

浅谈书库结露

□ 闫智培 国家图书馆古籍馆

固体表面结露是生活中常见的一种自然现象。在工作过程中，我们发现温湿度控制良好的书库也可能出现结露现象。图书、字画表面结露容易引起纸页起皱，照片、胶片等多层资料还可能出现脱落、裂缝等损伤，书库内屋顶、墙体或设备表面结露后容易发霉，进而污染书库内空气和图书资料，严重时会造成图书资料变色和加速老化。书库中为什么会出现结露现象？结露会对图书资料造成什么影响？又应该如何预防书库中出现结露现象呢？

一、常见书库结露原因

（一）书库结露原因概述

空气的容水能力与温度相关，温度越高空气的容水能力越强。如果空气中的水蒸气含量不变，当温度降低到一定程度时，空气中的水蒸气达到饱和状态，即空气相对湿度为100%RH。在此情况下若环境温度继续下降，则开始出现空气中水蒸气凝结析出的现象，即“结露”。产生结露现象的温度称为露点温度，简称为“露点”。图1是大气绝对湿度曲线图。如图1所示，25℃、50%RH的空气（A），要达到100%RH的相对湿度（B）需要降温到17℃（C）。即25℃、50%RH空气的露点温度为17℃。也就是说，25℃、50%RH的空气，如由于气候或其他原因温度骤降至17℃以下或者接触到温度低于17℃的低温表面，就存在结露风险。因此，凡是能够引起书库温度骤降或者引起高温高湿空气接触温差较大低温表面的因素都可能引起书库内发生结露现象。

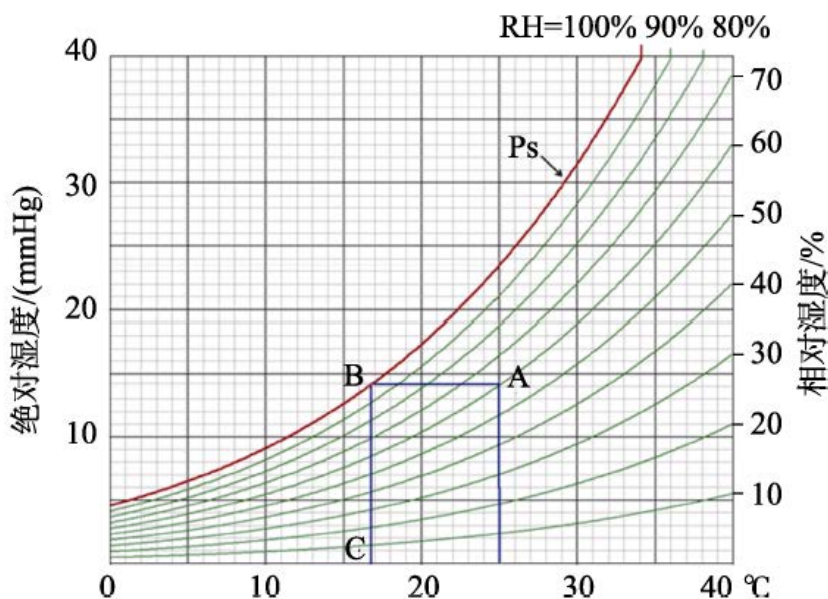


图1 大气绝对湿度曲线图

（二）常见书库结露起因

由上文可知，结露现象发生的两个必要条件是空气相对湿度高和温度骤降。书库结露原因大致分五类：

1.高湿库房温度骤降

相对湿度很高的库房温度骤降使得室温低于露点温度，库房内空气中多余的水蒸气可能在图书资料、书架、墙壁等表面结露。例如，夏季高温高湿地区的书库如果空调夜间关闭，那么当空调重新开机时室内相对湿度过高且温度下降速度过快，温度骤降至露点温度以下时书库内可能结露。

2.低温图书资料突然转移至高温高湿环境

低温环境的图书资料突然转移至高温高湿环境，例如图书资料突然从低温保存库房转移至高温高湿的阅览室，或超低温杀虫的图书资料没有经过充分回温即返回室温环境，高温高湿空气接触到低温图书资料表面时，如果图书资料的温度低于该空气的露点温度，空气中的水蒸气可能在图书资料表面结露。

3.书库外围护结构内侧温度偏低

北方冬季自然温度多低至零下，室内温度一般保持在 16—22℃。冬季室内外温差较大，当外墙、门窗、玻璃等外围护结构保温性能较差时，内侧的温度多低于室温。当内侧温度低于室内空气的露点温度时，可能发生结露现象。

4.室外空气温湿度高

回南天是华南地区特有的现象，一般出现在 2、3 月份，主要是冷空气走后，暖湿气流迅速反攻，致使气温回升，空气湿度加大^①。回南天出现时，空气湿度接近饱和。书库内温度较室外低，书库内墙壁、家具和图书资料遇到暖湿气流后，可能出现墙面发霉发黑、油漆剥落、家具发霉和图书资料发霉等现象。

5.空调部件温度偏低

在夏热冬冷地区，春夏季常发生中央空调出风口结露，此时室外空气湿度大，温度波动大，极易使室内中央空调出风口温度低于空气露点温度，引起中央空调出风口的边框、风管本体及支吊架等位置结露，在风口的边缘或管道底部滴水，造成天花漏水、墙面渗水等现象^②。

二、结露对图书资料的危害

（一）图书资料表面结露

由于纸张吸水性强，图书资料表面结露后水迅速被纸页吸收，因此图书资料表面结露不易被察觉，导致该问题尚未引起关注。但是，在博物馆系统中已经有人注意到藏品表面结露问题。2007 年 11 月，在丹麦哥本哈根举行的“博物馆微环境”会议上 Marion

^① 陈荣毅等：《夏热冬暖地区公共建筑低能耗技术研究与应用》，中国建筑工业出版社，2019 年，第 97 页。

^② 肖书博：《梅雨季节空调系统结露的原因及对策分析》，《建筑热能通风空调》，2017 年第 36 卷第 7 期，第 56—58 页。

F. Mecklenburg^①指出, 当室外温度过低(如 -10°C)时, 古建筑的展厅内温湿度适宜($18\text{—}20^{\circ}\text{C}$ 、 $55\%\text{RH}$), 挂在墙壁上展览的油画背面甚至表面会出现冷凝水。在室内空间相对湿度恒定在 $50\%\text{RH}$ 时, 一年之中油画背后的微环境相对湿度波动范围在 $30\%\text{RH}\text{—}100\%\text{RH}$ 。微环境的剧烈变化, 导致部分油画发生如图2、图3所示的基底和颜料脱落、裂缝等损坏。虽然图书资料表面结露不易察觉, 但是书籍表面结露必然导致封面等结露位置的纸页吸收结露的水珠, 含水量快速上升, 含水量骤变容易引起纸页发生起皱等变形。而照片、胶片等多层资料, 由于各层材料吸水时伸缩率存在差异, 结露的危害可能更大。



图2 19世纪意大利油画颜料和基底
完全从画布上脱落



图3 被湿墙损坏的油画

(二) 图书资料发霉变色, 加速老化

墙壁、屋顶等室内建筑或空调部件结露, 虽然不会直接危害图书资料安全, 但是会引起墙面、屋顶等局部湿度过高, 甚至滴水、渗水, 墙壁等表面长期结露非常容易生霉, 霉菌在室内传播会引起图书资料发霉, 进而造成图书资料变色和加速老化^②。

三、书库结露的控制与预防

表1是从图1得到的不同温湿度空气的露点温度表。

表1 不同温湿度空气的露点温度表($^{\circ}\text{C}$)

温度(℃)		2	4	6	8	10	12	14	16	18	20
相对湿度 (%)	40	-9.06	-7.44	-5.8 3	-4.22	-2.62	-1.03	0.6	2.42	4.22	6.03
	50	-6.5	-4.85	-3.2 1	-1.57	0.03	1.9	3.76	5.61	7.46	9.3
	60	-4.37	-2.7	-1.0 3	0.7	2.6	4.5	6.39	8.28	10.16	12.04
	70	-2.55	-0.85	0.93	2.87	4.8	6.73	8.65	10.57	12.48	14.4
	80	-0.95	0.85	2.82	4.78	6.74	8.69	10.64	12.59	14.53	16.47
	90	0.51	2.51	4.5	6.49	8.47	10.44	12.42	14.39	16.36	18.33

^① Marion F. Mecklenburg Hirshhorn, *Micro climates and moisture induced damage to paintings*, <https://conservationphysics.org/mm/mecklenburg/mecklenburg.pdf> (2021.5.28检索)

^② 白洁: 《房屋冷桥、结露发霉长毛的原因分析》, 《河南建材》, 2019年第1期, 第228—232页。

从表 1 可以看出相同温度的空气，湿度越低露点温度越低，即突然降温时较不易结露。以 20℃空气为例，40%RH 的空气露点为 6.03℃，而 90%RH 的空气露点为 18.33℃。这就意味着 90%RH 的空气如果室内温度从 20℃降至 18℃以下就存在结露的风险，而只有温度降至 6℃以下 40%RH 的空气才存在结露风险。以表 1 中温度减去不同湿度空气对应的露点，得到不同温湿度空气结露所需的温差（即结露温差，见表 2）。

表 2 不同温湿度空气结露温差（℃）

温度(℃)		2	4	6	8	10	12	14	16	18	20
相对湿度 (%)	40	11.06	11.44	11.83	12.22	12.62	13.03	13.4	13.58	13.78	13.97
	50	8.5	8.85	9.21	9.57	9.97	10.1	10.24	10.39	10.54	10.7
	60	6.37	6.7	7.03	7.3	7.4	7.5	7.61	7.72	7.84	7.96
	70	4.55	4.85	5.07	5.13	5.2	5.27	5.35	5.43	5.52	5.6
	80	2.95	3.15	3.18	3.22	3.26	3.31	3.36	3.41	3.47	3.53
	90	1.49	1.49	1.5	1.51	1.53	1.56	1.58	1.61	1.64	1.67

从表 2 可以看出，90%RH 空气结露温差均在 1.5℃左右，之后随相对湿度下降，结露温差不断变大，40%RH 空气结露温差达到 11℃以上，相对湿度对结露温差具有决定性影响。相同湿度的空气，随温度升高，结露温差只有小幅上升。温度虽然对结露温差影响较小，但是温度直接影响空气的容水能力。因此，要防止书库内出现结露现象，需控制好书库的相对湿度；同时减少书库内温度波动。

（一）控制书库的相对湿度

1.室外空气相对湿度大

当室外空气相对湿度过大时，例如南方的回南天、夏热冬冷及夏热冬暖地区的夏季，应该采取措施将书库的相对湿度控制在 60%以下。

对于可以采用自然通风的书库，需要紧闭门窗防潮。但是新风系统仍然需要开启。如果新风湿度过大，应考虑转换为最小新风量运行，如果最小新风量运行不能带走室内余热则自动转为制冷工况。当书库温度低于室外温度超过 3℃以上，湿度较大情况下，即使采用最小新风量，直接送风也可能遇到冷表面结露，这种情况应对新风进行独立除湿^①。如果室内温度低，不需要空调制冷，也可以在推荐的保存温度范围内适当提高室温，减小室内空气的相对湿度。如果空调系统不能满足除湿要求，应增加除湿设备。

2.室外温湿度过低

北京、河北、山西等地冬季外部环境寒冷干燥，室外环境温湿度远低于书库内部。这种情况下，即使书库内温湿度维持在理想范围，如果外墙和门窗的保温性能不够好，墙壁和门窗内侧温度较低，一旦室内温暖湿润空气接触低温表面，就容易出现结露现象。因此，保温性能较差的书库，在冬季可适当降低室内相对湿度以防止结露现象发生。

（二）减少书库温度波动

1.维持书库及图书资料温度稳定性

^① 陈荣毅等：《夏热冬暖地区公共建筑低能耗技术研究与应用》，第 100 页。

有条件的书库应通过空调系统控制好书库温度,尽量保持书库内温度日较差不超过 2°C 。夏季书库宜提高送风温度,增大送风量,减小送风温差。如果空调系统在夜间停止运行,那么由于围护结构自身的蓄热能力和热惰性,会导致室内空气的温度和湿度在夜间缓慢升高。而当空调系统在次日初启动时,为避免发生结露,空调送风温度应缓慢降低,逐渐接近送风系统的设计状态点。

图书资料在温度差异大的环境间传递时最好设置过渡间,经过一定时间的温湿度平衡处理后再使用,尽量不要让图书资料在温湿度骤变的环境下使用。此外,使用书盒、函套等装具保护图书资料对于温度波动有一定的缓冲作用。

2.改善书库保温性能

良好的保温性能是维持书库温湿度稳定及避免书库内出现温差过大表面的根本措施,因此要减少书库温度波动,防止结露,必须做好书库保温工作。

(1) 外墙

外墙加保温隔热层可以减小外界环境温度波动对书库温度的影响,但是复合保温墙体热湿传递也可能引发结露问题。不同气候类型地区应根据自身气候特征设计保温墙体结构。夏季高温高湿地区宜采用内保温墙体,冬季低温高湿地区宜采用外保温墙体。而在具有夏季高温高湿、冬季低温高湿的夏热冬冷地区,外保温复合墙体易在夏季结露,内保温复合墙体易在冬季结露,可加设空气层防结露^①。

(2) 门窗

选用多腔体门窗型材、多腔中空玻璃,并对玻璃余隙进行阻隔处理,门窗框安装时与墙体之间的密封保温处理,可以减少结露发生^②。

(3) 空调

① 出风口

结露不严重时可以通过调节百叶风口边缘的叶片角度,达到增加出口处紊流和风口边缘部分诱导风来减少结露。如果结露严重可选用较小传热系数的ABS塑料风口或木制风口代替普通铝合金风口,也可以在风口上喷一层憎水材料或在风口内边框及风口边端贴一层薄PE保温板,防止风口边端接受过多来自空调机组的冷量。

灰尘会加速水蒸气凝结,风口表面有灰尘时会导致结露概率变大,所以在日常维护工作中加强风口清理也是重要保障措施之一^③。

② 空调通风管道

要防止风管、水管保温层表面出现结露现象,需选用密度、厚度、导热系数、耐火等级满足需求的保温材料,根据防结露原则设计保温层厚度,并在管道保温层与支、吊架之间增加垫木进行隔热^④。

^① 邹凯凯、单贵苏:《高湿地区保温墙体防结露措施效果分析》,《建筑热能通风空调》,2019年第3期,第10—14页。

^② 孙文迁:《建筑门窗的防结露设计》,《中国建筑金属结构》,2019年第12期,第45—49页。

^③ 朱贻彤:《地铁车站通风空调系统结露、滴水现象分析及防治措施》,《中国新技术新产品》,2019年第5期,第84—86页。

^④ 肖书博:《梅雨季节空调系统结露的原因及对策分析》,第56—58页。

四、小 结

高湿库房内温度骤降、低温图书资料突然转移至高温高湿环境、书库外围护结构内侧温度偏低、室外空气温湿度高、空调部件温度偏低等能够引起书库温度骤降或者使书库内存在温差较大低温表面的因素都可能引起书库内发生结露。图书资料结露可能导致纸页变形；室内建筑或设备结露后容易发霉，从而可能引起图书资料发霉变色，加速老化。要避免书库结露，需降低书库内相对湿度、减小书库温度波动、做好外墙及门窗保温、库内空调部件采取防结露设计并采取相关保护措施。