

汽车用微合金高强高韧铸钢材料研究与应用

■ 柳建国, 张战场, 袁吉敏

摘要: 随着汽车轻量化要求提高, 根据汽车用铸钢材料的性能要求, 结合铸造企业生产成本控制等实际因素, 利用现有较丰富的低碳废钢和45钢等废钢资源, 在尽量不添加或少添加贵金属的前提下, 通过成分设计、材料强韧化机理的运用和必要的常规热处理工艺, 使得强度和韧性协调提升, 最终以较低成本开发出具有高强度和高韧性的铸钢材料。

关键词: 高强高韧; 铸钢; 化学成分; 热处理; 性能

当前, 汽车轻量化正逐步深入。钢因其所具有的优异特性、经济性、可再循环利用等特点, 在汽车轻量化的进程中发挥了十分重要的作用, 但对高强度、高伸长率材料的综合性能要求也越来越高。本文在分析钢中元素对性能影响的基础上, 利用现有废钢资源, 通过化学成分优化设计, 充分利用微合金对材料强韧化机理, 通过常规热处理工艺对性能改善, 试验表明, 在不添加Ni、Mo、Nb等贵重金属的前提下, 通过调整C、Si、Mn、Cr含量, 达成了铸钢材料强度与韧性之间的协调提升。

一、试验方案

1. 化学成分、热处理及目标性能设计

铬锰硅系钢材储量丰富、价格低廉、使用广泛, 这也是研究与推广应用的基础。

锰既可以溶于铁素体, 对铁

素体固溶强化, 也可以形成渗碳体。锰是扩大奥氏体区的元素, 降低共析温度, 并降低共析点含碳量, 因此有助于细化珠光体并增加珠光体比例, 提高钢的强度和硬度。同时, 还能细化铁素体, 抑制碳化物在过冷奥氏体晶界的析出, 可以提高钢的塑性。

硅对铁素体有很强的固溶强化作用, 其作用优于锰; 但由于会减少铁素体的有效滑移系, 因此会降低塑性, 但 $w_{Si} < 1\%$ 时塑性几乎不降低。硅可以提高淬透性, 在与其他合金综合使用时该作用更大; 硅还可以提高钢的耐回火性, 使脆性温度区间上移。此外, 硅的存在有利于脱氧。

w_{Cr} 在2%以下时既可以完全固溶于铁素体, 提高其强度, 而不降低其塑性, 也可以形成多种碳化物, 起到沉淀强化作用。铬

溶于奥氏体中时, 也是较强的提高淬透性的元素。因此, 铬能够提高钢在热处理状态下的强度和硬度。少量的铬还能够提高钢的塑性。不利的是, 铬也促进回火脆性。

碳是对钢实现固溶强化及第二相强化的元素, 在淬火态固溶强化效果达到极限。但碳量的提高会降低塑性。

P、S会严重影响钢的塑韧性, 因此在本项目开发中希望P、S含量尽可能低。

综上所述, 为了达到所要求的性能指标, 设计的化学成分见表1。

2. 热处理工艺设计

分别进行正火、淬火及回火处理, 测量正火性能和淬火+回火性能。

表1 高强高韧铸钢设计成分 (质量分数) (%)

C	Si	Mn	P	S	Cr
0.22~0.35	0.4~1.0	0.8~1.8	≤0.030	≤0.025	0.4~1.0

回火分别在200~620℃之间的10个温度上进行，见表2（按照国标要求每种试样均有3块，结论均为平均值）。

3. 材料目标性能设计

正火态：实现屈服强度、抗拉强度、伸长率分别≥370MPa、≥650MPa、≥15%。

淬火+回火态：实现屈服强度、抗拉强度、伸长率分别≥700MPa、≥1000MPa、≥10%。

二、试验结果与分析

1. 材料化学成分试验

(1) 正交试验方案 通过选定C、Mn两个强化元素的不同含量，同时考虑熔炼对化学成分精度的控制能力，设计了12个不同的搭配。热处理工艺仍按照采用淬火+560℃回火，热处理后进行拉伸试验，取3根试样的平均值。

(2) 试验结果 按设计方案，试验数据见表3、图1、图2。

(3) 化学成分的确定 根据测试结果，结合生产的原材料及生产实际，进一步微调C、Mn含量，调整化学成分，见表4。

2. 热处理工艺试验

按照热处理工艺设计，其试验数据见表5、表6。

淬火+回火拉伸性能随温度变化曲线见图3。

3. 冲击韧度试验

将冲击性能试验由U型缺口改为V型缺口，以观察材料的缺口敏感性，以及材料性能的重现性和稳定性。

从前面分析可知，在500℃

和560℃回火，可得到性能测试结果见表7。从表7可看出，在560℃回火可稳定地重复实现1000MPa-10%的性能指标。

表2 回火温度

编号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
回火温度/℃	200	250	350	380	410	440	470	500	560	620

表3 试验力学性能数据

序号	C含量 (%)	Mn含量 (%)	R _{p0.2} /MPa	R _m /MPa	A(%)	A _{KV} /J	HBW
1	0.20~0.23	1.0~1.2	726.3	856.6	19.0	87.0	242
2	0.20~0.23	1.2~1.5	730.2	882.3	16.3	85.6	251
3	0.20~0.23	1.5~1.8	730.7	905.6	17.2	85.8	262
4	0.23~0.27	1.0~1.2	762.3	940.3	16.5	82.6	236
5	0.23~0.27	1.2~1.5	782.4	926.4	15.0	81.7	260
6	0.23~0.27	1.5~1.8	826.2	960.6	14.5	72.3	262
7	0.27~0.31	1.0~1.2	856.2	946.6	15.4	76.4	268
8	0.27~0.31	1.2~1.5	860.7	1030.2	12.7	68.2	273
9	0.27~0.31	1.5~1.8	902.5	1100.3	11.2	69.0	283
10	0.31~0.35	1.0~1.2	920.2	1085.6	9.6	58.6	319
11	0.31~0.35	1.2~1.5	930.6	1170	8.4	52.4	342
12	0.31~0.35	1.5~1.8	1020.6	1300.4	7.0	43.3	347

注：1. 同样的热处理规范，560℃回火。
2. 均为3根试样的平均值。

表4 高强高韧铸钢化学成分（质量分数） (%)

C	Si	Mn	P	S	Cr
0.26~0.33	0.5~0.9	1.0~1.5	≤0.035	≤0.035	0.5~0.8

表5 高强高韧铸钢正火力学性能试验数据

试样编号	R _{p0.2} /MPa	R _m /MPa	A (%)	HBW
1	465	770	21	194
2	475	740	19.5	187
3	430	725	20.5	182
4	460	780	18	189
5	480	765	17.5	197

表6 高强高韧铸钢淬火+回火力学性能试验数据

试样编号	回火温度/℃	R _{p0.2} /MPa	R _m /MPa	A (%)	A _{KU} /J	HBW
1	200	1356.99	1765.23	4.66	20.57	481.7
2	250	1320.58	1562.26	5.40	41.22	447.0
3	350	1336.17	1527.07	6.03	16.79	429.0
4	380	1238.36	1379.80	6.95	19.17	418.0
5	410	1219.16	1302.42	7.68	32.42	407.3
6	440	1128.53	1215.40	8.29	46.92	369.3
7	470	1097.15	1167.87	8.66	47.36	339.0
8	500	1078.69	1164.15	10.10	55.14	307.3
9	560	984.75	1045.39	12.10	72.18	283.0
10	620	908.70	986.17	14.88	74.27	261.7

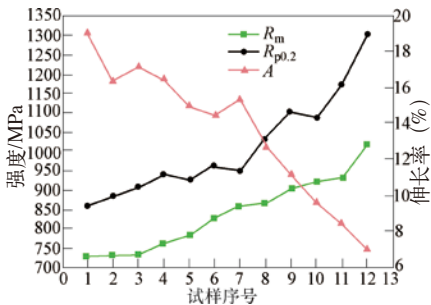


图1 试棒强度与伸长率曲线

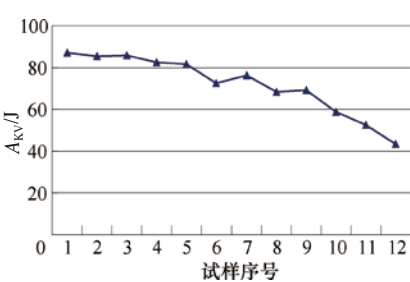


图2 试棒冲击性能曲线

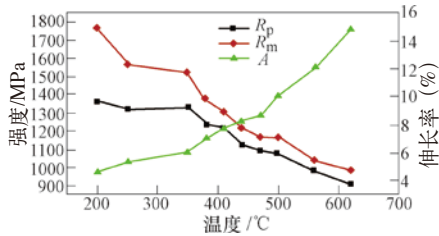
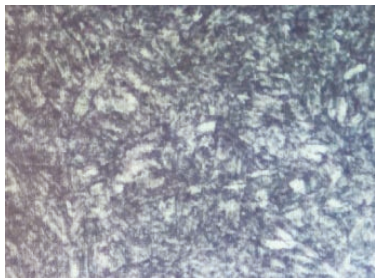
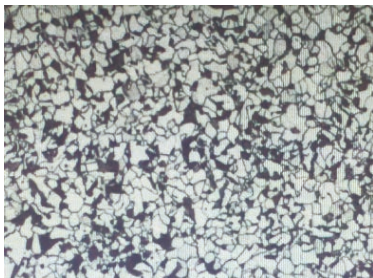


图3 拉伸性能与回火温度的关系



(a) 正火金相组织 (100×)



(b) 正火+调质金相组织 (500×)

图4 金相显微组织

表7 560℃回火力学性能试验数据

试样编号	$R_{p0.2}/\text{MPa}$	R_m/MPa	$A (\%)$	A_{KV}/J	HBW
1	1085	1175	11.5	59	324
2	1035	1135	12	58	318
3	1050	1140	11.5	61	288
4	1095	1190	13.5	67	297
5	1100	1185	14	52	292
6	1095	1190	12.5	52	313
7	1110	1120	12	56	302
8	1120	1160	14	58	297
9	1080	1160	12	58	286
10	1070	1155	13.5	61	283

表8 高强高韧铸钢力学性能

内控标准	最小值				硬度HBW
	屈服强度 $R_{p0.2}$ /MPa	抗拉强度 R_m /MPa	伸长率 A (%)	断面收缩率 Z (%)	
ZGD410-700	410	700	16	35	170~217
ZGD650-830	650	830	11	25	230~289
ZGD840-1030	840	1030	10	20	280~347

表9 金相组织

内控标准	热处理规范	金相组织	组织级别/级
ZGD410-700	正火或正火+回火	铁素体+珠光体	1~3
ZGD650-830	正火+调质	回火索氏体	1~4
ZGD840-1030	正火+调质	具有马氏体位向的回火索氏体	1~4

三、结语

通过化学成分优化设计、充分利用微合金对材料强韧化机理，通过常规热处理工艺对性能提升，试验表明，在不添加Ni、Mo、Nb等贵重金属的前提下，通过调整C、Si、Mn、Cr含量，可以实现低成本铸钢材料强度与韧性的协调提升，满足汽车零部件轻量化需求。

通过深入的研究，采用不同的热处理工艺，经过多轮的系列稳定性试验，形成了该材料的一系列性能指标，参照GB/T14408，形成企业内控材料标准见表8，金相组织见图4，表9。

参考文献

- [1] 崔忠圻，覃耀春．金属学与热处理[M]．北京：机械工业出版社，2011．
- [2] 廖鸣，等．高强韧性铸钢的研制[J]．矿山机械，1996（5）：18-21．
- [3] 姚贵升，景立媛．汽车用钢应用技术[M]．北京：机械工业出版社，2008．

作者简介：柳建国，东风精密铸造有限公司，高级工程师，主要从事铸造技术、金属材料及节能减排研究工作。张战场、袁吉敏，东风精密铸造有限公司。

MW 20170626