

# 球墨铸铁低温冲击韧性的改善

太原重型机器厂 骆晓纲\*

【提要】总结了研制保证低温缺口冲击韧性的球铁的主要内容及其应用。并从化学成分、合金元素、热处理和回火脆性等方面进行了探讨。

关键词：低温 缺口冲击韧性 球铁

德国标准中有两种在低温使用的球铁已纳入国际标准 ISO1083-1987，其中-20℃用的牌号亦被国际 GB1348-88 采用（见表 1）。这种球铁能保证在低温下具有良好的韧性，采用的缺口冲击试样与钢相同。我国球铁以前沿用无缺口试样，因而缺口冲击韧性数据较少。

表 1 常见牌号的耐低温球铁单铸试块性能

标准名称	牌号	$\sigma_b$ (N/mm <sup>2</sup> ) (最小值)	$\sigma_{0.2}$ (N/mm <sup>2</sup> ) (最小值)	$\delta_5$ (%) (最小值)	冲击功 (Av) 或冲击值 ( $\alpha_k$ ) (最小值)				
					试验温度 (℃)	Av (J)		$\alpha_k$ (J/cm <sup>2</sup> )	
						三个试样 平均值	个别值	三个试样 平均值	个别值
DIN1693 (1973.10. 版)	GGG-35.3	350	220	22	-40±2	14	11	(20)	(15.71)
	GCG-40.3	400	250	18	-20±2	14	11	(20)	(15.71)
ISO1083 —1987	350-22L	350	220	22	-40±2	12	9	(15)	(11.25)
	400-18L	400	250	18	-20±2	12	9	(15)	(11.25)
GB1348-88	QT400-18L	400	250	18	-20±2	(9.6)	(7.2)	12	9

注：①DIN 标准采用 DVM 试样（U 型缺口，槽深 3mm）；其余标准均采用 ISO-V 试样（V 型缺口，槽深 2mm）；

②括号中的数字系笔者为便于比较而换算的。

为生产此类球铁，德国采用含硅、锰、硫、磷和干扰元素极低的特种生铁；日本则进行 40~120h 的高温退火；美国有采用高纯生铁并加入钴合金铸态生产的报道；前苏联则采用复杂的热处理工艺。

为了满足起重机械的使用要求，我们立足

国有资源，研制了两种稀土镁耐低温球铁。

## 一、试验内容与结果

### 1. 普通铁素体球铁的冲击韧性

我厂冲天炉生产的铸态 QT400-15 单铸试

块的冲击试验结果如表 2 所示。

表 2 铸态 QT400-15 冲击试验结果

编号	含硅量 (%)	冲击值 $\alpha_k$ (三个试样的平均值) (J/cm <sup>2</sup> )							基体中铁素体 量 (%)
		常温	0℃	-20℃	-30℃	-40℃	-50℃	-60℃	
1.1	2.40	85.84	75.05	71.61	66.22	51.01	39.24	29.92	60~70
1.2	2.60	102.51	98.1	80.74	72.59	70.24	62.29	41.20	70~80
1.3	2.80	121.15	111.83	93.20	82.40	81.42	70.63	52.97	70~60
1.4	3.00	142.25	124.59	103.30	75.54	56.21	41.20	32.37	90~80
1.5	3.10	131.45	116.74	98.59	85.84	46.60	38.75	29.43	90~95
1.6	2.64	11.28	10.79	8.83	7.85	7.46	5.49	4.51	70~60

注：①其余化学成分 (%)：C 3.42~3.58, Mn 0.19~0.24, S 0.005~0.013, P 0.038~0.046, RE 0.030~0.047, Mg 0.036~0.058；

②除 1.6 采用 U 型缺口试样外，其余均采用无缺口试样。

\* 参加本工作的还有宋乃刚和刘德才等。1993 年 12 月 16 收到初稿，1994 年 4 月 29 日收到修改稿。

将铸态球铁进行低温铁素体化退火后，其基体组织全部成为铁素体，冲击值（尤其在0℃以下时）明显提高，试验结果见表3。

为提高球铁的低温韧性，缩短退火时间，进行了普通球铁的退火工艺对比试验，结果列于表4。

表3 低温退火球铁的冲击韧性

编号	化 学 成 分 (%)							$\alpha_k$ (平均值) (J/cm <sup>2</sup> )			冲击试样
	C	Si	Mn	P	S	RE	Mg	常温	-20℃	-40℃	
2.1	3.64	2.30	0.11	0.046	0.006	0.025	0.039	21.09	20.21	15.40	U形缺口
2.2	3.56	2.70	0.26	0.052	0.010	0.047	0.065	19.33	16.68	7.85	
2.3								121.64	115.27	86.33	无缺口

注：单铸T形试块；热处理规范：770℃保温4h，炉冷至600℃后出炉空冷。

表4 铁素体化退火工艺对比结果

试验编号	热处理工艺规范	力 学 性 能		ASTM 晶粒度	冲击值 对比
		$\alpha_k$ (-20℃) (J/cm <sup>2</sup> )	HB		
3.1	铸态	6.87	193	6	1.00
3.2	650℃保温4h，炉冷至600℃空冷	7.85	179	6~7	1.14
3.3	720℃保温2h，炉冷至600℃空冷	10.50	179	6~7	1.53
3.4	720℃保温2h，炉冷至室温	6.57	177	7	0.96
3.5	780℃保温1h，空冷；720℃保温2h，炉冷至600℃空冷	13.44	177	6~7	1.96
3.6	900℃保温1h，炉冷至720℃保温2h，炉冷至600℃空冷	17.66	175	7	2.57

注：①化学成分(%)：3.38C，2.88S，0.27Mn，0.006S，0.042P，0.038RE，0.059Mg；

②铸态性能： $\sigma_b$  485.6N/mm<sup>2</sup>， $\delta$  20%， $\alpha_k$  120.66J/cm<sup>2</sup>（无缺口试样）；③冲击试样为U型缺口试样。

## 2. 耐低温球铁的化学成分选择

余均为25mm厚Y形试块。试块经退火处理后，基体中铁素体量大于95%。试验结果见表5。

为确定耐低温球铁的化学成分范围，用感应电炉进行了试验。炉料为本溪Q12生铁和废钢，其中第1~4炉采用25mm厚T形试块，其

表5 耐低温球铁的化学成分试验结果

炉次	编号	化 学 成 分 (%)								力 学 性 能					冲击试样
		C	Si	Mn	P	S	RE	Mg	Ni	$\sigma_a$ (N/mm <sup>2</sup> )	$\sigma_b$ (N/mm <sup>2</sup> )	$\delta$ (%)	HB	$\alpha_k$ (-40℃) (J/cm <sup>2</sup> )	
1	4.1	3.70	2.49	<0.05	0.041	0.010	0.044	0.036	无	348.3	421.8	24.5	156	15.01	U 型缺口
2	4.2	3.58	2.28	<0.05	0.042	0.010	无	0.085	0.75	328.6	426.7	23.0	157	9.12	
3	4.3	3.53	2.59	<0.05	0.043	0.024	0.026	0.057	0.55	338.4	451.3	23.0	163	16.97	
4	4.4	3.52	1.48	0.41	0.009	0.026	0.052	0.056	无	—	—	—	128	14.72	
5	4.5	3.24	1.50	0.38	0.008	0.029	无	0.056	0.70	—	—	—	630	8.34	
6	4.6	3.20	1.50	1.33	0.022	0.024	0.029	0.057	0.60	—	—	—	129	15.70	
7	5.1	3.65	1.95	0.13	0.045	0.012	0.019	0.039	0.67	274.7	397.3	25.0	150	$\frac{23.25}{19.33}$	U 型缺口 V 型缺口
8	5.2	3.55	1.70	0.12	0.043	0.014	0.017	0.038	0.62	255.1	382.6	25.0	140	$\frac{21.88}{19.33}$	
9	5.3	3.44	1.86	0.14	0.009	0.011	0.010	0.054	0.75	260.0	382.6	25.0	140	$\frac{22.56}{19.91}$	
10	5.4	3.67	1.64	0.15	0.020	0.012	0.021	0.067	0.80	250.2	377.7	24.5	139	$\frac{21.29}{19.33}$	
11	6.1	3.47	1.54	0.15	0.047	0.014	0.020	0.067	1.65	235.4	363.0	23.0	146	18.44	
12	6.2	3.66	1.53	0.11	0.038	0.019	0.033	0.087	0.65	250.2	367.9	21.0	124	19.33	

## 二、试生产及应用

(1) 根据上述试验结果,对回转套和左机体等零件进行了试制,从Y<sub>1</sub>和Y<sub>2</sub>试块切取的试样退火后均达到所要求的性能,如表6所示。

表6 试制件的成分组织和性能

编号	化 学 成 分 (%)								金相组织		力 学 性 能						
	C	Mn	S	P	Si	RE	Mg	Ni	球化率 (%)	铁素体量 (%)	$\sigma_s$ (N/mm <sup>2</sup> )	$\sigma_b$ (N/mm <sup>2</sup> )	$\delta$ (%)	HB	$a_k$ (J/cm <sup>2</sup> )		
															-20℃	-40℃	
8.1	3.62	0.16	0.013	0.044	2.18	0.034	0.070	0.55	50~60	80~90	289.4	441.5	20.0	158	21.29	14.72	
8.2	3.28	0.14	0.022	0.037	1.82	0.026	0.052	0.59	70~80	100	279.6	397.3	23.5	143	22.56	19.62	
8.3	3.50	0.21	0.035	0.043	1.84	0.042	0.070	0.65	80~90	100	279.6	402.2	19.5	135	—	23.35	
8.4	3.93	0.32	0.023	0.049	2.20	0.024	0.069	无	80~90	100	264.9	387.5	25.0	140	—	23.05	
8.5	3.87	0.15	0.031	0.050	2.18	0.058	0.062	无	50~60	≈95	267.8	390.4	23.5	145	—	16.48	

注:①8.1、8.4、8.5在冲天炉熔炼,其余在工频炉熔炼。②8.1和8.2经低温退火,8.3、8.4、8.5经中温退火。

③铁素体晶粒度除8.4为ASTM7~8级外,其余均为5~6级;④除8.5采用V型缺口冲击试样外,其余均为U型缺口冲击试样。

表7 耐低温球铁冲击试验结果

试验编号	$a_k$ (平均值), (J/cm <sup>2</sup> )				冲击试样类型	基体中铁素体量 (%)	热处理规范
	0℃	-20℃	-40℃	-60℃			
9.1	23.54	22.86	16.38	9.12	U型缺口试样	100	700℃保温8h,炉冷至600℃后出炉空冷
9.2	102.32	100.75	91.53	84.37	无缺口试样		

表8 耐低温球铁的临界点的测定结果

编号	10.1	10.2	10.3	10.4	10.5
试样来源	5.4	5.2	8.2	5.3	5.1
临界点 (℃)	A <sub>1</sub>	783	785	789	792
	A <sub>2</sub>	816	815	827	821
含硅量 (%)	1.64	1.70	1.82	1.86	1.95
基体铁素体量 (%)	70~60	70~60	70~80	90~80	70~60

注:试样均为铸态。

(2) 大型履带起重机用回转套的材质为GGG-40.3 (QT400-18L),CC600型零件最大尺寸 $\varnothing 240 \times 397$ mm,铸件毛重130kg;CC1000型零件最大尺寸 $\varnothing 290 \times 441$ mm,毛重180kg。这两种铸件壁厚约80mm,加工后要求耐压42MPa。生产数据见试验号8.1~8.4。

用于我国寒冷地区,设计要求在-40℃具有良好韧性的100t门式起重机中有12种共20件减速机零件,材质为QT350-22L,主要壁厚10~16mm;其中尺寸最大的左机体,轮廓尺寸903×906×500mm,毛重340kg。生产数据见试验号8.5。

《铸造》1994.10

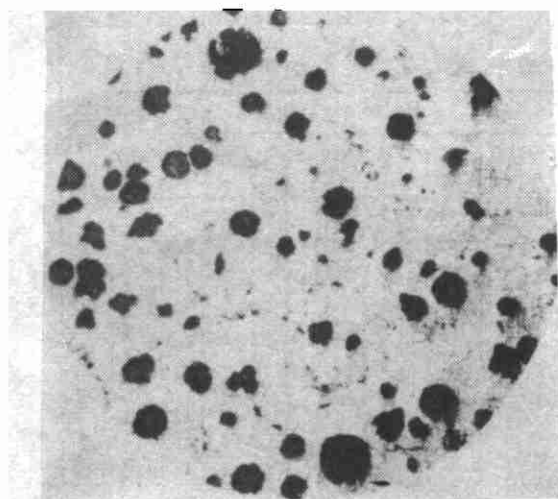


图 耐低温球铁退火后的金相组织 (100×)  
石墨球径:0.02~0.04mm 铁素体晶粒度:7~8级

采用德国 weiss 膨胀仪对试验号5.1~5.4和8.2的试样,测定临界点的结果示于表8。根据所测定的临界温度,将试验号8.2的Y<sub>1</sub>试块进行退火,工艺选择的结果见表9。

表9 耐低温球铁退火工艺选择试验结果

编号	热处理工艺规范	力学性能					金相组织	
		$\sigma_s$ (N/mm <sup>2</sup> )	$\sigma_b$ (N/mm <sup>2</sup> )	$\delta$ (%)	HB	-40℃ $\alpha_k$ (J/cm <sup>2</sup> )	铁素体量 (%)	晶粒度 (ASTM)
11.1	铸态	309.0	485.6	13.5	167	10.50	80~90	—
11.2	690℃保温 8h	274.7	392.4	24.0	143	17.36	100	4~6
11.3	720℃保温 3.5h	240.3	372.8	20.5	131	19.13	>95	6
11.4	740℃保温 3.5h	260.0	387.5	22.5	133	20.40	100	6~7
11.5	760℃保温 3.5h	250.2	392.4	24.0	138	18.54	>95	7~5
11.6	850℃保温 2.5h, 720℃保温 3.5h	250.2	367.9	24.0	131	20.31	100	7~8
11.7	880℃保温 2.5h, 720℃保温 3.5h	250.2	372.8	25.0	133	22.17	100	7~5
11.8	910℃保温 2h, 720℃保温 3.5h	250.2	372.8	23.5	126	20.60	100	5~7

注:①冲击试样为 ISO-V 型,取自 Y<sub>1</sub> 试块下层;②拉力试样取自 Y<sub>1</sub> 试块上层,故其性能偏低;③试块均在炉中冷却至 600℃ 后出炉空冷。

### 三、结果分析及讨论

(1) 由表 1~2 可知,铸态 QT400-15 的试样开缺口后  $\alpha_k$  的波动减小。缺口试样的冲击功主要消耗于裂纹扩展,故对试块致密度、铸态组织和化学成分不均匀及温度变化的敏感性减小。对比试样 1.1 和 1.6 可见, U 形缺口试样的低温  $\alpha_k$  仅有无缺口  $\alpha_k$  的 1/10 左右。

随着含硅量增加,铸态 QT400-15 的铁素体量和常温  $\alpha_k$  增加;含硅 2.8~3.0% 时,  $\alpha_k$  达到最大值,更高的硅反使  $\alpha_k$  下降。在 -20℃ 以下温度  $\alpha_k$  迅速下降;硅越高,  $\alpha_k$  下降越多。 -30~-40℃ 时,高硅铸态 QT400-15 的  $\alpha_k$  已低于低硅铸态 QT400-15 的  $\alpha_k$  值。因而为保证铸态 QT400-15 的韧性,应将其含硅量控制在 2.6~2.8%。

(2) 表 4 表明,QT400-15 退火后随炉缓冷会发生类似于回火脆性现象<sup>[1]</sup>,使  $\alpha_k$  下降。650℃ 铁素体化退火提高  $\alpha_k$  不多;中温正火加低温退火的  $\alpha_k$  值比低温退火高;两阶段退火的  $\alpha_k$  最高。退火后铁素体晶粒度提高约一级,但对  $\alpha_k$  的影响不明显,估计与铸态晶粒较细有关。退火后提高  $\alpha_k$  的主要原因在于铁素体化和化学成分的均匀性能高。

(3) 如表 5 所示,第 1 炉因含硅 2.49% 而未达到 GGG-40.3 的韧性;低硅含镍的第 2 炉  $\alpha_k$  最低;第 3 炉虽含硅较高,但加入少量稀土和镍后,其强度和缺口  $\alpha_k$  最高。第 4~6 炉的结

果与此相似。第 7~10 炉的硅量为 1.64~1.95%,均达到 GGG-35.3 及 350-22L 性能;硅高的 U 型缺口  $\alpha_k$  也较高。7~10 炉 V 型缺口  $\alpha_k$  相差甚少,约比 U 型缺口  $\alpha_k$  低 2~4J/cm<sup>2</sup>,对成分和组织的敏感性较小。含镍 0.62~0.80% 时对  $\alpha_k$  的影响不明显。而第 11、12 炉表明,镍从 0.65% 增至 1.65% 时  $\alpha_k$  略有下降。

综上所述,镍可提高退火球铁的强度,但略微降低伸长率<sup>[2]</sup>。由于缺口  $\alpha_k$  是强度和伸长率指标的综合反映,所以在减少硅量的同时加入 0.5~0.8% 镍,有利于提高缺口  $\alpha_k$ ,对改善稀土镁耐低温球铁的综合性能亦很必要。

(4) 采用我国中等纯度生铁和稀土镁球化剂生产回转套等铸件的实践证明,化学成分范围(%)为:3.50~3.90%C, ≤0.25%Mn, 1.80~2.20%Si, ≤0.05%P, ≤0.025%S, 0.010~0.040%RE<sub>总</sub>, 0.5~0.8%Ni 的球铁经低温退火后,可以稳定达到 GGG-40.3 和 400-18L 性能。镍可以提高铸件的致密性。为保证抗拉强度不低于 400N/mm<sup>2</sup>,在不加镍的情况下,应将含硅量控制在上限并适当提高退火温度;若将硅控制在中下限,经中温退火后也可达到 350-22L 的性能。

由表 6 可见,耐低温球铁中温退火后的 -40℃ 缺口  $\alpha_k$  为 23.05J/cm<sup>2</sup>,超过低硅黑心可锻铸铁的 -40℃ U 型缺口  $\alpha_k$  (约 21.2J/cm<sup>2</sup>)<sup>[3]</sup>。虽然经低温退火的耐低温球铁的无缺口  $\alpha_k$  不高,但其缺口  $\alpha_k$  比普通退火球铁要高得

多,在-60℃时仍有较好的韧性(见表7)。

(5)由表9可知,耐低温球铁的最佳退火工艺为中温奥氏体均匀化加低温退火(如试验11.7);选用较高温度的低温退火(740℃左右),亦可达到与高温两阶段退火相近的低温韧性,并具有较高的强度。此类球铁的退火周期仅20余小时,比国外同类球铁退火时间短。

## 四、结 论

(1)铸态铁素体球铁的缺口 $\alpha_k$ 很低,退火后可提高一倍。

(2)采用国产生铁及低稀土镁球化剂所生产的耐低温球铁的铁素体晶粒较细,只要严格控制成分,进行适当的热处理后,性能可达到DIN和ISO标准,并有退火周期短的特点。其含硅量应控制在1.8~2.2%,过低易产生碳化

物,导致退火时间延长和性能降低。为保证铸件具有良好的综合性能,必要时可加入0.5~0.8%Ni。

(3)耐低温球铁退火后,基体中的铁素体量必须大于95%。退火温度高反使韧性下降;在600℃左右出炉空冷一般可避免产生回火脆性。

(4)稀土镁耐低温球铁的-40℃ $\alpha_k$ 已超过低硅黑心可锻铸铁,多年在寒冷地区(起重机部件)使用已证实其可靠性。

## 参 考 文 献

- 1 沈阳铸造研究所等. 球墨铸铁. 北京:机械工业出版社, 1982
- 2 BCIRA Broadsheet 211-5, 1986
- 3 南京汽车厂等. 铁素体球墨铸铁性能试验. 北京:机械部情报所出版, 1977

(编辑:王惠愚)

# 铈对 Fe-C-Si-Mn 合金石墨组织的作用

北京科技大学 沈定钊 朱玉龙(执笔)

**【提要】**在本试验条件下,当含铈量小于0.036%时,随含铈量增加,Fe-C-Si-Mn合金的石墨片有变细小的趋势;当铈含量大于0.036%后,随含铈量的增加,石墨又开始粗化,但仍比不加铈的要细小。

**关键词:** 灰铸铁 铈 石墨组织

铈加入到灰铸铁中,可以降低共晶转变温度<sup>[1]</sup>,增加过冷度<sup>[2]</sup>。铈又是表面活性元素<sup>[3]</sup>,所以铈一定会对石墨片起作用。但各文献阐述铈对灰铸铁石墨片的影响观点各异<sup>[4~7]</sup>。为此笔者用纯Fe-C-Si-Mn合金材料,研究了铈对灰铸铁石墨组织的影响。

## 一、试验条件

为了尽可能地排除其他元素的影响,选用工业纯铁,光谱石墨电极,单晶硅及电解锰,在真空感应炉中配制成试验原材料,并将纯度为

99%以上的工业纯铈加入到试验原材料中,放在刚玉坩埚内,在有氩气保护下的钼丝炉中熔化,配制成试验用材料,其化学成分如表1所示。

表1 试验材料的化学成分(%)

编 号	C	Si	Mn	Sb	P	S
1	3.23	2.05	0.82	0		
2	3.23	2.05	0.82	0.018		
3	3.23	2.05	0.82	0.036	<0.01	<0.001
4	3.23	2.05	0.82	0.061		

将不同含铈量的Fe-C-Si-Mn合金分别装入 $\varnothing 40 \times 100$ mm的刚玉坩埚中,在有氩气保护

1994年5月18日收到初稿,1994年7月8日收到修改稿。