

稀土镁球墨铸铁轴承热处理的研究*

中山大学金属系金属物理学教研室
广东省佛山水泵厂

在总路线光照射耀下,稀土镁球铁已在各个工业部门中获得广泛的应用^{[1][2]}。广东省稀土球铁轴承试验组,最近二年来对用稀土球铁制造滚动轴承,作了一系列研究与试验,已获初步结果^{[3][4][5]}。本文介绍其中一部分研究结果:热处理对于稀土球铁一般机械性能,接触疲劳性能和耐磨性的影响。

我们研究了三个热处理条件对球铁金相组织和性能的影响:(1)淬火温度对组织和性能的影响;(2)回火温度对组织和性能的影响;(3)等温温度对组织和性能的影响。结果表明:用稀土球铁制作滚动轴承,恰当地选择热处理条件是非常必要的。

一、试验条件

(一) 试样来源

热处理所用试样是在冲天炉中熔炼铁水,用稀土镁中间合金作球化剂,冲入法进行球化处理,用75%硅铁作孕育剂。为了有利于生产上的推广,其化学成份采用普通高强度球铁的化学成分,见表一。

表一 制造轴承用的稀土镁球铁试样化学成份

元素名称	C	Si	Mn	S	P	Cu	Mg	Re
含量%	3.42	2.33	1.14	0.016	0.070	1.08	0.013	0.017

(二) 机械性能测定的试样形状及尺寸

按 JB 297—61浇注楔形试块(其石墨形态见图1,铸态组织见图2),为了消除游离渗碳体、使成分均匀和便利加工,楔形试块先经过高温石墨化退火(退火组织见

* 1973.9.27接稿

图3), 然后加工成试样, 抗拉试样为10毫米直径的标准尺寸, 冲击试样为 $10 \times 10 \times 55$ 毫米无缺口。耐磨试验采用 $\phi 32 \times \phi 16 \times 10$ (毫米) 的环形试样。接触疲劳试样系由 $\phi 30$ mm 的球铁鑄棒加工而成, 其工作部分为 $\phi 20$ mm 的园球形。

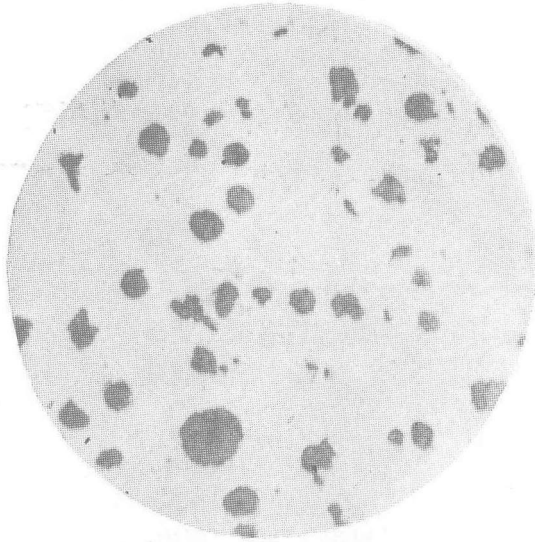


图1 石墨形态 100×

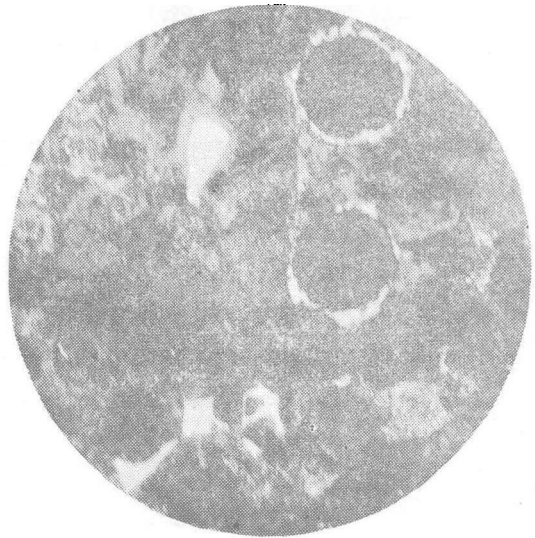


图2 鑄态組織 300×

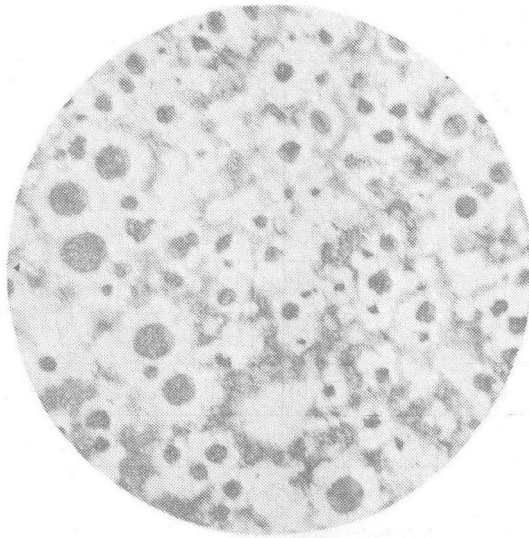


图3 退火組織 100×

(三)机械性能测定

抗拉试验在30吨万能试验机上测定。冲击试验是在量程为6 kg—M摆锤式冲击试验机上进行。耐磨试验是在MH—200型磨损试验机上进行，试样速度：上轴160转/分、下轴175转/分、负荷80kg，在干磨无润滑的条件下进行对磨，运转10万转（10小时25分）后，用万分之一克精密天平称量试样的失重。接触疲劳试验在ZYS—5型对滚式接触疲劳试验机上进行，试验机工作原理如图4所示，采用直径 $\phi 20$ mm 硬度 $HR_C 63—65$ 的GCr₁₆钢工作轮，试样转速5500转/分，径向负荷93.9kg，接触应力为 $300\text{kg}/\text{mm}^2$ ，采用3 錠子油飞溅润滑。试样按不同热处理状态分为三组，每组7—9个试样，每个试样试至疲劳剥落为止。

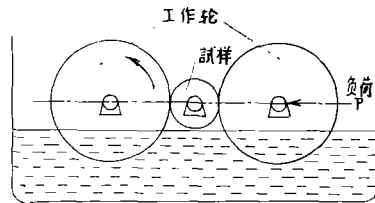


图4 接触疲劳试验机
工作原理简图

二、试验内容及结果

1、淬火温度对金相组织和机械性能的影响

试样的淬火温度分别为820、850、890、920、950°C，保温20分钟后淬油。淬火后均经160°C油浴回火2小时。试验结果如表二和图5所示。

表二 不同淬火溫度下(160°C回火後)的金相組織和性能

組織和性能 淬火溫度	σ_b kg/mm ²	α_k kg-M/cm ²	硬度 HR _C	金相組織
820°C	—	1.53	51	針狀馬氏體+破碎狀鐵素體+石墨(圖6a)
850°C	61.7	1.16	55	針狀馬氏體+極少量點狀鐵素體+石墨(圖6b)
890°C	70.7	0.81	58	針狀馬氏體+極少量殘余奧氏體+石墨(圖6c)
920°C	65.2	0.68	56.5	粗針狀馬氏體+少量殘余奧氏體+石墨(圖6d)
950°C	—	0.63	56	粗針狀馬氏體+較大量殘余奧氏體+石墨(圖6e)

圖6是不同淬火溫度下的金相組織，由金相組織上分析，在820°C淬火後，由於溫度過低，基體組織除馬氏體外，還存在着大量鐵素體，升高溫度至850°C時，基體組織基本上是馬氏體，鐵素體只剩下極少，並呈現點狀形態，從這裡看出，850°C接近臨界溫度(用膨脹儀測得臨界溫度為840~850°C)。隨着溫度提高至890°C，基體組織為針狀馬氏體，並出現少量殘余奧氏體；至920°C時，馬氏體變粗，而且殘余奧氏體量也增多；再繼續增高溫度至950°C時，形成粗大的針狀馬氏體，而且殘余奧氏體量增加更多。

由機械性能來分析，從表二和圖5可看出，所試驗這几种不同淬火溫度，以890°C的淬火溫度為最佳，它保證得到最高的硬度和強度，並具有一定的衝擊韌性。

由機械性能所探討出來的合適淬火溫度範圍，與由金相組織分析結果基本上一致。我們認為，淬火溫度過低時(850°C以下，或者更正確地說在臨界溫度以下)，因奧氏體化不完全，淬火後組織中還保留有一部份鐵素體，雖然衝擊韌性較好，但硬度值較低，不能選用。當溫度愈接近臨界溫度，保留下來的鐵素體量就愈少、愈破碎、硬度值愈高。當淬火溫度過高時(900°C以上)，馬氏體組織粗化，殘余奧氏體量增多，硬度、強度、韌性都降低。這是由於球墨鑄鐵中存在高碳石墨相，在高於臨界溫度淬

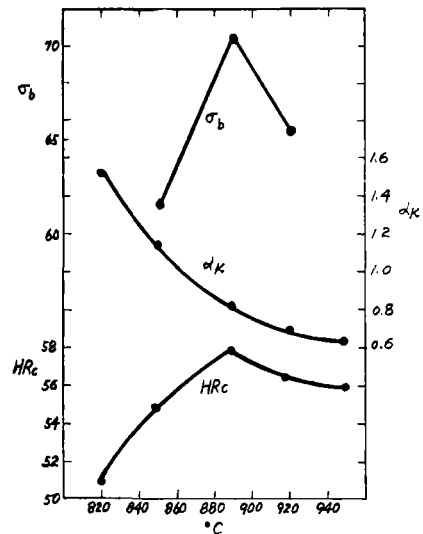
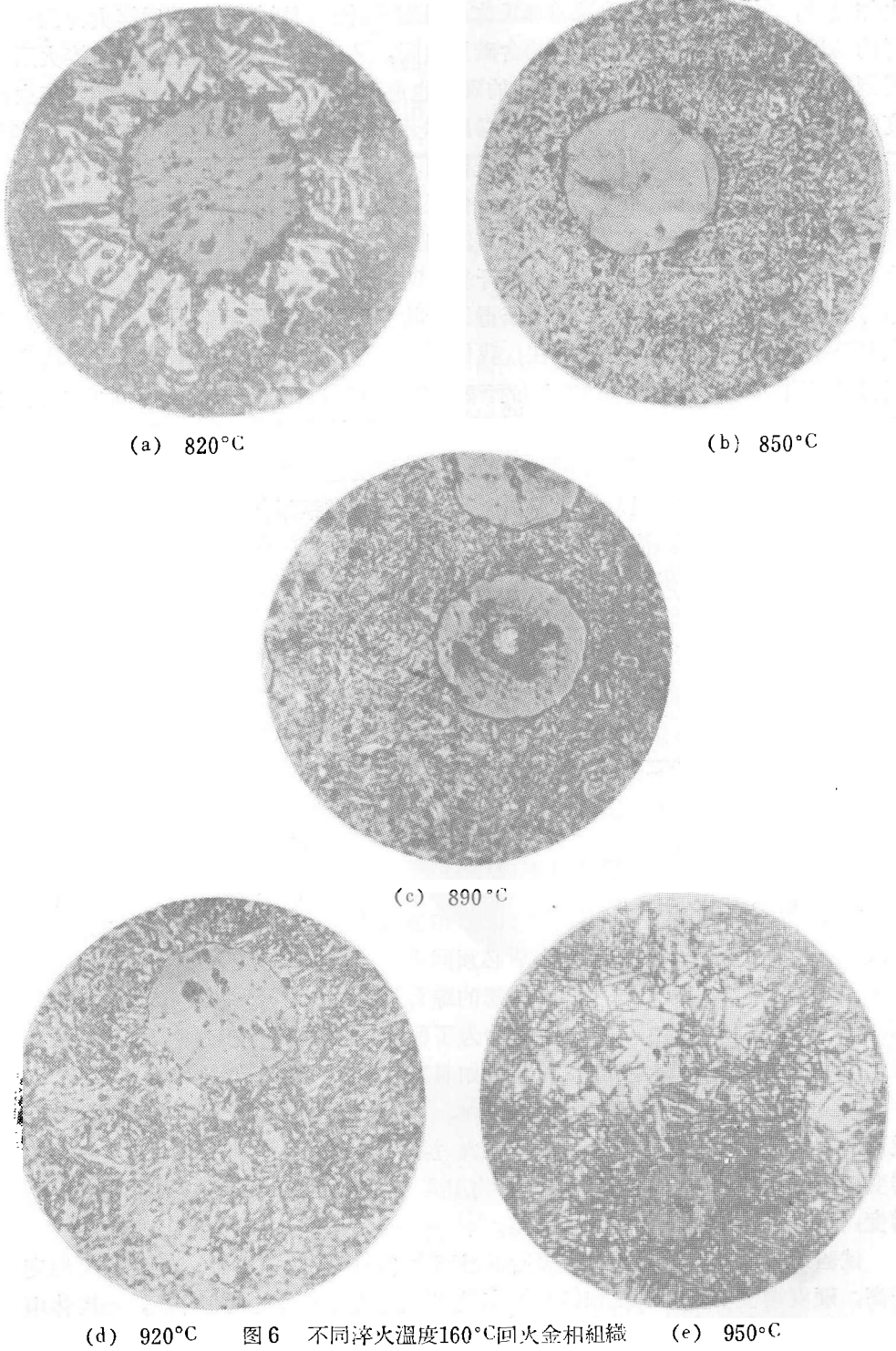


圖5 不同淬火溫度對機械性能影響



火加热时,奥氏体中的含碳量随奥氏体化温度的升高而增加,而随后淬火冷却所获得的马氏体的含碳量与原奥氏体的含碳量相同,所以奥氏体化温度愈高,淬火后所得到的马氏体的含碳量愈高,马氏体的硬度也愈高,脆性也愈大。但是,随着淬火温度的升高,奥氏体中含碳量的增加,马氏体开始转变温度“Ms”点亦愈低,则淬火后组织中的残余奥氏体量亦增多。奥氏体相不仅硬度低,而且在常温下很不稳定,因之,其量的增多,将会造成硬度的降低以及轴承尺寸的不稳定。此外,奥氏体化温度愈高,奥氏体晶粒就愈趋于粗化,淬出的马氏体粗大;不仅降低了另件的机械性能,而且因内应力大极易造成淬火开裂。所以应在保证完全奥氏体化的前提下,尽可能采取较低的淬火温度,以便获得细针状马氏体,避免粗针状马氏体,减少残余奥氏体,减少内应力,降低脆性。我们结合各工厂对球铁轴承淬火的生产实践,证明了选用 860°C — 890°C (对材料的含硅量为 $2.0\sim 3.0\%$ 时,硅高取上限,硅低取下限)的淬火温度为适宜,能获得细针状马氏体,综合机械性能较好。

由于球墨铸铁中有石墨存在,石墨又参与相变过程(溶解、扩散等),所以淬火加热时必须有一定的保温时间,保温时间适当较轴承钢增加。对于原组织为铁素体时,为了使石墨溶解、扩散并使奥氏体含碳量饱和,所需的保温时间比珠光体要长些。同时,球铁中存在石墨,也影响球铁的传热速度,因而球铁的冷却特点与钢不同,球铁在加热时,因为石墨导热性较差,热流在石墨处传导速度被阻滞,热流必须绕过石墨^[6],因而冷却较钢为慢。并且与石墨形状大小有关,愈细小分散,愈接近球形,则冷却速度愈快。

球铁中硅量较高,又有镁的存在,故它的淬透性是比较好的^[7],一般来说,铸铁厚度在40毫米以下时,在油中能完全淬透,所以球铁轴承的淬火剂可采用油。水和水溶液的冷却能力很强,容易碎裂,因此,基本上是不采用的。

2. 回火温度对组织和性能的影响

球墨铸铁淬火后的基体组织为马氏体和少量残余奥氏体。组织不稳定,内应力很大,强度低,脆性大,因此淬火后必须回火。回火的目的在于消除内应力,稳定组织,适当地降低硬度,求得较为理想的综合机械性能。根据零件机械性能要求的不同,采用的回火温度亦不相同。我们为了保证球铁轴承能有较高的硬度和耐磨性,所以选用低温回火试验,试验结果如表三、图7、图8和图9所示。

回火的过程主要是马氏体分解的过程,也就是从过饱和的“ α ”固溶体中析出过量的碳原子,以及碳化物的聚集和长大过程;其次是残余奥氏体在回火过程中的转变。马氏体分解的程度,析出的碳化物质点的大小及分布情况,以及残余奥氏体的转变,起决定作用的参数是回火温度。

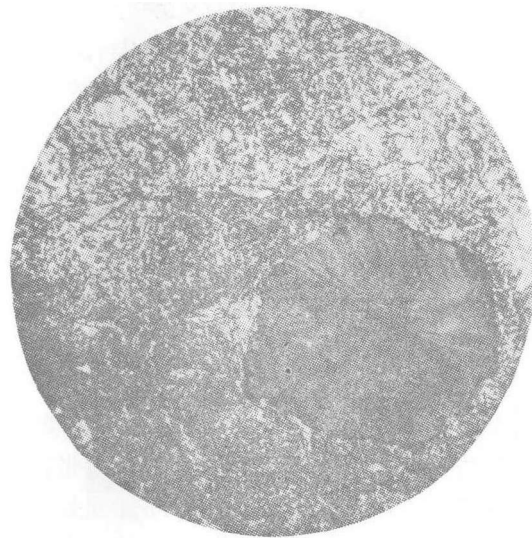
试验结果表明,球铁轴承淬火后低温回火(由 160 至 250°C)时,随着回火温度的升高,硬度慢慢下降,强度和韧性均有提高。这是由于回火温度升高,马氏体中析出的细小碳化物质点增多,淬火马氏体转变为回火马氏体、残余应力降低所致。图

表三 不同回火溫度(經890°C淬火後)的組織和性能

性能 和 組織 回 火 溫 度	σ_b kg/mm ²	α_k kg-M/cm ²	硬度 HR _c	金 相 組 織
160°C	70.7	0.81	58	回火馬氏體+少量殘余奧氏體+石墨
200°C	72.9	0.96	55.5	(同上)
250°C	93.5	1.27	53	(同上)
300°C	87.8	1.18	52	回火馬氏體+極少量殘余奧氏體+石墨
350°C	—	1.03	50	回火馬氏體+石墨

7和圖8分別是160°C及250°C回火後的顯微組織，(其中(a)為金相顯微鏡照片，(b)為電子顯微鏡照片)為細針狀回火馬氏體、殘余奧氏體和石墨。在金相顯微鏡下，很難辨別出馬氏體針葉上析出彌散的碳化物質點，更難分別二者碳化物質點的多寡。借助電子顯微鏡觀察，就很清楚地看出，回火溫度由160°C提高到250°C，馬氏體針葉上析出的碳化物質點明顯增加。

隨着回火溫度的進一步提高，超過250°C—300°C，則不僅硬度明顯降低，而且強度和韌性也有所下降。這是由於淬火後的殘余奧氏體轉變為回火馬氏體，增大了內應力，從而使脆性增加，強度降低。這一溫度區間，又稱為第一類回火脆性區。當然隨着回火溫度繼續升高，碳化物質點大量析出並聚集長大，內應力得以充分消除，沖擊韌性和強



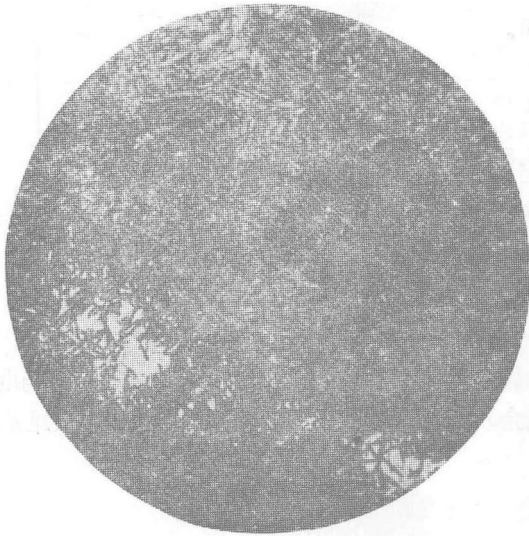
(a) 500×



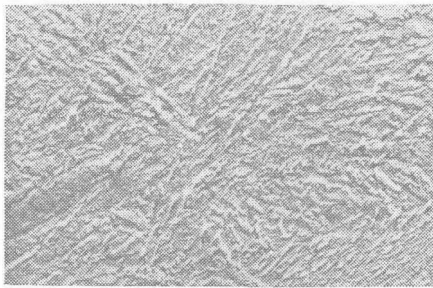
(b) 4000×

圖7 經890°C淬火、160°C回火的顯微組織

度又会恢复提高，但硬度已降至HR_c50以下。所以對於球鐵軸承而言，回火溫度選擇在200~250℃之間（可取220~230℃）較為適宜。當在200℃以下回火，硬度降下雖不多、耐磨性能好，但其強度和韌性頗低，而且在生產中反映軸承在這種溫度下回火時，脆性大，易摔裂。在220~230℃回火時，硬度仍能保持在HR_c54以上，耐磨性能也較160℃下降不多，可是抗拉強度、沖擊韌性和疲勞強度都有所增加，軸承脆裂的敏感性又顯著降低，綜合性能比較理想。當回火溫度超過250℃時，因位於第一類回火脆性區，強度、韌性均降低，特別是硬度降低過多，對耐磨性能和抗接觸疲勞性能十分不利。



(a) 500×



(b) 4000×2

圖8 經890℃淬火、250℃回火的顯微組織

3. 等溫淬火對金相組織和機械性能的影響

等溫淬火是目前發揮球鐵材料最大潛力，以使零件獲得較高綜合機械性能的重要熱處理手段。它能否適用於球鐵軸承要求，則必須進行試驗。

等溫淬火的主要關鍵是如何選擇等溫分解溫度的問題，我們為了保證有高的硬度，只選取在低溫下等溫淬火試驗。將試樣在890℃加熱，保溫20分鐘後，淬入不

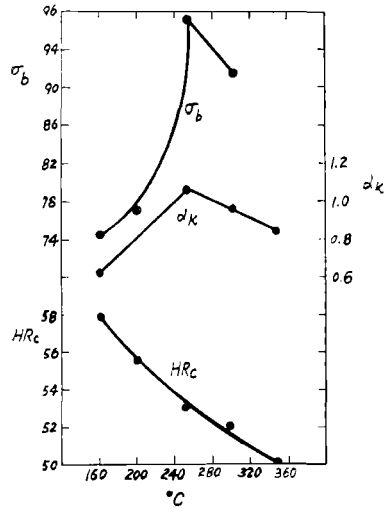


圖9 不同回火溫度對機械性能影響

同溫度(200、260、280、300°C)的硝鹽溶液中, 保溫2小時, 其金相組織和機械性能如表四、圖10和圖11所示。

表四 等溫淬火的金相組織和性能

等溫溫度 性能 和 組織	σ_b kg/mm ²	α_k kg-M/cm ²	硬度 HR _c	金 相 組 織
200°C	41.6	0.2	56.5	馬氏體+殘余奧氏體+石墨
260°C	94.8	2.7	49	下貝氏體+少量馬氏體+殘余奧氏體+石墨
280°C	121.0	3.5	47	下貝氏體+殘余奧氏體+石墨
300°C	111.5	4.6	43	下貝氏體+殘余奧氏體+石墨

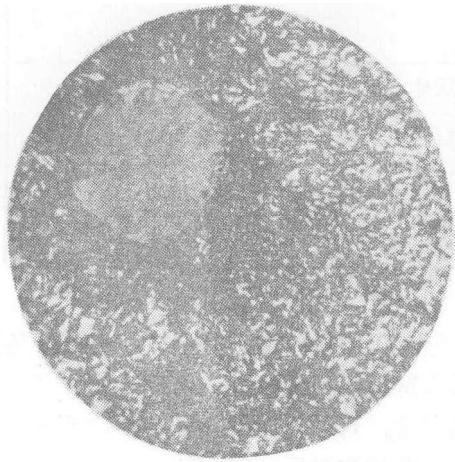
球鐵等溫淬火後的硬度、強度和韌性, 為奧氏體化溫度、等溫分解溫度及等溫時間等參數所影響, 奧氏體化溫度愈高, 碳的溶解速度就愈快, 同時碳在奧氏體中的溶解度也愈大, 這就提高了奧氏體的相對穩定性, 可使更多的奧氏體過冷到更低的溫度下轉變為含碳量較高的、具有高硬度的馬氏體和貝氏體, 內應力也相對提高, 從而表現出宏觀硬度的增高。然而奧氏體化溫度若過高, 奧氏體晶粒粗化, 殘余奧氏體量增加, 並呈網狀分布, 強度和韌性導致降低。因此我們選擇奧氏體化溫度為890°C是比較適合的。

等溫分解溫度的變化是直接與馬氏體和貝氏體的相變規律緊緊關聯的, 它對組織和性能的影響尤為突出。許多單位的研究證明^{〔8〕〔9〕}, 隨著等溫溫度升高, 硬度逐漸下降, 沖擊韌性明顯提高, 並在280~320°C範圍內基本趨於穩定, 而強度的變化卻呈拋物線形, 具有一峰值。我們沒有進行300°C以上的等溫淬火試驗, 300°C以下的試驗也證實了這一規律。等溫分解溫度低於250°C時, 由於近於球鐵的M_s點, 組織中存在着多量的馬氏體和殘余奧氏體, 並有較大的內應力, 故硬度高而強度和韌性低, 例如在200°C等溫, 硬度達HR_c 56~57, 其金相組織為馬氏體和殘余奧氏體(圖10a)。當等溫溫度升至260~280°C時, 這個階段的特徵是: 硬度迅速下降, 強度和沖擊韌性急劇增加, 總之在這個階段中各種性能變化劇烈, 這是由於遠離了“M_s”點, 能使更多的奧氏體分解為下貝氏體, 減少或消除了馬氏體, 同時內應力也大大地減少。其隨着超過“M_s”點的溫度愈高, 內應力減少得更多, 奧氏體的等溫分解得更充分。這時在金相組織中下貝氏體的形態由光滑的尖針轉變為邊界不平直的而成排的針狀的下貝氏體(圖10(b)10(c))。當溫度繼續上升至280~300°C時, 各種性能變化較為緩慢, 這說明在此階段內奧氏體的等溫分解已達到相當充分, 由此, 在強度曲線上出現了極大值, 這時貝氏體在形態上的變化很小, 其均為邊界不

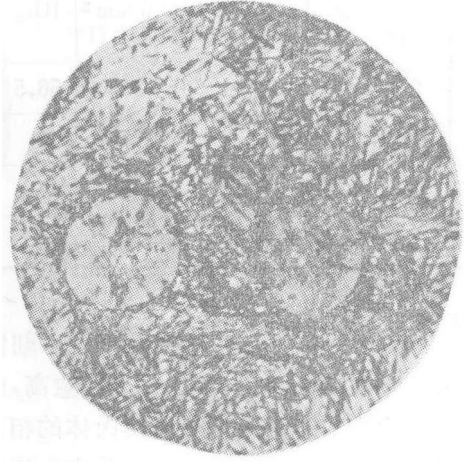
很平滑的成排取向针状的下贝氏体(图10(d))。图10(e)为图10(d)在电子显微镜放大下的金相组织。

从等温淬火所得到的组织和性能来看,对球铁轴承来说,等温温度选取 $260\sim 280^{\circ}\text{C}$ 较为适宜,这样可保持有较高的硬度、很高的强度和韧性,综合性能较佳。

我们对球铁经不同热处理后进行耐磨性试验,其结果见表五。



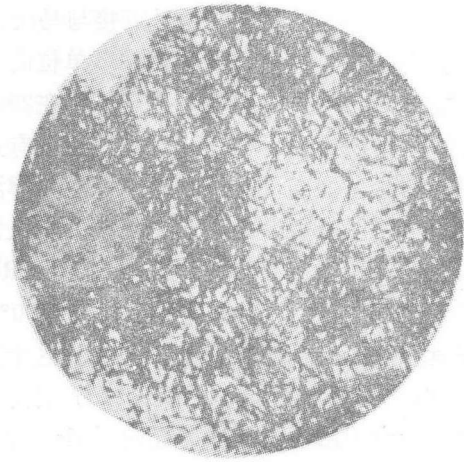
(a) 200°C



(b) 260°C



(c) 280°C



(d) 300°C

图10 890°C 加热不同温度等温2小时后的显微组织 $400\times$

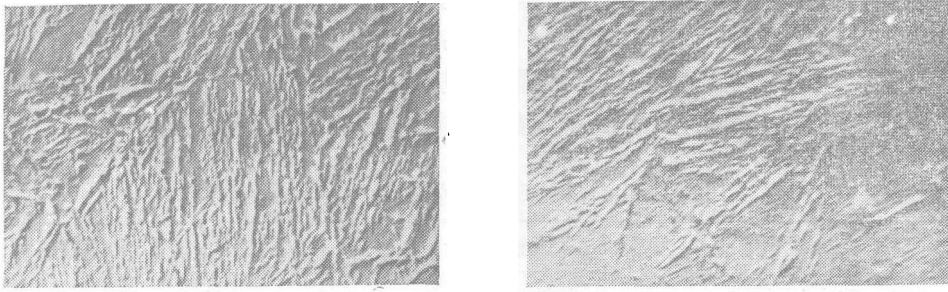


图10 (e) 890°C加热260—280°C等温淬火的下貝氏体和殘余貝氏体 4000×2

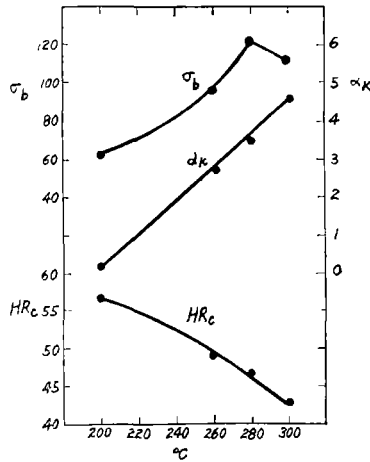


图11 不同等温温度对机械性能影响

表五 球铁轴承在不同热处理下的耐磨性能

材 料		热 处 理 工 艺	硬 度 HR_c		平 均 磨 損 量 (克)	
上 試 样	下 試 样		上 試 样	下 試 样	上 試 样	下 試 样
球 鉄	球 鉄	890°C 加热 260 ~ 280°C 等温 2 小时	44.6 ~ 46.6	44.7 ~ 46.8	0.5299	0.3845
球 鉄	球 鉄	890°C 淬火 250°C 回火	52.4 ~ 54.4	52.2 ~ 55.2	0.1012	0.0551
球 鉄	球 鉄	890°C 淬火 160°C 回火	56.3 ~ 57.4	56.2 ~ 58.0	0.0862	0.0676
GCr ₁₅ 鋼	GCr ₁₅ 鋼	840°C 淬火 170°C 回火	61.0 ~ 62.0	61.0 ~ 62.0	0.2244	0.1176

球铁的耐磨性与石墨的形状、大小和分布、以及金属基体组织和硬度有关。由于球铁在磨擦过程中，石墨易于脱落成粉，在磨擦面间形成一层薄膜，成为很好的天然固体潤滑剂⁽¹⁰⁾。这就使得在干磨无潤滑条件下，经过淬火—低温回火处理的球铁自身对磨的耐磨性能优于Gcγ₁₅鋼(鉻軸承鋼)。耐磨试验还表明：球

铁等温火后, 尽管强度、韧性很高, 但是毕竟硬度还较低, 耐磨性能不仅远低于淬火—低温回火者, 也低于 $Gc\gamma_{15}$ 钢。可见马氏体基体的耐磨性能要优于贝氏体基体。此外, 球铁淬火后低温回火, 随回火温度升高, 硬度下降, 磨损量也略有增加。

我们对球铁经不同热处理后进行接触疲劳性能试验, 其结果见表六。

表六 300kg/mm² 接触应力下的球铁轴承材料疲劳寿命

组别	热处理工艺	硬度 HRc	最低寿命		最高寿命		平均寿命	
			运转时间	循环次数	运转时间	循环次数	运转时间	循环次数
I	890°C淬火, 160°C回火 2 小时	54.6~55.6	49分钟	0.539×10^6	5时 3分	3.333×10^6	2时1分	1.331×10^6
II	890°C淬火, 250°C回火 2 小时	51.2~52.8	20分钟	0.22×10^6	10时26分	6.896×10^6	3时43分	2.453×10^6
III	890°C加热 260~280°C 等温 2 小时	40.0~45.1	13分钟	0.143×10^6	18时38分	12.298×10^6	4时33分	3.003×10^6

试验结果表明:

(1) 球铁经等温淬火处理后, 得到下贝氏体组织, 尽管硬度较低(比马氏体), 而其接触疲劳强度却高过淬火—回火处理者。

(2) 球铁淬火后采用250°C回火, 接触疲劳寿命高于160°C回火的。这与250°C回火马氏体组织较之160°C回火者稳定、残余应力和脆性较充分消除、提高了强度等原因有关。

(3) 球铁的抗接触疲劳性能远比 $Gc\gamma_{15}$ 钢差(表七列举了 $Gc\gamma_{15}$ 钢在540kg/mm² 接触应力下的疲劳寿命)。球铁中的石墨固然给材料本身带来了耐磨性能优良的有利一面, 然而石墨的强度和硬度极低, 与金属基体的结合力很差, 在交变应力作用下很易剥离, 成为早期疲劳剥落的主要原因, 如果球铁的石墨形态不佳, 疲劳强度便大幅度地降低; 随石墨尺寸的增大, 疲劳强度降低^[11]。此外, 球铁致密度差, 易有疏松和夹杂物, 基体组织粗大, 且成分和组织不均匀等, 这些也是球铁接触疲劳强度低的重要原因。总之, 不论是用淬火—低温回火抑或等温淬火, 球铁轴承只能承受较低的接触应力。

表七 $Gc\gamma_{15}$ 钢的接触疲劳寿命

试验条件		试样硬度 HRc	接触疲劳寿命(循环次数)		备注
接触应力	试样转速		破坏概率 10% (τ_{10})	破坏概率 50% (τ_{50})	
540kg/mm ²	11000转/分	62	18.91×10^6	109.29×10^6	数据采用韦布尔数理统计方法处理

三、結 論

1. 稀土鎂球鐵通過淬火——低溫回火或等溫淬火，可以充分發揮材料潛力，得到較好的組織和綜合機械性能。試驗表明：針對軸承零件的性能要求（高的硬度、耐磨性和接觸疲勞性，較高的抗拉強度，一定的沖擊韌性），適合的熱處理工藝分別為 860~890°C 淬火後 200~250°C 回火，及 860~890°C 加熱、260~280°C 等溫淬火。

2. 稀土鎂球鐵經過淬火——低溫回火，可以獲得高的硬度和耐磨性能、較好的強度、一定的韌性。在干磨無潤滑的條件下，其耐磨性優於 GCr15 鋼。等溫淬火處理，強度和韌性有顯著提高，而硬度較低，耐磨性能不及 GCr15 鋼好。

3. 稀土鎂球鐵軸承的沖擊韌性和抗接觸疲勞性能均較 GCr15 為低，而且在較低的接觸應力下，仍具有早期疲勞的特性，因而，應根據機械工作的條件和要求，有針對性地在一範圍內使用。通過二年來軸承實際使用考核說明，稀土球鐵軸承在廣

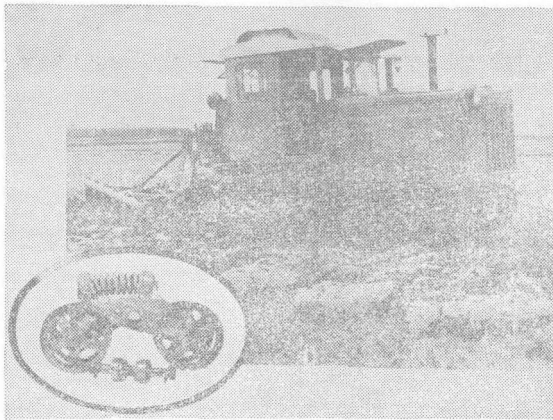


圖13 安裝在東方紅拖拉機上的7909軸承，耕作時間已達2100小時，還在繼續使用。

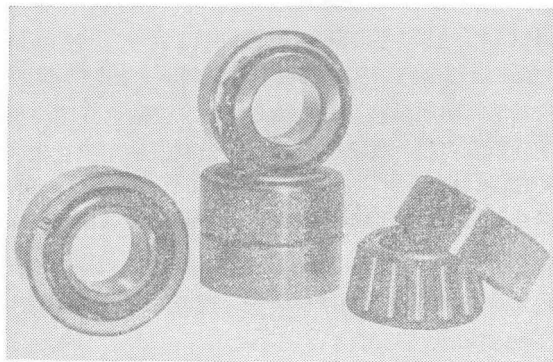


圖12 球鐵7909軸承

泛使用的农业机械中，可以代替铬钢轴承工作，特别是用球铁所制造的滚子轴承（因滚子对轴承套圈运动时，是綫接触，較滚珠轴承所受的点接触应力小），在一般负载和转速下，其使用寿命接近铬钢轴承。例如72年4月安装在东方红拖拉机上7909球铁轴承（见图12和图13）至73年6月调查，拖拉机耕作已达2100小时（已达一般铬钢轴承寿命），而轴承还继续使用。72年7月，装在4吨拖车的轮轴上的807813球铁轴承，现已运行8万公里，轴承还继续使用（见图14）。

本文中的耐磨试验和接触疲劳试验等是在洛阳轴承研究所的大力支持下进行的，他们不仅提供了设备条件，而且参加了试验工作，在此表示感谢。

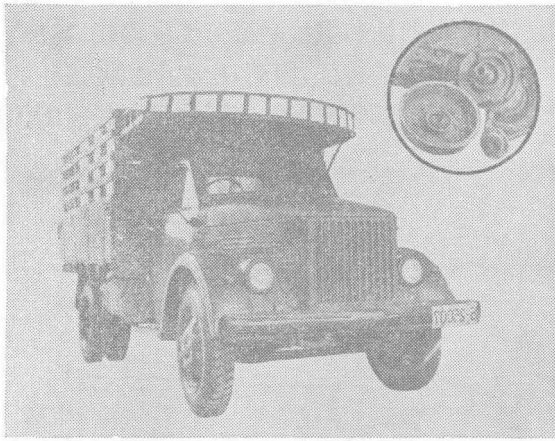


图14 安装在汽车上的807813轴承，已行驶8万公里，轴承良好。

参 考 资 料

- 〔1〕 沈阳鑄造研究所編 国内外球铁生产技术发展综述 1973年5月
- 〔2〕 广东省第一机械工业局技术处 广东球墨鑄鉄調查报告 1973年1月
- 〔3〕 佛山水泵厂、中山大学 球墨鑄鉄轴承
 - A. 《鑄造机械》 1971年第5期 21—28頁。
 - B. 第一机械工业部情报所編《活頁技术資料》 1972年第21号
- 〔4〕 广东省稀土球鉄轴承試驗組試驗总结 稀土球鉄滚动轴承 1973年1月（内部資料）
- 〔5〕 广东省稀土球鉄轴承調查組 稀土球墨鑄鉄轴承試制使用調查报告
 - 《鑄工》1971年11期
- 〔6〕 北京鋼鉄学院金相及热处理教研組編 金属热处理 289頁 1961年9月中国工业出版社出版
- 〔7〕 The British Foundryman 1966 Vol.69, No9, 379—386
- 〔8〕 无錫球墨鑄鉄研究室等編 稀土鑄球墨鑄鉄 124—125 1973年6月上海人民出版社出版
- 〔9〕 K·N 瓦申科著 球墨鑄鉄 338頁
- 〔10〕 中国科学院1954年金属研究工作报告会会刊 第二册（球墨鑄鉄）45頁
- 〔11〕 《鑄物》1971年 Vol.43 No2 21—27頁 No9 69—70頁