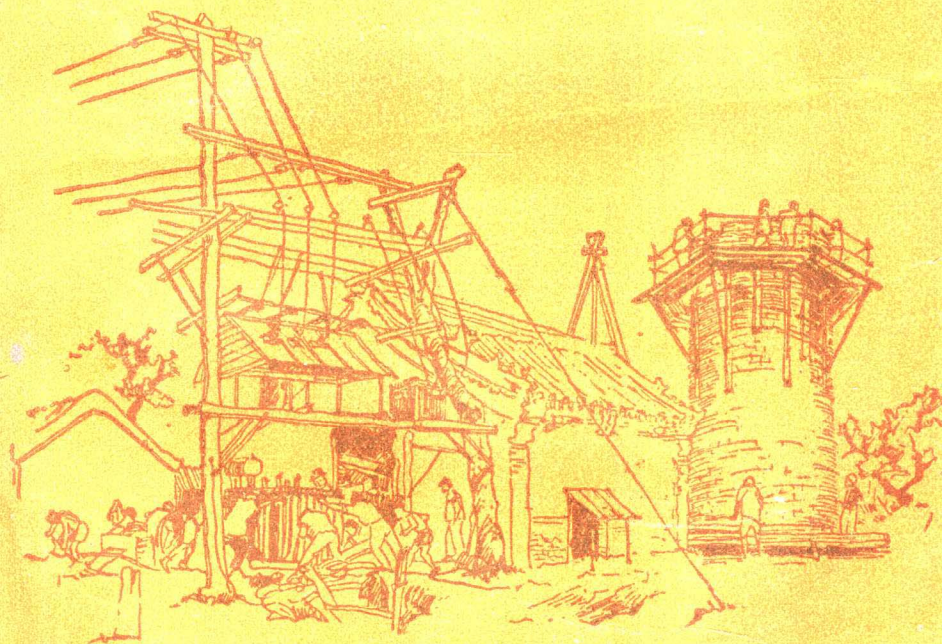


清華大學燃料綜合利用試驗電廠叢書

第 11 冊

用球墨鑄鐵作汽輪機轉子

電廠建設者集體編寫



水利電力出版社

內 容 提 要

用球墨鑄鐵做汽輪機轉子已經在清华大学試制成功，并將在該校燃料綜合利用試驗電廠第二期工程中安裝運行。

本書對球墨鑄鐵的性能，採用球墨鑄鐵製造汽輪機轉子方面的一些經驗、以及金相分析、主軸的疲勞試驗和葉輪的超速試驗等，都作了具體介紹，并附有各項數據。

本書供汽輪機製造、設計、安裝和運行人員閱讀。

清华大学燃料綜合利用試驗電廠叢書

第 11 冊

用球墨鑄鐵作汽輪機轉子

電廠建設者集體編寫

*

1706R356

水利電力出版社出版(北京西郊科學路二里溝)

北京市書刊出版業營業許可證出字第105號

清华大学出版科排印 新华書店發行

*

787×1092 $\frac{1}{32}$ 開本 * 32印張 * 21千字

1958年11月北京第1版

1958年11月北京第1次印刷(0001—20,100冊)

統一書號: 15143·1340 定價(第9類)0.12元

目 录

第一章 概述	(1)
第二章 汽轮机轉子的工作条件及对材料的要求	(3)
第1节: 轉子的运行工作条件	(4)
第2节: 轉子材料的要求	(5)
第三章 球墨鑄鉄的一般介紹	(6)
第1节: 一般介紹	(6)
第2节: 球墨鑄鉄的性能綜合与存在的問題	(10)
第3节: 汽轮机轉子使用球墨鑄鉄的初步分析	(11)
第四章 汽轮机轉子鑄造方面的經驗、質量檢查及 金相分析	(12)
第1节: 鑄造經驗	(12)
第2节: 轉子的質量檢查及金相分析	(18)
第五章 叶輪的超速試驗与主軸的疲劳試驗	(21)
第1节: 叶輪的超速試驗	(21)
第2节: 主軸的疲劳試驗	(27)

第一章 概

由於全國大躍進形勢的要求，對發電設備的制造提出迫切的任務。原有的發電設備和發電容量遠遠不能滿足工農業生產的要求，這就必須增加更多的發電設備。但是汽輪機的主軸和葉輪一般是用大型鋼料，在巨大的水壓機上鍛造而成，在目前鋼材供應還十分緊張的情況下，這種制造方法要在全國立即推行顯然是有困難的，因此尋找新的途徑，利用鑄鐵來代替鍛鋼，既為國家節省大量鋼材，而且還可以全民性的制造汽輪發電設備，實為技術上一項重大革命。

這樣一個光榮而偉大的任務，在清華大學黨委的領導下，由動力系、機械系十幾位青年學生和三位青年教師擔當起來。由於他們政治掛了帥，解放了思想，敢想，敢干，破除迷信，克服了各種困難，經過了不到二個月的日夜奮戰，在水利電力部北京修造廠等校內外八個兄弟單位協助下，在國家經濟委員會水利電力局的親切關懷下，終於在 10 月 13 日將汽輪機球墨鑄鐵主軸和葉輪的試制和試驗工作勝利完成。

在整個工作中解決了下面幾個主要問題：

一、關於汽輪機球墨鑄鐵主軸

尺寸：鑄造毛坯長 2200 公厘；

加工後長 1710 公厘，最大直徑 145 公厘，平均直徑 120 公厘。

1. 主軸第一次澆注就得出了良好的鑄件，打破了所謂球墨鑄鐵大件不能澆注得好的保守觀點。

2. 退火後經過機械性能試驗結果表明：它可以和中炭鋼相比擬：（某些情況可以大大超越中炭鋼）。

主軸和 40 號鋼比較：

	主 軸	40 号 鋼
抗拉强度(公斤/公厘 ²)	56	57
延伸率 (%)	5—8.8	17
冲击值(公斤-公尺/公分 ²)	1.5—4.1	
剪应力 (公斤/公厘 ²)	61.5	
布氏硬度(公斤/公厘 ²)	176—210	217

3. 經過機械加工、 γ 射綫、超聲波內部探傷和酸洗外表探傷，証明軸的內部和表面均無裂紋、縮松、縮孔等缺陷，合乎汽輪機主軸的要求。

4. 經過金相分析及硬度測定，証明主軸球墨化良好，組織均勻。全長硬度差不大於 40 公斤/公厘²，完全合乎質量標準。

5. 在一般的汽輪機的安全系數下，集中加載荷 2.5—3.2 噸，在轉數 2500—3300 轉/分（設計轉速為 3000 轉/分）下，作了它的疲勞試驗，經過 33 小時 5.2×10^6 交變次數的運轉之後，沒有發現任何缺陷，証明球墨鑄鐵主軸可以在高轉數下較長期運轉，打破了所謂鑄鐵不能高速長期運轉的舊論點。

二、關於汽輪機球墨鑄鐵葉輪

尺寸：毛坯直徑 864 公厘，厚度 60 公厘。

加工後直徑 844 公厘，厚度 20 公厘，並開有五個平衡孔。

1. 由於葉輪的鑄造工藝比較困難，而且沒有經驗，所以三次鑄造都有夾渣、縮松、縮孔等缺陷。在總結了前三次的經驗並採取改進措施後，第四次終於成功了，這說明了葉輪的鑄

造工藝也完全是可以掌握的。

2. 退火後葉輪的機械性能和主軸相近。

3. 經過機械加工、金相分析，說明了它的球化良好，組織均勻。

4. 試驗前經過超聲波內部探傷，沒有發現任何缺陷，用磁力探傷除發現輪廓部分有小點縮松外，一切良好，肯定可以運轉。

5. 葉輪設計轉數是 3000 轉/分。在超速 3200—3600 轉/分運轉 16 分鐘，其最大圓周速度 161 公尺/秒，最大應力 1950 公斤/公分²，（試驗時輪上裝有重 100 克、長 90 公厘的葉片 240 片）。試驗前後測量平衡孔尺寸沒有發生變形；試驗後又進行一次磁力探傷，和試驗前比較証明沒有產生任何新的缺陷，試驗工作全部成功，推翻了所謂鑄鐵只能在圓周速度小於 8 公尺/秒的條件下工作的陳規。

這次試驗工作証明了用球墨鑄鐵來制造汽輪機主軸和葉輪（轉子部分）是具有很大的現實性，而且打破了對用球墨鑄鐵制造汽輪機轉子的保守觀點。

但是，這一新的嘗試還僅僅是一個開端，還有待於在運行機組上繼續試驗，由於時間關係，沒能在我校試驗電廠加以實現，所以建議有關單位能加以採納，盡速試制汽輪發電機組作運行試驗，以便普遍推廣，這對全民性辦電力起着重要的作用。

第二章 汽輪機轉子的工作條件及對材料的要求

汽輪機轉子是汽輪機非常重要的元件之一，它主要的責任

是把蒸汽的能量傳遞給發電機。常用的汽輪機轉子結構形式有三個組成部分：葉片、葉輪和主軸。葉輪是採用熱套方法，一個一個的套在主軸上；葉片是一片片裝在葉輪輪緣的凹槽內，如圖 2—1 所示。

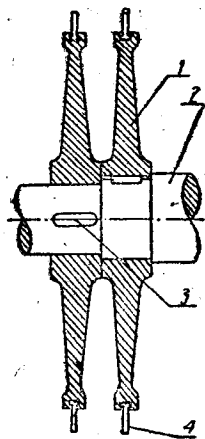


圖 2—1

1—葉輪； 2—主軸；
3—鍵； 4—葉片。

第 1 節 轉子的運行工作條件

整個轉子是處於高溫高轉速下工作的，當它把蒸汽能量傳遞給發電機時，轉子不僅要承受很大的扭曲應力，而且還要承受轉子自重所產生的彎曲應力。針對葉輪式轉子分析，主要可以分成兩部分——葉輪與主軸。

一、葉輪的工作任務與工作條件

汽輪機葉輪的工作任務是將工作葉片的轉動力矩傳遞到主軸上去。葉輪是在以下的工作條件下運轉的：

1. 在較高溫度的蒸汽中運轉（中小型汽輪機的蒸汽溫度一般低於 400°C ）；
2. 承受巨大的離心力；葉輪經常處於高轉速轉動狀態，它的半徑又很大，所以由於轉動而產生的離心力是相當大的，所承受的應力可達 2000 公斤/平方公分，或者更高一些；
3. 承受轉動時振動所產生的反覆應力；
4. 承受蒸汽的機械磨損與化學性侵蝕作用；葉輪是在高速蒸汽流中工作的，不可避免的會產生磨損與受“潮”的侵蝕作用。

二、主軸的工作任務與工作條件

主軸的工作任務是傳遞扭矩與支架葉輪。汽輪機主軸是在以下的工作條件下運轉的：

1. 承受葉輪與主軸的自身的重量所引起的反覆應力；
2. 承受溫度變化的熱應力作用（即由溫度為 $50^{\circ} \sim 80^{\circ}\text{C}$ 的軸端軸承處變化到溫度為 300°C 左右的第一級葉輪處所引起的熱應力作用）；
3. 承受轉動力矩與振動應力；振動應力是由於轉子在轉動時產生的自然振動所引起的應力。

第2節 轉子材料的要求

針對汽輪機轉子的運行工作條件及一般經驗，認為中小型汽輪機轉子材料一般採用 45 號鋼及 45H（鎳鋼）。具體要求見表 1。

轉子材料的技術要求

表 1

用途	機械性能	抗拉極限 σ_B 公斤/公厘 ²	屈服極限 σ_T 公斤/公厘 ²	延伸率 δ %	断面收縮率 ψ %	冲击值 α_K 公斤/平方公分	弯曲角
汽輪機主軸		52	23	13	40	4	150°
葉輪		57	32	12	35	4	120°

從表 1 中可以看出，汽輪機葉輪和主軸要求強度和延伸率都很高，只有中碳鋼才能達到汽輪機。常用的合金鋼（例如 40x、45x、50x）其延伸率僅有 8—9%，所以提出 $\delta=12-13\%$ 顯然是偏高了。根據制造廠老師傅們的意見和一些運行經驗證明，延伸率能達到 7—8% 就可以了。

第三章 球墨鑄鐵的一般介紹

第1節 一般介紹

在鐵水中加入少量的鎂，就可以使鑄鐵起質的變化而成為高强度的球墨鑄鐵，它的機械性能接近鋼，而鑄造性能又接近鐵。它所含的石墨是球形的，和普通鑄鐵里的片狀石墨不同。普通鑄鐵性質較脆，不能經受長期的高熱和強大的拉力、張力；球墨鑄鐵由於把片狀石墨變成球形，因此，它具有耐拉力和伸長率的優點，因而可以代替一部分普通鑄鋼、鍛鋼和可鍛性鑄鐵（馬口鐵）來制造機件。

球墨鑄鐵近年來已被廣泛地應用於機器制造、冶金工業、電力工業、建築工程、交通運輸業上。球墨鑄鐵在我國汽車拖拉機制造工業部門用得比較普遍，象曲軸、鍛模、軋輥等機件都已使用球墨鑄鐵；向來被人們認為承受交變與沖擊載荷而要求高韌性材料的鋼軌，經過清華大學的多次試驗，也可用球墨鑄鐵制造了，經過試車效果很好。

在蘇聯已把球墨鑄鐵的機械性能規定成國家標準（見表2），這充分說明球墨鑄鐵的機械性能已有了保證。

蘇聯國家標準 ГОСТ 7283—54

表 2

編 號	機 械 性 能 (不小於)				硬 度 H_B
	抗拉極限 σ_B 公斤/ 公厘 ²	屈服極限 σ_T 公斤/ 公厘 ²	延伸率 δ %	沖擊值 α_K 公斤- 公尺/公分 ²	
BЧ-45-0	45	36	—	—	187—255
BЧ-50-1.5	50	38	1.5	1.5	187—255
BЧ-45-5	45	33	5	2	170—270
BЧ-40-10	40	30	10	3	158—197
BЧ-60-2	60	42	2	1.5	187—255

一般文獻與實驗室數據見表 3。

實驗室一般數據

表 3

機械性能	低于中等塑性				高塑性	
	1	2	3	4	5	6
抗拉極限 公斤/公厘 ²	40	45	55	65	40	45
屈服極限 公斤/公厘 ²	32	36	44	45	30	30
比例極限 公斤/公厘 ²	28	32	40	40	28	27
抗彎極限 公斤/公厘 ²	60	72	100	110	70	85
楔形強度 公斤/公厘 ²	60	65	72	85	64	—
抗扭強度 公斤/公厘 ²	45	50	70	72	40	—
伸 伸 率 %	0.4—1.5	0.4—1.5	0.4—1.5	4.0—6	5—10	10—20
沖 击 值 公斤公尺/公分 ²	0.5—1.5	0.5—1.5	0.5—1.5	4.0—6.5	2.5—8	5—7
旋轉試件的 抗彎疲勞強度 公斤/公厘 ²						
光滑試樣	16	18	20	—	18	26
缺口試樣	14	15.5	16	—	16	—
試震性%	12	12	8.00	6.00	—	—

從國內一些廠家生產的球墨鑄鐵的機械性能看來，質量是較好的，有些已經超過了國際水平。從上海礦山機器廠生產的球墨鑄鐵的性能看來，機械強度與延伸率都是較高的（見表 4）。

自從清華大學鑄工車間生產球墨鑄鐵以來，球墨鑄鐵的抗拉強度極限最大達到 $\sigma_B = 82$ 公斤/公厘²，最小 $\sigma_B = 43$ 公斤/公厘²，一般強度極限都已達到 σ_B 大於 50 公斤/公厘²。此外，清華大學還曾經用一包鐵水作典型強度試驗，所得數據見

上海礦山機械廠球墨鑄鐵的性能

表 4

牌 号	鑄态机械性能		
	抗拉强度 公斤/公厘 ²	延伸率 %	硬 度 H _B
СПЧ—П—53	62—74	2.5—6	240—270
СПЧ—Ф—10	52—62	8—12	200—220

正火后的机械性能			退火后的机械性能		
抗拉强度 公斤/公厘 ²	延伸率 %	硬 度 H _B	抗拉强度 公斤/公厘 ²	延伸率 %	硬 度 H _B
85—97	2—4	285—302	—	—	—
—	—	—	47—57	12—23	160—166

表 5。

清華大學某一次球墨鑄鐵試驗數據

表 5

試驗次數	1	2	3	4
抗拉强度極限 σ_B 公斤/公厘 ²	46	43.3	43.3	45.8
断面收縮率 ϕ %	18.7	28	22.6	39
延 伸 率 δ %	18.5	20	21	25

根據球墨鑄鐵的性能，在高溫下（小於 400°C），它的機械性能是與鑄鋼相接近的，國外文獻記載數據見表 6。

表 6

球墨鑄鐵在高溫下的機械性能

試驗 條件 材料 名稱	溫 度							
	20°C				425°C			
	抗拉強度 極限 σ_B 公斤/公厘 ²	延伸率 δ %	短期載荷		長期載荷		短期載荷	
			抗拉強度 σ_B 公斤/公厘 ²	延伸率 δ %	抗拉強度 σ_B 公斤/公厘 ²	延伸率 δ %	抗拉強度 σ_B 公斤/公厘 ²	延伸率 δ %
鑄鋼 (CT 25)	58.2	21.3	40.6	23.8	20.8	22.4	25.4	24.8
П-球墨鑄鐵	59.7	1.2	52.9	7.2	28.5	10.6	37	11.1
Ф-球墨鑄鐵	44.1	15.8	35.9	14.6	22.2	6.2	22.8	15.2
П-Ф可鍛鑄鐵	49.6	2.2	39.2	4.8	20.8	6.9	24	5.8
Ф-可鍛鑄鐵	25.8	5.9	20.3	4.7	11.7	7.0	12.8	4.6
孕育鑄鐵	22.3	—	22.0	—	13	1.2	16.3	—
								7.0
								16.5
								11.9
								11.2
								7.9
								9.2
								0.9

第2节 球墨鑄鐵的性能綜合與存在的問題

從上面一系列的數據可以得出：球墨鑄鐵和碳鋼一樣，具有相似的抗拉極限和較高的耐磨性、減震性，彈性系數也相差不多。球墨鑄鐵的疲勞強度比鑄鐵和可鍛鑄鐵的高，低於鑄鋼，但是球墨鑄鐵的缺口敏感性比灰口鑄鐵和可鍛鑄鐵大，比鑄鋼低。

總結國內與我校生產的球墨鑄鐵的情況，一般球墨鑄鐵能達到的機械性能見表 7。

表 7

球墨鑄鐵種類 \ 機械性能	抗拉強度 σ_b 公斤/公厘 ²	延伸率 δ %	沖擊強度 公斤-公尺/公分 ²	
上海礦山機器廠生產的	47—57	12—23		
一般情況	45—50	8—15	無缺口	0.8—3
			有缺口 (縮形)	4—8

到目前為止，球墨鑄鐵尚存在以下一些問題。

1. 球化處理不夠穩定：鑄鐵中加入一定量鎂後，不能保證 100% 的片狀石墨全部成為球形。球墨鑄鐵的抗拉强度高，就是因為它的石墨是呈球狀的，所以說球墨鑄鐵的球化不穩定，就影响到機械性能也不能穩定。

2. 澆鑄不能完全保證無缺陷：有時在組織內部發生氣孔、砂眼、縮松、縮孔、黑點（即中間夾有細小的硫化鎂）等情況，這也影响球墨鑄鐵的機械性能。

總的說起來，目前球墨鑄鐵的機械性能不能象鋼一樣穩定。

不過這些問題正在逐步解決中，而且球墨鑄鐵鑄造生產經驗及研究成果交流會與實物展覽會，將要在沈陽召開，這標誌着在球墨鑄鐵鑄造方面將掀起一個新的技術革命高潮，相信在不久的將來會生產出更穩定與更高質量的球墨鑄鐵。

第2節 汽輪機轉子使用球墨鑄鐵的初步分析

從球墨鑄鐵性能試驗所取得的數據與汽輪機對材料所提出的要求來看，用球墨鑄鐵代替鍛鋼，從機械強度方面看來是可行的。上海礦山機器廠歷年所生產的球墨鑄鐵，它的抗拉強度在退火後已達到 47~57 公斤/公厘²，延伸率已達到 12~27%（汽輪機轉子對材料所提出的抗拉強度為 52~57 公斤/公厘²，延伸率為 12~13% 或更低一些），它們不僅滿足了強度的要求，也解決了球墨鑄鐵延伸率低的問題。當然，這是個別廠的生產情況，不過既然一個廠能作到，經過推廣和交流，相信其他廠也同樣能作到。因此，採用球墨鑄鐵製造汽輪機有很大的現實性。

任何機器在使用一種新材料前，都要經過慎重考慮，尤其是發電廠中的汽輪機，它是經常處在高轉速和高溫度下進行工作的，材料所受應力相當大，因此對安全的要求是很高的，一般都用鍛鋼或合金鋼作轉子材料。汽輪機如在運轉時發生破裂，將會造成極大的危害，設備與人身都要受到嚴重損傷。所以在選用一種新材料時，一定要經過詳細分析，試驗證明無問題後方可採用。

試驗分兩部份作：主軸試驗和葉輪試驗。這兩部份實驗共同解決的問題是：

1. 汽輪機主軸與葉輪鑄造是否有缺陷，並積累鑄造經

驗；

2. 了解鑄體內部組織均勻性的情況，是否能滿足汽輪機的要求；

3. 作應力試驗，看其強度是否安全。

因此，特試制了1500瓩汽輪機的主軸和一個葉輪進行鑄造性能和強度性能的試驗。實驗結果，將在以下幾章里詳細分析。

第四章 汽輪機轉子鑄造方面的經驗、 質量檢查及金相分析

第1節 鑄造經驗

由於球墨鑄鐵存在着上面所講的一些缺陷，因此，在鑄造汽輪機主軸和葉輪時，就有一定的困難。保證鑄件的質量關鍵問題有以下幾點。

一、球化處理：我校用的是1.5噸三排風口冲天爐，原料為本溪低磷生鐵。球化處理使用純鐵鐘罩壓入法，加鐵重為鐵水重的0.4~0.5%；孕育處理的硅鐵應為鐵水重的0.4%。純鐵鐘罩壓入法如圖4-1所示。

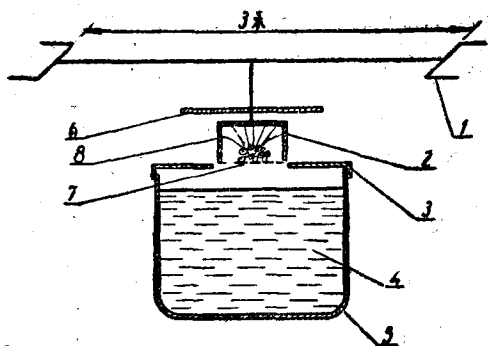


圖 4—1 鐘罩與鐵水包

- 1—壓桿把手；
- 2—鐘罩；
- 3—套筒；
- 4—鐵水；
- 5—鐵水包；
- 6—蓋罩；
- 7—鐵絲網；
- 8—鑄塊。

處理是在 800 公斤鐵水包中進行的。把碎塊純鎂用鐵絲捆住，綁在四壁塗有石墨塗料的方鐘罩里，鐘罩四周表面都打有圓洞（約 7、8 個）。

處理時，先出鐵水重 $\frac{1}{2}$ 左右於鐵水包中，用磅秤稱一下，蓋好蓋子將鐘罩壓入鐵水包中進行球化處理，接着再出第二次鐵水，同時加入硅鐵，然後用鐵棒攪動鐵水，起均勻作用，並加入少許冰晶石去渣。最後過秤，取三角試樣判定球化情況，準備澆鑄。

在球化處理中，主要控制以下四項：

(1) 控制出鐵量，使鎂的加入準確，不致因為對鐵水重量估計不正確而發生加鎂量變動的情況；加鎂分兩次，這樣可以提高鎂的回收率；

(2) 控制球化處理的鐵水溫度，一般應高些，但不宜太高，太高會使鎂蒸發過多而使回收率降低，也會影響球化效果；

(3) 為了保證延伸率，應該控制生鐵的含磷量，不使它過高。

(4) 控制鐘罩在鐵水中上下運動的方向，使鐘罩與鐵水表面保持垂直，否則鎂蒸汽逸散太快，回收率降低。可用圖 2 所示的壓桿兩邊的把手來控制上下垂直的方向。

我校原來採用無壓力加鎂法，最近又提出用壓力加鎂法，這樣可以大大節省鎂量，給球墨鑄鐵的推廣創造更有利的條件。

二、造型經驗：造型所用砂子的成分為新砂 30%，舊砂 50%，黏土 10%，煤粉 10%。首先根據零件的形狀造木模，一般採用刮板的方法來制造葉輪木模。

造完型後，送到室內或爐內燒干，規範為加熱 3 小時到 300°C，保溫 3 小時後進行煙火。如不按此生產程序時，只要保

証砂型烘乾即可。

1. 主軸的造型與澆鑄：主軸澆注方法是採用立澆，其砂型形狀如圖 4-2 所示。

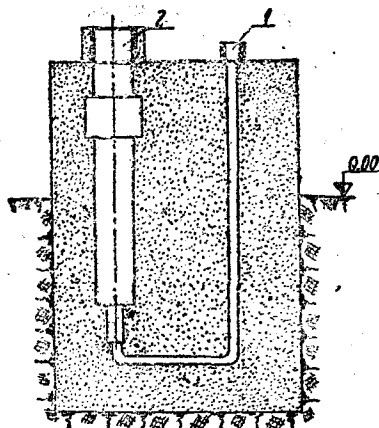


圖 4-2 立澆砂型圖

1—澆鑄口； 2—冒口。

沿軸中心綫作分型面。

立澆是把砂箱立起來，約有 $1/2$ 埋在地下，澆滿鐵水後再添冒口，在型中冷卻。立澆的結果是軸的鑄件質量很好，軸總長為 2 米。這充分說明了立澆是保證主軸質量的有效方法；不過若軸太長，造型也有困難。

立澆的好處是：易於排除鐵渣，使其能暢快的浮在冒口處，且立澆有鐵水靜壓力，使軸內部組織緊密。

2. 葉輪的造型與澆鑄：葉輪是一個直徑相當大（864 公厘）的圓盤，其毛坯厚度為 40~60 公厘。困難在於防止輪面上存留鐵渣。澆鑄時保證鐵渣暢快的從冒口中流出，不使積在砂型內部和輪體表面，這是保證質重的關鍵。