 100 mm × 50 mm,其中, Y 为钢锭长度方向, X 为钢锭宽度方向, Z 为钢锭厚度方向。

2.2.2 M2 钢铸态组织晶粒尺寸

金属的晶粒大小对其力学性能有重要的影响。实验表明,在常温下细晶粒金属比粗晶粒金属有更高的强度、硬度、塑性和韧性。这是因为细晶粒受到外力发生塑性变形时,其塑性变形可分散在更多的晶粒内进行,塑性变形较均匀,应力集中较小。此外,晶粒越细,晶界面积越大,晶界越曲折,越不利于裂纹的扩展。对试样进行抛光后,采用 10% 的 FeCl₃ 溶液腐蚀得到 1# 水冷铜模冷却铸锭与 2# 铸铁模冷却铸锭晶粒尺寸如图 3、图 4 所示。

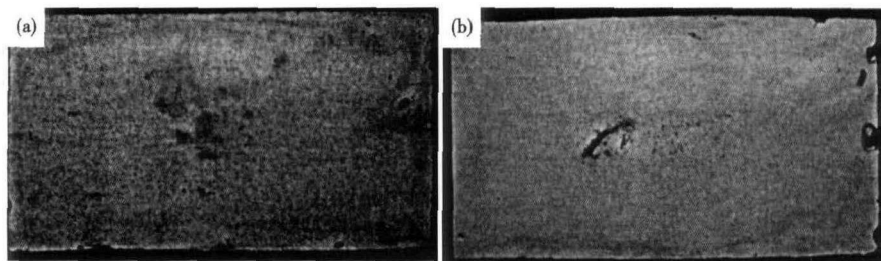


图 1 水冷铜模 1# 锭(a)和铸铁模 2# 锭(b)工艺浇铸的 M2 钢锭低倍组织形貌
Fig. 1 Morphology of macrostructure of M2 steel ingot casting by water-cooling copper mould process, 1# ingot (a) and cast iron mould process, 2# ingot (b)

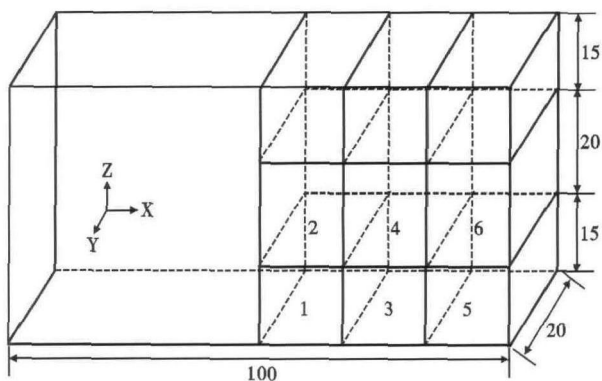


图 2 铸锭断面取样示意图
Fig. 2 Schematics of casting ingot cross section sampling

2 实验结果及分析

2.1 M2 钢低倍组织

考虑到铸锭头部存在凹陷,取样选取距钢锭底部 100 mm 处(铸锭总长 300 mm),取样厚度 20 mm。选用 45% 的盐酸溶液在温度为 40 °C 时,对试样进行酸洗。

选用 45% 的盐酸溶液在温度为 40 °C 时,对打磨后的试样进行酸洗。1# 与 2# 铸锭的低倍组织如图 1 所示,图 1 中的两块铸锭没有明显的枝晶生长方向,可见水冷铜模和铸铁模条件下 M2 钢铸锭中树柱状晶可以有效的控制和消除。同时从图 1 可以发现,

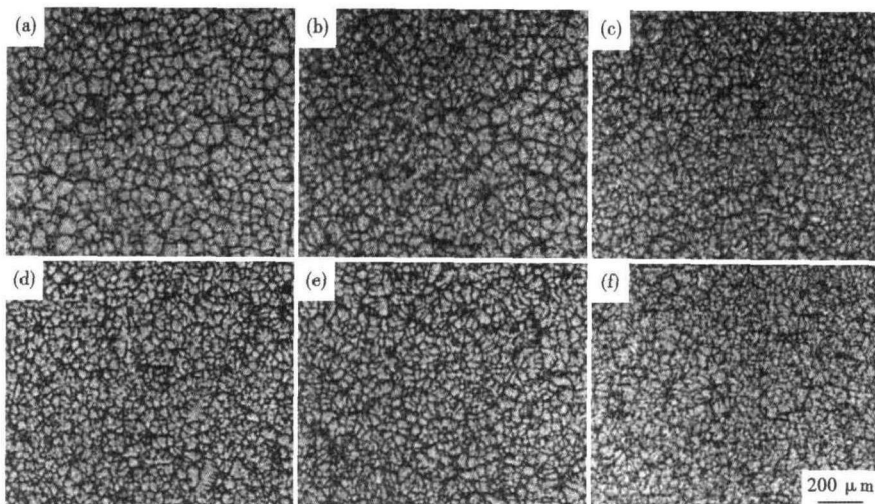


图 3 水冷铜模冷却工艺浇铸 1# M2 钢锭的组织形貌: 试样(a)1#-2; (b)1#-4; (c)1#-6; (d)1#-1; (e)1#-3; (f)1#-5

Fig. 3 Morphology of structure of M2 steel 1# ingot casting by water-cooling copper mould process: sample (a)1#-2; (b)1#-4; (c)1#-6; (d)1#-1; (e)1#-3; (f)1#-5

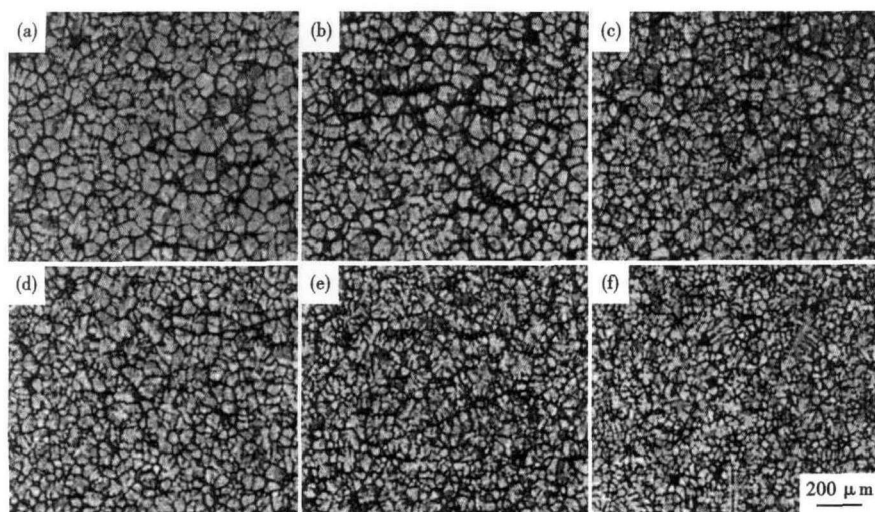


图4 铸铁模冷却工艺铸造的2#M2 钢锭组织形貌:试样(a)2#-2;(b)2#-4;(c)2#-6;(d) 2#-1;(e)2#-3;(f)2#-5

Fig. 4 Morphology of structure of M2 steel 2# ingot casting by cast iron mould process: sample (a)2#-2;(b)2#-4;(c)2#-6;(d)2#-1;(e)2#-3;(f)2#-5

通过图3和图4可以看出,铸铁模冷却铸锭与水冷铜模冷却铸锭晶粒均较细小,且均为等轴晶;对比图3与图4相应位置晶粒尺寸可以发现水冷铜模冷却的铸锭较铸铁模冷却的铸锭晶粒细小。

在图形软件 Adobe Photoshop 7.0 上将图3与图4中金相照片放大至一定倍数,添加参考线(长度 L_i 、条数 n),利用 Measure Tool 统计与长度为 L_i 参考线相交的晶粒个数 N_i 。晶粒的大小 L 的计算公式如

$$\bar{L} = \frac{\sum L_i}{nN_i} \quad (1)$$

利用式(1)对 M2 高速钢铸锭中晶粒进行测量和统计平均,结果如图5所示。

从图5可以得出,铸铁模冷却的2#铸锭中1~6号试样晶粒尺寸较水冷铜模冷却的1#铸锭相应1~6号试样晶粒尺寸粗大,铸铁模冷却的试样晶粒尺寸依次比水冷铜模冷却的试样晶粒尺寸大90.9%、21.0%、18.5%、8.6%、42.2%、28.3%。取平均得出铸铁模冷却的铸锭比水冷铜模冷却的铸锭晶粒尺寸平均大35%。可见对于 M2 钢冷却速度越大晶粒越细小。

对比图4、5、6可以看出,在两种不同的冷却制度下,5号试样处晶粒较同一铸锭其他试样细小,而2号试样晶粒较其他试样粗大,这是因为5号试样位于铸锭的角部,冷却速率较大,而2号试样位于铸

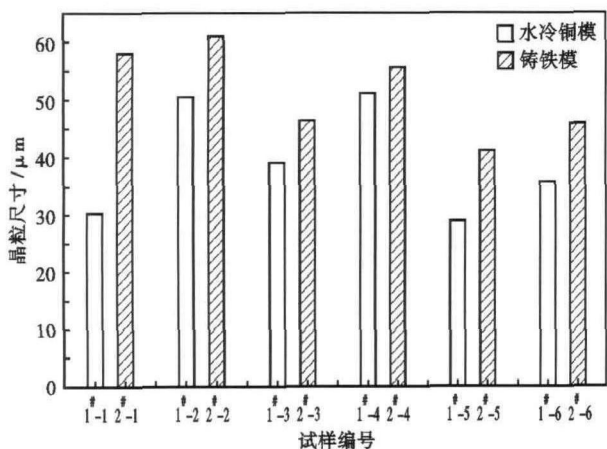


图5 水冷铜模浇铸和铸铁模浇铸 M2 铸锭不同位置晶粒尺寸对比

Fig. 5 Comparison between sizes of grain at different location of M2 steel ingot casting by water-cooling copper mould process and cast iron mould process

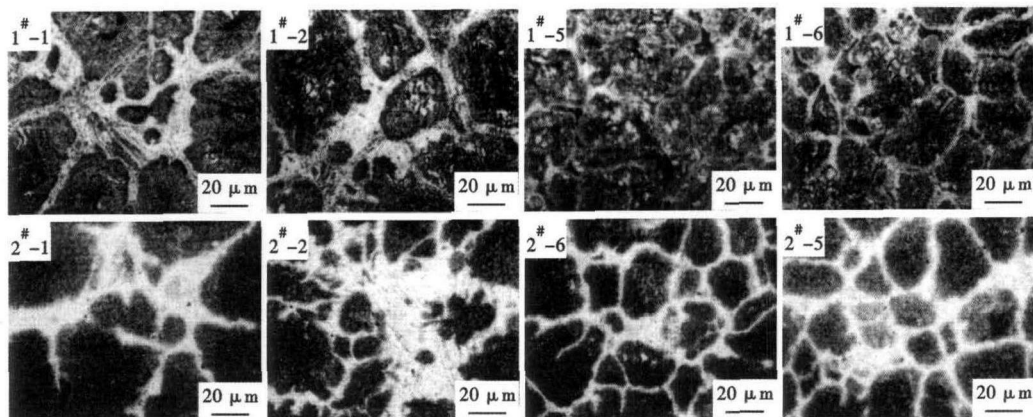


图6 水冷铜模工艺(上排1#铸锭)和铸铁模工艺(下排2#铸锭)浇铸 M2 钢铸锭碳化物分布

Fig. 6 Distribution of carbides in ingot of M2 steel casting by water-cooling copper mould process (upper row 1# ingot) and cast iron mould process (lower row 2# ingot)

锭的中心部位,冷却速率较小。从铸锭中心到铸锭边部的取样结果为 2、4、6 号试样。对比图 3 和图 4 中的 2、4、6 号试样可以发现,从铸锭中心到铸锭边部晶粒逐渐减小,同样是因为冷却速率不同导致,靠近边部的冷却强度要大于铸坯中心位置处的冷却强度。由此可以通过水冷铜模在 M2 钢中得到较为细小且均匀的等轴晶。

2.2.3 M2 钢铸态组织碳化物

碳化物是高速钢中最重要的相,高速钢的化学成分、冶炼条件、各种热加工过程,决定了碳化物相的种类、数量、形状、大小以及分布情况。而碳化物的这些特点,对高速钢的各种性能又起着决定的作用。分布均匀细小的碳化物决定了高速钢具有高的硬度、红硬性及耐磨性等优异的性能。铸造 M2 高速钢中粗大的铸态组织和晶界网状共晶碳化物严重削弱材料的韧性、磨削性^[4-9],且难以用热处理方法消除^[10-11]。因此,改变铸造高速钢共晶碳化物的形态和分布,推广铸造高速钢应用的研究,一直受到国内外科技工作者的重视^[12-13]。

1[#]、2[#]铸锭中碳化物的分布如图 6 所示,图 6 列举了冷却条件差异较大的铸锭中心处 1、2 号试样以及铸锭边部 5、6 号试样的碳化物分布情况。从图 6 可见,1[#]铸锭中碳化物尺寸较相应位置的 2[#]铸锭碳化物细小。这是因为 1[#]铸锭各试样晶粒尺寸较 2[#]铸锭晶粒尺寸细小,由于晶粒的细化,凝固后期在晶

粒间由于偏析而形成的共晶钢液熔池变小,从而使共晶碳化物得到细化。可见水冷铜模条件下更容易获得较为细小的晶粒,从而获得尺寸细小的碳化物。

从图 6 可以看出,1[#]-5、1[#]-6 试样的碳化物由细小均匀的颗粒状碳化物和短条状碳化物组成。1[#]-2、2[#]-5、2[#]-6 试样大部分碳化物呈网状,颗粒状及短条状碳化物较少。1[#]-1、2[#]-1、2[#]-2 试样由于铸态组织粗大,共晶碳化物形态为层片状和鱼骨状,呈粗大网状分布于晶界上。可见随着冷却速率的增大,晶粒间碳化物的分布均匀弥散,碳化物尺寸逐渐减小,铸锭的质量得到改善。可见水冷铜模对铸锭中碳化物的分布有着积极的作用。

3 结论

(1) 铸铁模和水冷铜模条件下 M2 钢铸锭中柱状晶可以得到有效控制和消除。

(2) 冷却速率越大铸锭中心缩孔有减弱的趋势,但气泡的上浮会受到一定的影响。

(3) 随着冷却速率的增大,M2 钢晶粒及碳化物细小且分布均匀,铸铁模冷却条件下晶粒尺寸比水冷铜模冷却条件下平均大 35%。

(4) 随着冷却速率的增大,M2 钢碳化物细小且分布均匀。

(5) 快的冷却速率对生产 M2 钢铸锭有着积极的作用。

参考文献

- [1] 邓玉昆,陈景荣,王世章. 高速工具钢[M]. 北京:冶金工业出版社,2002:156.
- [2] 李正邦. 发展我国高速钢的战略分析[J]. 特殊钢,2006,27(1):1-6.
- [3] 赵建政,贾志琦. 国内外高速钢发展现状[J]. 科技情报开发与经济,1997(1):13-15.
- [4] 郭耕三. 高速钢及其热处理[M]. 北京:机械工业出版社,1985:265.
- [5] Leskovsek V, Vle B. Improved Vacuum Heat-treatment for Fine-blanking Tools From High-speed Steel M2 [J]. Materials Processing Technology, 1998, 82:89-94.
- [6] Bergman F, Hedenqvist P, Hogmark S. The Influence of Primary Carbides and Test Parameters on Abrasive and Erosive Wear of Selected PM High Speed Steels [J]. Tribology International, 1997, 30(3):183-191.
- [7] Shaikh Q A, Coleman D S, Bates J, et al. Wear and Microstructural Studies of Alloy Sintered Steels [J]. Journal of Materials Science & Technology, 1991, 7:728-738.
- [8] Dunlop G L, Wang Rong. Development of Microstructure during Heat Treatment of High Speed Steels [Z]. Leoben: Proceeding First International HSS Conference, 1990:33-40.
- [9] El-Rakaby A M, Mi Us B. On the Microstructure and Mechanical Properties of High Speed Steels [J]. Journal of Materials Science & Technology, 1988; 23:4340-4344.
- [10] Ghomaschi M R, Sellar C M. Microstructural Changes in as-cast M2 Grad High Speed Steel during High Temperature Treatment [M]. Metal Science, 1984, 18(1):44-48.
- [11] Lenta E J, Twentyman M E, Pesci H. Transformation of the Primary Carbide Networks in High-speed Steels by Heat Treatment at High Temperatures [J]. Metallography, 1983, 16:387-401.
- [12] Kheirandish Sh, Mirdamadi Sh, Kharrazi Y H K. Effect of Titanium on Cast Structure of High Speed Steels [J]. Materials Science and Technology, 1998(14):312-316.
- [13] 赵玉谦,姜启川,赵宇光,等. 铝复合变质处理 M2 铸造高速钢的影响 [J]. 吉林工业大学学报, 1997, 27(2):28-32.

赵志刚(1985-),男,博士研究生(钢铁研究总院),2009年昆明理工大学(本科)毕业,工模具钢连铸研究。

E-mail: zhaozhigang119@126.com

收稿日期:2013-12-04