

铸造金属耐磨材料研究的进展

Progress in the Study of Wear Resistant Cast Metal Material

符寒光 西安交通大学材料科学与工程学院 陕西西安 710049)

摘要 :详细介绍了耐磨材料奥氏体锰钢、低合金钢和白口铸铁的成分、组织、性能及其应用进展,还对耐磨钢结材料和耐磨铸造复合材料以及新开发的高硼铸造耐磨合金进行了评述,期待为科学选择耐磨材料提供参考。

关键词 耐磨材料,锰钢,低合金钢,白口铸铁,高硼铸造合金

中图分类号 :TG142.72 ;**文献标识码** :A ;**文章编号** :1006-9658(2006)06-5

Abstract:The composition, microstructure, properties and application of abrasion resistant materials such as Mn steel, low alloy steel, white cast iron have been introduced in details and the wear resistant structure steel material and casting composite materials and high B casting alloy have also been reviewed.

Keywords:Abrasion resistant material, Manganese steel, Low alloy steel, White cast iron, High boron casting alloy

常见的材料破坏形式有断裂、腐蚀和磨损。材料磨损尽管不像另外两种形式,很少引起金属工件灾难性的危害,但其造成的经济损失却是相当惊人的。据统计,由磨损造成的经济损失,美国约1200亿美元/年,德国约500亿马克/年。据2000年统计,国内每年消耗金属耐磨材料约达300万吨以上^[1],其中每年因磨损造成球磨机磨球消耗近180万吨,球磨机和各种破碎机衬板消耗近30万吨,轧辊消耗近50万吨,各种工程挖掘机和装载机斗齿、各种耐磨输送管道、各种破碎机锤头和鄂板、各种履带板消耗也超过50万吨。在各类磨损中,磨料磨损又占有重要的地位,在金属磨损总量中占50%以上,磨料磨损已成为冶金、矿山、机械、电力、煤炭、石油、交通、军工等许多工业部门设备失效或材料破坏的一个重要原因,也是造成经济损失最多的问题之一。因此,研究和发展新型耐磨材料,减少金属磨损,对国民经济具有重要的意义。在现有的耐磨材料中,一般有奥氏体锰钢、合金铸铁、低合金耐磨钢、耐磨合金和硬质合金等,它们都有各自的特点。随着工业的发展,这些材料逐步从传统型过渡到较为新颖、多样化和合金化的新型钢中去。

1 耐磨锰钢研究进展

耐磨锰钢是应用最广的耐磨材料,其中高锰钢是英国人Hadfield于1882年发明的,其铸态组织是奥氏体+马氏体+碳化物,水韧处理后为单一奥氏体组织,常见高锰钢的力学性能见表1。高锰钢的主要特征是屈服强度低,高锰钢工件使用中易变形,冲击值达1960~2940kJ/m²,显示出极高的韧性,在强烈冲击工况下可产生加工硬化,从而具有良好的耐磨性。

表1 高锰钢的力学性能

屈服强度 /MPa	抗拉强度 /MPa	伸长率 (%)	收缩率 (%)	冲击韧性 /kJ·m ⁻²	硬度 HB
392~441	784~794	40~80	40~60	1960~2940	180~240

100多年来,高锰钢的主要成分并未发生太大变化,目前大量生产的高锰钢的化学成分为:1.0%~1.4%C,10%~14%Mn。高锰钢的耐磨性与含碳量有关,一般说来,含碳量越高,耐磨性越好,但在1.3%C以上,容易析出碳化物而使韧性降低。另外,根据使用条件的不同,在普通高锰钢基础上,有目的地添加一些其它合金元素:如加入铬、钒、钨、铜和硼等元素,对奥氏体进一步固溶以实现固溶强化。加入钒、钛、铬和钼等元素,使在奥氏体基体上弥散析出细小碳化物,以实现第二相强化。这种碳化物的分布形态对高锰钢的韧性影响不大,并能阻止位错运动,从而大幅度提高高锰钢的加工硬化能力。加入稀土、镁和钙等元素,可净化晶界,改善夹杂物的形态和分布,以实现晶界强化。加入稀土、钛等元素,可以明显细化组织,以实

基金项目:中国博士后科学基金(2004036058)资助项目
 收稿日期:2006-05-13
 文章编号:2006-083
 作者简介:符寒光,男,(1964-),湖南桃江人,博士后,高级工程师,主要从事铸造技术和新型金属材料的研究

现细晶强化。研究和实践表明,添加一种以上的合金元素比添加单一的合金元素,在改善性能上起的作用更大。为使厚大铸件中心部位也为全奥氏体组织,提高加工硬化能力,发展了超高锰钢(Mn15、Mn17、Mn20、Mn25)。挪威的Staranger Stool公司开发了一种名为STROMHARD的超高锰钢,其锰含量为15%~23%,同普通高锰钢相比,其初始硬度提高了80~150HB,加工硬化性能明显增强,有相当好的耐磨性。针对结构复杂,易产生裂纹的特殊铸件,研制出了低碳高锰钢(75Mn13、50Cr2Mn14、60Cr5Mn12)满足市场需要^[2]。高锰钢熔炼发展了吹氩、吹氮,炉外精炼等工艺,提高了钢的纯净度。采用悬浮浇注、表面合金化、爆炸硬化等措施,可以进一步提高其耐磨性。

高锰钢铸件热处理一般为缓慢升温(50~80 /h)到650~700 ,保温1~2h后以100~120 /h升温到1050~1080 ,保温2~4h后水韧处理。对于合金化高锰钢、超高锰钢淬火温度一般提高到1080~1120 ,保温时间延长到4~6h。近年来,许多单位采取先在950 保温2h正火预热处理,均化成分,细化组织,冷至300 后再淬火的工艺,使耐磨性得到提高^[3]。此外,高锰钢件铸后利用余热淬火,不需再经加热进行水韧处理,可以简化工艺、节约能源、缩短生产周期、提高经济效益。进行余热处理时,需要对具体铸件冷却时温度与时间关系进行精确测定,严格控制好冷却开箱时间和淬火温度以保证质量。刘立中等^[4]采用高锰钢颧板铸后余热淬火,寿命与进行水韧处理的高锰钢相当。

中锰钢是在普通高锰钢基础上发展起来的,适当降低锰含量,并加入一定含量的铬,从而降低奥氏体的稳定性所获得的一种新型耐磨材料。大致成分为0.8%~1.2%C、6.0%~9.5%Mn和1.5%~3.0%Cr,水韧处理后仍可得到单相奥氏体组织,在室温下磨损中变形可以诱发马氏体相变,从而提高加工硬化能力。即使在低冲击、较小应力下工作,也会因形变诱发相变而显著硬化,使耐磨性提高。国内研制的中锰钢有13Mn7、10Mn7Cr2等系列,与高锰钢相比,其韧性有所降低,耐磨性则有较大提高,如表2所示^[5]。中锰钢的加工硬化速率比高锰钢高得多,它弥补了高锰钢的

表2 高锰钢与中锰钢韧性和耐磨性比较

材 料	冲击韧性/kJ·m ⁻²	相对耐磨性
Mn13	>1200	1.00
13Mn7	830~1150	1.91
10Mn7Cr2	180~220	1.69

不足之处,有足够的韧性也有良好的耐磨性,在中、低应力的冲击磨损条件下,比高锰钢性能优良。工业使用证明,它可用做球磨机衬板、中小型破碎机衬板以及破碎机板锤,使用寿命比高锰钢提高20%~30%以上^[6,7]。

2 低合金耐磨钢研究进展

针对耐磨锰钢的缺点,结合工况条件,国内外研制出了多种低合金耐磨钢。低合金耐磨钢是很有发展前途的一类抗磨材料,一般来说,它具有生产成本低和较好的抗磨性与良好的强韧性相匹配等特点。

国外低合金抗磨钢主要是Cr-Mo系,并加入少量其它合金元素^[8]。含碳量在低碳(0.15%~0.30%)、中碳(0.30%~0.45%)和高碳(0.45%~1.00%)都有广泛的应用。国内则以硅、锰系为基础,加入铬、钼以及其他微量元素而发展起来的。其合金系统由成分简单的单一锰系、铬系、铬锰系到成分复杂的铬-锰-硅-钼-其他微量元素的多元复合系列,国内常用低合金耐磨钢的成分和性能见表3^[9]。

表3 国内常用低合金耐磨铸钢的成分和性能

钢 号	成分(%)						性能	
	C	Mn	Cr	Si	Mo	其它	硬度 HRC	韧性/kJ·m ⁻²
ZG30Cr2MnSiMoTi	0.28~0.35	1.2~1.7	1.8~2.2	1.2~1.6	0.2~0.4	0.06~0.12Ti 微量RE	50	>200
ZG42Cr2MnSi2MoRE	0.38~0.48	0.8~1.1	1.8~2.2	1.5~1.8	适量	微量RE	57	240~680
ZG40CrMnSi2Mo	0.38~0.45	1.5~1.8	0.9~1.4	1.9~2.5	0.2~0.3		55	>200
ZG30CrMnSiMoRE	0.35~0.45	0.8~2.5	0.8~1.5	0.8~1.2	0.3~0.5	0.03~0.08RE	55	590~780
ZG85CrMnSiMoCu	0.7~1.0	1.0~1.3	5.0~7.0	0.8~1.2	<0.5	<1.0Cu	>52	>150
ZG100Cr5MnSiMoRE	0.8~1.2	1.0~1.3	4.5~5.5	0.8~1.2	0.3	0.3RE	48~55	150~250

近年来,以硅为主要合金元素,利用硅在等温转变过程中强烈抑制碳化物析出的特点进行等温淬火,得到由无碳化物贝氏体和被碳、硅稳定化了的奥氏体组成的奥-贝双相组织,其显微组织见图1,它具有优异的综合力学性能,即高的强度、硬度以及良好的冲击韧性,是一种在耐磨领域极具研究和开发价值的新材料^[9,10]。同时,高碳高硅铸钢是一种廉价的新型材料,所需添加的合金元素仅为1.5%~3.5%Si,其它的合金元素很少或根本不需添加,因而具有极高的性能价格比。西北工业大学^[11]还开发了一种准贝氏体耐磨钢,其特点是加入硅或铝等抑制碳化物形成元素,使组织中没有碳化物,同时,加入较多的锰使贝氏体和

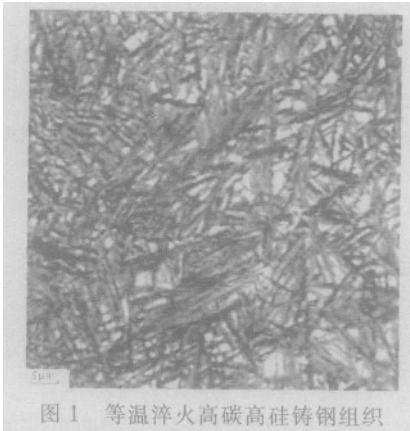


图1 等温淬火高碳高硅铸钢组织

珠光体转变区分开,并使贝氏体转变线位于珠光体转变线左边,在空冷条件下获得了无碳化物贝氏体和分布于铁素体条间(准上贝氏体)和条内(准下贝氏体)的残余奥氏体膜。由于准贝氏体组织中残余奥氏体膜的合理分布,使其具有比其它贝氏体组织及回火马氏体组织更好的塑性和韧性,而强度和硬度仍维持在较高的水平,使材料表现出优异的耐磨性。

3 耐磨合金铸铁研究进展

耐磨白口铸铁的发展分为普通白口铸铁、镍硬铸铁和高铬白口铸铁 3 个阶段。其中应用最成功、最广泛的当属镍硬铸铁和高铬铸铁。镍硬白口铸铁是 Climax 国际镍公司在 1928 年研制成功的,它是在普通白口铸铁中加入 3.0%~5.0%Ni 和 1.5%~3.0%Cr,化学成分见表 4。铸态组织为 $(Fe, Cr)_3C$ +马氏体+奥氏体。在较高含铬量的镍硬型铸铁中,出现了部分 M_7C_3 型碳化物,在一定程度上破坏了碳化物的网状分布,从而改善了韧性^[12]。镍硬白口铸铁在强度、硬度和耐磨性方面都优于普通白口铸铁且生产工艺简单,故较早得到了广泛应用。但是,由于碳化物主要是连续片状的渗碳体,脆性较大。这种铸铁多用于泥浆泵泵体、球磨机衬板、磨煤机磨辊和冶金轧辊等。近来还研究通过热处理方法获得贝氏体+回火马氏体,以得到较高的综合力学性能和抗磨料磨损能力的良好配合。为了节约镍,国外还进行以锰、铜代镍的研究工作,试验结果表明,要得到相同的性能,镍只能被部分代替。

高铬白口铸铁几乎是与镍硬铸铁同时发展起来

表 4 镍硬铸铁的化学成分(%)

种类	C	Si	Mn	Ni	Cr	Mo	S	P
镍硬	3.0~3.6	0.3~0.5	0.3~0.7	3.3~4.8	1.5~2.6	<0.4	<0.15	<0.3
镍硬	2.5~3.0	0.3~0.5	0.3~0.7	3.3~5.0	1.4~2.0	<0.4	<0.15	<0.3
镍硬	2.9~3.7	0.4~0.7	0.4~0.7	4.0~4.8	1.4~1.8		<0.05	<0.05
镍硬	2.6~3.2	1.8~2.0	0.4~0.6	5.0~6.0	8.0~9.0		<0.10	<0.06

的,由于需要电炉熔炼,发展一直缓慢。20 世纪 60 年代以后,由于电炉熔炼的广泛应用,使得高铬铸铁得到相当大的发展。铬元素的加入,使碳化物结构类型由网状 M_3C 型变为孤立的 M_7C_3 型,且碳化物硬度提高,由 M_3C 的 840~1100HV 提高到 M_7C_3 的 1300~1500HV,这样不仅提高了耐磨性,而且提高了韧性,其使用效果比镍硬铸铁更好。因此,高铬铸铁问世以来,一直被认为是比较理想的耐磨材料,应用十分广泛^[13,14]。另外,高铬铸铁中存在的杆状碳化物还有一个重要的特点,即其硬度在不同的方向是不同的。通常在杆状的横剖面上硬度高达 1989HV,而在杆状的纵剖面上的硬度为 1450HV。这一硬度的差别使得人们有可能利用定向凝固的方法使碳化物定向排列,让碳化物的高硬度面朝向磨损面而提高铸件服役时的耐磨性。有关实验表明,当碳化物垂直于磨损面定向排列时,与碳化物呈无序排列的普通砂型铸造试样相比,其耐磨性的提高幅度可达 30%~150%^[15]。

目前,对于高铬铸铁的研究取得了很大的进展。研究发现,在高铬铸铁中加入一定数量的钒,在铸态下可以获得高硬度的马氏体组织,可以省去高铬铸铁的高温热处理工艺^[16]。对高铬铸铁进行加硼的试验研究发现,添加适量的硼和采取合适的热处理工艺,可以使高铬铸铁的碳化物细化,基体淬透性增加,并使高铬铸铁的硬度和韧性同时得到提高,从而增加了材料的耐磨性^[17]。在高铬铸铁提高韧性方面,主要采用微合金化、除气处理、热塑性变形、高温处理、悬浮铸造和过滤处理等手段,试图改变碳化物的形态,使之变为断续状或颗粒状,以提高高铬耐磨铸铁的韧性,满足在较大冲击载荷下的应用。但这一方面的研究至今可以说尚未有实质性的进展,因而出现了各种镶铸工艺以解决高铬耐磨铸铁件硬度与韧性的矛盾。

采用合理的成分设计以及特殊的变质处理工艺,无须等温淬火处理,获得的马氏体-贝氏体球墨铸铁,其硬度适中(HRC48~55),冲击韧性较高(α_k 100kJ/m²),适用于制作球磨机磨球、衬板等多种抗磨部件,特别是在具有腐蚀介质的湿式磨损工况中其优越性更为显著。采用该材质生产的球磨机磨球(金属型铸造),其成本与普通低铬铸铁相当,但其耐磨性在铅锌矿中是低铬铸铁的 2 倍左右。

中国学者结合我国国情,开发了中锰白口铸铁、硼系合金白口铸铁和钨系白口铸铁等。中锰白口铸铁的各项力学性能可与国外镍硬铸铁相比,用于生产磨料低应力冲刷磨损件,如矿山砂浆泵体、分级机衬板等均取得很好的经济效益。但用于制做冲击磨损件和高应力凿削磨损件,如球磨机衬板和磨球,无论在硬

度和冲击韧性上,都需要进一步提高。中锰白口铸铁经稀土变质处理可以使碳化物由连续网状分布变为断网状和逐渐成为孤立状分布,韧性可以达到 50~120kJ/m² [18]。但硬度的提高则依赖于合金化和热处理,消除组织中残留奥氏体及获得最大量的马氏体或贝氏体。以硼为主要合金元素的低合金白口铸铁,其许多性能接近于高铬铸铁,且成本大大低于高铬铸铁,具有较高的使用价值和广阔的发展前景。但这种铸铁淬透性不高,难以直接应用于壁厚较大的耐磨部件。加入 4.0%~5.0%Mn 可以提高硼白口铸铁的淬透性和淬硬性,有利于改善耐磨性 [19]。中锰白口铸铁和硼系合金白口铸铁成分和性能见表 5 [20]。钨合金白口铸铁具有硬度高、耐磨性好等特点,用于制作搅拌机叶片、渣浆泵泵体,使用寿命已经达到高铬铸铁的水平 [21]。钨合金白口铸铁中,钨分布在基体和碳化物中,钨能改变碳化物的形态和分布。钨合金白口铸铁中的 W<6% 时,碳化物呈 M₃C 型,呈连续网状分布,20%W 左右时,碳化物以 M₆C 型为主,少量为 M₂₃C₆ 型及 MC 型,其形貌呈紧密结构的孤立块状,为奥氏体所包围。13%~15%W 时,碳化物以 M₆C 型为主,有少量的 M₇C₃ 型及 M₃C 型,其形貌呈断网状或孤立状。低钨合金白口铸铁成本低,但其共晶碳化物呈连续网状分布,脆性大,在承受冲击载荷的工况下安全性差,用 Ce-K-Na 处理低钨合金白口铸铁,共晶碳化物的网状组织全部消失,呈团块状、部分呈团球状分布,力学性能明显提高 [22]。

表 5 中锰白口铸铁和硼系合金白口铸铁成分和性能

名称	化学成分 (%)								力学性能		
	C	Si	Mn	Mo	Cu	B	Ti	其它	HRC	k _k / kJ·m ²	w / MPa
中锰白口	2.5~3.5	0.6~1.5	5.0~6.5	0~0.6	0~1.0			1.0Cr	57~62	40~100	
	2.9~3.2	0.9~1.6	0.5~1.0	0.5~0.7	0.8~1.2	0.14~0.25	<0.18	0.02~0.08RE	62~65	44~81	440~560
低碳高硼	2.2~2.4	0.9~1.6	0.5~1.0	0.5~0.7	0.8~1.2	0.40~0.55	<0.18	0.02~0.08RE	63~65	33~41	450~540

4 其它耐磨材料研究进展

耐磨钢铁材料和耐磨铸造复合材料是近年发展起来的新型耐磨材料,耐磨钢铁材料是以钢为粘结金属,以难熔金属碳化物作硬质相的结合材料,其组织特点是微细硬质晶粒均匀分散于钢基体中。它兼有硬质化合物的硬度和耐磨性以及钢的强度和韧性,处于普通硬质合金和钢的中间地位。钢结合金基体可被设计为各种合金和超合金。钢结合金工艺特性多为基体

赋予;钢结合金高硬度、高耐磨性、高韧性等为硬质相及基体提供。钢结合金可采用以下几种方法生成:普通粉末冶金方法、浸渍法、热压法、热等静压法、喷射成形法、混合搅拌铸造法、等离子熔融粉末法等 [23]。其中普通粉末冶金法、浸渍法及热压法运用较为普遍。近年来,为了降低钢结合金成本,采用中频电炉和电渣炉等设备,采用电冶熔铸工艺制备电冶碳化钨钢结合金,控制所制合金的成分 (%):WC40, Cr0.80, Mo1.70, Ni0.5, 其余为 Fe, 生产出一种新型的硬质工模具材料,该材料生产成本低,周期短,可制作大体积工件,用该材料所制成的冷轧螺纹钢轧辊的硬度达 HRC64~66,冲击韧度 a_k 达 90~100kJ/m²,抗弯强度达 1900MPa。与粉末冶金钢结合金轧辊的力学性能相当,由于电冶钢结合金中的硬质相与钢基体相实现了冶金结合,没有明显的相界面,故裂纹不易在两相界面处生成,即使有微裂纹生成,也不易扩展,表现出较好的使用效果 [24]。

用于电力、冶金、选矿、化工等行业的许多耐磨部件,不仅经受物料的磨损作用,还经受介质的强烈腐蚀作用(如化工厂耐酸泵中的过流部件)以及高温环境的氧化作用(如电厂锅炉用喷火咀)。在如此严酷的工况中,金属抗磨材料是无法满足要求的。例如耐热钢或不锈钢具有良好的抗高温氧化性能或耐腐蚀性能,但二者的抗磨料磨损性能均很差。高铬铸铁虽具有优良的抗磨料磨损性能,但高温抗氧化性能与耐腐蚀性能又很差。为此,近年来有学者开展了表面耐磨铸造复合材料的研究,利用陶瓷颗粒 (Al₂O₃、WC) 的高硬度以及高的化学稳定性,采用铸渗的方法将其复合于不锈钢或耐热钢部件经受磨损的局部表面,克服了整体复合铸造工艺难度大、且会造成材料不必要的浪费等优点,获得了很好的抗磨效果 [25]。另外,通过元素之间或元素与化合物之间的化学反应,在金属基体内原位生成一种或几种高硬度、高弹性模量的陶瓷增强相,从而达到强化金属基体的目的,也是获得高性能耐磨材料的重要手段 [26]。

最近,我们还开发了一种以硼为主要合金元素的高硼铸造耐磨合金,以高韧性的马氏体为基体,在基体上分布有硬度高、热稳定性好的硼化物,可以确保高硼铸造合金具有优异强韧性的前提下,还具有高的硬度和优良的耐磨性。特别是经钛、稀土、氮和镁等变质处理的高硼铸造合金,硼化物呈团球状和颗粒状分布,材料力学性能和耐磨性明显提高。典型高硼铸造合金的组织见图 2,其力学性能见表 6。

5 结束语

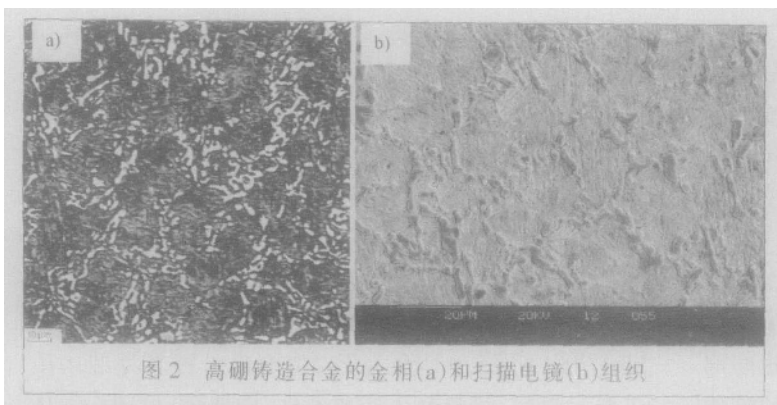


图2 高锰铸造合金的金相(a)和扫描电镜(b)组织

磨损和耐磨材料的研究及生产耐磨产品的企业目前正面临着一个激烈竞争的时代，但同时也拥有一个美好和广阔的前景。因为有工业就有磨损，工业越发达，需要的耐磨材料就越多。随着耐磨材料研究与应用的发展，针对千差万别的使用条件，应继续深入研究摩擦磨损理论，充分分析典型磨损工况，了解各种磨损机理所占比重，从而确定对耐磨材料的要

表6 高锰铸造合金力学性能

硬度/HRC	抗拉强度/MPa	冲击韧性/J·cm ²	断裂韧性/MPa·m ^{1/2}
60-64	730-780	20-24	35-38

求，以进行合理的合金和组织设计。并在新材料、新工艺，特别是产品生产的机械化、自动化上下功夫，不断提高生产效率，降低成本，稳定产品质量，提高产品竞争力。另外，在耐磨材料的研究、应用中不要追求高合金化，建议在工艺上下功夫，以达到需要的组织和性能，尽量降低昂贵、稀缺合金元素的使用量。

参 考 文 献

- 1 王洪发.金属耐磨材料的现状与展望[J].铸造, 2000, (增刊):577-581
- 2 赵四勇,涂小慧,郑开宏.关于高锰钢的若干问题[J].铸造技术, 1999 (4):34-36
- 3 I Mahallawi, R Abdel - Karim and A Naguib.Evaluating effect of chromium on wear performance of high manganese steels [J].Journal of Engineering and Applied Science, 2000, 47(5) :945-964
- 4 刘立中, 刘 凯, 陈淑英. 消失模铸造大型高锰钢颧板的余热水韧处理[J].铸造技术, 2003, 24(3): 210-211
- 5 全健民.耐磨钢研究进展[J].水利电力机械, 2003, 25(2) :29-32
- 6 J Tianfu and Z Fucheng.Work - hardening behavior of medium manganese steel under impact abrasive wear condition[J].Materials Letters, 1997, 31(3-6) :275-279
- 7 Xu Zhenming. Eutectic growth in as-cast medium manganese steel [J]. Materials Science and Engineering A, 2002, 335A(1-2) :109-115
- 8 E Jisheng and D T Gawne.Influence of lubrication regime on the sliding wear behaviour of an alloy steel[J].Wear, 1997, 211(1) :1-8
- 9 SK Putatunda.Influence of austempering temperature on microstructure and fracture toughness of a high- carbon, high- silicon and high- man-

- ganese cast steel [J].Materials and Design, 2003, 24 (6) : 435-443
- 10 徐继彭,姚三九,严有为,等.温淬火高碳硅铸钢的抗磨性能[J].中国铸造装备与技术, 2005(1) :20-22
- 11 康沫狂,朱 明.淬火合金钢中的奥氏体稳定化[J].金属学报, 2005, 41(7) :673-679
- 12 O N Dogan, J A Hawk and J Rice.Comparison of three ni-hard alloys [A].Association for Iron and Steel Technology. AIST Process Metallurgy, Product Quality and Applications Proceedings [C].Materials Science and Technology, Sep 26 -29 2004, New Orleans, LA, United States, 451 - 455.
- 13 Liu Jinhai, Liu Gensheng, Li Guodu, Wang Kunjun and Zeng Daben. Research and application of as-cast wear resistance high chromium cast iron[J].Chinese Journal of Mechanical Engineering (English Edition), 1998, 11(2) :130-135.
- 14 G B Stachowiak, G W Stachowiak and O Celliers.Ball - cratering abrasion tests of high - Cr white cast irons [J].Tribology International, 2005, 38(11- 12) :1076-1087
- 15 Su J Y, Zhou Q D and Jia Y D.An Investigation of Abrasive Wear Resistance of Unidirectionally Solidified High Chromium Iron[A].Wear of Materials, Vancouver, British Columbia, Canada; 14 -18 Apr.1985.pp. 621-624
- 16 M Radulovic, M Fiset, K Peev and M Tomovic.Influence of vanadium on fracture toughness and abrasion resistance in high chromium white cast irons[J].Journal of Materials Science, 1994, 29(19) : 5085-5094
- 17 Ma N, Rao Q and Zhou Q.Effect of boron on structures and properties of 28% Cr white cast iron[A].AFS Transactions, 1990, Vd.98, 775-780
- 18 王兆昌, 马 前.稀土变质处理中锰白口铸铁的研究[J].铸造, 1989 (11) :1-6
- 19 孙广平,贾树盛,周 宏.锰对硼白口铸铁组织与性能的影响[J].机械工程材料, 1992, 16(1) :31-35
- 20 李茂林.我国金属耐磨材料的发展和应用 [J]. 铸造, 2002, 51(9) : 525-529
- 21 Wang M C, Ren S Z, Wang X B and Li S Z. Study of sand slurry erosion of W- alloy white cast irons[J].Wear, 1993, 160(2) :259-264
- 22 Zou D and Fu H.Influence of Ce, K, and Na on spheroidization of eutectic carbides in low- tungsten white cast iron[J].Z Metallkd, 2005, 96 (11) : 1328-1331
- 23 王洪海.硬质颗粒钢基复合材料[J].硬质合金, 1993, 10(3) :169-173
- 24 尤显卿,朱晓勇,陈九磅.电冶碳化钨钢结合金在螺纹钢轧辊上的应用[J].重型机械, 2003(1) :42-45
- 25 Bao Conggao, Xing Jiandong, Gao Yiming and Wang Enze.Wear resistant of Al₂O₃/heat-resistant steel at high temperature [J].Key Engineering Materials, 2005, 280- 283(1- 2) :1119-1122
- 26 Hui X D, Yang Y S and Chen X C.Fabricating TiC particulate reinforced Fe- Cr- Ni matrix composites by a liquid state in- situ synthesis [J]. Journal of Materials Science Letters, 2000, 19(4) :1281-1283