

# ZG22CrMnMo高强度铸钢的研究

孙方策

## 摘 要

本文研究合金元素和杂质含量对 ZG22CrMnMo 铸钢性能的影响, 钢的组织、性能与热处理工艺的关系, 以及钢的氢脆敏感性、塑性系数、断裂韧性和裂纹扩展速率等性能。

## 前 言

ZG22CrMnMo 低合金高强度铸钢具有与 30CrMnSiA 锻钢相当的力学性能, 又有优良的铸造、热处理和焊接工艺性能。从 1970 年起就开始用这种钢的精铸件制造飞机上的重要受力构件, 如前起落架轮叉和旋转臂、应急电机支架、平尾助力器摇臂以及减速板支臂等。十多年来的生产实践和使用情况表明, 该钢精铸件质量稳定, 性能可靠, 寿命也不亚于锻件。

1978 年《航空材料》第 4 期上《ZG22CrMnMo 铸钢及精铸前起落架》一文曾介绍该铸钢的成分、工艺和全面性能。本文研究合金元素和杂质含量对该铸钢性能的影响, 钢的组织、性能与热处理工艺的关系, 以及钢的氢脆敏感性、塑性系数、断裂韧性和裂纹扩展速率等性能。

## 一、合金元素和杂质含量对钢性能的影响

为了使铸钢具有与锻钢相当的强韧性, 我们取 GS22CrMo54 铸钢<sup>[1]</sup> 和 GC 11 锻钢<sup>[2]</sup> 成分之长处, 设计了 ZG22CrMnMo 铸钢。考虑到铸造工艺性和裂纹倾向性, 该钢不加镍, 碳量接近包晶点碳量, 硅量低于 0.45%。为了使钢具有足够高的淬透性, 钢中加有适量的铬、锰和钼。在碱性中频感应炉内熔炼和 900℃ 油淬 520℃ 回火的条件下, 合金元素对钢性能的影响示于表 1。

表中数据显示, 碳、铬和钼含量对钢的性

能有显著影响, 含量低时强度低而韧塑性高, 含量高时强度高而韧塑性低。锰对钢的性能影响较小。因此, 为了使铸钢具有最好的强韧性, 应将碳、铬和钼量控制在中限, 锰量控制在中上限。

当合金元素含量在中限时, 硫磷杂质对钢性能的影响示于表 2。钢中硫主要与锰形成硫化物夹杂, 降低钢的韧塑性。铸钢的室温和低

表1 合金元素对铸钢性能的影响

试验元素	化学成分, %					$\sigma_b$	$\delta$	$\psi$	$a_k$
	C	Mn	Cr	Mo	Si	MPa	%	%	J/cm <sup>2</sup>
碳	0.18	0.89	1.20	0.59	0.17	1197	14.5	52.4	62.8
	0.20	0.86	1.30	0.58	0.18	1229	14.0	47.8	76.1
	0.22	0.92	1.32	0.60	0.25	1262	12.2	46.6	73.5
	0.24	0.94	1.20	0.56	0.31	1298	12.1	41.9	51.4
	0.26	1.02	1.18	0.58	0.18	1335	11.6	41.2	36.7
锰	0.20	0.68	1.20	0.58	0.21	1221	13.9	51.1	74.9
	0.20	0.86	1.30	0.58	0.18	1229	14.0	47.8	76.1
	0.21	1.00	1.29	0.59	0.23	1232	12.7	48.1	72.0
铬	0.21	0.71	1.00	0.54	0.11	1187	14.7	52.3	87.1
	0.20	0.68	1.20	0.59	0.21	1221	13.9	51.1	74.9
	0.20	0.86	1.30	0.56	0.18	1229	14.0	47.8	76.1
钼	0.21	0.83	1.15	0.53	0.18	1251	13.7	48.3	65.2
	0.21	0.91	1.32	0.60	0.20	1271	13.1	48.6	67.1
	0.21	0.89	1.16	0.75	0.18	1287	11.7	50.3	72.0

温韧塑性随硫含量的提高而显著下降。磷可溶于铁素体, 增加钢的脆性, 尤其是低温脆性。随磷含量的提高, 铸钢的低温韧性明显下降。

表2 硫磷杂质含量对铸钢性能的影响

试验 元素	S %	P %	室温性能				-60°C低温性能			
			$\sigma_b$ MPa	$\delta$ %	$\psi$ %	$a_k$ J/cm <sup>2</sup>	$\sigma_b$ MPa	$\delta$ %	$\psi$ %	$a_k$ J/cm <sup>2</sup>
硫	0.003	0.019	1211	13.5	51.5	105.9	1288	14.2	49.2	46.7
	0.023	0.017	1189	13.1	49.2	61.7	1249	13.1	42.7	34.3
	0.030	0.021	1202	10.6	31.1	35.3	1264	11.7	32.9	20.8
磷	0.003	0.013	1233	15.0	49.2	92.1	1312	13.9	46.2	46.8
	0.002	0.018	1231	12.0	46.5	71.5	1315	13.2	43.0	47.3
	0.003	0.027	1230	13.8	47.6	61.7	1304	13.5	42.3	29.8

## 二、钢的组织、性能与

## 热处理工艺的关系

用金相法测定的ZG22CrMnMo钢等温转变曲线示于图1。由图可见，该钢过冷奥氏体转变的孕育期较长。用不同直径的试棒进行淬火回火并加工成拉伸试样，测定了铸钢和锻钢的淬透性，结果列于表3。数据表明，该铸钢的实际淬透性与30CrMnSiA锻钢相当。油淬时直径25mm的圆棒可以淬透，水淬时直径50mm的圆棒可以淬透，达到1177MPa的强度要求。

从梅花棒上取样测定的ZG22CrMnMo钢

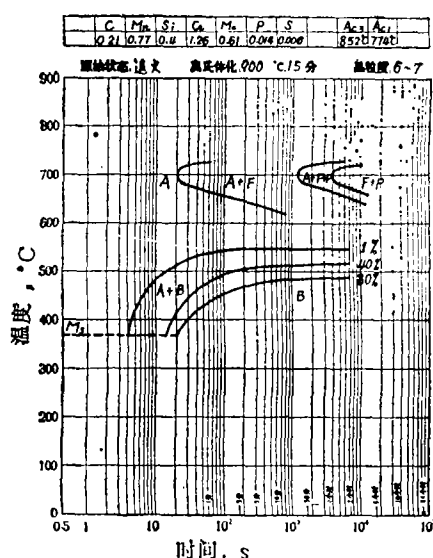


图1 ZG22CrMnMo钢的等温转变曲线

表3 ZG22CrMnMo铸钢和30CrMnSiA锻钢的淬透性

钢 号	热处理	直径 mm	油淬性能			水淬性能		
			$\sigma_b$ MPa	$\delta$ %	$\psi$ %	$\sigma_b$ MPa	$\delta$ %	$\psi$ %
ZG22CrMnMo	900°C淬火	25	1198	11.3	43.2	1218	12.4	39.2
	520°C回火	50	1031	11.3	40.9	1229	12.2	41.6
30CrMnSiA	900°C淬火	25	1250	13.6	43.9	1237	12.6	48.5
	490°C回火	50	1093	14.9	51.2	1168	14.9	51.3

铸态、退火、正火、淬火、回火和等温淬火状态的性能列于表 4 ,其中正火、淬火、回火和等温淬火状态的组织示于图 2 至图 5 。在同一强度水平下比较,该钢回火索氏体组织的韧性高于正火贝氏体组织的韧性。因此,对于强度要求为1079 MPa和1177 MPa 的铸钢件,建议用油淬高温回火工艺。至于强度要求为1275 MPa 的铸钢件,则建议用贝氏体等温处理工艺。该钢油淬低温回火和低温等温淬火状态的组织均为回火马氏体,其强度和韧性也基本相同。

表 4 不同状态下铸钢的性能

热 处 理	$\sigma_b$ MPa	$\delta$ %	$\psi$ %	$a_k$ J/cm <sup>2</sup>
铸 态	954	8.1	13.5	27.1
900°C退火	592	25.9	55.2	92.3
900°C正火	1128	14.6	37.8	47.1
900°C正火350°C回火	1082	11.9	46.7	35.2
900°C油淬	1587	10.1	33.3	66.3
900°C油淬 230°C回火	1560	11.1	38.1	68.0
900°C油淬 520°C回火	1238	12.8	44.6	62.5
900°C油淬 550°C回火	1159	12.8	49.4	88.3
900°C加热200°C等温淬火230°C回火	1559	11.0	40.9	68.9
900°C 加热360°C等温淬火	1307	10.4	49.5	58.1

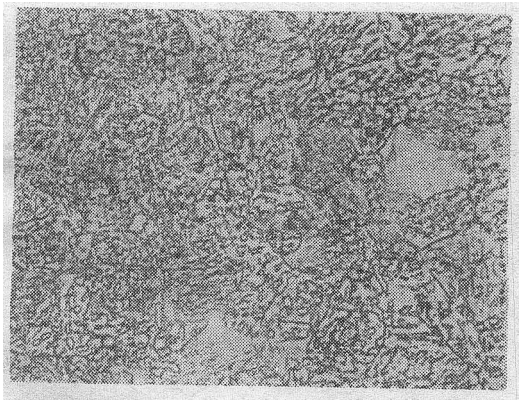
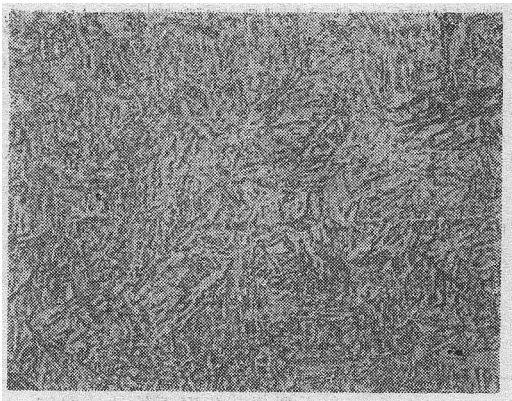
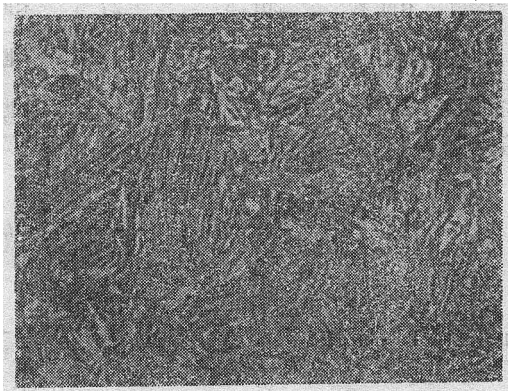


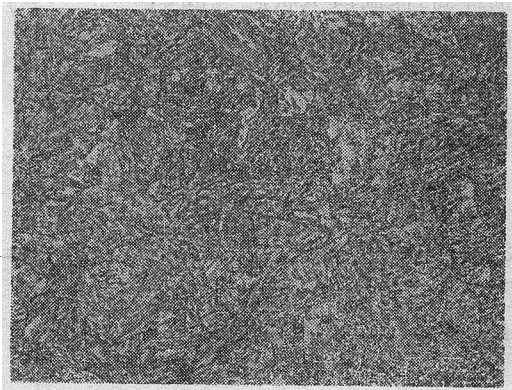
图 2 正火状态组织



500×  
图 3 900°C加热360°C等温淬火状态组织



500×  
图 4 900°C油淬230°C回火状态组织



500×  
图 5 900°C油淬520°C回火状态组织

### 三、钢的氢脆敏感性

用900°C油淬530°C回火状态的延迟破坏试

样测定的ZG22CrMnMo钢镀铬和镀锌氢脆敏感性分别列于表5和表6。数据表明,这种高强度铸钢经一次或四次镀铬除氢后无氢脆,一次镀锌除氢后也无氢脆,但是经多次镀锌除氢后有些试样有氢脆。因此,需要镀锌的钢铸件应尽可能避免多次镀锌。若需重复镀锌则应在退去锌层后进行除氢处理,然后再重复镀锌除氢。

表5 ZG22CrMnMo钢表面镀铬的延迟破坏性能

表面处理	在下列载荷作用下的持续时间,小时	
	先加75% $\sigma_{bn}$ *	后加85% $\sigma_{bn}$ *
一次镀铬未除氢	201.5	27.5 未断
一次镀铬除氢	201.5	27.5 未断
四次镀铬四次除氢	201.5	27.5 未断

\*带缺口的延迟破坏试样未电镀时的抗拉强度

$$\sigma_{bn}=1991\text{MPa.}$$

#### 四、钢的应力应变图与塑性系数

布里格斯认为,塑性大于5%的材料为塑性材料<sup>3</sup>。按此观点,ZG22CrMnMo铸钢属于塑性材料。为了确定钢的塑性系数,曾在相同条件下分别测定了该铸钢油淬高、低温回火状态和30CrMnSiA锻钢油淬高温回火状态的应力应变图。图6示出这二种钢高温回火状态的应力应变图和 $\sigma$ -MY/I关系曲线。当几何塑性系数K为1.2、1.4、1.5、1.6、1.7、1.8和2.0时,按铸钢和锻钢应力应变曲线求得的相应物理几何塑性系数值列于表7。数据表明,在

图6 铸钢和锻钢的应力应变图

和 $\sigma$ -MY/I曲线

a. ZG22CrMnMo

b. 30CrMnSiA

表6 ZG22CrMnMo钢表面镀锌的延迟破坏性能

表面处理	112厂*	320厂*	132厂*	621所*
	在75% $\sigma_{bn}$ **载荷作用下的持续时间,小时			
一次镀锌除氢	200 未断	200 未断	300 未断	213 未断
	200 未断	200 未断	300 未断	213 未断
	200 未断	200 未断	300 未断	159.4 断
二次镀锌二次除氢	2.7 断	223 未断	6 断	5.1 断
	27 断	223 未断	29 断	7.1 断
	27 停试	54.5 断	29 停试	213 未断
三次镀锌三次除氢	0.02 断	279 未断	0.04 断	214 未断
	0.02 断	279 未断	0.04 断	214 未断
	0.02 断	279 未断	0.04 断	214 未断
四次镀锌四次除氢	0.02 断	3.7 断	0.04 断	214 未断
	0.02 断	14.1 断	0.04 断	214 未断
	0.02 断	14.1 停试	0.04 断	214 未断

\*在112厂、320厂和132厂带镀锌层除氢,退锌后重复镀锌;在621所先退锌后除氢,再重复镀锌。

\*\*未电镀的缺口试样抗拉强度 $\sigma_{bn}=2010\text{MPa}$ 。

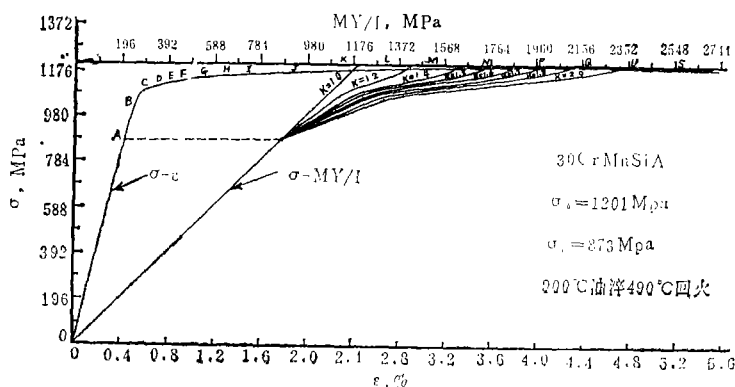
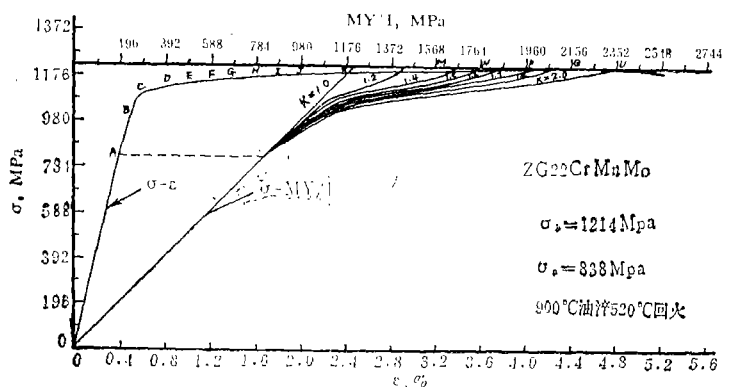


表 7 铸钢和锻钢的塑性系数

钢 号	热 处 理	不同K值的物理几何塑性系数							
		1.0	1.2	1.4	1.5	1.6	1.7	1.8	2.0
ZG22CrMnMo	900°C油淬230°C回火	1.00	1.17	1.35	1.44	1.52	1.61	1.70	1.88
	900°C油淬520°C回火	1.00	1.18	1.37	1.47	1.56	1.65	1.75	1.94
30CrMnSiA	900°C油淬490°C回火	1.10	1.19	1.38	1.47	1.57	1.66	1.76	1.95

同一强度水平下ZG22CrMnMo铸钢具有与30CrMnSiA锻钢相当的塑性系数,即使在1471MPa强度水平下也有良好的塑性系数。因此,这种钢的铸件可按塑性材料的规范计算弯曲强度。

## 五、钢的断裂韧性和裂纹扩展速率

从大型梅花铸锭和厚钢板上切取三点弯曲试样,测定了这种铸钢和30CrMnSiA锻钢的断裂韧性,结果列于表8。从铸锭上切取的紧凑拉伸试样,经900°C油淬530°C回火,在每分钟交变800次的980~9800N脉冲载荷作用下,测定了ZG22CrMnMo钢的裂纹扩展速率 $da/dN$ ,如图7所示。结果表明,这种高强度铸钢具有优良的断裂韧性和缓慢的裂纹扩展速率。

表 8 铸钢和锻钢的断裂韧性

钢 号	热 处 理	$K_{Ic}$ MN/m <sup>3/2</sup>
ZG22CrMnMo	900°C油淬230°C回火	98.3
	900°C油淬520°C回火	138.3
30CrMnSiA	900°C油淬260°C回火	66.7
	900°C油淬490°C回火	147.6

## 结 论

1 为了使这种铸钢具有最好的强韧性,应将碳、铬和钼含量控制在中限,锰量控制在中上限。

2.降低钢中硫磷杂质含量是提高铸钢韧塑性的十分有效途径。

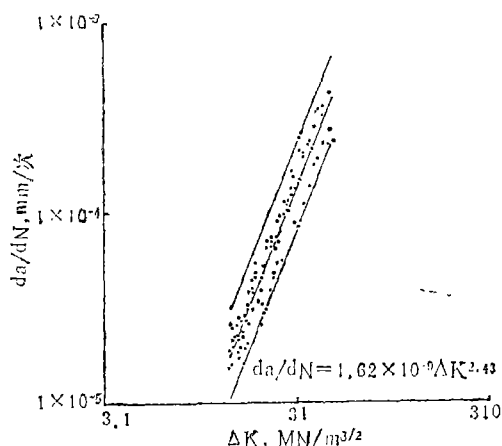


图 7 ZG22CrMnMo钢的裂纹扩展速率

3 需要镀锌的高强度铸钢件应尽可能避免多次镀锌,若需重复镀锌时则应在退去锌层后进行除氢,然后再重复镀锌除氢。

4 在同一强度水平下,ZG22CrMnMo铸钢具有与30CrMnSiA锻钢相当的塑性系数,可按塑性材料的规范计算铸件的弯曲强度。

5.这种高强度铸钢具有优良的断裂韧性和缓慢的裂纹扩展速率。

## 参 考 文 献

- [1] 陈石卿,《国际航空》,1958年第5期,45页。
- [2] 可焊接高强度贝氏体钢(GC-11)-30CrMnSiA代用料的研究,六二一所内部资料。
- [3] Briggs,C.W.,Steel Castings Hand book 1970, 4th Ed.,244.