

多元合金化复合变质处理对高铬铸铁锤头组织和性能的影响

郭长庆, 程 军

(内蒙古科技大学科技中心, 内蒙古包头 014010)

摘要: 介绍了多元合金化复合变质处理高铬铸铁Cr20MoCu2BNbRETi的化学成分、变质处理工艺, 并介绍了多元合金化复合变质处理后高铬铸铁的组织 and 力学性能的变化, 以及采用多元合金化复合变质处理高铬铸铁生产破碎机锤头的生产工艺、生产成本和使用性能。工业试验表明: 复合变质处理高铬铸铁锤头的耐磨性是高锰钢锤头的3.65~3.8倍。

关键词: 多元合金化; 复合变质; 锤头; 高铬铸铁

中图分类号: TG143.9 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4977 (2007) 05-0482-05

Study on Multi-Alloying Complex Modifying High Chromium Cast Irons Hammers

GUO Chang-qing, CHENG Jun

(Inner Mongolia University of Science & Technology, Baotou 014010, Inner Mongolia, China)

Abstract: The chemical compositions and complex-modifying process of new type of Cr20MoCu2BNbRETi high chromium cast irons were introduced. The microstructures and mechanical properties resulted by the multi-alloying and complex-modifying process treatments as well as hammer operating process and performance that use the high chromium cast irons were presented. It was found by industrial experiments that the wear resistance of the high chromium cast iron hammers is about 3.65 to 3.8 times higher than that of the high manganese steel crusher hammers.

Key words: multi-alloying; complex modifying; hammer; high chromium cast irons

在建材、电力、矿山、冶金、公路建设及化工等行业中, 矿物原料的破碎广泛使用的是锤式破碎机。锤头是锤式破碎机关键而又易磨损的零部件。锤头服役性能的优劣直接关系到锤式破碎机的工作效率。目前, 国内外用于制造破碎机锤头的耐磨材料主要有高锰钢、低合金耐磨钢和高铬铸铁三种。高锰钢锤头在实际使用中承受的冲击力有限(中、低应力), 锤头表面不能被高度硬化, 加工硬化后的表面硬度通常在HB 400左右(HRC 40~42)^[1]; 高锰钢锤头耐磨性较差, 有逐渐被淘汰的趋势。低合金贝氏体或马氏体耐磨钢锤头具有硬度高、韧性好、耐磨性能优良以及生产成本低等优点^[2], 目前在市场中占有一定的份额。低合金耐磨钢硬度的上限通常为HRC55, 硬度过高则脆性增大, 导致锤头断裂的危险性加大。高铬铸铁Cr20Mo2NiCu目前被认为是生产锤式破碎机锤头比较理想的耐磨材料, 其使用寿命是高锰钢锤头和低合金钢锤头的4~6倍^[3-4]。Cr20Mo2NiCu高铬铸铁含有一定量的贵重合金元素Mo和Ni, 尤其是合金元素钼(含量在

1.5%~3%), 其生产成本较高。此外, 因Cr20Mo2NiCu高铬铸铁韧性不足而导致锤头经常发生断裂, 也是制约其被广泛推广应用的另外一个重要原因。因此, 研制一种新型低成本、韧性优良和高耐磨的高铬铸铁锤头已成为提高我国锤式破碎机作业率一项亟待解决的问题。多元合金化复合变质处理高铬铸铁就是在Cr20Mo2NiCu高铬铸铁的基础上为解决这些问题而研发的一种耐磨材料。

1 试验材料及试验方法

表1给出了试验用Cr20MoCu2BNbRETi高铬铸铁和常规Cr20Mo2NiCu高铬铸铁的化学成分。两者相比, 可以发现: 试验用Cr20MoCu2高铬铸铁与常规Cr20Mo2NiCu高铬铸铁的化学成分基本相同, 只是试验用高铬铸铁中去掉了贵重合金元素Ni, 将Cu的含量由0.8%~1.2%(质量分数, 下同)提高至1.8%~2.0%, 将Mo含量从1.5%~3%降低至0.5%~0.7%, 这样做的目的是使高铬铸铁的生产成本大大降低。Mo之所以没有被

收稿日期: 2006-08-22收到初稿, 2006-11-15收到修订稿。

作者简介: 郭长庆(1962-), 男, 内蒙古包头人, 教授, 主要从事特种金属材料研究。电话: 0472-5951648, E-mail: guo_changqing@126.com

彻底去除是因为Mo和Cu配合可以显著提高淬透性^[5-6]。去掉Ni和降低Mo含量对淬透性的影响一方面通过适量增加Cu的含量来加以补偿,另一方面加入了能够显著提高淬透性的微量合金元素B。B是迄今为止人们所发现能提高淬透性最有效的合金元素。合金钢的淬透性试

验表明^[7]:0.005% B提高钢的淬透性的效果相当在钢中加入0.5% Mo、0.5% Mn、0.5% Ni和0.5% Cr的综合效果;B提高淬透性的能力至少为Mo的100倍。另外,B也是一种非常廉价的合金元素。试验用高铬铸铁中Ti、Nb和RE的加入主要是为了净化钢液和细化结晶组织。

表1 试验用Cr20MoCu2高铬铸铁与常规Cr20Mo2NiCu高铬铸铁的化学成分比较

Table 1 The comparison of chemical compositions of Cr20MoCu2 with Cr20Mo2NiCu

项目	C	Si	Mn	Cr	Cu	Mo	Ni	20#硼铁	30#钛铁	1#稀土合金	50#铌铁
Cr20MoCu2	2.9~3.3	≤0.8	≤1.0	18~22	1.5~2.0	0.5~0.7	0	0~0.15	0.4	0.3	0.2
Cr20Mo2NiCu	2.9~3.3	≤0.8	≤1.0	18~22	0.8~1.2	1.5~3.0	0.6~1.2	0	0.1~0.3	0	0

当含C量在2.9%~3.3%时,Cr20高铬铸铁属共晶铸铁,若不加以处理,组织中的共晶碳化物 M_7C_3 会形成一个连续的、粗大的三维网络,这是高铬铸铁冲击韧性不足的主要原因。所以,改善高铬铸铁冲击韧性的关键在于破坏这个连续的、粗大的共晶碳化物网络,而变质处理是实现这一目的有效手段。

变质处理对于改善高铬铸铁具有特别重要的意义,国内外材料工作者们对此进行了大量的研究,研制出了种类繁多的变质剂。在这些变质剂中,有采用单一合金元素进行变质的,也有采用多种合金元素进行复合变质的;有采用无机盐进行变质的,也有采用无机盐+合金元素进行变质^[8-10]。在本研究中,采用了Ti、Nb、RE和B四个合金元素组成的复合变质剂对Cr20MoCu2进行了变质处理。在这四个合金元素中,Ti和RE是变质剂中常用的合金元素,而Nb和B作为变质剂合金元素则很少被采用。所以,Ti、Nb、RE和B四个合金元素即是合金化元素,也是变质剂元素。

Ti、Nb、RE和B组成的复合变质剂的配制方法是:将30#钛铁、50#铌铁,1#稀土合金和20#硼铁的大合金块粉碎成小于15 mm的小块。然后,按照加入的要求比例称量,倒入容器中搅拌混合均匀即可。表2给出了试验用变质剂的配方。其中,Ti-Fe、Nb-Fe和1#稀土合金的加入量参照前人的研究成果加以固定,而B-Fe的加入量有所变化,这主要是考虑到合适的B-Fe加入量难以确定的缘故。

高铬铸铁的变质处理试验在50 kg中频感应电炉中进行,电炉的炉衬用镁砂打结。熔炼前将粒度小于20 mm的钼铁块和部分粒度小于50 mm的高碳铬铁放在炉底,之后加入废钢并通电开始熔化。待熔清后提温,陆续加入余下的高碳铬铁。出钢前10 min加入0.3%的高碳锰铁和0.3%的65#硅铁进行预脱氧,然后调整成分,之后加入铜板。用铁皮或铝箔将称量好的变质剂包裹并将其放在钢包底部,当铁液温度达到1 550 ℃时插铝终脱氧,然后出钢。铁液经稍加镇静后,注入到用水玻璃砂造型的20 mm×20 mm×110 mm的非标准冲击试样和 Φ 150 mm×100 mm的用于测淬透层深度的圆棒试样的铸型中。

表2 试验用高铬铸铁变质剂配方

Table 2 The compositions of modifier for high chromium

变质剂	cast irons			M_B (%)
	30#钛铁	50#铌铁	1#稀土合金	20#硼铁
B0	0.4	0.2	0.3	0
B1	0.4	0.2	0.3	0.15
B2	0.4	0.2	0.3	0.25
B3	0.4	0.2	0.3	0.35
B4	0.4	0.2	0.3	0.45
B5	0.4	0.2	0.3	0.55
B6	0.4	0.2	0.3	0.65

待试样冷却到室温后,清理打磨去掉飞边和毛刺。选用经B1变质处理的六个圆棒试样放入到热处理炉中,分别加热至850、900、950、1 000、1 050 ℃保温1.5 h,出炉空冷,之后250 ℃回火,保温4 h。用铜丝切割机从圆锭中间部位沿径向切下一个厚约20 mm圆片,将其中的一面用金相砂纸由粗到细打磨、抛光,然后沿径向由表面至心部每隔1 mm打硬度,硬度HRC=56所对应的深度被认为是淬透层深度。

冲击试验在JB30/A型摆锤式冲击试验机上进行。20 mm×20 mm×110 mm非标准试样所用跨距为70 mm。将冲断后的试样研磨,打硬度和制成金相样进行组织观察,硬度试验在HR150D型洛氏硬度试验机上进行,显微组织观察在NEOPOT-3型光学金相显微镜上进行。

2 试验结果及分析讨论

2.1 奥氏体化温度对淬透性的影响

图1示出了奥氏体化温度对经B1变质处理的高铬铸铁淬透层深度的影响。由图1可知,高铬铸铁的淬透层

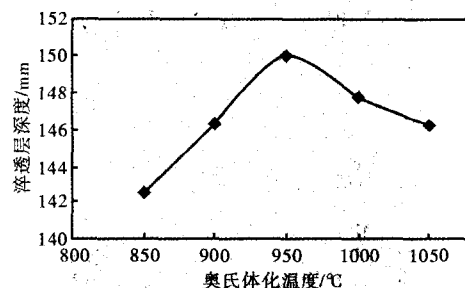


图1 奥氏体化温度对淬透层深度的影响

Fig. 1 The effect of austenitizing temperature on hardened thickness

深度随奥氏体化温度的变化所表现出的特性与含硼钢是一样的,即呈现峰值特性曲线;随奥氏体化温度的升高,含硼高铬铸铁的淬透层深度逐渐升高,在950℃达到峰值,随后逐渐下降。所以,含硼高铬铸铁的最佳奥氏体化温度应为950℃。高铬铸铁经B1变质处理和950℃奥氏体化后,在缓慢的空气中冷却,其淬透层深度已达150mm,这个深度对于一般厚大的耐磨备件已经足够了。

2.2 复合变质处理对高铬铸铁组织和性能的影响

图2示出了变质剂中硼铁的加入量对硬度的影响,图3示出了变质剂中硼铁的加入量对冲击韧性的影响,图2、3均为950℃/1.5h奥氏体化后空冷,250℃/4h回火。由图2、3可知:变质处理可使高铬铸铁的硬度略有升高,但不明显;变质处理对高铬铸铁的韧性有显著的影响,如冲击韧性从未变质前的5.5 J/cm²提高到加入变质剂B1后的12.3 J/cm²,提高幅度达123%;继续增加变质剂中硼铁的加入量,冲击韧性反而逐渐下降;在新型高铬铸铁的变质剂中,B-Fe的加入量不宜超过0.15%。

变质剂B1使得Cr20MoCu2BNbRETi高铬铸铁冲击韧性发生明显改善的根本原因在于其明显地改变了高铬铸铁的显微组织。图4a、b、c为不加变质剂和加加不同量变质剂后的显微组织的变化情况。由图4可知,未加变质剂时,高铬铸铁的碳化物呈粗大的、连续的网状形式分布(图4a),加入变质剂B1后,碳化物转变

为独立的团块状均匀地分布在基体上,如图4b所示,对应的高倍组织金相照片更加清楚地说明了这一点,如图5所示。然而,当变质剂中B-Fe加入量超过0.15%后,组织中开始出现了粗大的初晶碳化物,如图4c所示。可见,正是由于组织间存在的明显差异,造成了不同变质处理后的试验用高铬铸铁的韧性之间产生了显著的差异。

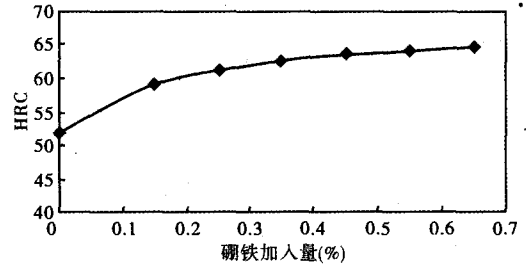


图2 硼铁加入量对硬度的影响

Fig. 2 The effect of ferro-boron addition on hardness

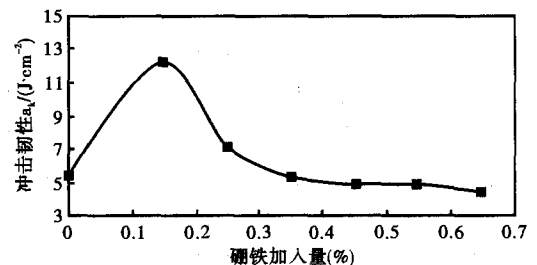


图3 硼铁加入量对冲击韧性的影响

Fig. 3 The effect of ferro-boron addition on impact toughness

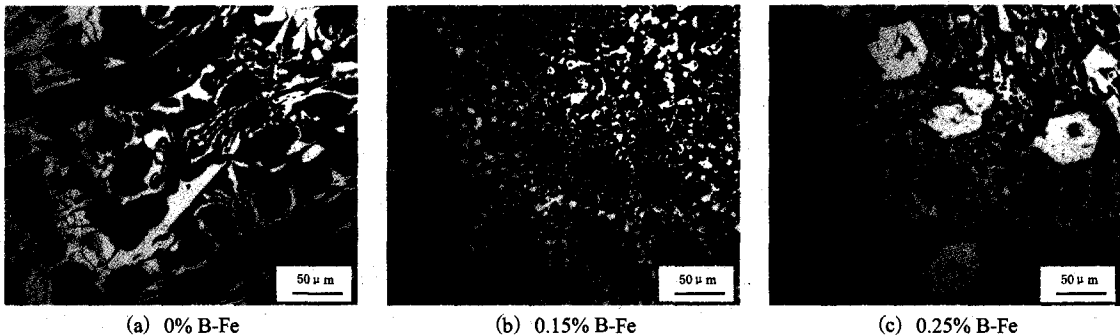


图4 硼铁加入量对显微组织的影响

Fig. 4 The effect of ferro-boron addition on microstructure

需要指出的是,为了排除结晶取向对显微组织观察带来的影响,对与图4b相互垂直的金相试样表面也进行了显微组织观察,其结果如图6所示,比较图4b和



图5 变质处理高铬铸铁显微组织

Fig. 5 The microstructure of high chromium cast iron after complex modifying

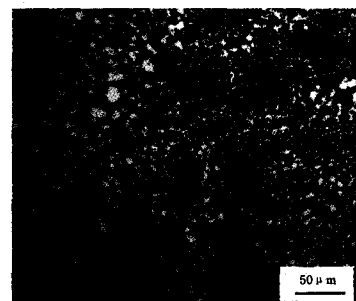


图6 变质处理高铬铸铁显微组织

图6可以发现:两个垂直面的显微组织无明显差异,这充分证明了变质剂B1的变质效果是成功的。

变质剂对高铬铸铁的变质原理至今尚不清楚,但一般认为Ti是一个非常活泼的合金元素,它与铁水中

的氧、氮和碳都有很强的亲和力。在铁液凝固冷却期间, Ti与[O]、[N]和[C]结合形成大量细小的氧化物、氮化物和碳化物颗粒, 这些细小的颗粒悬浮在铁液中, 可能会成为新相形核的基底, 细化了高铬铸铁, 并使共晶反应发生变化, 导致碳化物与奥氏体共晶组织分离; Nb是一个与Ti非常相似的合金元素, 变质剂中加入Nb是为了进一步加强Ti的变质作用; RE是活泼的合金元素, 它与氧和硫有很强的亲和力, 加入到铁液中能够有效地降低铁液中的[O]和[S]的含量。另外, 稀土能够改善夹杂物的形态, 去除有害气体和细化显微组织; B也是一个很活泼的合金元素, 它与氧有很强的亲和力。B的熔点低, 变质剂中的B在铁液凝固期间可能会被排挤到结晶前沿, 从而延缓凝固速度、细化显微组织和改变共晶反应的结晶规律。

3 锤头的生产工艺

与常见的机械零配件不同, 破碎机锤头的特点是: (1) 对加工精度要求不高; (2) 对表面光洁度要求不严格; (3) 数量大。而真空消失模铸造工艺(EPC)的特点能够完全满足破碎机锤头的生产工艺要求, 所以, 试验用高铬铸铁锤头的成型采用真空消失模铸造, 其工艺流程如下: 泡沫塑料板制成模样→涂刷MgO基

涂料→烘干涂料→置入沙箱中造型→抽真空、浇注→20 min后打箱翻出铸件打掉浇冒口→冷却到室温清理打磨→热处理→成品入库。

需要指出的是, 生产工艺中之所以要求趁铸件处于红热状态下打掉浇冒口, 主要是考虑到如果将高铬铸铁直接冷却到室温后, 再采用电焊割掉浇冒口, 常常会在浇冒口处产生裂纹。

4 装机试验

工业试验锤头主要有两种类型, 一种是板式反击破碎机锤头, 另一种是带轴孔的立轴式破碎机锤头。试验用PF-1315反击破碎机用锤头呈厚板状, 长746 mm, 宽192.5 mm, 厚148 mm, 重量约315 kg。试验用CPL-1500立轴式破碎机用锤头重约60 kg, 复合锤头的锤柄采用35CrNiMo。

试验用破碎机锤头的生产采用500 kg中频感应电炉进行。锤头在包头某铁矿的PF-1315反击式破碎机上和内蒙古呼和浩特某高速公路碎石厂的CPL125立轴式破碎机上进行了长期的试验, 并获得了成功。表3给出了装机试验结果, 可见多元合金化复合变质处理高铬铸铁锤头的耐磨性是普通高锰钢锤头的3.65~3.8倍。

表3 装机试验结果

Table 3 The result of industrial experiment

破碎机类型	矿石硬度	锤头消耗/kg	破碎矿物量/万t	磨耗/(kg·t ⁻¹)	高锰钢锤头平均磨耗/(kg·t ⁻¹)	是高锰钢锤头的耐磨倍数
PF-1315	普氏16	75 600	265.6	0.029	0.11	3.8
CPL 125	普氏17	15 840	105	0.015 1	0.055	3.65

5 生产成本

表4给出了采用新型高铬铸铁生产1吨CPL125立轴式破碎机锤头和PF-1315反击破碎机锤头的生产成本, 并与常规Cr20Mo2CuNi高铬铸铁生产相同类型的锤头的生产成本进行了比较。由表4知: 新型高铬铸铁CPL125立轴式破碎机锤头和PF-1315反击破碎机用锤头的生产成本分别约为7 830元/吨和9 610元/吨, 而常规Cr20Mo2CuNi高铬铸铁生产相同类型的锤头的生产

表4 试验高铬铸铁锤头与常规Cr20Mo2CuNi高铬铸铁锤头的生产成本的比较

Table 4 Comparison of production cost between experimental and normal Cr20Mo2CuNi high chromium cast irons hammers

项目	锤柄 /元	高铬铸铁 /元	淬火 /元	回火 /元	工资等 /元	合计 /元
试验CPL 125锤头	2 500	4 280	300	50	700	7 830
常规CPL 125锤头	2 500	6 930	300	50	700	10 480
试验PF-1315锤头	0	8 560	300	50	700	9 610
常规PF-1315锤头	0	13 860	300	50	700	14 910

注: (1) 65#钼铁按350 000元/吨计, 生铁按2 600元/吨计, 废钢按2 200元/吨计。(2) 复合锤头的锤柄与锤头打击部位高铬铸铁的比例按照1:1计。

成本分别为10 480元/吨和14 910元/吨, 可见采用新型高铬铸铁代替常规Cr20Mo2CuNi高铬铸铁生产1吨CPL125立轴式破碎机锤头和PF-1315反击破碎机锤头生产成本可分别降低约2 650元和5 300元。

6 结论

(1) 多元合金化复合变质处理高铬铸铁锤头的研究是在Cr20Mo2CuNi高铬铸铁的基础上进行的。经过重新合金化后的高铬铸铁锤头的化学成分为2.9%~3.3% C, Si ≤ 0.8%, Mn ≤ 1.0%, 0.5%~0.8% Mo, 1.5%~2.0% Cu; 变质剂的加入量为0.15%的20#硼铁, 0.4%的30#钽铁, 0.3%的1#稀土合金和0.2%的50#铌铁。

(2) 多元合金化复合变质处理高铬铸铁在经950 °C奥氏体化、250 °C回火后冲击韧性12.3 J/cm², 且淬透层深度(以硬度达到HRC 55为标准)达到150 mm。

(3) 经过多元合金化复合变质处理后, 高铬铸铁中的共晶碳化物转变为细小的、独立的团块状颗粒, 均匀地分布在基体上, 结果冲击韧性较没有变质处理前提高了123%。

(4) 多元合金化复合变质处理高铬(下转第490页)

气体对金属的流动产生反向压力。当金属液的压力头无法克服沿程阻力、粘度升高造成的阻力和EPS模样气化造成的反向压力时，金属液停止流动，完成充型。图6为取消失模铸造试样末端的纵向剖面宏观组织，由于其糊状凝固方式的特性，断面均布等轴晶，证明其停止流动的机理是符合宽结晶范围合金停止流动的机理的。

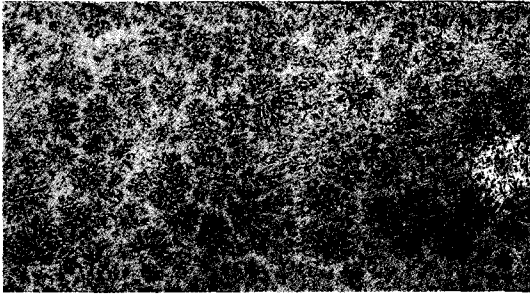


图6 试样纵向剖面宏观组织 2x

Fig. 6 The longitudinal section macro structure of sample

3 试验结果分析

消失模铸造铝合金过程中，由于铸件完全凝固时热量对铸型的穿透能力很小^[3]，铸型激冷效果较差，合金液使得EPS模样气化后有足够的热量加热铸型，因此铸件/铸型温差较小，造成铸件凝固过程中断面温度场分布十分“平坦”，几乎同时进入凝固区域，整个断面实现过冷形核、长大。另外，充型过程中，EPS模样气化，增强液体的紊流，且铝合金导热能力较好，容易在液体断面形成“平坦”的温度分布，使之呈现糊状凝固方式。由图4a中可以看出，铸件边缘与中心开始结晶的时间差较短0.14 min (0.98~0.84)，结束时间差也只有0.25 min (7.25~7.00)，仅此段时间内铸件断面存在温度差异，在整个凝固过程中，因温度梯度很小，绝大部分时间里该断面上各点几乎同时达到临界过冷的要求，处于同时凝固状态，形成糊状凝固方式。

主要工艺因素对于MDE值的影响可作分析如下：随铸件模数增大，比表面积减少，亦即铸件凝固时有更

(上接第 485 页) 铸铁锤头的耐磨性约为高锰钢Mn13的 3.65~3.8倍。

(5) 多元合金化复合变质处理高铬铸铁锤头的生产成本低于常规Cr20Mo2CuNi高铬铸铁锤头的生产成本。

参考文献：

- [1] 付英，熊其兴，李志华. 改性锰钢锤头的研制 [J]. 铸造设备研究, 2003 (2): 29-30.
- [2] 周永欣，吕振森. 低合金铸钢锤头的研制 [J]. 热加工工艺, 1997 (7): 45-46.
- [3] 许龙江. JN801新型高寿命立磨锤头的研制 [J]. 煤矿机械, 2000 (11): 16-17.
- [4] 吴振卿，卢广玺，汤文伯. 高铬铸铁-铸钢双金属复合锤头的研制 [J]. 铸造设备研究, 2000 (5): 18-20.
- [5] 许龙江. JN801新型高寿命立磨锤头的研制 [J]. 煤矿机械, 2000

多的热量要通过较少的面积散发出去，浇注温度提高，凝固过程中液相线以上金属液有更多的热量加热铸型，使得铸件/铸型温差降低，热传导作用减弱，这都势必造成铸件内部温度场分布更加“平坦”，温度梯度减小，凝固区域变宽，糊状凝固程度加强使MDE值增大。

4 铸造工艺设计中的一些问题

干砂消失模铸造浇注过程中金属液使得EPS模样气化，容易造成紊流。因此，浇注系统设计应充分考虑平稳充型；使用该工艺铸造铝硅合金，结晶过程为糊状凝固，使铸件中容易产生粗大的等轴晶粒和分散的缩松。实际生产中，应加强合金的变质处理、避免过高的浇注温度、热节处加强冷却措施、提高冒口的补缩压力和有效距离，减少因金属液补充不足造成的铸件缺陷。

5 结论

(1) 干砂消失模铸造铝硅合金符合糊状凝固方式结晶，这与普通砂型铸造凝固过程相比发生了根本的变化，且糊状凝固程度随铸件模数的增大、浇注温度的提高而加强，前者对糊状凝固程度的影响尤为显著。

(2) 干砂消失模铸造铝硅合金停止流动的机理与宽结晶温度范围合金停止流动的机理相同，工艺设计应采用宽结晶温度范围合金规范进行。

参考文献：

- [1] 李庆春. 铸件形成理论基础 [M]. 北京：机械工业出版社，1982：77-81.
- [2] 石原守央 (王兰英译). 大型球墨铸铁件的生产 [J]. 昆重科技, 1981 (3): 17-37.
- [3] 吴献明. 消失模铸造铝合金凝固特性及机械性能的研究 [D]. 哈尔滨：哈尔滨工业大学，1991：44-58.
- [4] 李魁盛. 铸造工艺设计基础 [M]. 北京：机械工业出版社，1981：119-125.

(编辑：田世江，tsj@foundryworld.com)

- (11): 16-17.
- [6] 程巨强，康春龙，高兴明，等. 微合金化多元合金化高铬铸铁破碎机板锤的研制与应用 [J]. 铸造技术, 2004, 10 (25): 729-740.
- [7] KNOWLTON H B. Journal of Iron and Steel Institute, 1954: 176-179.
- [8] 陈东，顾泉佩，林国荣，等. 高铬铸铁变质的试验研究 [C]//中国金属学会耐磨材料学术委员会. 第五届全国耐磨材料学术会议论文选集. 大连，1989：35-38.
- [9] 杨建华. 钠盐变质Fe-Cr-C系耐磨堆焊条的研究 [C]//中国金属学会耐磨材料学术委员会. 第五届全国耐磨材料学术会议论文选集. 大连，1989：20-25.
- [10] 温质清，张永维，王庆顺. 锌变质处理对高铬铸铁组织和性能的影响 [C]//中国金属学会耐磨材料学术委员会. 第五届全国耐磨材料学术会议论文选集. 大连，1989：45-46.

(编辑：曲学良，qxl@foundryworld.com)