

拟因子设计法在断裂韧性研究中的应用

数学教研室 吕世意

金物教研室 褚武扬

摘 要

ZG-18铸钢是一种不含镍的铸造结构钢,用代替飞机上的某些受力模锻件。

虽然在同强度条件下铸钢的塑性、冲击韧性及疲劳强度比锻钢差,但其 K_{Ic} 和 $\frac{da}{dN}$ 却优于锻钢,所以从破损安全设计观点来考虑,用ZG-18铸钢代替锻钢作受力件是可行的。为了找到具有最佳断裂韧性的工艺条件,我们运用拟因子设计法研究了试验温度,热处理工艺以及硫含量等因素对 K_{Ic} 的影响。结果表明:

(1) ZG-18铸钢回火马氏体组织的 K_{Ic} 平均值是 $356\text{kg}\cdot\text{m m}^{-3/2}$,而上贝氏体组织的 K_{Ic} 平均值是 $247\text{kg}\cdot\text{m m}^{-3/2}$,相差将近45%。

(2) ZG-18铸钢最佳热处理工艺是低于 250°C 等温处理或油淬后低温($<300^\circ\text{C}$)回火,这样可获得马氏体组织,其断裂韧性最高,强度也较高,其它性能也不差。

(3) 无论是等温回火还是油淬回火,降低硫含量将使 K_{Ic} 提高,故应尽量降低材料的硫含量。

一、研究的目的和意义

金属材料以铸代锻在很多领域中已为人们广泛地应用。铸件较锻件具有加工量小,加工周期短,生产工艺简便,生产率高的特点,而ZG-18铸钢能否代替飞机上的某些受力模锻件用的40CrNiMoA锻钢,对于发展我国的航空工业,有着重大现实意义。

原用强度在 $140\text{kg}\cdot\text{m m}^{-2}$ 级别的40CrNiMoA锻件由于模锻生产率低,加工工艺复杂,故拟用强度级别相等的ZG-18铸钢来代替,主要矛盾是铸件组织不均匀现象较为突出,在等强度条件下铸钢的常规塑性($\delta\%$, $\psi\%$),冲击韧性(a_k)及疲劳强度要比锻钢差,但其 K_{Ic} 和 $\frac{da}{dN}$ 却优于锻钢,见表1。

由于常规塑性韧性差,往往成为阻碍使用铸钢的理由,但是具体问题要具体分析,铸钢的常规塑性韧性差,并不等于构件实际使用的安全性和寿命也差,对于承受交变载荷的襟翼滑轨来说,发生低应力(低于 σ_s)脆断的原因,是在构件内部或表面存在有临界尺寸的

表1

材料	热处理	性能						
		σ_t	σ_s	ψ	δ	a_k	K_{Ic}	$\frac{da}{dN}$
铸钢	900℃加热30分	147	123	39	11	5.5	283±16	$5.5 \times 10^{-11} (\Delta K)^{3.24}$
	350℃等温30分							
	370℃回火4时							
锻钢	850℃加热30分	116	105	57	16	11	243±30	$7.6 \times 10^{-11} (\Delta K)^{3.24}$
	260℃等温20分							
	450℃回火40分							

宏观缺陷（它可能是构件中原始存在的，但往往是由原来的微小缺陷经长时间交变负荷下作用形成的疲劳裂纹）。断裂力学的迅速发展，为定量处理构件的安全性和使用寿命提供了研究基础。从断裂力学观点来说，最主要的材料参数是断裂韧性 K_{Ic} 和裂纹发展速度 $\frac{da}{dN}$ ，材料的 K_{Ic} 愈高， $\frac{da}{dN}$ 愈小，则构件愈安全，寿命愈长，而 a_k ， δ ， ψ 等参数不那么重要，因此

对不同的材料来说，常规塑性韧性低并不等于 K_{Ic} 低， $\frac{da}{dN}$ 高，所以对 ZG-18 铸钢代替 40CrNiMoA 锻钢构件的安全性和使用寿命进行评价时，必须建立在断裂力学的基础上。

北京621所和我院断裂韧性组，做了大量试验和研究，ZG-18铸钢经350℃等温370℃回火处理后，其强度级别和40CrNiMoA锻钢相同，虽然ZG-18铸钢的常规塑性和冲击韧性不如40CrNiMoA锻钢，但反映裂纹抵抗断裂的韧性指标 K_{Ic} 值以及反映裂纹临界扩展速度的指标 $\frac{da}{dN}$ 却都比锻钢要好。见表1，因此从断裂力学观点来看，用ZG-18铸钢代替40CrNiMoA锻钢做构件是安全可行的。

综上所述，ZG-18铸钢的断裂力学参数（ K_{Ic} ， $\frac{da}{dN}$ ）优于40CrNiMoA锻钢，因此进一步研究提高ZG-18铸钢的断裂韧性 K_{Ic} 指标更有实际价值。为了进一步提高ZG-18铸钢断裂韧性指标，我们运用了拟因子设计法安排试验，研究了热处理，组织结构以及S、P含量等对ZG-18铸钢断裂韧性的影响。

二、试验过程及结果

试验用钢采用中频感应炉冶炼，用熔模精密铸造成梅花型试样（拉伸、冲击和 K_{Ic} 试样）经退火处理（900℃2小时，炉冷至400℃出炉）后加工成15×30×140毫米，25×50×220毫米，30×60×260毫米的 K_{Ic} 试样进行调质热处理（按实验方案安排热处理工艺），测量 K_{Ic} 用三点弯曲试样，经调质热处理后磨光，用钼丝切割缺口再预制疲劳裂纹然后进行测试，实验用钢化学成份如表2；

表 2

ZG-18铸钢化学成份

成份 炉号	C	Si	Mn	Cr	Mo	S	P
610	0.26	0.71	1.12	1.20	0.56	0.009	0.019
702	0.23	0.80	1.11	1.18	0.51	0.008	0.012
703	0.24	0.86	1.14	1.22	0.52	0.017	0.014
711	0.25	0.89	1.15	1.15	0.59	0.007	0.013
712	0.25	0.89	1.15	1.18	0.52	0.017	0.027
713	0.25	0.80	1.19	1.26	0.60	0.004	0.020

1. 应用拟因子设计法安排试验:

对不同炉号应用拟子设计法设计法研究 (i) 等温和油淬。 (ii) 是否增加正火工序。 (iii) 炉温波动三个因素对 ZG-18铸钢 K_{1c} , σ_b , a_k 等指标的影响, 这是一个三因素两个不同水平的试验。

正火因素用 A 表示, 取二个水平,

A₁: A₁, 1水平, 正火,
A₂: A₂, 2水平, 不正火

等温和油淬因素用 B 表示, 取二个水平,

B₁: B₁, 1水平, 等温 (350℃等温 + 370℃回火)
B₂: B₂, 2水平, 油淬 (油淬后470℃回火)

炉温因素用 C 表示, 取三个水平,

C₁: C₁, 1水平, 比正常温度低20℃,
C₂: C₂, 2水平, 正常温度,
C₃: C₃, 3水平, 比正常温度高20℃

安排在经过改造后的 $L_8(2^7)$ 正交表里进行试验; 试验方案以及试验结果计算如表 3, 方差分析及显著性检验分别见表 4 和表 5;

根据因子水平的改变引起的平均偏差平方和与误差的平均偏差平方和的比值称为 F 比,

即 $F = \frac{S_{因}/f_{因}}{S_{误}/f_{误}}$ 的原理, 综合上述表 3 的数据结果, 可得方差分析表 4;

表 4 与表 5 中的 * * 是表示高度显著, 所以方差分析和显著性检验结果表明:

(1) 在奥氏体化之前增加一道正火工序对断裂韧性 K_{1c} 值, a_k 以及 σ_b 均没有影响, 正火和 不正火的平均值基本上一样。

(2) 350℃等温370℃回火其强度和油淬470℃回火基本相同, 但其 K_{1c} 却有明显的差别, 方差分析表明这个因素对 K_{1c} 值的影响是高度显著。

(3) 等温时在 350℃附近炉温波动 $\pm 20^\circ\text{C}$, 油淬回火时在 470℃附近炉温波动 $\pm 20^\circ\text{C}$ 对断裂韧性影响不显著。

表 3

试验号	因素 列 水平 号	因素							试验结果		
		C			A	B			K_{Ic}	Cl_k	σ_b
		1	2	3	4	5	6	7			
1	111	1	1	1	1	1	1	1	284	5.4	149.4
2	221	1	1	1	2	2	2	2	367	4.2	143.3
3	112	1	2	2	1	1	2	2	274	4.6	144.4
4	222	1	2	2	2	2	1	1	346	4.2	140.4
5	122	2	1	2	1	2	1	2	367	4.0	137.8
6	212	2	1	2	2	1	2	1	280	4.1	147.6
7	123	2	2	1	1	2	2	1	379	4.2	137.6
8	213	2	2	1	2	1	1	2	319	5.5	136.7
I		1280	1298	1349	1304	1157	1316	1289			
II		1345	1318	1267	1312	1459	1300	1327			
II-I		65	20	-82	8	302	-16	38			
$S = \frac{(II-I)^2}{8}$		528.1	50	840	8	11400.5	32	180.5			

表 4

方差分析

方差来源	平方和	自由度	F 值	显著性
(总闲)	528.1	1	4.98	
A	8	1	0.079	
B	11400.5	1	107.5	**
C	890	2	4.24	
误差	212.5	2		

$$F_{0.01}(1,2) = 98.5$$

$$F_{0.05}(1,2) = 18.5$$

金相和电子显微镜观察表明, 350℃等温370℃回火后获得的上贝氏体组织, 而油淬470℃后回火却是回火马氏体组织, 其 K_{Ic} 值相差26%。另外用4个 K_{Ic} 试样(15×30×140毫米), 在200℃等温, 220℃回火, 获得回火马氏体组织, 其 K_Q (平均为363 $\text{kg}\cdot\text{mm}^{-3/2}$)和油淬回火的 K_Q 值几乎相同, 明显高于350℃等温370℃回火的 K_{Ic} 值。用大试样(25×50×220毫米, 30×60×260毫米)测出350℃等温370℃回火的 K_{Ic} 平均值为289 $\text{kg}\cdot\text{mm}^{-3/2}$, 而同一炉号200℃等温220℃回火其 K_{Ic} 值为388 $\text{kg}\cdot\text{mm}^{-3/2}$, 它们之间相差30%左右, 这也表明等温马氏体组织比上贝氏体组织 K_{Ic} 值要高, 通过这样的设计试验说明, 热处理工艺(等温回火与油淬回火)性能上的差异其原因是组织结构的不同。

表 5

性能平均值和工艺影响显著性

因素	水平	工艺条件	K_{Ic}		a_k		σ_b	
			平均值	显著性	平均值	显著性	平均值	显著性
A	1	正火(900℃ 30' 空冷)	326		4.6		142.3	
	2	不正火	328		4.5		141.8	
B	1	等温回火	289		4.9		144.5	
	2	油淬回火	364	**	4.2		139.8	
C	1	比正常温度低20℃	316		4.6		146.6	
	2	正常温度	319		4.2		142.6	
	3	比正常温度高20℃	342		5.0		137.0	

为了进一步研究组织结构, 回火脆性以及杂质含量对 K_{Ic} 值的影响, 我们采用部分追加设计进行试验(1)。

综合上述研究, 初步结论如下:

① ZG-18铸钢回火马氏体组织的 K_{Ic} 平均值是 $356 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3/2}$, 而上贝氏体组织的 K_{Ic} 平均值是 $247 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3/2}$, 相差将是45%左右。

② ZG-18铸钢最佳热处理工艺是低于250℃等温或油淬后小于300℃回火, 这样可获得马氏体组织, 其断裂韧性较高, 强度较高, 其它性能也不差, 如图1所示:

③ 对ZG-18铸钢, 调质前增加正火工序对强度, 韧性和断裂韧性均没有影响, 故可以取消正火工序。

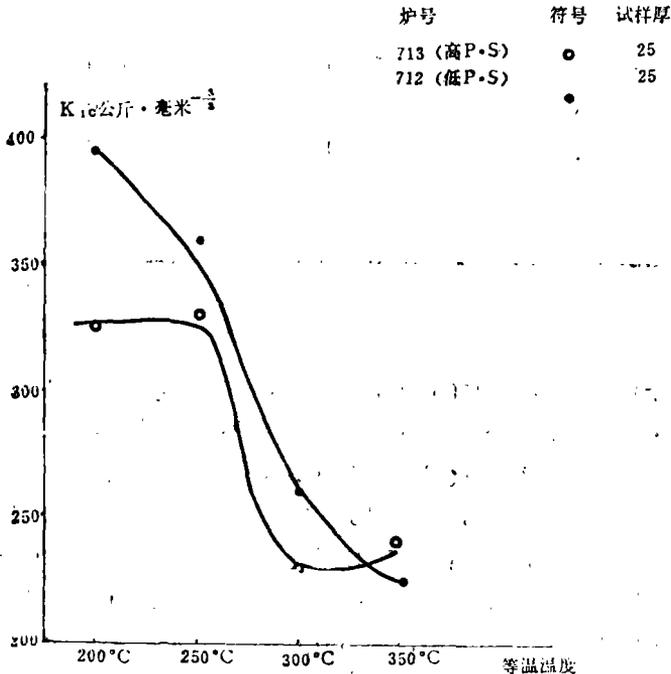


图 1

参 考 文 献

- (1) 中国科学院数学所数理统计组编 正交试验法 人民教育出版社 1975
- (2) 北京大学数学力学系概率统计组编 正交设计法 石油化学工业出版社 1975
- (3) 上海市科学技术交流站组编 正交试验设计法 上海人民出版社 1975
- (4) (日)增山元三郎著 试验设计法 刘璋温译 上海科学技术出版社 1962
- (5) H. B. 曼著 试验的分析与设计 张里千等译 科学出版社 1963