

钢铁耐磨铸件 铸造技术

杜西灵 杜 磊 编著

广东科技出版社
·广 州·

前 言

钢铁耐磨材料零件科技含量较高,广泛存在于冶金、矿山、建材、水泥、铁路、电力、煤炭、石油化工、军工等行业的机械装备结构中,这些耐磨零件往往铸造而成,称为钢铁耐磨铸件。钢铁耐磨铸件虽占机器总重的比重不大,但却是上述工业部门机械装备中科技含量较高的关键零部件。这些零部件常因磨损、腐蚀、氧化作用而失效,使每年各种钢铁耐磨铸件消耗量巨大(2002年我国仅钢铁冶金矿山年耗耐磨件达140万~150万t),有的运转时间不长就要维修或更换,甚至停机停产,造成巨大经济损失。据统计,机械零件的失效中,磨损占80%以上。美国因磨损造成经济损失每年约达1000亿美元,我国在矿山、冶金、电力、煤炭以及农机部门不完全统计,仅因工件磨损造成经济损失每年达400亿元。

钢铁耐磨铸件的抗磨性和使用寿命与铸造质量(含热处理)和冶金质量有着十分重要的关系。提高金属液熔炼质量,提高铸件表面和内在质量,提高耐磨铸件表面粗糙度(Ra)、尺寸精度、铸件重量偏差等技术经济指标,对提高钢铁耐磨铸件抗磨性,延长使用寿命,对持续生产,减少经济损失,增加经济效益,以及创造耐磨铸件精品和名牌,参与国际市场竞争,具有重要意义。

用铸造方法生产的钢铁耐磨材料零件,在不同工况环境下具有很好的耐磨性。尤其是近年来,随着现代工业高速发展和科学技术突飞猛进,耐磨高锰钢已成为磁悬浮列车、凿岩机器人、新型坦克等先进装备中首选的耐磨铸件材料。鉴于国内外市场需求,耐磨铸件生产已呈现出专业化的趋势。专家预测,国内有年耗200万t耐磨铸件的市场,以及日渐增长的耐磨铸件出口市场。

本书是为我国中小企业、乡镇企业、个体企业的铸造技术人员、铸造工人而编写的,目的是提供钢铁耐磨铸件新材料、新工艺知识,帮助他们提高钢铁耐磨铸件的铸造工艺水平,改善耐磨铸件质量,降低铸件成本,以生产出具有竞争力的耐磨铸件产品,满足国内外用户不同工况的需求。

全书共10章,其中第7,8,10章由杜磊(Larry Du)撰写,并校核第1,2,3章。其余章节由杜西灵撰写,并统稿全书。

“参考文献”中专家学者们的重要文献资料和数据,保证了本书在结构和内容上的系统性、严谨性。为此,向他们表示诚挚的敬意和感谢。

由于磨损的复杂性,很多钢铁耐磨材料和铸造工艺正处于不断发展和深入研究过程之中,加之作者水平有限,故书中难免会出现缺点和错误,恳请读者批评指正。

作 者

2006年2月15日于深圳

作者简介

杜西灵 高级工程师。男，1965年毕业于郑州大学机械学院铸造专业。曾工作于华北石油管理局第一机械厂、中信重型机械公司总工程师办公室。曾任主任工程师、全国铸造信息网特聘专家、河北省铸造学会理事和河南省铸造学会理事等。

长期从事铸造工艺技术实践与研究，在铸造事业上做出了卓有成效的成绩。结合生产实际先后完成了十多项技术进步项目，其中，领导和主持的《钻井液旋流器球铁铸造》获1989年中国石油天然气集团总公司QC成果一等奖。

撰写了大量具有理论指导和实践应用价值的论著。在《铸造》、《铸工》、《铸造技术》、《矿山机械》、《河北机械》等国家级和省级刊物及学术年会上，发表论文40余篇。

出版技术专著3部：《铸造工艺问答》（机械工业出版社出版，印数达万册），该书于1990年被收入中国科学院何祚庥院士主编的《中国优秀科技图书要览》；《袖珍铸造工艺手册》（机械工业出版社出版，4次重印）；《钢铁耐磨铸件铸造技术》（广东科技出版社）。

杜磊 男，1997年西安交通大学研究生院毕业，工学硕士。参与编写《袖珍铸造工手册》和《钢铁耐磨铸件铸造技术》，分别由机械工业出版社和广东科技出版社出版。曾任珠海市大明软件公司项目经理，高级程序员；法国金谱斯科技有限公司技术顾问；博力思软件有限公司全国销售总监、华南区销售经理；达能思科技有限公司（Nasdaq: TCNO）华南区运营经理，2004年荣获公司全球最佳员工，President Club大奖。

目 录

第 1 章 耐磨铸造合金	1
1.1 耐磨高合金铸钢	1
1.1.1 耐磨高锰铸钢	1
1.1.2 超高锰铸钢	8
1.1.3 耐磨高铬铸钢	9
1.1.4 耐热耐磨高合金铸钢	11
1.2 耐磨中合金铸钢	15
1.2.1 耐磨中锰铸钢	15
1.2.2 耐磨中铬铸钢	17
1.3 耐磨低合金铸钢	20
1.3.1 水淬低合金马氏体耐磨铸钢	20
1.3.2 油淬 [$\omega(\text{C}) > 0.35\%$]低合金马氏体耐磨铸钢	25
1.3.3 空淬低合金马氏体耐磨铸钢	28
1.3.4 正火低合金珠光体耐磨铸钢	29
1.3.5 低合金贝氏体耐磨钢	31
1.4 抗磨白口铸铁	34
1.4.1 标准抗磨白口铸铁	34
1.4.2 普通白口铸铁	36
1.4.3 低合金白口铸铁	37
1.4.4 中合金白口铸铁	39
1.4.5 高铬白口铸铁	45
1.5 铬系合金铸铁磨球	48
1.5.1 铬系合金铸铁磨球的化学成分和力学性能	48
1.5.2 铸造磨球的规格及其选用	49
1.6 钒系高耐磨铸铁	50
1.6.1 低钒高铬耐磨铸铁	50
1.6.2 高钒高耐磨铸铁	50
1.6.3 超高钒高韧度耐磨铸铁	51
1.7 抗磨球墨铸铁	51
1.7.1 马氏体抗磨球墨铸铁	51
1.7.2 贝氏体抗磨球墨铸铁	52
1.7.3 中锰抗磨球墨铸铁	53
1.8 钢铁双金属复合抗磨材料	54
1.8.1 双液双金属复合铸造抗磨材料	55
1.8.2 镶铸双金属复合铸造抗磨材料	56
1.8.3 铸渗工艺的双金属抗磨材料	57
第 2 章 中频感应电炉熔炼	60
2.1 中频感应电炉熔炼设备	60
2.1.1 中频感应电炉熔炼设备的配置	60

2.1.2 中频感应电炉的主要技术性能	60
2.2 熔炼用原材料	61
2.2.1 钢铁材料和返回料	61
2.2.2 常用合金元素及其铁合金	62
2.2.3 造渣材料	70
2.2.4 中频感应炉熔炼配料计算	71
2.3 感应炉坩埚的制备	78
2.3.1 感应电炉坩埚材料	78
2.3.2 感应电炉坩埚成型	84
2.3.3 感应电炉坩埚的烧结	85
2.4 中频感应炉熔炼耐磨铸钢	86
2.4.1 扒补炉与装料	86
2.4.2 碱性感应电炉不氧化法熔炼工艺	87
2.4.3 碱性感应电炉氧化法炼钢工艺	93
2.4.4 酸性感应炉炼钢	95
2.5 中频感应炉熔炼抗磨铸铁	98
2.5.1 感应炉熔炼铸铁的冶金特点	99
2.5.2 合金元素的吸收率	99
2.5.3 抗磨球墨铸铁的熔炼	99
第3章 钢铁耐磨件铸造工艺设计	104
3.1 砂型铸造工艺方案的确定	104
3.1.1 造型(芯)方法的选择	104
3.1.2 铸型种类的选择	104
3.1.3 浇注位置和分型面的选择	105
3.1.4 砂箱中铸件数目的确定	105
3.1.5 砂芯设计	106
3.2 铸造工艺参数的选择	109
3.2.1 铸件线收缩率	109
3.2.2 铸件的机械加工余量和尺寸公差	109
3.2.3 起模斜度	112
3.2.4 铸制孔槽	114
3.2.5 工艺补正量	115
3.2.6 分型负数和分芯负数	116
3.3 耐磨铸件的冒口和冷铁	117
3.3.1 冒口的基本知识	117
3.3.2 耐磨铸钢件冒口设计	119
3.3.3 抗磨球墨铸铁件冒口设计方法	123
3.3.4 耐磨铸件用冷铁	124
3.4 浇注系统设计	125
3.4.1 耐磨铸钢件浇注系统的计算	125
3.4.2 抗磨球墨铸铁件浇注系统的计算	133
3.5 耐磨铸件铸造工艺图实例	134
3.5.1 铸造工艺图的内容及作用	134

3.5.2 耐磨高锰钢铸件铸造工艺图例	134
3.5.3 耐磨低合金钢铸件铸造工艺图例	138
第4章 耐磨铸件砂型铸造	140
4.1 抗磨铸铁件粘土砂铸造	140
4.1.1 粘土型砂	140
4.1.2 铸铁件粘土砂型用涂料	144
4.1.3 抗磨铸铁件粘土砂手工造型	146
4.1.4 抗磨铸铁磨球件粘土砂机器造型	152
4.2 抗磨铸铁件树脂砂铸造工艺	155
4.2.1 覆膜砂及其铸造工艺	155
4.2.2 树脂自硬砂及其铸造工艺	163
4.3 耐磨铸钢件 CO ₂ 水玻璃砂砂型铸造	167
4.3.1 水玻璃砂	167
4.3.2 耐磨铸钢件水玻璃砂型用涂料	174
4.3.3 水玻璃 CO ₂ 硬化砂砂型铸造	175
4.3.4 水玻璃 CO ₂ 硬化砂常见缺陷及预防措施	178
4.4 有机脂水玻璃自硬砂铸造	178
4.4.1 有机脂水玻璃自硬砂的概念	178
4.4.2 有机酯水玻璃自硬砂	179
4.4.3 耐磨铸钢件有机脂水玻璃自硬砂铸造工艺	179
4.4.4 铸造缺陷及预防措施	181
第5章 钢铁耐磨铸件特种砂型铸造	183
5.1 耐磨铸钢件 VRH 法造型新工艺	183
5.1.1 真空置换硬化 (VRH) 法原理	183
5.1.2 真空置换硬化 (VRH) 工序	184
5.1.3 真空置换硬化 (VEH) 工艺对原材料性能的要求	185
5.1.4 真空置换硬化 (VRH) 砂基本配方及性能	185
5.1.5 VRH 造型生产线及主要工艺设备	186
5.1.6 真空置换硬化 (VRH) 工艺要点	186
5.2 耐磨铸钢件 V 法铸造新工艺	187
5.2.1 V 法铸造工艺的概念	187
5.2.2 V 法铸造耐磨铸件的结构特点	188
5.2.3 V 法铸造的优点和局限性	189
5.2.4 V 法铸造的工艺设备	189
5.2.5 V 法造型主要工装	190
5.2.6 V 法造型主要原材料及涂料	190
5.2.7 V 法铸造工艺过程	191
5.2.8 V 法造型的工艺要点	192
5.2.9 V 法造型的铸件质量和经济效益	193
5.3 抗磨铸铁件 EPC 法铸造新工艺	193
5.3.1 消失模 (EPC) 铸造工艺概述	193
5.3.2 泡沫塑料模的制备与粘结	196
5.3.3 消失模铸造的浇注系统	197

5.3.4	消失模用涂料	198
5.3.5	消失模模样施涂与烘干	199
5.3.6	消失模铸件的造型与浇注	200
5.3.7	消失模铸造生产线	201
5.3.8	消失模铸件的缺陷及预防	203
第6章	钢/铁复合耐磨材料铸造工艺	207
6.1	钢/铁双液复合材料铸造工艺	207
6.1.1	钢/铁双液复合材料成分	207
6.1.2	钢/铁双液复合铸造工艺	207
6.1.3	钢/铁双液双金属铸件的热处理	209
6.2	钢/铁镶铸熔铸工艺	210
6.2.1	抗磨铸铁镶块和铸钢母材	210
6.2.2	钢/铁镶铸造型工艺	210
6.2.3	钢/铁镶铸铸件热处理及耐磨性	212
6.3	复合材料离心铸造铸渗工艺	213
6.3.1	材料	213
6.3.2	环形零件离心铸渗工艺	214
6.3.3	离心铸渗操作方法	214
6.4	V法铸造铸渗工艺	214
6.4.1	V法造型铸渗工艺图	214
6.4.2	V法造型操作要点	214
6.4.3	气缸套内表面铸渗工艺	214
6.5	砂型铸造铸渗工艺	215
6.5.1	合金涂料及涂层的制备	215
6.5.2	砂型铸造铸渗工艺参数	218
6.5.3	砂型铸造“焦炭车架车铸铁板”铸件铸渗工艺	218
第7章	铸型的浇注	219
7.1	铸型浇注前的准备	219
7.1.1	了解浇注计划和铸造工艺文件	219
7.1.2	浇包使用前的质量检查	219
7.1.3	金属液起重运输设备安全检查	219
7.1.4	常用工具准备情况的检查	220
7.1.5	试样铸型及辅助材料准备情况的检查	220
7.1.6	铸型紧固,抹缝及浇冒口高度的检查	220
7.1.7	安排好铸型浇注次序	220
7.2	耐磨铸钢的浇注	220
7.2.1	盛钢桶的种类和规格	220
7.2.2	盛钢桶的烘烤	221
7.2.3	镇静时间	222
7.2.4	浇注温度	222
7.2.5	浇注速度	223
7.2.6	铸钢件浇注操作要点	224
7.3	抗磨铸铁的浇注	224

7.3.1 浇包的种类和规格	224
7.3.2 修包与烤包	226
7.3.3 铸铁浇注技术要点	228
第8章 耐磨铸件落砂与清理	230
8.1 耐磨铸件的落砂	230
8.1.1 铸件在砂型中的冷却时间	230
8.1.2 落砂方法	231
8.2 耐磨铸件的清理	232
8.2.1 浇冒口的清除	232
8.2.2 铸件表面清理方法	235
8.3 消除耐磨铸件铸造应力处理	235
8.4 耐磨铸件的焊接	235
8.4.1 铸钢件缺陷手工电弧焊焊补	235
8.4.2 耐磨高锰钢铸件的焊接	240
8.4.3 抗磨铸铁件缺陷焊补	252
第9章 钢铁耐磨铸件热处理	258
9.1 耐磨铸钢件热处理	258
9.1.1 铸钢件热处理工艺曲线	258
9.1.2 耐磨高锰钢铸件的热处理	259
9.1.3 耐磨高铬钢铸件的热处理	268
9.1.4 耐热耐磨高铬镍钢铸件的热处理	269
9.1.5 耐磨中锰钢和中铬钢铸件的热处理	271
9.1.6 耐磨低合金钢铸件的热处理	272
9.1.7 耐磨碳钢铸件的热处理	274
9.2 抗磨铸铁件的热处理	274
9.2.1 抗磨铸铁件的热处理工艺基础	274
9.2.2 抗磨白口铸铁件热处理工艺	276
9.2.3 抗磨球墨铸铁件的热处理	288
9.3 双金属抗磨铸件的热处理	289
9.3.1 双金属铸件的热处理	289
9.3.2 镶铸双金属铸件的热处理	289
第10章 钢铁耐磨铸件的质量检验	290
10.1 耐磨铸件质量检验的常规方法	290
10.2 球磨机磨球和衬板的冲击疲劳试验	291
10.2.1 磨球的MQ型冲击疲劳试验	291
10.2.2 衬板的CB-1型冲击疲劳试验机	292
10.3 耐磨铸钢件耐磨性的检测	293
10.3.1 MM型磨损试验	293
10.3.2 环块型磨损试验	295
10.3.3 改进的橡胶轮试验	296
10.3.4 强应力磨粒磨损	296
10.3.5 碰撞磨损	296
10.4 抗磨铸铁件耐磨性测试	297

10.4.1	MM 型磨损试验	297
10.4.2	环块型磨损试验	297
10.4.3	往复磨损试验	297
10.4.4	铸铁抗磨性能测试方法	298
10.5	耐磨铸件质量的评定	300
10.5.1	铸件质量检验结果分类及废品率	300
10.5.2	铸件质量分级的概念	301
10.5.3	铸件平均质量等级评定	301
参考文献		303

第 1 章 耐磨铸造合金

耐磨铸造合金材料种类大致如表 1-1 所示。

表 1-1 耐磨铸造合金材料种类

种 类		合金元素 含量 (ω, %)	基体组织	碳存在形式
耐磨铸钢	碳素耐磨铸钢	无	铁素体 + 珠光体	
	低合金耐磨铸钢	< 5	马氏体	
	中合金耐磨铸钢	5 ~ 10	马氏体	碳化物
	高合金耐磨铸钢	> 10	奥氏体 + 碳化物	碳化物
耐磨铸铁	减磨铸铁	低合金	珠光体	片状石墨
			索氏体	球状石墨
	抗磨铸铁	无	珠光体 + Fe ₃ C	白口
		低铬	珠光体 + M ₃ C	白口
		中铬	马氏体, 贝氏体 + M ₃ C + M ₇ C ₃	白口
		高铬	马氏体 + M ₇ C ₃	白口
耐磨铸造 复合材料	双液双金属复合铸造抗磨材料			
	镶铸双金属复合铸造抗磨材料			
	铸渗工艺的双金属抗磨材料			

1.1 耐磨高合金铸钢

耐磨高合金铸钢包括：耐磨高锰铸钢、耐磨高铬铸钢、耐热耐磨高合金铸钢等。

1.1.1 耐磨高锰铸钢

高锰钢是世界各国通用的一类抗磨钢。在我国抗磨材料中高锰钢是用量最多的钢种。

1.1.1.1 国家标准 Mn13 系列高锰钢

1. 化学成分

Mn13 系列高锰钢适用于不同程度冲击载荷下的耐磨损高锰钢铸件。Mn13 系列高锰钢化学成分见表 1-2。成品分析的化学成分允许偏差，见表 1-3。

表 1-2 高锰钢铸件的化学成分 (GB/T5680—1998)

牌 号	化学成分 (ω, %)						
	C	Mn	Si	Cr	Mo	S≤	P≤
ZGMn13-1	1.00 ~ 1.45	11 ~ 14	0.30 ~ 1.0			0.040	0.09
ZGMn13-2	0.90 ~ 1.35	11 ~ 14	0.3 ~ 1.0			0.040	0.07

续表

牌 号	化学成分 (ω, %)						
	C	Mn	Si	Cr	Mo	S≤	P≤
ZGMn13-3	0.95~1.35	11~14	0.30~0.8			0.035	0.07
ZGMn13-4	0.90~1.30	11~14	0.30~0.8	1.50~2.50		0.040	0.07
ZGMn13-5	0.75~1.30	11~14	0.30~1.0		0.90~1.20	0.040	0.07

注：“ZGMn13”系铸造高锰钢，“—”后阿拉伯数字表示品种代号。

表 1-3 高锰钢铸件成品分析的化学成分允许偏差 (GB/T5680—1998)

元素	C	Mn	Si	Cr	Mo	S	P
偏差 ± (ω, %)	0.05	0.40	0.10	0.10	0.07	0.005	0.005

2. 金相组织

国家标准 Mn13 系列高锰钢铸件的金相组织，见表 1-4。

表 1-4 高锰钢的金相组织 (试样) (GB/T5680—1998)

铸 态	水韧处理后	碳化物级别验收规定		
		未熔碳化物	析出碳化物	过热碳化物
奥氏体 + 碳化物	奥氏体或奥氏体 + 少量碳化物	不大于 W ₃ 级为合格	不大于 X ₃ 级为合格	不大于 G ₂ 级为合格

3. 力学性能

国家标准 Mn13 系列高锰钢铸件的力学性能，见表 1-5。

表 1-5 高锰钢铸件的力学性能 (GB/T5680—1998)

牌 号	力学性能				
	σ _s /MPa≥	σ _b /MPa≥	δ (%) ≥	a _{KU} /J·cm ⁻² ≥	HBS≤
ZGMn13-1	—	635	20	—	—
ZGMn13-2	—	685	25	147	300
ZGMn13-3	—	735	30	147	300
ZGMn13-4	390	735	20	—	300
ZGMn13-5	—	—	—	—	—

4. 铸件检验项目

①高锰钢铸件必须进行 ≥1 040℃ 的水韧处理。②化学成分为必检项目，为主要验收依据。③制造厂可根据本厂的检测能力或与需方商定，选择金相检验、力学性能检验和弯曲检验中的一项作为产品验收的必检项目。未规定的条款一律不作验收依据。

1.1.1.2 普通高锰钢

普通高锰钢系指传统的标准型 Mn13 钢，又称 Hadfield 钢，是由英国人 R.A.Hatfield 于 1882 年

发明的。普通高锰钢只由 C, Mn, Si, P, S 5 种元素组成, 不加任何其他合金元素, 锰的公称含量为 $\omega(\text{Mn}) = 13\%$ 。

1. 普通高锰钢的化学成分和力学性能 (表 1-6)

表 1-6 ZGMn13 的化学成分及力学性能

化学成分 ($\omega, \%$)					力学性能				
C	Mn	Si	P	S	σ_s/MPa	σ_b/MPa	$\delta_s (\%)$	$\varphi (\%)$	HB
0.90 ~ 1.30	11 ~ 14	0.3 ~ 0.8	≤ 0.07	≤ 0.05	≥ 300	≥ 560	≥ 15	≥ 15	179 ~ 229

注: 相当于国家标准 GB/T5680—1998 中的 ZGMn13-3 牌号。

2. 普通高锰钢的应用

普通高锰钢适用于冲击磨料磨损和高应力碾碎磨料磨损工况。常用于制造球磨机衬板、锤式破碎机锤头、颚式破碎机颚板、圆锥破碎机轧臼壁、破碎壁、挖掘机斗齿、斗壁、铁道道岔、拖拉机和坦克的履带板等抗冲击抗磨损的铸件。

1.1.1.3 合金化高锰钢

在普通高锰钢 ZGMn13 中, 以合金化为目的而加入少量的 1 个或多个合金元素 (Cr, Mo, Ni 等), 即成为含单元素或多元素的合金化高锰钢。

1. 单元低合金高锰钢 (低 Cr 高锰钢, 低 Mo 高锰钢, 低 Ni 高锰钢)

(1) 低 Cr 高锰钢。元素 Cr 在普通高锰钢 ZGMn13 中, 可提高屈服强度, 提高耐磨性。但由于晶界碳化物析出倾向增加, 从而使钢的塑性和韧度比 ZGMn13 降低 30% ~ 40%。因此含 Cr 高锰钢应避免在低温下使用。低铬高锰钢的牌号与化学成分, 如表 1-7。

表 1-7 低 Cr 高锰钢的化学成分 ($\omega, \%$)

牌 号	C	Mn	Si	P	S	Cr
ZGMn13Cr2	0.9 ~ 1.3	11 ~ 14	0.3 ~ 0.8	≤ 0.08	≤ 0.04	1.5 ~ 2.5
ZGMn13Cr	1.05 ~ 1.35	11 ~ 14	0.3 ~ 1	≤ 0.07	≤ 0.05	0.3 ~ 0.75
SCMnH11 ①	0.9 ~ 1.3	11 ~ 14	≤ 0.8	≤ 0.07	≤ 0.04	1.5 ~ 2.5
C ②	1.05 ~ 1.35	11.5 ~ 14	≤ 1.0	≤ 0.07		1.5 ~ 2.5
GX120MnCr13-2 ③	1.05 ~ 1.35	11 ~ 14	0.3 ~ 0.9	≤ 0.06	≤ 0.045	1.5 ~ 2.5

注: 牌号 ZGMn13Cr 和 ZGMn13Cr2 是机械行业标准中的牌号, 其中 ZGMn13Cr2 相当 GB/T5680—1998 中的 ZGMn13-4 牌号。其 $\sigma_{0.2} \geq 390\text{MPa}$ 。

①日本国家标准, 标准编号 [JISG5131 (1991)] 中的钢种牌号。其 $\sigma_{0.2} \geq 390\text{MPa}$ 。

②美国国家标准, 标准编号 ASTM A128/A128M—1993 中的钢种牌号。

③ISO 国际标准奥氏体锰钢铸件牌号。

(2) 低 Mo 高锰钢。含 Mo 高锰钢在较恶劣的磨料磨损工况条件下具有良好的耐磨性。但 Mo 价格较贵, 使用时应合理充分发挥 Mo 的合金化作用。含 Mo 高锰钢的牌号和化学成分如表 1-8。

表 1-8 低 Mo 高锰钢的化学成分 ($\omega, \%$)

牌 号	C	Mn	Si	P	S	Mo
ZGMn13Mo	0.9 ~ 1.3	11 ~ 14	0.3 ~ 0.8	≤ 0.07	≤ 0.04	1.0 ~ 2.0

续表

牌 号	C	Mn	Si	P	S	Mo
ZGMn13Mo2	1.05 ~ 1.45	11.5 ~ 14	≤1.0	≤0.07	≤0.05	1.8 ~ 2.1
E—1 ①	0.7 ~ 1.3	11.5 ~ 14	≤1.0	≤0.07	—	0.9 ~ 1.2
E—2 ①	1.05 ~ 1.45	11.5 ~ 14	≤1.0	≤0.07	—	1.8 ~ 2.1
GZ110MnMo13—1②	0.75 ~ 1.35	11 ~ 14	0.3 ~ 0.9	≤0.06	≤0.045	0.9 ~ 1.2
GX90MnMo14②	0.70 ~ 1.00	13 ~ 15	0.3 ~ 0.9	≤0.06	≤0.045	1.0 ~ 1.8

注：ZGMn13Mo 相当于国家标准 GB/T5680—1998 中的 ZGMn13—5 牌号。

①E—1 和 E—2 是美国国家标准，标准编号 ASTM A128/A128M—1993 中的钢种牌号。

②是 ISO 国际标准。

(3) 低 Ni 高锰钢。我国镍资源缺乏，金属镍价格昂贵，镍的加入使高锰钢铸件成本大幅度提高。故含镍高锰钢没有列入国家标准。只有在特大特厚高锰钢件才选用。生产中应用的含镍高锰钢的牌号有：ZGMn13Ni，ZGMn13Ni4。其化学成分如表 1-9。

表 1-9 低 Ni 高锰钢化学成分 (ω, %)

牌 号	C	Mn	Si	P	S	Ni
ZGMn13Ni3	0.90 ~ 1.3	11 ~ 14	0.3 ~ 0.8	≤0.10	≤0.05	2 ~ 3
ZGMn13Ni4	0.7 ~ 1.3	11.5 ~ 14	≤1.0	≤1.0	≤0.05	3 ~ 4
D ①	0.7 ~ 1.3	11.5 ~ 14	≤1.0	≤0.07		3 ~ 4
GX120MnNi13—3②	1.05 ~ 1.35	11 ~ 14	0.3 ~ 0.9	≤0.06	≤0.045	3 ~ 4

注：①是美国国家标准，标准号 ASTM A128/A128M—1993 中的钢种牌号。

②是 ISO 国际标准中的牌号。

2. 二元低合金高锰钢（铬镍高锰钢、铬钒高锰钢、铬氮高锰钢、镍钼高锰钢、镍铌高锰钢）

(1) 含铬镍高锰钢。前苏联国家标准含铬镍高锰钢化学成分，见表 1-10。

表 1-10 铬镍高锰钢的化学成分 (ω, %)

牌 号	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni
110r13n①	0.9 ~ 1.5	11.5 ~ 15	0.3 ~ 1	≤0.12	≤0.05	≤1.0	≤1.0

注：①此牌号是标准编号 TOCT977—1988 中的牌号。

(2) 含铬钒高锰钢。凡是使用环式碎煤机的火力电厂，均可用 ZGMn13CrV 高锰钢的锤环。其化学成分如表 1-11。力学性能如表 1-12。

表 1-11 铬钒高锰钢化学成分 (ω, %)

牌 号	C	Mn	Si	P	S	Cr	V
ZGMn13CrV (金属型)	0.94	12.55	0.53	0.021 ~ 0.032	0.009	1.5 ~ 2.5	微量
SCMnH21 ①	1.0 ~ 1.35	11 ~ 14	≤0.8	≤0.07	≤0.04	2 ~ 3	0.4 ~ 0.7

续表

牌 号	C	Mn	Si	P	S	Cr	V
进口锤环	1.04	12.55	0.37	0.01 ~ 0.021	0.011	Mo 0.045	0.011

注：①此牌号是日本国家标准，标准编号 [JISG5131 (1991)] 中的牌号。

表 1-12 铬钒高锰钢 ZGMn13CrV 的力学性能

钢 号	状 态	$\sigma_b / \text{N} \cdot \text{mm}^{-2}$	δ (%)	$a_k / \text{MJ} \cdot \text{m}^{-2}$	HB
ZGMn13CrV	1050 ± 10℃, 1 ~ 1.5h 水淬	949.3 ~ 990.5	28.8 ~ 50.6	1.45 ~ 2.0	217 ~ 257
进口锤环		565.8 ~ 710.8	36.4 ~ 55	1.10 ~ 1.60	149 ~ 168

(3) 含铬氮高锰铸钢。在 ZGMn13 中加入元素 N, Cr 后其综合性能较好。ZGMn13NCr 高锰钢耐磨性比单元素高锰钢提高 5%。其化学成分如表 1-13, 力学性能见表 1-14。

表 1-13 ZGMn13NCr 钢化学成分 (ω, %)

元素	C	Mn	Si	P	S	Cr	N
含量	0.90 ~ 1.30	11.0 ~ 14.0	0.30 ~ 0.80	≤0.10	≤0.05	1.5	0.05

表 1-14 ZGMn13NCr 钢力学性能及抗磨性

钢 号	力学性能				磨损量
	$\sigma_b / \text{kg} \cdot \text{mm}^{-2}$	$\delta_s /$ (%)	$a_k / \text{kgm} \cdot \text{cm}^{-2}$	HB	
ZGMn13NCr	53	93	27	224	0.9
ZGMn13	40	63	19	179	1.4
比 1 提高 (%)	32	48	48	25	54

(4) 含镍钼高锰钢。其牌号及化学成分, 如表 1-15。

表 1-15 镍钼高锰钢的牌号及其化学成分 (ω, %)

牌 号	C	Mn	Si	P	S	Ni	Mo
ZGMn13Ni4Mo	0.7 ~ 1.3	11.5 ~ 14	≤1.0	≤1.0	≤0.05	3.0 ~ 4.0	0.9 ~ 1.2

(5) 含镍铋高锰钢。其牌号及化学成分, 见表 2-16。

表 1-16 镍铋高锰钢化学成分 (ω, %)

元 素	C	Mn	Si	P	S	Ni	Bi (加入量)
ZGMn13Ni3Bi	0.9 ~ 1.3	11 ~ 14	0.3 ~ 0.8	≤0.1	≤0.05	2 ~ 3	0.2 ~ 0.4

3. 多元低合金高锰钢 (铬镍硼高锰钢, 铬钼镍钒高锰钢, 铬钒钼钛稀土多元合金化高锰钢)

(1) 含铬镍硼高锰钢。前苏联国标铬镍硼高锰钢牌号及化学成分, 见表 1-17。

表 1-17 铬镍硼高锰钢的牌号及化学成分 (ω, %)

牌 号	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	B
120r13 × 2Бл	1.0 ~ 1.4	11.5 ~ 14.5	0.3 ~ 1.0	≤0.1	≤0.05	1.5 ~ 2.5	≤1.0	0.08 ~ 0.10

(2) 含铬钼镍钒高锰钢。前苏联国标铬钼镍钒高锰钢化学成分见表 1-18。

表 1-18 铬钼镍钒高锰钢化学成分 (ω, %)

牌 号	C	Mn	Si	S	P	Cr	Mo	Ni	V
130r14 × МФ АЛ	1.2 ~ 1.4	12.5 ~ 15	≤0.6	≤0.05	≤0.07	1.0 ~ 1.5	0.2 ~ 0.3	≤1.0	0.08 ~ 0.12

(3) 含铬钒钼钛稀土多元合金化高锰钢。多元合金化高锰钢在大型齿板上得到很好的应用。用 Cr, Mo, V, Ti, RE 多合金元素使高锰钢合金化, 改善了高锰钢的铸态组织, 并使奥氏体晶粒细化。导致高锰钢屈服强度明显提高 (屈服强度达 500MPa 以上) 及加工硬化能力明显增加, 形成少量高硬质点碳化物耐磨相, 使多元合金化高锰钢耐磨性显著增加。而塑韧性保持了较高水平。与普通高锰钢相比使用寿命提高近 1 倍。破碎矿石时齿板使用寿命比普通高锰钢提高 80%。

含铬钒钼钛稀土多元合金化高锰钢。其化学成分及力学性能见表 1-19。

表 1-19 多元合金化高锰钢成分和性能

序 号	化学成分 (ω, %)									
	C	Mn	Si	Cr	Mo	V	Ti	P	S	RE
1	0.9 ~ 1.2	12 ~ 15	0.3 ~ 0.7	2.0 ~ 3.0	0.4 ~ 1.0	0.1 ~ 0.2	0.15 ~ 0.3	0.06 ~ 0.08	<0.03	0.2 ~ 0.3 (加入量)
2 动齿板	1.23	13.95	0.58	1.89	0.45	0.22	0.13	0.08	0.09	0.015
3 定齿板	1.25	12.83	0.56	2.08	0.41	0.20	0.12	0.073	0.009	0.017
序 号	力学性能									
	σ_b /MPa		σ_s /MPa		δ (%)		a_{kv} /J·cm ⁻²		HBS	
1	795		480		16		90		230 ~ 250	
2 动齿板	900		545		30		114		256	
3 定齿板	845		505		30		120		275	

1.1.1.4 微合金化高锰钢

微合金化元素或微量元素是指合金元素 V, Nb, Ti, B, RE 等, 对普通高锰钢 ZGMn13 用微合金化 (0.05% ~ 0.14%) 方法进行变质处理, 是采用最多的生产方法。

1. 钛微量化高锰钢

含钛高锰钢的化学成分如表 1-20。

表 1-20 钛微量化高锰钢化学成分 (ω,%)

钢 号	C	Mn	Si	P≤	S≤	微量元素 (加入量)	
						Ti	RE
ZGMn13Ti	0.9~1.3	11~14	0.3~0.8	0.1	0.05	0.1~0.3	—
ZGMn13TiRE	0.9~1.3	11~14	0.3~0.8	0.1	0.05	0.1~0.3	0.2

注：高锰钢中钛 ω (Ti) =0.1%时，综合力学性能最好，尤其韧性最高。

2. 钒钛微量化高锰铸钢
含钒钛高锰钢的化学成分如表 1-21。

表 1-21 ZGMn13VTi 和 ZGMn13VTiRE 化学成分 (ω,%)

钢 号	C	Mn	Si	P≤	S≤	微量元素 (ω,%)		
						V	Ti	RE
ZGMn13VTi	0.9~1.3	11~14	0.3~0.8	0.1	0.05	微量 (0.2~0.3)	微量 (0.05~0.1)	—
ZGMn13VTiRE	0.9~1.3	11~14	0.3~0.8	0.1	0.05	微量	微量	0.2
ZGMn13VTiRE (实例)	1.1~1.25	11~13	0.47	0.04	0.021	0.4	0.18	0.015 (加入 0.5)

3. 钼钒钛微量化高锰铸钢
ZGMn13MoVTi 钢，经 600℃保温 6h，再加热至 1 000℃固溶处理后，用于“4m³ 电铲铲齿”的寿命提高 70%~170%。其化学成分如表 1-22。

表 1-22 ZGMn13MoVTi 钢化学成分 (ω,%)

元素	C	Mn	Si	P	S	加入量			状态
						Mo	V	Ti	
含量	0.9~1.3	11~14	0.3~0.8	≤0.1	≤0.05	0.7~0.8	0.3~0.4	0.2~0.4	固溶处理

4. 硼微量化低铜高锰铸钢
用于破碎机和大型球磨机衬板等耐磨件，其耐磨性比 ZGMn13 钢提高 50%。其化学成分如表 1-23。

表 1-23 多元微量化含铜钼高锰钢化学成分 (ω,%)

元素	C	Mn	Si	P	S	Cu	Mo	B	V	Nb	W	N
含量	0.9~1.3	11~14	0.3~0.8	≤0.1	≤0.05	1.0~3.5	<0.6	0.01~0.03	微量	微量	微量	微量

5. 稀土高锰铸钢和稀土钒钛高锰铸钢（化学成分见表 1-24，力学性能见表 1-25）

表 1-24 稀土高锰钢和稀土钒钛高锰钢化学成分 ($\omega, \%$)

钢 号	C	Mn	Si	S	P	RE	V, Ti
ZGMn13RE	0.90 ~ 1.30	11 ~ 14	0.30 ~ 0.80	≤ 0.05	≤ 0.10	加入稀土硅铁 0.1 ~ 0.3	—
13.5m ³ 电铲斗齿	1.1 ~ 1.25	11 ~ 13	0.46	0.008	0.051	0.014	—
ZGMn13REVTi	1.1 ~ 1.25	11 ~ 13	0.47	0.021	0.04	0.015 (加入量 0.5)	V 0.4 Ti 0.18
进口斗齿	0.92						

表 1-25 稀土高锰钢力学性能

钢 号	状 态	$\sigma_b / N \cdot mm^{-2}$	$a_k / J \cdot cm^{-2}$	HB	应用举例
ZGMn13RE	常规处理	813	211	213	锤头铲齿齿板衬板等
ZGMn13REVTi	弥散强化处理 40h	725	166	260	2100BL 型 13.5m ³ 电铲斗齿
进口斗齿		715	219		2100BL 型 13.5m ³ 电铲斗齿

有资料：对 2100BL 型 13.5m³ 电铲斗齿，每磨损单位重量金属材料能挖掘矿石量是进口产齿为 1，ZGMn13RE 钢为 1.48，ZGMn13REVTi 钢为 1.07。又有资料：用 ZGMn13RE 钢制作的破碎机锤头，耐磨性比 ZGMn13 提高 16.1%；用作铲齿，提高 10.6% ~ 16%；用作颚式破碎机齿板，提高 20% ~ 30%，而且韧性好，抗冲击，不掉牙，不断裂，且磨损均匀；用作球磨机衬板可提高 25%。

1.1.1.5 低碳高锰钢

普通高锰钢 ZGMn13，通常碳含量在 0.90% ~ 1.30%，Mn/C 比为 8 ~ 10，若将 ZGMn13 的含碳量改为 0.30% ~ 0.90%，锰含量不变，适当加入合金元素 Ni，Mo 等，以保证力学性能，形成低碳高锰钢。低碳高锰钢的化学成分，参考表 1-26。

表 1-26 低碳高锰钢化学成分 ($\omega, \%$)

元素	C	Mn	Si	P	S	Ni	Mo
含量	0.30 ~ 0.90	11 ~ 14	0.30 ~ 0.80	≤ 0.10	≤ 0.05	适量	适量

由于碳低锰高，铸态下无碳化物，铸态冲击值也较高，可以生产形状复杂的铸件。同时这种低碳高锰钢的耐热性能也较好，适用于有一定温度的场合。这种方法，是利用改变锰碳比，降低高锰钢奥氏体的稳定性，提高耐磨性。

1.1.1.2 超高锰铸钢

采用 Mn13 系列耐磨高锰钢制造厚大断面铸件，存在着 3 个问题：①水韧处理后，其内部常常出现碳化物而使韧度下降；②低温条件下使用，常出现脆断现象；③耐磨性尚不足，屈服强度较低。超高锰钢在一定程度上解决了上述的问题。超高锰钢加工硬化能力优于 ZGMn13。超高锰钢包括 ZGMn17，ZGMn17Cr2，ZGMn18，ZGMn25 等。

1.1.1.2.1 超高锰钢的化学成分

超高锰钢的化学成分如表 1-27。