

# 贝氏体球铁的连续冷却

徐 杨<sup>①</sup> 周世康  
(机械工程学院)

**摘 要** 探讨含铬、钼、铜多元微量元素的合金球铁经连续冷却获得贝氏体组织的新工艺,研究了热处理工艺参数对贝氏体球铁组织和性能的影响,并以杂质泵过流部件为对象进行了生产验证。结果表明,采用该工艺可以稳定地获得以下贝氏体为主的组织和良好的综合机械性能( $HRC \geq 50$ ,  $\alpha_c \geq 10 \text{ Jcm}^{-2}$ ),耐磨性提高为普通灰铸铁的 5 倍,经济效益显著。

**关键词** 连续冷却; 贝氏体球铁; 热处理

**中图分类号** TG151.2

## Continuous Cooling of Bainite Ductile Iron

Xu Yang Zhou Shikang  
(College of Machinery Engineering, CAU)

**Abstract** The new technology of continuous cooling Bainite ductile iron with addition of Cr, Mo, Cu is studied. The influence of heat treatment parameters on the structure and properties of the Bainite ductile iron is analysed in detail, and the shield parts of impurity pump made of this material is used in production. The results show that the lower Bainite structure and good mechanical properties ( $HRC \geq 50$ ,  $\alpha_c \geq 10 \text{ Jcm}^{-2}$ ) can be obtained by using this new technology; the wear resistance of the new material is over five times than that of cast iron and the economic benefit is notable.

**Key words** continuous cooling; Bainite ductile iron; heat treatment

贝氏体球铁是近 10 几年发展起来的一种具有良好综合机械性能、铸造性能和加工性能的新型抗磨材料,现主要采用传统的盐浴等温淬火工艺生产,虽然生产工艺成熟,性能稳定,但生产设备一次性投资大,生产过程中能耗高,污染严重,工人劳动强度大,阻碍了贝氏体球铁的进一步应用。目前虽也有用油浴等温淬火或分级淬火代替传统的盐浴等温淬火的工艺<sup>[1,2]</sup>,但这些工艺仍存在生产周期长、介质易老化、不适用于大件等缺点。用连续冷却的方法生产贝氏体球铁,工艺简单,尤其适用于大件,生产设备投资小,成本低且性能优异,选择合理的工艺参数可以保证其生产稳定性接近盐浴等温淬火。国内外对这一工艺的研究大多还处于试验阶段,本研究旨在完善此工艺,使它成为生产贝氏体球铁的一个重要方法。

收稿日期:1996-01-22

①徐 杨,北京清华东路 17 号中国农业大学(东校区)61 信箱,100083

## 1 试验条件及化学成分选择

试验用球铁用1 t冲天炉熔制,合金元素在炉前加入。用冲入法进行球化和孕育处理,并在转包时用75硅铁瞬时孕育。出铁温度大于1450℃,用光学高温仪测温,用三角试块和炉前快速金相检验法检验球化情况。除冲击试块是直接浇注的20 mm×20 mm×110 mm无缺口试块外,其他试验用试块均取自同包浇注的试样及Y型试块。

热处理及检测设备包括高温箱式电炉、洛氏硬度计、光学显微镜、30 kg冲击试验机、X-650扫描电镜、MLS-23湿砂橡皮轮磨粒磨损试验机等。

试验用原材料主要有本溪18号生铁、碳素废钢、55钼铁、高碳6号铬铁、紫铜丝、75硅铁孕育剂及稀土镁6-9球化剂等。

化学成分的选择以普通球铁(含C3.5%~3.7%,Si2.4%~3.4%,Mn少于0.5%,P少于0.07%,S少于0.03%,残余Mg0.03%~0.05%,残余Re0.02%~0.03%)为基础进行Mo,Cr和Cu多元微量合金化。钼是提高淬透性的主要元素,有利于贝氏体的生成;铬是强碳化物形成元素,它的加入可使球铁的硬度、耐磨性及淬透性都提高;铜是负偏析元素,可中和钼和铬的正偏析作用,使球铁组织均匀,同时与钼和铬有交互作用,也使淬透性提高。

## 2 试验结果及分析

### 2.1 工艺参数的影响

#### 2.2.1 奥氏体化温度和时间

球铁完全奥氏体化的最低温度与球铁的化学成分有关,而以 $w(\text{Si})$ 的影响最大<sup>①</sup>。在上述球铁成分基础上改变含硅量进行空冷试验,结果如图1所示。可见:1) $w(\text{Si})$ 不同时,硬度峰值对应的奥氏体化温度 $\theta$ ,也不同,奥氏体化温度随 $w(\text{Si})$ 的增加而升高;2)各种成分合金的残余奥氏体量 $R_A$ 均随奥氏体化温度的升高而增多,这是由于温度过高后奥氏体中含碳量增高,稳定性增强,从而使硬度降低,耐磨性减小。奥氏体化的温度也与钼、铬等合金元素的含量有关,但由于其含量低,作用远不如硅大。

奥氏体化时间的影响试验采用 $w(\text{Si})=2.9\%$ 的试样。结果表明,在900~920℃时保温0.5~1.0 h,组织和性能差别不大;超过1 h后,残余奥氏体量有所增加,硬度有所下降,韧性

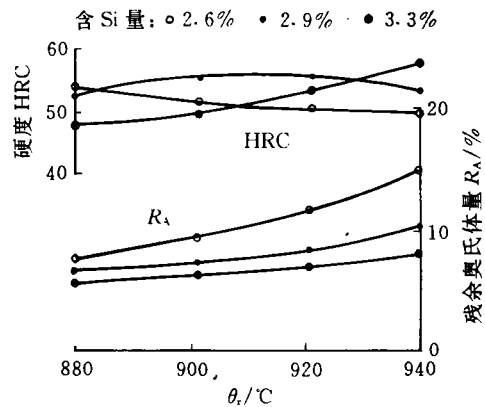


图1 含Si量及奥氏体化温度对球铁组织及性能的影响

① 郭戟荣. 奥贝球铁的热处理. 见:叶学贤等编. 奥氏体-贝氏体球墨铸铁. 北京:全国铸造学会,1986. 131

稍有提高。时间的影响不如温度显著。

### 2.2.2 超高温奥氏体化的温度和保温时间

用 2.1.1 中  $w(\text{Si})=2.9\%$  的球铁做超高温奥氏体化后空冷的试验,结果如图 2 所示。以  $900\sim 950\text{ }^\circ\text{C}$  加热后硬度几乎不变,韧性有下降趋势;以  $950\sim 980\text{ }^\circ\text{C}$  加热时,硬度略有下降,而韧性有较大提高。从图 3 对应的金相组织看,随着奥氏体化温度的提高,残余奥氏体量增多,组织均匀性提高,但组织无明显粗化。

文献[3]认为,合金元素在晶界处的偏聚可以阻碍贝氏体在晶界上核心数量的增加。对  $w(\text{Si})=2.9\%$  的试样进行能谱分析,结果如表 1。可见,硅在组织中的分布仍较均匀,改变奥氏体化温度对硅的再分布影响不大;铬在基体中含量不多,在共晶团边界中的含量有所增加,在碳化物中含量仍占大多数,说明含铬的合金碳化物在温度升高时只有少

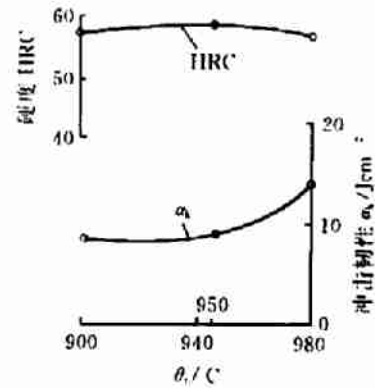
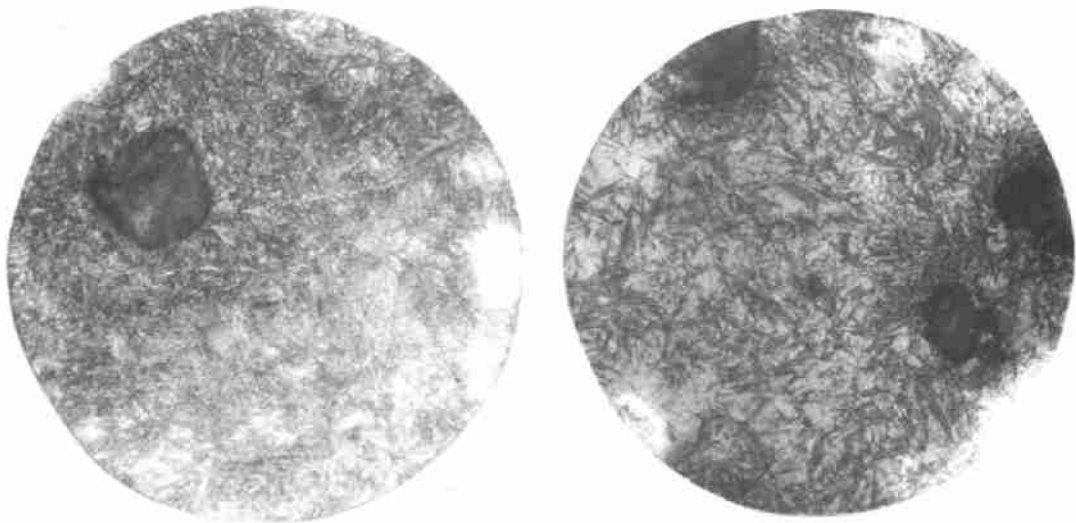


图 2 超高温奥氏体化温度  $\theta$  对性能的影响



(a)  $900\text{ }^\circ\text{C}$ , 保温 30 min

(b)  $980\text{ }^\circ\text{C}$ , 保温 30 min

图 3 超高温奥氏体化空冷后的金相组织( $\times 450$ )

量溶解;随温度的升高,钼在基体中含量逐渐增多,在碳化物中含量减少很多,这是碳化物中钼重溶在各相中的分布更加均匀的结果。 $\theta_s=980\text{ }^\circ\text{C}$  时更显著,即随奥氏体化温度的提高,钼的利用率提高,使球铁的淬透性提高,组织更均匀,韧性有较大的提高,而硬度略有下降,材质的综合性能提高。

奥氏体化保温时间的作用通过对上述成分的冲击试样在  $980\text{ }^\circ\text{C}$  温度下考查获得。结果表明,保温时间过长(如大于 40 min),冲击韧性损失很大,硬度变化并不大,这可能是由于长时间保持高温,促使含铬量高的网状碳化物形成所致。

表 1 微区成分能谱分析

$\theta_i / ^\circ\text{C}$	区 域	质量百分数 $w/\%$			
		Si	Cr	Mo	Cu
900	基体	13.73	0	4.21	0.73
	共晶团边界	11.36	0.05	12.31	0.78
	块状碳化物	8.24	1.22	31.04	8.78
950	基体	13.09	0	6.40	3.30
	共晶团边界	7.92	0.61	12.01	25.44
	块状碳化物	8.68	0.65	29.02	35.00
980	基体	13.23	0	7.17	3.13
	共晶团边界	11.23	0.81	10.09	1.59
	块状碳化物	9.61	0.89	23.90	11.71
	网状碳化物	9.78	7.13	8.82	9.02

2.1.3 连续冷却速度

采用  $w(\text{Si}) = 2.9\%$  的  $\phi 60 \text{ mm} \times 30 \text{ mm}$  的试块,  $w(\text{Mo})$  分别为 0, 0.3%, 0.7%, 考查空冷、风冷、风雾冷 3 种不同连续冷却速度对球铁组织和性能的影响, 结果如表 2 所示。可知:

表 2 冷却方式对球铁硬度 (HRC) 的影响

冷却方式	$w(\text{Mo})/\%$		
	0	0.3	0.7
空冷	29	46	53.0
风冷	33	49	54.0
风雾冷	39	52	54.5

1) 合金中不含钼即  $w(\text{Mo}) = 0$  时, 3 种冷却速度下获得组织的硬度均很低, 这主要是此时 C 曲线上半部(珠光体转变区)靠左, 合金的淬透性低, 上述 3 种冷却曲线均与 C 曲线相交, 如图 4(a) 所示, 故均为片条状的珠光体类型组织, 如图 5(a) 所示。

2) 钼的加入使 C 曲线中珠光体区右移,  $w(\text{Mo}) = 0.3\%$  时如图 4(b) 所示, 上述 3 种冷却曲线均避开珠光体区, 但是空冷和风冷曲线穿过上、下贝氏体区和马氏体区, 故得到  $(B_{\text{上}} + B_{\text{下}} +$

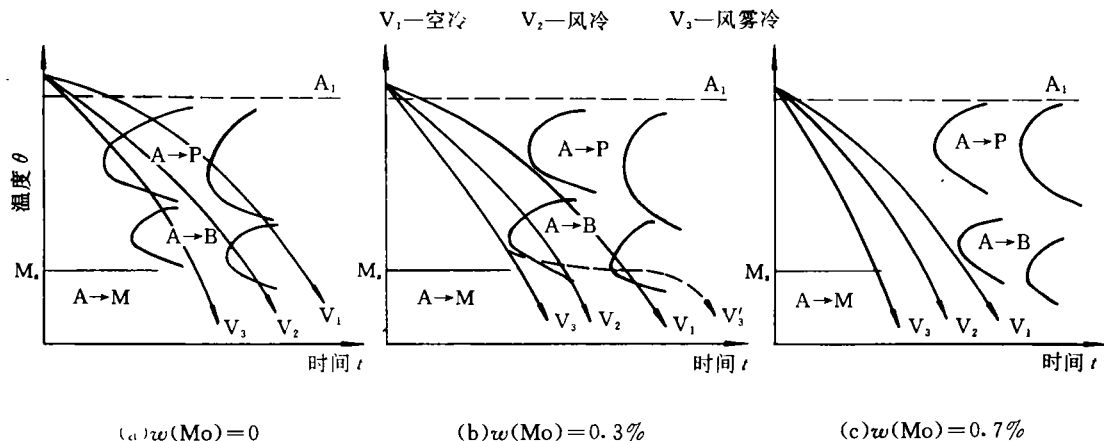


图 4  $w(\text{Mo})$  不同时球铁的 C 曲线示意图

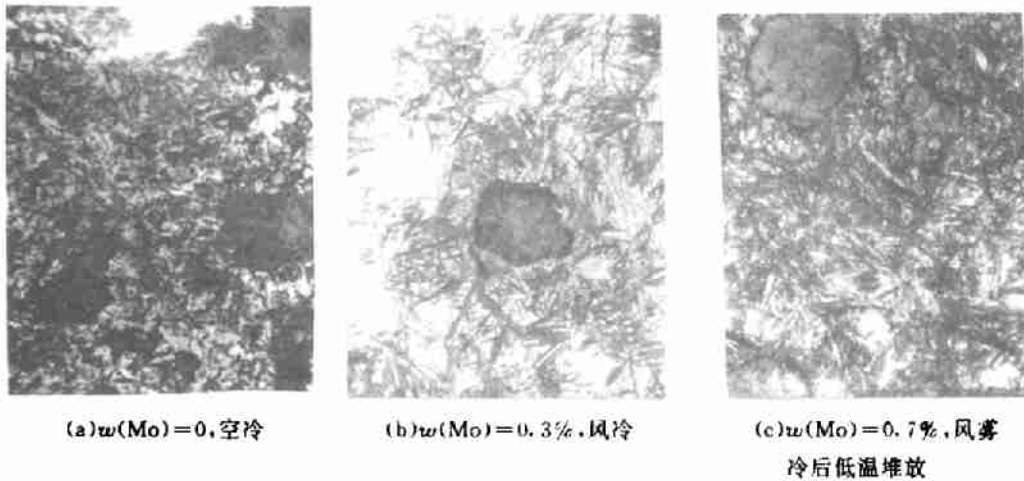


图5  $w(\text{Mo})$ 不同时球铁在不同冷却速度下的金相图( $\times 450$ )

M)的混合组织,硬度较低( $\text{HRC}<50$ ),金相如图5(b)所示。而风雾冷曲线均避开珠光体和贝氏体区,直接进入马氏体区,若按此冷却到室温,则会获得以马氏体为主的组织,这并不理想,理想的冷却曲线是图4(b)中的虚线,即过C曲线的鼻尖后,采用慢冷方式获得以下贝氏体为主的组织,如图5(c)所示。这样既满足了组织性能的要求,又有效地防止了变形和开裂。我们常采用工件低温堆积的办法来达到缓冷的目的,保证了连续冷却生产贝氏体球铁工艺的稳定性。

3)对于  $w(\text{Mo})=0.7\%$  的试样,改变冷却速度对硬度影响不大。这是由于  $w(\text{Mo})$  值足够大时,C曲线已向右移,几种冷却速度下的冷却曲线均躲过C曲线鼻尖,如图4(c)所示,得到针状组织,性能差别不大。

由此可见,合金元素可使球铁的淬透性提高,但也会加剧偏聚,造成组织不均匀;提高冷却速度,既可减少钼等合金元素的含量,又起到提高淬透性的作用;因此只要将合金元素和冷却速度匹配合理,就会获得满意的贝氏体球铁组织。

## 2.2 耐磨性试验

6 mm  $\times$  30 mm  $\times$  60 mm 的耐磨块,经 30 min, 920  $^{\circ}\text{C}$  的奥氏体化后空冷,硬度 HRC55,组织为均匀细致的贝氏体针+适量块状游离碳化物+少量白亮区。对比试样为 HT200,铸态硬度为 HRC30。磨粒磨损试验后 8 块试样的平均相对耐磨因数

$$\beta = \frac{\text{灰铁平均失重}}{\text{空冷贝氏体球铁平均失重}} = \frac{347.7}{66.1} = 5.26$$

试验条件为载荷 68.6 N,磨料为 40/70 目的新会石英砂,转速 240  $\text{rmin}^{-1}$ ,预磨 1 000 转,正磨 1 000 转。可见,空冷贝氏体球铁的耐磨性为灰铁的 5 倍以上。

## 2.3 生产验证

在河北和山西的 3 个工厂批量生产 XP65-65-220 和 2PN-002 等杂质泵的叶轮和泵壳。工艺流程为:铸造(球铁铸件) $\rightarrow$ 机加工 $\rightarrow$ 连续冷却贝氏体转变热处理(硬化处理)。由处理结果可知:

- 1)铸件硬度为 HB250~300,机加工性能良好;
- 2)热处理后得到硬度较高(均为 HRC52~57)的以下贝氏体为主的基体组织,耐磨性和综

合性能良好;

3)热处理后膨胀量小(如叶轮径向膨胀量为 $+(0.05\sim 0.15)$ mm),均在要求的公差范围内,机加工时预留此余量,便可省去硬化处理后难以精加工的工序。

上述杂质泵用于矿井污水、城市污水和黄河泥沙等介质中,用户反映良好。拆机实测在煤矿井中使用了4个月(约运转1200h)的叶轮和泵壳,磨损量均在0.2mm以内,进一步表明本工艺是切实可行的。

### 3 结 论

1)在化学成分配比合理的情况下,连续冷却生产贝氏体球铁的工艺是可行的。

2)连续冷却生产贝氏体球铁的奥氏体化温度与含硅量有很大的关系,含硅量越高,完全奥氏体化温度越高。

3)大幅度提高球铁的奥氏体化温度,可使基体组织均匀化,综合性能提高。

4)适当提高冷却速度,可减少钼等合金元素的用量。

5)以下贝氏体为主的球铁具有良好的耐磨性。

6)用连续冷却工艺生产贝氏体球铁杂质泵的叶轮和泵壳,工艺简单,性能稳定,磨损小,成本低,具有良好的技术经济效益和社会效益。

### 参 考 文 献

- 1 Hornung K. 球铁贝氏体分段淬火的工艺方法. 吴国华译. 国外金属热处理,1989,10(4):48~54
- 2 周世权. 分级等温淬火球墨铸铁的组织与性能. 热加工工艺,1993(5):17~19
- 3 徐祖耀,刘世楷. 贝氏体相变与贝氏体. 北京:科学出版社,1991. 215