

电渣重熔连续定向凝固 M2 高速钢铸态组织的研究

The As-cast Microstructure of ESR-CDS
M2 High Speed Steel

占礼春^{1,2}, 迟宏宵², 马党参², 付锐³, 蒋业华¹

(1 昆明理工大学 材料科学与工程学院, 昆明 650093;

2 钢铁研究总院 特殊钢研究所, 北京 100081;

3 钢铁研究总院 高温材料研究所, 北京 100081)

ZHAN Li-chun^{1,2}, CHI Hong-xiao², MA Dang-shen², FU Rui³, JIANG Ye-hua¹

(1 Faculty of Materials and Science, Kunming University of Science and

Technology, Kunming 650093, China; 2 Special Steel Research Institute of

CISRI, Beijing 100081, China; 3 High Temperature Material

Research Institute of CISRI, Beijing 100081, China)

摘要: 研究了传统电渣重熔工艺(ESR)和电渣重熔连续定向凝固技术(ESR-CDS)所得到的 M2 高速钢铸态显微组织。结果表明:采用 ESR 工艺得到铸态组织边部为树枝晶且部分出现了三次枝晶,心部为粗大的等轴晶,晶粒之间有网状碳化物,铸锭的偏析较为严重,经深腐蚀凝固组织基体与碳化物过渡区较为疏松、粗糙,部分基体内部出现了细小的裂纹。而采用 ESR-CDS 工艺得到铸态组织边部和心部都以较为细小的树枝晶为主,组织中存在比较多的“不连续的复合规则型”的碳化物,组织较为均匀,经深腐蚀,碳化物与基体过渡区圆滑。

关键词: 电渣重熔连续定向凝固; M2 高速钢; 铸态组织

doi: 10.3969/j.issn.1001-4381.2013.07.006

中图分类号: TG142.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4381(2013)07-0029-06

Abstract: The ESR and ESR-CDS casting microstructure of the M2 high speed steel was studied. The results show that the casting' edge is dendrite and appears three times dendrite with ESR, and the structure of heart are coarse equiaxed grains, between which is network carbide, and the segregation of ingot is more serious, the matrix and carbide transition region is loose and rough, and the fine crack is found of some part of the substrate with the deep etching. However, the structure of casting' edge and heart are small dendrite, and there are more "discontinuous composite regular type" carbide, the structure is more uniform, the transition zone of carbide and matrix is smooth with the depth of corrosion.

Key words: ESR-CDS; M2 high speed steel; as-cast microstructure

作为特种冶金技术之一的电渣冶金,对高速钢的生产尤其重要。国内外电渣重熔技术的发展几乎都与高速钢的生产工艺有关。M2 高速钢(我国牌号 W6Mo5Cr4V2 钢),是 20 世纪 60 年代以来,国际上生产量最多、应用最广的 W-Mo 系通用高速钢,因其优异的性能,被公认为高速钢家族中最具代表性的钢种。高速钢铸态组织由于受化学成分和冷却速率等的影响,很不均匀。特别是传统电渣重熔高速钢点状偏析相当严重,影响钢材的加工塑性,降低成材率,同时给刀具的加工和使用带来一定的危害^[1]。

ESR 工艺冶炼铸锭的组织主要由与铸锭轴线呈

一定夹角的柱状晶组成,有时在铸锭中心还存在粗大的等轴晶^[2]。ESR-CDS 工艺通过控制铸锭凝固过程中的热流传递方向,凝固前沿的温度梯度和凝固速率,获得完全由与铸锭轴线平行的柱状晶组成的铸锭且枝晶干的生长方向保持一致,一方面消除了不同取向晶粒的交界区域,另一方面消除了不同生长方向枝晶交汇处严重的元素偏析和析出相的聚集,从而提高铸锭的热加工塑性^[3]。文献[4—6]研究认为,降低铸锭中元素偏析程度,控制枝晶间一次析出相的数量、尺寸和形态是提高合金铸锭热加工变形性能的有效方法。目前,将 ESR-CDS 技术应用于高速钢方面的研究在国内

外的报道较少,本工作以 M2 高速钢为代表,利用电渣重熔连续定向凝固技术冶炼,并对其铸态组织进行了研究。

1 实验材料和方法

实验钢采用 ESR 及 ESR-CDS 技术冶炼,化学成分见表 1,钢锭经去应力退火(730℃保温 16h 炉冷)后,在钢锭一端取样,加工成 20mm×20mm×20mm 的铸态试样。浅腐蚀和深腐蚀试样分别采用 4%硝酸酒精溶液和盐酸硝酸水溶液。采用德国 LEICA MEF4M 光学金相显微镜、日立 S-4300 扫描电子显微镜进行显微组织观察及能谱分析。

表 1 实验用钢的主要化学成分(质量分数/%)

Table 1 The main chemical composition of tested steel (mass fraction/%)

	C	Cr	Mn	Mo	Si	V	W	Fe
ESR	0.86	3.88	0.25	4.74	0.32	1.82	5.85	Bal
ESR-CDS	0.88	3.92	0.22	4.68	0.30	1.88	6.02	Bal

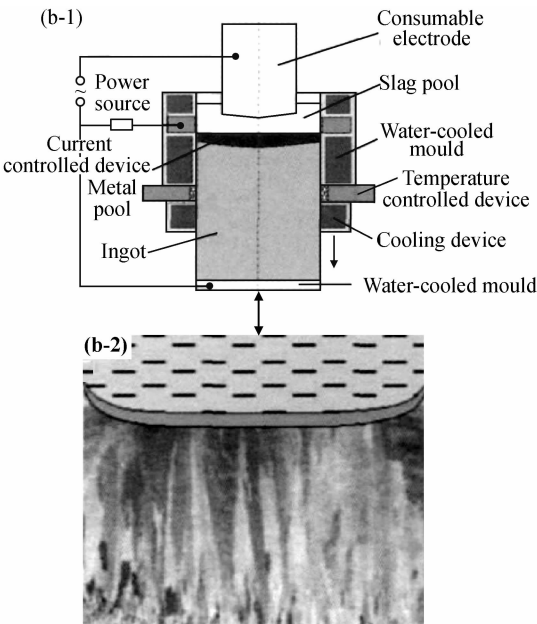
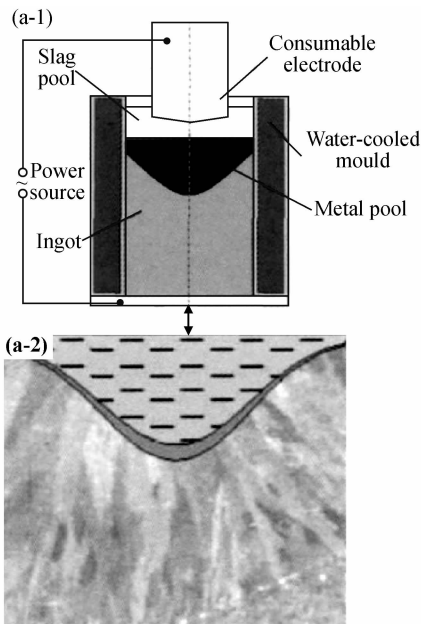


图 1 ESR(a)与 ESR-CDS(b)示意图^[2] (1)凝固工艺示意图;(2)铸锭组织
Fig. 1 Diagram of ESR(a) and ESR-CDS(b)^[2] (1)diagram of solidification process;(2)organization of solidification ingot

2.2 边部和心部显微组织

取实验钢边部和心部组织进行金相观察,分别如图 2 和图 3 所示。并对横纵向组织枝晶间距进行测量,结果如表 2 所示。一般高速钢的铸态组织可以看成是由两大部分构成:一是钢的基体组织,由孤立且不连续的奥氏体晶粒组成,称为初生晶粒;二是存在于各晶粒之间的共晶莱氏体网以及先共晶碳化物^[1]。

2 实验结果及分析

2.1 电渣重熔连续定向凝固工艺

要得到定向凝固的铸锭必须满足以下三个条件:(1)铸锭的热流传递方向与凝固方向相反且平行于铸锭轴线;(2)合适的凝固前沿温度梯度;(3)适当的凝固速率。传统电渣重熔工艺和电渣重熔连续定向凝固工艺的示意图见图 1,可见传统电渣重熔工艺无法对热流传递方向,凝固前沿的温度梯度和凝固速率进行精确控制,形成的熔池较深,得到的铸锭组织由与凝固方向呈一定夹角的柱状晶组成(见图 1(a-2))。而电渣重熔连续定向凝固工艺采用连续抽锭式双电流回路设计,可以通过改变冷却方式控制热流的传递方向,通过控制侧向电流的大小来控制渣池的温度得到适当的温度梯度,通过控制抽锭速率和总电流的大小来获得合适的凝固速率,在合适的工艺条件下形成浅而平的熔池,从而使铸锭获得全部与铸锭轴线近似平行的柱状晶(见图 1(b-2))。

由图 2 可看出,ESR 工艺得到的基体组织在形态和大小上极不均匀,一次枝晶和二次枝晶都很粗大,部分出现了较为粗大的三次枝晶,共晶莱氏体呈不均匀的片状,铸锭的偏析较为严重。ESR-CDS 工艺得到的组织较为均匀致密,以细小的树枝晶为主,共晶莱氏体周围有大量的白色基体,莱氏体细小,有些呈短棒状,在后续的变形加工过程中对材料的组织性能更有利^[7]。

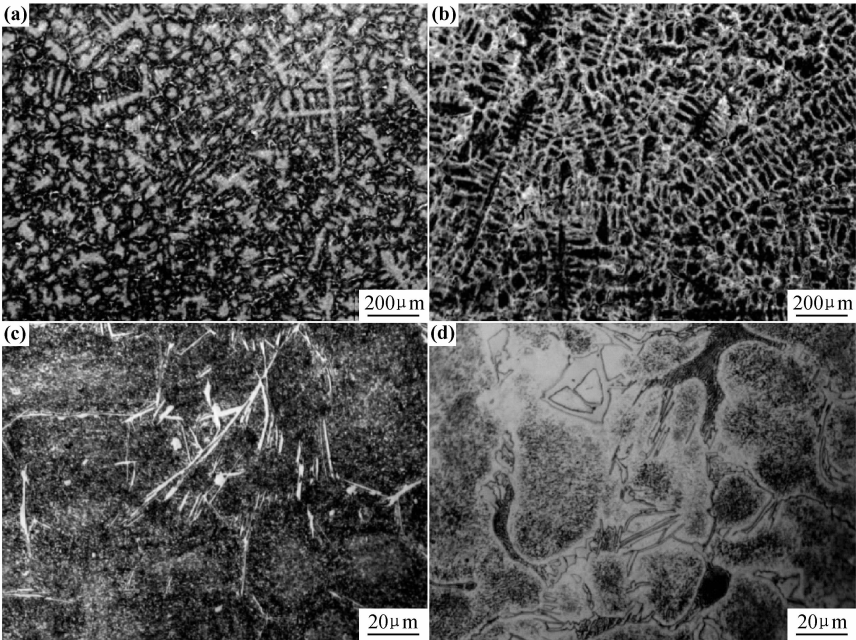


图 2 不同凝固方式边部组织 (a),(c) ESR 凝固;(b),(d)ESR-CDS 凝固

Fig. 2 The edge structure of different solidification mode (a),(c) ESR;(b),(d)ESR-CDS

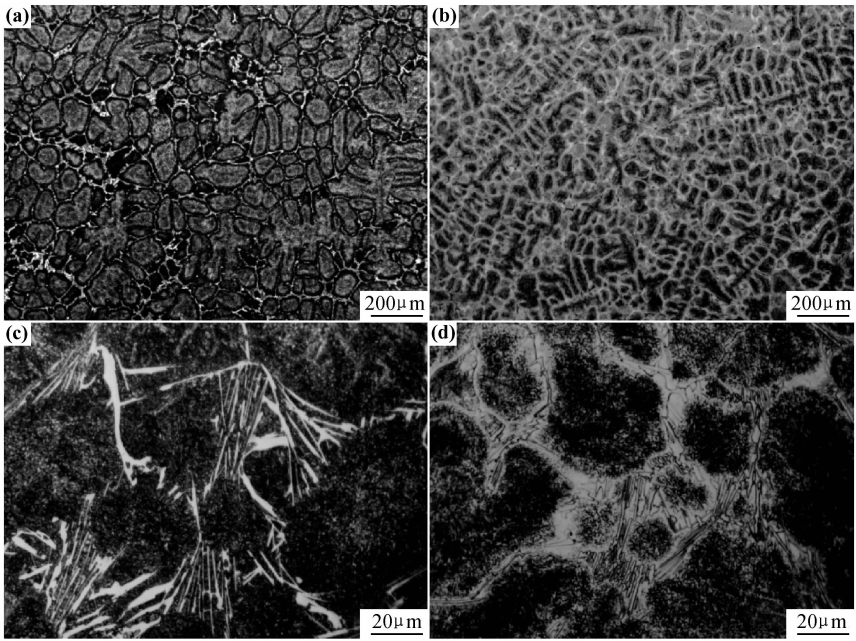


图 3 不同凝固方式心部组织 (a),(c) ESR;(b),(d) ESR-CDS

Fig. 3 The center structure of different solidification mode (a),(c)ESR;(b),(d)ESR-CDS

由图 3 可见,ESR 工艺得到的心部组织等轴晶疏松粗大,且存在较为粗大的树枝晶,网状碳化物较连续,类似扇形的莱氏体片状粗细不一,初生晶粒极不均匀,晶界偏析较为严重。而 ESR-CDS 工艺得到的组织有大量均匀细小的树枝晶,莱氏体短、细小,较为圆滑,有的呈短棒状及颗粒状,周围有白色的基体组织。由图 2 和图 3 可看出,采用 ESR-CDS 工艺得到的铸态组织边部和心部组织较为均匀。对实验钢横向和纵向组织枝晶间距进行了测量,如表 2 所示。

表 2 实验钢的枝晶间距				
Table 2	The dendrite arm spacing of the tested steel			
	Horizontal edge/ μm	Horizontal center/ μm	Vertical edge/ μm	Vertical center/ μm
ESR	32.37	45.33	30.39	47.01
ESR-CDS	34.47	38.79	34.62	47.96

由表 2 可知:横向上,ESR 工艺得到的边部和心部组织枝晶间距相差比较大,差值为 $13\mu\text{m}$ 左右,而 ESR-CDS 工艺得到的边部和心部差值相差较少,为

4 μm 左右。同时,两者的心部枝晶间距值也有一定的偏差,进一步说明 ESR-CDS 方法得到的组织更加均匀一致,且较致密。纵向上,两者边部和心部变化趋势基本一致。造成以上原因主要是由于两者凝固机理的不同^[3,8]。

2.3 铸态扫描组织观察

对 ESR 及 ESR-CDS 工艺方法得到的铸态组织进行浅腐蚀和深腐蚀,用扫描电镜观察组织,分别如图 4 和图 5,并对碳化物和基体组织进行了能谱分析,如图 6。

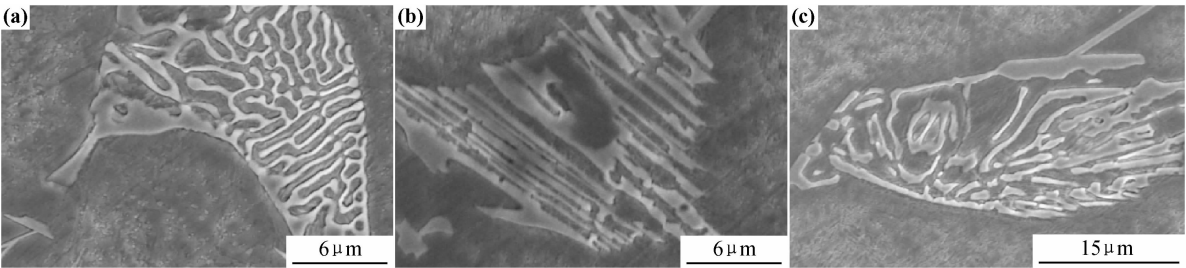


图 4 浅腐蚀 M_2C 形貌 (a)复合型;(b)不规则型;(c)不连续复合规则型

Fig. 4 Morphology of M_2C with shallow etching (a) composite type; (b) irregular type; (c) discontinuous composite regular type

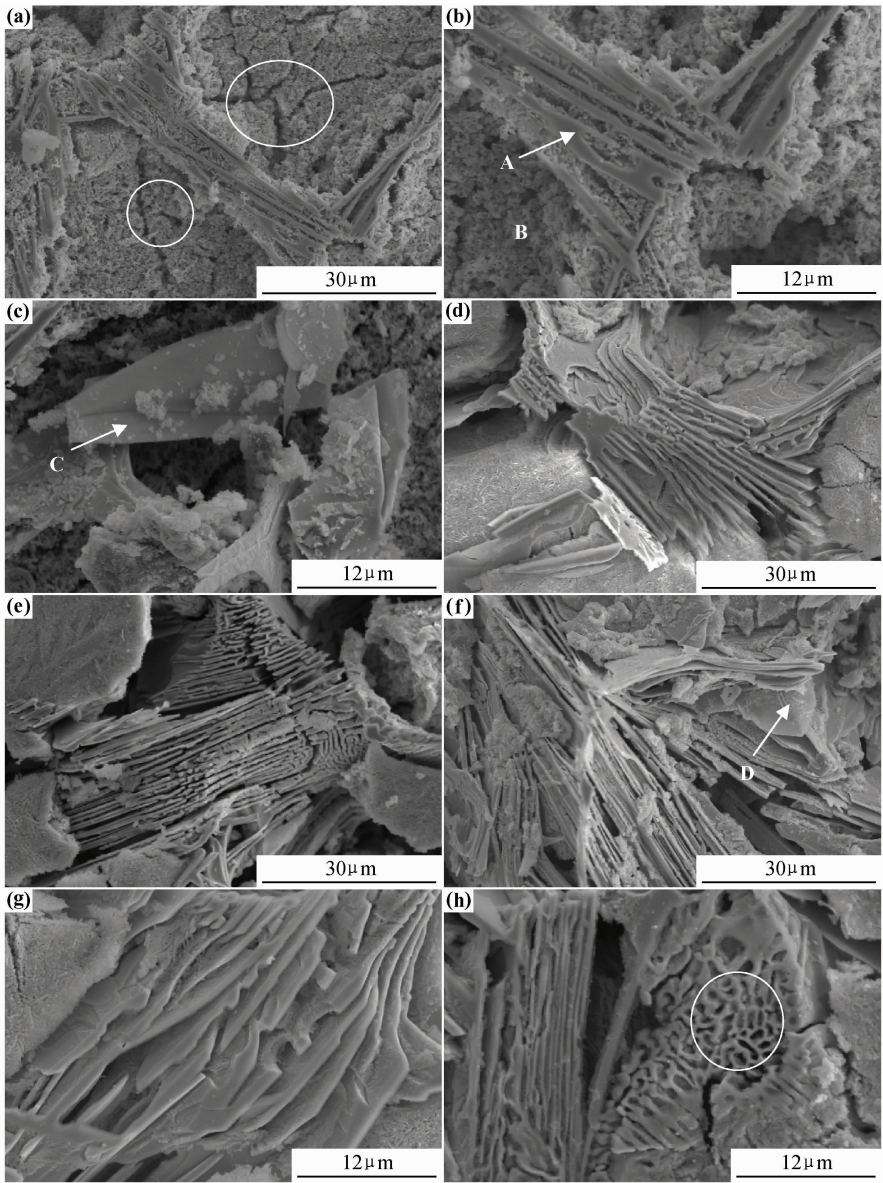


图 5 深腐蚀组织 (a),(b),(c)ESR;(d),(e),(f),(g),(h)ESR-CDS 组织形貌

Fig. 5 Microstructure of deep etching (a),(b),(c)ESR;(d),(e),(f),(g),(h)ESR-CDS

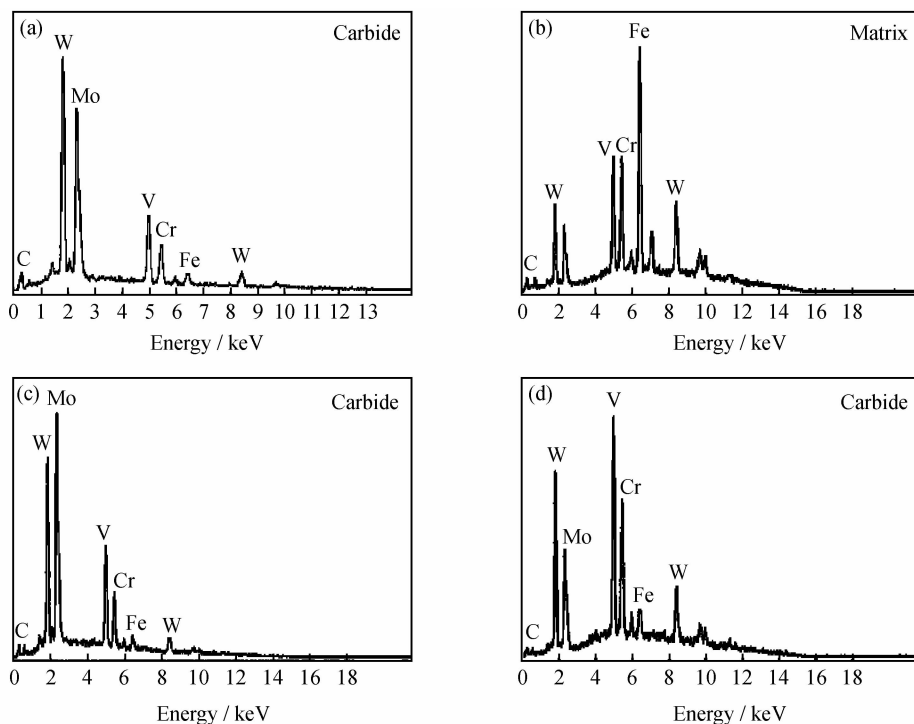


图6 实验钢能谱图 (a)图5(b)中A;(b)图5(b)中B;(c)图5(c)中C;图5(f)中D

Fig. 6 EDAX spectra of the tested steels

(a)position A in fig. 5(b);(b)position B in fig. 5(b);(c)position C in fig. 5(c);position D in fig. 5(f)

图4为高倍下 M_2C 碳化物浅腐蚀的形貌:复合型和不规则形(如图4(a),(b))。复合型 M_2C 形貌以光滑的边界为特征,呈螺旋状生长,但很难发现完整的螺旋,这主要是因为高速钢中低的碳化物体积分数和高程度的枝晶组织造成的。不规则的 M_2C 形貌具有不连续的边界特征,基体和碳化物之间没有清晰的轮廓界面,呈典型的盘片状。另外,在ESR-CDS工艺得到的组织中还发现了比较多的“不连续的复合规则型”的碳化物(如图4(c)),这种碳化物具有短棒状特征生长于螺旋生长的频繁间断处。

图5为高倍下实验钢深腐蚀铸态组织的形貌。从图5中可看出,两种工艺深腐蚀凝固组织有很大的区别。ESR工艺得到的组织基体与碳化物过渡区较为粗糙,碳化物覆盖在基体上面,没有出现明显的呈层片状状态,以松散的条状为主,部分基体内部出现了大小不一的裂纹,如图5(a),(b),这可能是因为基体较为疏松,又由于在凝固过程中,包晶和包共晶反应都依靠碳及合金元素通过奥氏体包层的长程扩散,导致相的成分偏离平衡,心部奥氏体碳含量低,合金元素比外部高^[1];同时也出现了较为粗大集中的块状碳化物,如图5(c),该碳化物对韧性及磨削性等力学性能会带来一定的不利影响^[9-12]。ESR-CDS工艺得到的组织碳化物片层均匀致密,碳化物与基体过渡区圆滑,从图5(d),(e),(g)所示;同时,在深腐蚀过程中部分海绵状

碳化物仍然可见如图5(h);但单个碳化物取向并不一致,呈一定夹角,甚至达到了 90° ,从图5(d),(e),(f)便可看出。这可能是因为高速钢在凝固过程中合金元素成分较大,造成一定影响,同时,也由于ESR-CDS工艺凝固机理的影响。

图6为实验钢在图5中椭圆部分对应的碳化物及基体的能谱分析。从图6可看出:碳化物中合金元素以W,Mo,V,Cr为主,不同部位的峰值元素含量有所不同。由图5(b)及结合谱图6(a)可知,该碳化物较为平直,且呈片条状,主要金属元素为W,Mo,V且含有少量Cr和Fe,在W-Mo系高速钢中为典型的 M_2C 型碳化物^[1]。由于 M_2C 型碳化物为亚稳型碳化物,在加热时易发生分解:据文献^[13]指出高速钢中共晶碳化物 M_2C 分解行为可表示为: $M_2C + Fe(\gamma) \rightarrow M_6C + MC$,生成的产物则是稳定的。根据图5(c)和谱图6(c)可知,由于该碳化物为大块状,且富含Mo,W,V,Cr,又因为在铸态 M_2C 分解转变时, M_6C 碳化物数量较多且长大速率比MC快,判断该碳化物可能为 M_6C 型碳化物。根据图5(f)及谱图6(d)可知,该碳化物为富V的碳化物,为MC型碳化物,在淬火过程中,该碳化物易溶入基体,对钢的二次硬化有利^[1]。

3 结论

(1)M2 高速钢在铸态组织边部,采用 ESR 工艺

得到基体组织在形态和大小上极不均匀,一次枝晶和二次枝晶都很粗大,且出现了较为粗大的三次枝晶,共晶莱氏体呈不均匀的片状,铸锭的偏析较为严重;而采用 ESR-CDS 工艺得到的组织以均匀细小的树枝晶为主,莱氏体细小,有些呈短棒状,在后续的变形加工过程中对材料的组织性能更有利。

(2)铸态心部组织,ESR 工艺得到的组织等轴晶疏松粗大,且存在较为粗大的树枝晶。而采用 ESR-CDS 工艺得到的组织有大量均匀细小的树枝晶,莱氏体短、细小,较为圆滑,边部和心部的组织较为一致。

(3)在横向上,ESR 工艺得到的边部和心部组织枝晶间距相差比较大,而 ESR-CDS 工艺得到的边部和心部枝晶间距相差较少,纵向上,两者边部和心部变化趋势基本一致。

(4)采用 ESR 工艺经深腐蚀凝固组织基体与碳化物过渡区较为疏松、粗糙,部分基体内部出现了细小的裂纹,且有大量较为集中的块状碳化物;采用 ESR-CDS 工艺得到组织中存在比较多的“不连续的复合规则型”的碳化物,经深腐蚀,碳化物与基体过渡区圆滑。

参考文献

- [1] 邓玉昆,陈景榕,王世章. 高速工具钢[M]. 北京:冶金工业出版社,2002. 359—367.
- [2] 梁强,陈希春,任昊,等. 电流对 GH4169 合金电渣重熔凝固过程参数影响的数值模拟研究[J]. 航空材料学报,2012,32(3):29—34.
LIANG Qiang, CHEN Xi-chun, REN Hao, et al. Numerical simulation researches influence of current on solidification process parameters of GH4169 in electrosag remelting process[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2012, 32(3): 29—34.
- [3] 付锐, 陈希春, 任昊, 等. 电渣重熔连续定向凝固 René88DT 合金的组织与热变形行为[J]. 航空材料学报, 2011, 31(6): 8—13.
FU Rui, CHEN Xi-chun, REN Hao, et al. Study on the as-cast microstructure and deformation behavior of ESR-CDS René88DT alloy[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2011, 31(6): 8—13.
- [4] MA De-xin, GRAFE U. Microsegregation in directionally solidified dendritic-cellular structure of superalloy CMSX-4[J]. Materials Science and Engineering. A, 1999, 270(2): 339—342.
- [5] ZHOU Y Z, VOLEK A. Effect of dendrite arm spacing on castability of a directionally solidified nickel alloy[J]. Scripta Materialia, 2007, 56(6): 537—540.
- [6] 朱耀宵. 低偏析高温合金[J]. 金属热处理学报, 1997, 18(3): 16—22.
ZHU Yao-xiao. Low segregation superalloys[J]. Transactions of Metal Heat Treatment, 1997, 18(3): 16—22.
- [7] 周雪峰, 方峰, 蒋建清, 等. 高速钢 M2 中共晶碳化物 M_2C 的性质和形态[J]. 钢铁, 2009, (9): 76—80.
ZHOU Xue-feng, FANG Feng, JIANG Jian-qing, et al. Study on property and morphology of M_2C eutectic carbides in M2 high speed steel[J]. Iron and Steel, 2009, (9): 76—80.
- [8] 陈希春, 付锐, 任昊, 等. 电渣重熔连续定向凝固 FGH96 合金非金属夹杂物研究[J]. 中国新技术新产品, 2011, (10): 1—2.
CHEN Xi-chun, FU Rui, REN Hao, et al. Study on nonmetallic inclusions of ESR-CDS FGH96 alloy[J]. China New Technologies and Products, 2011, (10): 1—2.
- [9] PAYSON P. The Metallurgy of Tool Steels[M]. New York: John Wiley and Sons Inc, 1962. 187—196.
- [10] LESKOVSEK V, VIE B. Improved vacuum heat-treatment for fine-blanking tools from high-speed steel M2[J]. Materials Processing Technology, 1998, 82: 89—94.
- [11] FU H G, QIANG X, XING J D. A study on the crack control of a high-speed steel roll fabricated by a centrifugal casting technique [J]. Materials Science and Engineering A, 2008, 474(1—2): 82—87.
- [12] 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.
- [13] FREDRIKSSON H, BRISING S. The formation of carbides during solidification of high speed steels [J]. Scandinavian Journal of Metallurgy, 1976, 5(6): 268—275.

- 收稿日期: 2012-06-26; 修订日期: 2013-03-15
- 作者简介: 占礼春(1985—), 男, 硕士, 主要研究方向为工模具钢的研制与开发, 联系地址: 北京市海淀区学院南路 76 号, 钢铁研究总院特殊钢研究所(100081), E-mail: lichun597@126.com
- and Technology, 2009, (1): 26—31.
- [9] 肖治垣. 临近空间太阳能径向变体飞艇概念设计[D]. 北京: 北京航空航天大学, 2012.
- [10] WANG Bing-zhong. The lecture of solar radiation calculation—The first chapter the calculation of astronomy parameters of solar energy[J]. Solar Energy, 1999, (2): 25—28.
- [11] FARLEY R E. Balloon Ascent: 3-D Simulation Tool for the Ascent and Float of High Altitude Balloons[R]. AIAA 2005—7412, 2005.

收稿日期: 2012-12-27; 修订日期: 2013-05-15

作者简介: 肖治垣(1966—), 男, 博士研究生, 主要从事飞艇研究, 联系地址: 北京东城区交道口南大街 67 号(100712), E-mail: robertxia@cannews.com.cn