

水管式蒸汽鍋爐 因循環破壞所發生的故障

蘇聯 姆·符·密克里雅爾著

燃料工業出版社

水管式蒸汽鍋爐 因循環破壞所發生的故障

蘇聯 姆·符·密克里雅爾著

羅 仲譯

燃料工業出版社

內 容 提 要

水管式蒸汽鍋爐的循環迴路，由於其中流體的流動、分佈等情況不適宜，會發生種種故障。本書就此一方面用一些系統化的材料加以說明。這些材料，對發電廠工作人員及鍋爐製造工廠的工作人員在提高動力設備的運行可靠性方面，應該是有幫助的。

水管式蒸汽鍋爐 因循環破壞所發生的故障

ПОВРЕЖДЕНИЯ ВОДОТРУБНЫХ ПАРОВЫХ КОТЛОВ
ИЗ ЗА НАРУШЕНИЯ ЦИРКУЛЯЦИИ

根據蘇聯國立動力出版社(ГОСЭНЕРГОИЗДАТ)

1952 年莫斯科俄文第一版翻譯

蘇聯 М. В. МЕЙКЛЯР 著

羅 仲譯

燃料工業出版社出版

廠址：北京東片安海路燃料工業部

北京市印刷出版登記證出字第012號

北京市印刷一廠排印 新華書店發行

編輯：朱雅軒 劉玉枝 校對：趙保玲

書號 470 電 204

787×1092 $\frac{1}{2}$ 開本•4壹印張•90 F字•定價(8)六角八分

一九五五年七月北京第一版第一次印刷(1—2, 100冊)

原 序

本書中討論的是帶自然循環的水管式蒸汽鍋爐的循環迴路中流體的流動及分佈問題；這類問題的形式很多，包括的範圍也甚廣。本書着重研究有關水在鍋爐內循環的問題，因為在運行中由於流體的流動及分佈不適當所引起的絕大多數故障和事故，都與不正確循環有關。

作者收集了許多具體實例，這些實例說明了水管式蒸汽鍋爐循環迴路中由於流體的流動及分佈不適當而發生的種種故障及事故的特點。這些實例中的一部分係自有關文獻中摘出，而另一部分則尚屬初次發表。

本書除包括有關現代蒸汽鍋爐（其中也有若干是關於高壓蒸汽鍋爐的）運行的資料以外，也敘述了一些有關老式鍋爐運行特點的知識。作者不能不討論這一方面的資料，因為直到現在為止，在許多工業企業內仍有一些舊式結構的蒸汽鍋爐在運行着，而關於用什麼方法來改善它們，並不是總能從技術參考書中找到實際建議的。

關於個別問題，作者不能不講明，直至現在還存在着各種不同的意見；這些意見在各部門知識迅速發展的條件下都是完全合理的。譬如，直到現在關於「內部」中空現象（蘇聯中央鍋爐汽輪機研究所稱之為「熱」中空現象）對於鍋爐危險性的問題，尚未得到解決；還有關於當鍋爐汽壓迅速降低時降水管中的「沸騰」究竟產生何種實際影響，也是一個未得到解決的問題。毫無疑問，這一類問題，在最近幾年中

一定會獲得解決。

作者對於所有列舉的故障實例，均儘量引述一些用以消除所敘述的不正常情況的具體建議。這些辦法都是比較簡單的屬於調整性質的措施，依靠電廠本身的力量即可實行。

本書可供廣大的熱能工作者、工程師及技術員參考。

目 錄

源 序

前 言	4
第一章 水管式蒸汽鍋爐中爐水自然循環過程的實質	9
1. 熱量由煙氣傳給流過管中的液體	9
2. 循環示意圖及其計算	14
3. 膜狀汽化	28
4. 循環的參數	30
第二章 水管式蒸汽鍋爐由於循環不良而發生故障的 實例	33
5. 汽水混合物的分層現象	33
6. 低循環速度與結渣的關係	45
7. 水在各管中分配得不均衡；汽與水在管中的反方向運 動	48
8. 管內的自由水面	66
9. 中間聯箱以上的管子內不穩定的循環	80
10. 裝有短路管的水冷壁中的不良循環	85
11. 循環迴路中流體的流動情形不適當是形成環狀裂縫的 一種原因	96
12. 循環迴路降水管中的中空現象	105
13. 鍋爐氣壓急劇變化時循環可靠性受到破壞	112
14. 汽水分離裝置的結構不正確所產生的影響	124
結 論	129
譯後記	136

前 言

沙皇俄國在 19 世紀下半期水陸蒸汽動力運輸事業的發展，以及在 19 世紀末期固定蒸汽設備的發展，是以大型和小型機器製造工廠的小型蒸汽鍋爐生產的增長為先決條件的。

當時工廠很多，特別是小型工廠，但其中有一些並不是專門製造鍋爐的；而另外有一些往往是屬於外國資本的，他們對發展俄國的鍋爐製造事業並不感到興趣，因此所製造出的鍋爐經濟性小，質量也不高。腐朽到極點的沙皇專制制度本身就妨礙了生產力的發展，也不可能保證俄國鍋爐製造工業的建立。外國帝國主義國家，像英國、德國、法國等首先利用了這種情況，將自己陳舊了的產品賣到俄國來。僅在偉大的十月社會主義革命勝利以後，蘇聯的機器製造工業，其中包括鍋爐製造工業，才有了大規模發展的可能。

我們知道，蒸汽鍋爐的運行可靠性在很大程度上決定於所安排的爐水循環方式的正確程度。但是在動力設備中採用蒸汽的最初階段，對爐水循環問題所給予的注意是不夠的，這是由於那時蒸汽鍋爐的運行經驗不夠，蒸汽發生過程也研究得少的緣故。因此初期的蒸汽鍋爐自然是有着許多缺點的，而革命以前各外國公司出售給俄國的鍋爐，毛病與缺點更多。

一百年以前，參加過謝瓦斯托波里(Севастополь)戰役、歷史上有記載的「弗拉基米爾」戰艦艦長伊·格·布塔柯夫(И.Г. Бутаков)在估量裝置在船上的具有明顯缺點的英國製

蒸汽鍋爐時曾寫過：「這些在 1853 年本應換去的鍋爐，現從它們 1855 年的航行成績上看，我們可以信任它們的堅固性還沒有完全消損。具有豐富的實際知識和經驗的俄國工程師和機械士們就能夠如此地維持着這些鍋爐。我敢有信心地講，沒有一個曾在我們這裏服務過的英國機械士，是能夠和敢於用它們來航行的。」

1900 年阿·普·噶符黎列柯 (А. П. Гавриленко) 教授在他所著的書裏討論到各種各樣的外國鍋爐的結構時寫道：

「其中大多數鍋爐出現的原因是爲了要躲過以前所已經出品的鍋爐的專利權」。所有這許多在作廣告時曾說是「技術上的最新成就」的鍋爐系統，因其製造動機實際上是遠離科學的，所以都需要加以不同的改造。

進一步仔細地研究鍋爐內部所發生的各種過程，並擬定出方法來提高它們的運行可靠性的任務，引起了當時許多俄國先進工程師們的注意。當時發現到，要使受熱面工作可靠，必須使爐水不斷地保持着環行運動。有時當鍋爐內的水不能保持這種運動時，或當這種運動進行得不正確時，沸水管會發生過有起疱甚至爆炸的情形。在爐管內表面清潔時有時也發生故障，所以發生事故的原因不能用水垢的影響來解釋。並且，這種管子燒損情形不但是在將近水平的管子上發現，而且在垂直的管子或幾近垂直的管子上也發現，在這些管子內似乎蒸汽泡本應可以無阻碍地離開而上升的。當時對水與汽在水管式蒸汽鍋爐內的運動情形最關心研究的是一般在海軍裏工作的工程師們，因為在那些年代裏戰艦上的蒸汽鍋爐的工作強度甚大，工作條件極複雜。1893 年，工程師符·斯·薩佐諾夫 (В. С. Сазонов) 初次得出了決定在管內任何

截面處汽水混合速度的方程式，此速度與管子的熱負荷及該截面距離蒸汽開始發生點的距離有關。他注意到蒸汽在管內的上升速度一定較水為快，並且指出，「恐怕只有用實驗才可以」求出蒸汽的相對速度。

1897年1月工程師阿·波郭勤(А. Погодин)在海軍工程師協會作了兩個關於水在蒸汽鍋爐內的環行運動的報告，作報告時並曾用實際模型作說明。波郭勤完全正確地說明了此種現象的實質，並得出了第一個關於該過程的數學公式。

諸如此類的理論探討，是與為數甚多的用來改善爐水環行運動條件的實際措施平行進行的。保證這種環行運動（循環）的問題，在大家所公認的符·格·舒霍夫(В. Г. Шухов)所發明的鍋爐中得到了完善的解決。關於改善構造繁複的外國鍋爐中水循環的工作，就中我們可以注意符·雅·陀郭連柯(В. Я. Долголенко)在彼得堡巴季斯克工廠(Балтийский завод)所進行的對別利維里雅(Бельвиля)蒸汽鍋爐的根本性改製工作。當時此種鍋爐是用於戰艦製造的。若以陀郭連柯鍋爐與別利維里雅鍋爐相較，則陀郭連柯鍋爐中沸水所流經的長度較後者要縮小一半。汽水混合物所受到的流體阻力適當地減小了。陀郭連柯的鍋爐曾以「陀郭連柯-別利維里雅」鍋爐的名稱安裝在許多俄國及法國戰艦上，它們勝過最初外國鍋爐構造之處在於它們有較簡單的循環系統及更大的運行可靠性。

最初的關於計算循環的完整方法是出現在本世紀的20年代，當時曾刊載過符·阿·卡利雅金(В. А. Карякин)及克·阿·茹拉夫列夫(К. А. Журавлев)二人所作研究工作的文獻。由於俄羅斯熱工學所發展到的高度水平，以上所述的以

及其他一系列的理論性的探討工作是自然會發生的。當時爲了正確而合理地解決水在水管式蒸汽鍋爐內環行運動的問題，必須進行更廣泛的試驗研究，這種試驗研究工作在蘇聯革命以前的條件下是不可能達到其應有的程度的；只有在現代才能實現，因爲黨和政府特別關心蘇聯科學的繁榮發展。當時必須自對運行鍋爐的推測工作及觀察工作，以及對假定的規律進行數學分析的工作，轉而進入對這些過程進行數值的測量，無論是在工業鍋爐中或是在實驗室設備中。

這項任務當時必須在盡可能縮短的期限內解決。這是爲了滿足蘇聯社會主義國家工業化的需要，爲了滿足按天才的斯大林五年計劃發展的强大工業的需要。在第一個五年計劃時期，具有水冷壁的壓力較高的大容量蒸汽鍋爐得到了廣泛的採用；它們在新的用高度技術裝備的工業企業中運行。鑑於最後這個情況，任何由於流體流動不適當而引起的強迫停爐故障都是完全不容許的。這個關於保證循環可靠性的問題，蘇聯許多研究所在發電廠及鍋爐製造工業的工作者們緊密合作之下真正地將它綜合地解決了。

以捷爾任斯基（Дзержинский）命名的全蘇熱工研究所（ВТИ）第一個開始研究鍋爐內水循環的問題。1929年阿·格·柯羅聶夫斯基（А.Г. Короневский）所發表的循環計算方法在原則上與那些較舊的計算方法區別不大，其中各種量的數值問題同樣地也未解決。但計算技術已大大地被簡化了，且許多熱工技術人員已都能進行實際工業計算。柯羅聶夫斯基的計算方法是初期的一些循環研究工作中最後的和最重要的一個。所謂初期即指在以試驗方法作蒸汽鍋爐內循環研究以前的時期。在柯羅聶夫斯基的計算方法中已經有了第二階段

的一些因素；例如，對水冷壁聯箱流體阻力的決定是以特種的模型試驗為基礎的。

進一步對循環的研究首先是依靠大量詳細的和多方面的試驗探討工作。由於這些試驗探討，關於液體在鍋爐內部流動的種種特點的概念才能大大發展。這些試驗在蘇聯動力工程轉入採用高壓高溫蒸汽的時候，充分地顯示了它們的意義：儘管高壓蒸汽有着一系列的顯著的特點，但由於循環所發生的事故和故障的次數並不多，且在頗大程度上都可用偶然性質的理由來解釋。這些試驗工作在本書第一章中有較詳細的討論。

第一章 水管式蒸汽鍋爐中爐水自然循環 過程的實質

1. 熱量由煙氣傳給流過管中的液體

在任何情形下，管壁溫度都是介於給出熱量的煙氣溫度和得到熱量的爐水溫度之間的。要使鍋爐正常地工作，必須使管子的溫度非常接近爐水的沸點溫度。由金屬傳熱給液體的各種條件在這一點上有着最重要的意義。

假若管子內表面上有絕熱的水渣層或水垢層而使傳熱發生困難，則管子金屬的溫度就要升高。我們基本上是應從改善鍋爐給水制度上來與水渣及水垢的沉結現象進行鬥爭的。但是，像在以後所舉的一些例子中將講到，水渣的沉結也與爐水流動情形有關。爲了防止水渣沉結，爐水應以不太慢的速度流動（見第45頁）。

要使受熱面的工作可靠，首先的而且也是必要的條件，即受熱面上應沒有水渣或水垢存在。但即使受熱面上沒有水渣和水垢，管金屬的冷卻程度仍可能不同。

假定 α_1 ——自煙氣到管壁的散熱係數，以大卡/公尺²小時^{°C}表示之；

α_2 ——自管壁到液體的散熱係數，亦以大卡/公尺²小時^{°C}表示之；

λ_1 ——金屬的導熱係數，以大卡/公尺小時^{°C}表示之；

λ_2 ——水垢的導熱係數，以大卡/公尺小時^{°C}表示之；

S_{mp} ——管壁厚度;

S_n ——水垢層厚度。

則每經一平方公尺受熱面積所傳送的热量等於:

$$Q = \alpha_1(T - t_{cm}^e) = \alpha_2(t_{cm}^e - t) = \frac{\lambda_1}{S_{mp}}(t_{cm}^n - t_{cm}^e) \\ = \frac{\lambda_2}{S_n}(t_{cm}^e - t),$$

式中 T 及 t ——分別為煙氣及液體的溫度, $^{\circ}\text{C}$;

t_{cm}^n 及 t_{cm}^e ——分別為管壁外表面及內表面的溫度,
 $^{\circ}\text{C}$ 。

金屬外表面及內表面間的溫度差決定於水垢層的絕熱影響。

我們研究一下最簡單的情形, 即當水垢層沒有時:

$$t_{cm} \approx \frac{\alpha_1 T + \alpha_2 t}{\alpha_1 + \alpha_2}.$$

由此公式可見, 若 α_2 愈較 α_1 大, 則管壁溫度 $[t_{cm}]$ 愈近於液體溫度。在極限情形下, 若管壁至液體的散熱係數如此大, 以致在計算時另一係數 α_1 可以略去不計, 則管壁溫度為:

$$t_{cm} = \frac{\alpha_2 t}{\alpha_2} = t.$$

因此, 要想使鍋爐工作得可靠, 就必須保證有足夠大的由管壁至液體的散熱係數 α_2 的數值。

當研究自金屬傳熱至液體的各項條件時, 發現那些以前應用於水加熱過程的熱傳導定律, 現在不能整個地搬來適用到水正在管中汽化的情形上去。關於水沸騰時的熱傳導過程的詳細研究工作, 完全是在不久以前開始的, 現在還遠未完

畢。以前的一些理論曾斷定說，當水與管壁接觸時蒸汽就直接形成；但在現在所已進行了的一些試驗研究工作，已能證明這些未經過足夠實驗所審查的理論底不正確性。

有一點可認為是已經確定了的，沸水總是稍微過熱的，也即是說，沸水的溫度較所形成蒸汽的溫度稍高。這種過熱在厚水層中總共只零點幾度，且當金屬表面光滑時比粗糙時過熱程度要高一些。水溫顯著增高處僅是在厚約數公厘的邊層中發現。

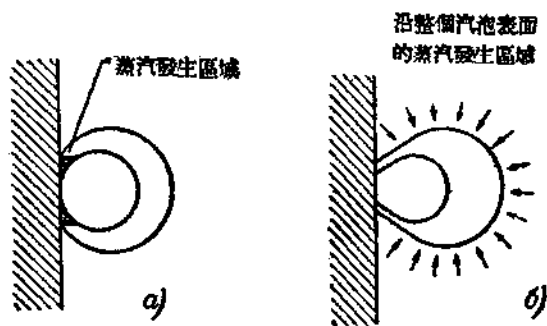


圖 1 汽泡形成情況的示意圖

a—過去的不正確的示意圖；b—現在的示意圖。

箭頭指示的為從水到汽的傳熱方向。

蒸汽並非產生在所有的受熱面上，而僅產生在那些所謂汽化中心處。這種中心即金屬表面的粗糙處所。當熱負荷增大時，汽化中心的數目就增多。從汽泡體積增大直到它們脫離受熱而為止的過程，並非是水在受熱壁本身上的汽化，而主要是水從汽泡邊層上的汽化，這一種情況有着很重要的意義。因此，如圖 1b 所示，蒸汽泡的「腳」並不大，它在蒸汽形成時的傳熱過程中沒有什麼特別的意義。

汽泡的長大基本上並不是在受熱面本身上進行的，而是沿着汽水分界線上進行的。此時溶於水中的鹽類，僅以極小的顆粒自未飽和溶液中沉澱出來。自潔淨的金屬表面向沸水散熱的散熱係數 α_2 是很大的，約為數千大卡/公尺²小時°C。實際上，此時水無論以那種速度流動，都可以保證管壁應有的冷卻。

假使管壁上因為某些原因開始附有蒸汽，情況就改變了。因為自管壁向蒸汽的散熱係數要小得多，且蒸汽速度的大小對此散熱係數的數值影響很大。此係數可取作與蒸汽速度的 0.8 次方成比例。假使受熱管壁上附有靜止的或流動得緩慢的蒸汽，受熱面的工作就成為不可靠而且危險的了。可以肯定，只有當汽水混合物在管內流動，管壁上不間斷地有水附着的情形下，金屬才能完全令人滿意地冷卻。

專門的研究工作曾指出，大多數情形下這個條件是完全被遵守着的。甚至當汽水混合物中的含水甚少時，管壁上仍然存在著薄的水膜。差不多每個測量都指出，當汽水混合物穩定地向一個方向流動時，管壁的水冷卻總是令人滿意的。

關於闡明水與汽共同運動的各種特性，全蘇熱工研究所 (ВТИ) 阿·阿·亞爾曼德 (А. А. Арманд) 曾進行過詳細的試驗。他研究了變相流體運動的特性——研究水及空氣泡在水平的內徑為 26 公厘的黃銅管內流動的情形。雖然他作這些試驗時用的不是汽水混合物，而是氣水混合物；但這些試驗指出了，氣水混合物的某些特性 (例如它的流體阻力) 與汽水混合物的各對應特性是相當一致的 (在汽水混合物壓力低於 10 個大氣壓的條件下)。

按照全蘇熱工研究所的資料，變相流體的運動，可以按下

列的四種方式中的一種進行：

1. 水浸濕管壁的全部，空氣泡雜在水流中間運動。這些空氣泡的大小可能一樣，也可能不一樣——有很小的和很大的。

2. 槽流，即分流，作此種流動時水是在管內的下部流動，空氣在水面上流動。這種形式的流動，僅可能發生在水流速度不大及氣相（指空氣或蒸汽）的體積濃度較小的時候。

3. 同心流，此時水在管壁上形成一層薄膜，而空氣在管中間流動。

4. 與第三種一樣，但空氣中帶有一些水滴。

全蘇熱工研究所的試驗是在方式變動範圍極廣泛的條件下進行的，所以能認為以上所述的四種流動方式，已包括了一切實際中所可能遇到的情形。在第一、第三及第四種運動的形式下，管壁上附有水，而空氣在流體中間流動。雙相流體運動的這三種形式從受熱面工作可靠性的觀點來說，是能完全令人滿意的。它們確實存在着，直到氣水混合物中的空氣含量幾乎達 100% 時，仍可能有。

按照符·符·波密藍采夫 (В. В. Померанцев) 和斯·恩·守爾金 (С. Н. Сыркин) 二人的觀測，可以認為，全蘇熱工研究所的試驗（除第二種流動方式外）不僅能表明在水平管內流體流動的特性，也能說明在垂直管及傾斜管內流體流動的特性，其時管壁上有一層水附着，蒸汽則在流體中間流動。

關於第二種流動方式的研究工作，蘇聯中央鍋爐汽輪機研究所曾作了較詳細的試驗。這些試驗指明了，當汽與水在管內作「槽流式」運動時，金屬溫度有時會升高到 500°C 以

上。

因此知道，當汽水混合物在管內穩定地作一致性的運動（汽與水向同一個方向流動）時，事故僅可能發生在流體以第二種方式流動的時候——即當流體在水平管內流動且汽與水的速度很小時。然而，並不是在所有的情形下流體都是穩定的作一致性的運動的。

下面將較詳細地談到，浸濕管壁的水膜有時會破裂。例如，當水與汽在管內向不同方向流動時，這種水膜破裂的情形就會發生。所以，汽水混合物非一致性的流動（向不同的方向流動）能够引起爐管的燒損。實際上發生過的爐管故障，絕大多數並不是因汽水混合物的「槽流式」運動而引起，而是由於在各種不同的情況下雙相流體的穩定性遭受了破壞所致。

爲了確定在什麼條件下受熱面工作的可靠性能得到保證，管金屬能得到冷卻，就必須了解水與汽在蒸汽鍋爐內的各種運動規律。這種運動中的最重要的一種形式，就是水在閉合迴路中的流動（循環）。在大多數現代的蒸汽鍋爐中，這種流動是依靠鍋爐內部的運動力來完成的。

2. 循環示意圖及其計算

圖 2 是蒸汽鍋爐水冷壁中水與汽運動的示意圖。

按此簡化圖所示，汽化僅發生在燃燒室的水冷壁管（圖右）中。

在其餘管中，即在降水管中及兩汽鼓之間的連通管束中，水不受加熱作用。因此可以將鍋爐內部彼此相聯的管子比作兩部分連通着的容器，這兩個容器內有兩種不同的液