

工業企業車間 內的熱濕傳播

П. И. 安德烈夫著

金岡譯

紡織工業出版社

工业企业車間內的热湿傳播

П. И. 安德烈夫著

金 岡 譯

沈 祖 昂 校

紡織工業出版社

Распространение тепла и влаги в цехах промышленных предприятий

П. И. Андреев

Государственное издательство литературы по
строительству и архитектуре
Москва—1955

本書專供從事設計和研究工業企業通風系統的工程師用。

書中闡述工業企業車間內熱濕傳播的規律。根據現有的計算車間
上下部熱濕吸收的公式，介紹生產過程中有散熱和散濕的車間的通風
計算方法。

技術科學候補博士 B.B.巴杜林校閱

工業企業車間內的熱濕傳播

П. И. 安德烈夫著

金 岡 譯

沈 祖 勛 校

*

紡織工業出版社出版

(北京東長安街紡織工業部內)

北京市書刊出版業營業許可証出字第16号

五十年代表印刷厂印刷

*

787×1092 $1/32$ 开本·5 $10/32$ 印張·107 千字

1958年8月初版

1958年8月北京第1次印刷·印數0001~1050

定 价 (10) 0.76 元

目 錄

序言.....	(4)
第一章 大气中及車間內紊流交換的基本概念.....	(15)
第二章 散热散湿車間通風計算的基本公式.....	(26)
第三章 影响車間內热湿傳播的主要因素.....	(36)
第四章 車間內热量和水汽的吸收.....	(44)
第五章 系数 α_n 及 β_n 的实驗数值与理論数值的比較...	(87)
第六章 在有部分热源和湿源位于工作地帶之上的情况 下車間內的热交換和湿交換.....	(99)
第七章 在各种不同通風系統的条件下車間內的热交換 和湿交換.....	(118)
第八章 散热散湿車間的通風計算法.....	(145)
参考書	(170)

序 言

1. 本書目的在於確定生產過程中有散熱和散濕的各個工業企業部門現有的通風計算方法。本書對車間內熱濕傳播方面所做的某些結論，在研究車間內氣體污染質傳播時亦可運用。

車間內熱濕傳播的物理本質已在 B. B. 巴杜林、E. B. 庫特良采夫以及其他作者的著作中予以闡明了。

在 B. B. 巴杜林的許多著作中所列舉的車間內熱傳播方面的實驗資料，有的是他自己求得的，有的是引用其他文獻中的資料。但是有關車間內熱濕傳播方面的問題還遠沒有研究徹底。進一步的研究和作理論總結主要要在實驗室和生產中實驗的基礎上繼續進行。

由於車間內熱濕傳播的問題是既複雜而又多方面的，因而至今還未全部確切地得到解決。可是這個問題在實用上却迫切需要，所以即使是得到近似的解決也可以明確一部分在設計和研究通風時的計算問題。

如通曉車間內熱濕傳播的規律，便有可能求出送入車間的空氣在工作地帶範圍內吸收的熱量和水汽，同時也可以用最合理的方法解決在工作地點造成合適的氣象條件的問題。因此，尋求這些規律的目的，不僅是為了要在車間工作地帶內造成良好的衛生條件，而且是為了使通風系統的設計和製造做得更經濟。

目前，在紡織工業部門和某些其他工業部門計算通風時，通常都採用無維系數 α 和 β 來表示送風在工作地帶內吸收熱量和水汽的數值與車間內吸收散熱和散濕的總數之比。

在通過車間的空氣的紊流中，送風從送風裝置（吊風口、送風筒等等）出風口流出空氣的地方到車間排出廢氣的地方這一段路程中，繼續不斷地吸收生產過程中散發出來的熱量和水

汽。所謂繼續不斷的意思，就是指送入車間的全部空氣的平均吸收過程而言的。當各部分送風經過散熱面和散濕面時，在某一個時間內，它們的含熱量和含濕量大大增加，而以後與其他部分的送風混合時，便減小至這一部分空氣或這一空氣層所具有的平均值。空氣的混合與其性質的均一化，主要是在紊流熱傳導和紊流擴散的影響下進行的，因為在紊流中分子熱傳導和分子擴散與紊流混合相比是微不足道的。

通過車間的送風的平均含熱量和含濕量，由於吸收熱量和水汽的緣故發生變化。當將空氣送至車間下部而從上部排出廢氣時，在車間內沒有熱源和濕源的地方向上移動的空氣的含熱量和含濕量的平均值是隨高度而增加的。知道了這個增長的規律，就可以求出工作地帶平面上的空氣參數，並可求出係數 α 和 β 的數值。

有些作者曾經提出過表示係數 α 和 β 的函數關係式。但是這些純粹屬於經驗性質的公式，不能認為是有足夠根據的，因此，在實際計算中這些公式沒有得到廣泛的應用。而目前要求得係數 α 和 β ，仍不得不運用尚待作理論總結的不完整的經驗資料。

本書根據紊流交換的原理，也介紹了求係數 α 和 β 的公式。把根據這些公式求得的係數 α 和 β 的數值來和主要在研究紡織廠通風設備運轉時所得的實際資料相比。這樣就會看到進一步比較的結果，而說明這些公式是可以在生產過程有散熱散濕現象的許多車間的通風計算中應用的。

當然，對所要研究的問題進一步地進行理論研究和試驗研究，就可以對所得的結論作出重要的修正。進一步研究這個問題時，正如E.B.庫特良采夫所指出，如果通風過程的模型試驗能夠完全反映實際生產條件的全部情況，那麼它就能起相當重

要的作用。許多研究工作者所求得的自然对流热交換起主要作用的通風气流模型試驗的資料，只能用来求某些車間（譬如热車間）內热湿傳播的規律性。對於紡織工業的大部分車間和其他工業部門的类似車間來說，用自然对流起主要作用的热湿傳播並不具有代表性。在这些車間內，如果热源和湿源的能量不大，通風設備、生產机器、運輸裝置等等的作用所造成的強力对流的气流，以及因热源湿源的影响而形成的自然对流的气流的相互作用，對於热交換和湿交換就有很大的影响。A.H.賽里維爾斯多夫^①对細紗車間和織布車間內机器運轉所產生的气流進行了观察，虽然这些观察工作做得尚有許多缺点，但能証明：这些气流对車間內热交換的性質有顯著的影响。在这些車間內：热交換是在自然对流和強力对流的共同作用下完成的，而后者的影响一般是主要的。

在細紗、捻綫、絡筒、織布等車間以及类似的車間內，热源非常均匀地分佈在車間地面上，而且單位能量不大^②。在裝有運轉速度較大的机器的其他車間，譬如染色、漂練等車間內，除了有主要的能量小的热源湿源外，还有能量較大的热源和湿源。但不論在那種車間內，热湿傳播都是由強力对流的巨大影响和自然对流气流的相互影响來决定的。在这些車間內，生產設備運轉时散出來的热量和水汽，在大多数情況下都是在自然对流和強力对流的同时影响下雜乱地散播到車間各部分。

在其他生產車間，譬如干燥車間（裝有同一种形式的干燥

① 1951年第2期和第8期“紡織工業”雜誌中A.H.賽里維爾斯多夫所寫的論文。

② 所謂热源的單位能量，應理解為單位時間內从热源的单位傳热表面上散出的热量。在以后的敘述中，都把热源的單位能量当作是已知的，而且是一定的（与变化很小的周圍环境的狀態無關）。

設備)或是裝有火爐的熱車間內,熱傳播是在更為強烈的自然對流的影響下進行的,因為在這些車間內,通風氣流的速度對熱流的性質並不起決定性的作用。這裡熱源和濕源散發出來的熱流和水蒸汽的流綫,在大部分情況下多少是具有整齊的氣流形式。

純粹自然對流(自由的自然對流)的現象,只有在無限制的空間內和完全靜止的同種的周圍環境中才能出現。這種現象就是在大氣的條件下一般也是不存在的。在純粹自然對流的條件下,流過熱源的空氣被加熱並上升形成氣流,由於周圍空氣加入運動,氣流便逐漸擴大。此時,氣流的質點就不再返回到熱源上去了^①。

將密閉空間內的熱源沿着氣流四周佈置,便產生循環氣流,因此,氣流便由於周圍空氣與被熱源加熱的空氣質點的混合物而增強。假如在密閉的空間內有幾個熱源,那末混合將因熱流的相互作用而更加活躍起來。在後一種情況下,內部形成某一熱源對流圈的空間因相鄰熱源的影響而受到限制,因此,上升和下降的氣流都在積極混合相互干擾的條件下流動,以後關於這方面的敘述,將列舉若干實驗室研究的資料,根據這些資料可以判斷熱源分佈密度對混合過程的影響。在研究車間內熱濕傳播的時候,應該隨時注意熱流的相互作用,因為它對車間內熱量和水汽的混合程度,從而對係數 α 和 β 的數值有很大的影響。

當然,紊流是由於通風系統、機器等等的作用而產生的。

① 已經求得的自然氣流的紊流傳播和層流傳播可參看 1950 年建築工程出版社出版的 E. B. 庫特良采夫所著的“通風系統的模型試驗”及 1951 年國家外文出版社出版的, Л. 沒爾得里所著的“流體力學和體力學”。

在騷動的環境中，混合變得更加強烈，熱流不斷地改變方向發生彎曲，而騷動繼續增加就會使氣流的形狀破壞，使離開熱源的熱流變成雜亂無章，也就是說熱流將由無數被加熱的小氣流或者由各部分空氣團形成，這些小氣流或空氣團主要在強力對流的影響下具有拋物綫的形狀，並繼續不斷地改變方向，各自溶化於周圍空氣中^①。這種現象的產生，不僅決定於周圍環境的騷動程度和熱流的相互影響，而且也與熱源的能源有關。在車間的实际条件下，純粹只受自然對流影響的熱濕傳播是不會發生的；完全紊亂式的熱濕傳播同樣也是不會有的。所以，這里只能談談自然對流和強力對流的共同作用，以及究竟以那一種形式的熱濕傳播佔優勢。

因而，一般地說，所有的車間都可按熱濕傳播的性質，視強力對流與自然對流速度的對比關係劃分為許多組或類。但在進一步研究各種不同車間內熱濕傳播的性質時，就發現有這樣一個特點：在具有能源強大的熱源的大多數車間內，周圍環境的騷動比較少，反之，在有能源微弱的熱源或濕源的車間內，氣流在頗大程度上由於機器的作用，一般由於生產設備的作用而被擾亂。此外，在這些車間內，熱源和濕源佈置的密度往往要比具有強大熱源的車間大些。

因此，所有車間按熱濕傳播的性質大體可分為近於極限情況的兩類：紊亂式熱濕傳播佔優勢的車間以及雖然不可能有純粹的自然對流，但熱量和水汽還是主要以氣流式傳播，即多少是有秩序傳播的車間。“紊亂式傳播”^②應該認為是一個假定的

① A.B.雷高夫在國家動力出版社1950年版的“干燥原理”一書第二節和第三節中也說明了上述現象。

② 已經定名的紊亂式熱濕傳播可以稱為擴散的熱濕傳播。這個技術名詞應該認為是假定的，因為在所有情況下，車間內的熱濕傳播主要都是在紊流擴散的影響下進行的。

技術名詞，它是由於不知道車間內气流發展的規律而產生的。總之，上述因素對車間內自然對流的气流的影响是當通風气流的擾亂程度增加時，位於下部的熱源和濕源散出來的熱量和水汽的吸收數值將隨高度而變化，並在車間的下層內增加。

不論車間內熱濕傳播的性質如何，總是要產生循環气流的，因此熱源和濕源就會受到送風與循環空气的混合物的沖洗，但在气流式熱濕傳播時，循環气流則比較有秩序。

應該說明，這裡談到的只不過是影响車間內熱濕傳播性質的主要因素中的幾個因素。從下面的敘述中將可看到，譬如熱力分化、通風方法等因素，對於車間內的熱濕傳播也會造成巨大的影响。

在研究金屬加工工業熱車間和棉紡織工業細紗車間的通風效果時，可以證明上面將車間假定劃分為兩類的做法是合理和正確的。假定在兩種條件下，單位時間內車間單位容積的散熱量都相等。夏季兩個車間的通風設備都開放，通風量相同，並且熱源都位於車間下部，如果送風在送到細紗車間去之前，先在空气洗滌器內經過冷卻，那麼這兩個車間的工作地帶的空气溫度就可以差不多相同。如果沒有這個條件，那麼即使通風量和室外空气參數相同，細紗車間內工作地帶的空气溫度亦將高於熱車間的溫度。這是因為兩個車間內熱傳播的性質不同的緣故。在細紗車間內，送風吸收熱量的過程主要在工作地帶的範圍進行。在細紗車間內的觀察說明，工作地帶之上的溫度梯度通常等於零或者接近於零。而在熱車間內，熱量的吸收過程則沿着車間整個高度進行，而且平均的溫度梯度總是大於零。

細紗車間所以具有紊亂式熱傳播的性質是由於：一方面，熱源的能量不大，而且相互靠得很近地散佈在車間地面上；另一方面，有通風系統和機器運轉時造成的气流。而熱車間內的

热傳播，由於热源能量强大而且集中，主要具有气流式的性質。

今后將根据上述將車間分为兩类的原則進行問題的研究，但是这並不是說屬於其中某一类的各个車間的热湿傳播的性質都是完全相同的。譬如假定將車間分为兩类时，細紗、織布和染色这些車間都是屬於第一类車間，其性質为紊乱式的热傳播。但是在細紗車間和織布車間內，机器運轉所造成的气流對於热傳播性質的影响要比染色車間和相类似車間更大些。这个例子明确地說明所研究的問題是复雜的，並且徹底解决是不可能的。因而，按热湿傳播的性質將車間分为兩类时，实际計算所得的結果，並不一定就能准确地反映实际条件。車間內热湿傳播方面計算結果的精确程度如何，要看車間內热湿傳播主要性質的决定是否正确。

將車間按热湿傳播的性質分为兩类的条件性，在后面將詳細闡明。

值得指出，热傳播的性質在大气条件下同样有区别。M.И. 步寶科^①曾在露天研究过这个区别。与紊乱式热傳播不同的大气中热空气有規則的上升运动，称为“热力对流”。当然，在大气条件下現象的規模远比在車間条件下的規模要大。但是物理現象的本質在兩種条件下几乎是相同的。

2. 車間內的热交換不僅依靠对流，而且也依靠辐射热交換來实现。

当运用一般採用的公式計算机器設備的散热量或者建筑物外围結構的热損失时，不但要考慮到对流造成的傳热，同时也

① 見水文气象出版社 1951 年出版的 И.И. 托維爾斯基所著的“气象学教科書”第 372 頁。

要考慮到由於輻射造成的傳熱。不考慮任何熱交換型式的特點，就必然會在車間熱傳播的計算中造成許多不準確的地方。假如在車間內有表面溫度很高的散熱設備時，這些不準確的地方就可能會使車間內計算的空氣參數與實測的參數之間產生不能容許的誤差。

在紡織廠的車間以及相類似的車間內，不單獨考慮對流熱交換和輻射熱交換對於熱傳播的影響，也不會造成大錯誤，因為在這種車間內機器設備沒有高溫的傳熱表面。只有在某些情況下，才認為有分別研究對流熱交換和輻射熱交換的影響程度的必要。

3. 由於對像車間這樣大的密閉容積內的熱濕傳播還研究得很少，因此認為在某種程度上可以利用在有氣流熱力分層條件下研究大氣內空氣流動和熱交換時所獲得的理論和經驗。同時應該考慮到，雖然決定大氣內和車間內熱交換和濕交換的某些基本因素是相同的，然而在兩種情況下熱濕吸收的機構方面卻有着極顯明的區別。但是因為在氣象學方面對於異種氣流已經有過比較充分的研究，所以在研究車間內的熱交換時，可以在某種程度上運用研究氣象現象時所得到的熱濕傳播的規律性。

4. 由於車間內的熱交換和濕交換是一個複雜的問題，在解決這問題時必須規定一些限制條件，並採取簡化通風過程的手段。但是，採用這些手段，未必會比現時一般採用的通風計算更加脫離實際條件。

在開始時，求車間內熱濕傳播規律的任務，在於尋求並充分考慮影響吸收過程的基本因素。如果研究這個問題時有一些限制條件，那麼這個問題的解決就容易得多。

在作車間內熱濕傳播基本公式的結論時，最先採取的最根本的限制條件，就是假定空氣送至車間下部並從車間上部分散

地排出廢氣。我們認為這種通風方法，對於有散熱和散濕的車間，在大多數情況下是效果最好的。這一事實已經被伊萬諾沃勞動保護研究院及中央建築科學研究試驗館証實。但是，在作系數 α 和 β 公式的結論時，假定所採用的下部送風，不同於實際條件下所採用的下部送風方法。這個區別就在於作系數 α 和 β 公式的結論時，假定下部送風在沒有熱源和濕源的全部車間地面上是均勻和全面的。當然，這種送到車間去的送風方法，是一種理想化的送風方法（但不是理想的送風方法）。實際的下部送風方法總是與我們所採用的送風方法不同的。與我們所採用的理想化下部送風方法最相似的，就是織布車間內通過低送風筒（以每四台織布機一個送風筒計算）的送風法。

在實際情況下，除了下部送風以外，還廣泛採用其他的送風方法，譬如上部送風或聯合送風（此時部分空氣送至上部，部分空氣送至下部）。在第七章內將可看到與這種送風方法大体上相同的斷面圖。

在研究車間內的热交換和湿交換時，所假定的另一個重要的限制條件，关系到熱源和濕源沿車間高度分佈的問題。在作系數 α 和 β 基本公式的結論中，假定熱源和濕源位於車間下部，這與紡織工業的大多數車間及其他工業部門許多車間內的實際情況是不矛盾的。但是，在任何車間中總是有一些位置不太高的熱源和濕源，這就使我們不得不在第六章內要研究幾個個別有代表性的例子，除了位於下部的主要熱源和濕源以外，並且還有高於工作地帶的熱源和濕源。

為了簡化車間內熱交換和湿交換的問題，不打算分別研究熱傳播和湿傳播，並且假定熱量和水汽是由許多同一的來源散發出來的。由不同來源散出來的熱量和水汽的傳播，只是對個別情況分別進行研究。對於大部分車間來說，這個假定不會與實際

情况有顯著的差別，這可以用第五章內所列举的實驗資料來証明。从這些資料中可以看到，系数 α 和 β 的实际数值（在同一車間內）或是相等或是彼此稍有出入，而且有时在發現的差別中很难觉察到有任何規律性，這問題將在第四章內詳細敘述。

5. 大家都知道，各个作者对通風進行理論和實驗的研究工作时，大半都是把車間內热交換和湿交換的制度假定為固定的。我們也採用這個假定。車間運轉的間歇性，室外空气参数的变化，部分設備的開車或停車等因素，都會在車間內造成不固定的热湿交換条件。B.C. 索格洛夫^①所作的細紗車間和織布車間內不固定热交換的理論研究和實驗研究說明，研究通風時，通常所指的固定条件只有在車間開車几个小时以后才会出現。

根据固定制度的条件所設計的許多通風系統（譬如紡紗廠和織布廠內）的使用經驗証明，所採用的計算空气参数大半都能切实反映車間內的实际情况。不固定制度的理論可以給予通風研究以全面的分析，但是在我們的結論中，只限於固定制度的研究。

6. 运用 $I-d$ 圖表在頗大程度上可以簡化通風計算，並有可能繪制顯明的热湿吸收过程。 $I-d$ 圖表的这些优点，在作系数 α 和 β 公式的結論時以及所有通風計算上，已全部加以运用。

大家都知道，苏联工程师 B.H. 維捷尼索夫和 P.M. 傑赫脫首次將 $I-d$ 圖表运用於通風計算上，运用 $I-d$ 圖表可以更深刻、更全面地來研究通風过程。在我們所研究的問題中，以及在今后通風过程的研究中，运用 $I-d$ 圖表在很大程度上能使我們易

① 工企出版社 1953 年出版的 B.C. 索格洛夫所著的“建築物中不固定的热交換”。

於了解有关車間內热交換和湿交換的物理現象。

7. 最后講一个重要問題。

將生產車間按热湿傳播的性質分为兩类时，但並不是指热源湿源絕對全面地分佈在車間地面上，而是指“島嶼式”地分佈在車間地面上，即在热源湿源之間有着工作地点以及在热源湿源之外有着其他空地。在極少數的情況下，也有主要热源湿源差不多絕對全面分佈的生產車間。被水淹沒的地板是唯一的散湿來源，因此工作地点乃位於散湿來源之上的車間，就屬於这类車間。如果有这种來源，並且採用下部送風送至車間，吸收过程就可能在靠近地板面不太高的一層內進行，同时这一層以上的水汽和热量（不計算外圍構築物的热損失）的梯度可能等於零。从而，系数 α 和 β 的数值就可能等於 1。这已經由工程师 И. М. 伐托拉烏勃（中央建筑科学研究試驗館）所作的实验証实，在这些实验中，差不多被加热的模型地板的全部面積都作为热源。工作地帶的空气溫度等於排風的溫度。

这种車間內的热交換在本書中不予研究。但關於类似車間的最合理的通風方法問題將在第七章內大体上提供一些意見。

島嶼式热源湿源的分佈会使車間的全部空間分为兩個区域：热源湿源上部被積極对流流綫所佔的区域及沒有積極对流的区域。两个区域中的热交換和湿交換經常彼此相互進行。第二区域内空气参数的变化是我們最感兴趣的，因为它的下部是工作人員所在的工作地帶。但是在研究第二区域内空气参数的变化时，当然不能离开第一区域，因为兩個区域均處於彼此交換空气，从而交換热量和交換水汽的狀態中。这个情况在后面研究車間內热湿傳播的一切問題时，均須加以考慮，但是有关通風过程中空气参数变化的規律性方面的具体結論，將在涉及第二区域——工作区域时談到。

第一章 大气中及車間內紊流 交換的基本概念

一、在異种气流中紊流的發展

對於工業企業車間內具有紊流特性的气流，要比對於大气中的紊流知道得少些。关于車間內气流的實驗資料在今天尚未作出結論，这些結論或許是可以根據紊流运动理論作出的。

車間內的空气运动應該在流体动力学和气体动力学既得成就的基礎上，以及在动力气象学某些結論的基礎上進行研究。

研究大气中的紊乱气流时，把紊流分为动力（或机械）紊流及热力紊流两种形式。动力紊流系由运动着的空气与粗糙表面相摩擦及流过各种障碍物时气流中產生渦流所形成，热力紊流則因沿車間高度的溫度分佈不均匀而造成，这时較热的气团上升，而較冷的气团下降。

假使不可壓縮的液流或气流中任意点的溫度均相同，那末这种液流或气流在物理上就是同种的液流或气流。雷诺氏数是同种液流或气流运动規則的准数。

$$R_0 = \frac{vl}{\nu} \dots\dots\dots (1)$$

式中 v ——流速；

l ——有代表性的气流直綫尺寸；

ν ——空气的动力黏滯系数。

在热力学上異种的气流中，紊流的發展主要決定於气体密度的垂直梯度。运动着的空气的热力分層，在某种情况下会加强紊流，而在另一种情况下却能使紊流減小。当空气密度随高度

增大时能使紊流的发展，密度随高度减小时又成为紊流度发展的障碍。

大气中紊流度的发展决定於它的直减率^①，也就是决定於温度垂直梯度的大小及符号。

如果在水平气流中，空气密度自下而上地减小，譬如温度随高度而增大，那末这种气流中的紊流混合的结果当会引起较重的空气质点上升，而较轻的空气质点相反地下降。由此可见，在这种情况下，要依靠保持紊流的能力来对重力作功。因此，气流的紊流逐渐减弱，有时就完全消失。晚间大气中的紊流减弱或甚至完全消失，就可作为这种现象的典型例子，这时地面比空气冷却得快，因而在某一空气层内，气温便随高度而增加（即出现逆温现象）^②。

М. И. 步寶科在雾天对一个继续不断的单点烟源的烟气散佈的观察，可作为大气直减率影响紊流发展的另一个例子。圖 1 a 为大气逆温时的烟气散佈圖。在这种情况下，烟雾的上边接近於直线，与地面相交的角度不大。

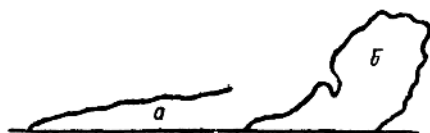


圖 1 在紊流度不同的情況下，大气中的烟气散佈

在过絕热梯度时（空气温度随高度顯著下降），就出现完全不同的散佈圖。由圖 1 б 可見，在这种情况下，烟气力图上升，而且烟气散佈也較有活力。在后一种情况下，气流的热力

① 沿大气高度的温度分佈称为直减率(Стратификация)。

② 譯註：逆温为气象学名詞即大气中温度上部高下部低，与正常的温度梯度相反的現象。