

西芹热风干燥工艺研究

诸爱士,成 忠

(浙江科技学院 生物与化学工程学院,杭州 310023)

摘 要: 研究了西芹的干燥过程,考察了实验的预处理时间、预处理温度、干燥温度、风量、形状、装载量等不同因素对干燥过程的影响。结果表明,西芹干燥具有典型的物料干燥升温、等速、降速三个阶段,提高干燥温度与风量,对强化干燥过程有利。较好的干燥工艺条件是:西芹薄片在 90 °C 热水中烫漂 3 min,干燥风温 80 °C、风量 0.021 m³/s (1.34 m/s),物料为薄而双层。干燥方程符合 Page 模型。

关键词: 西芹;热风干燥;工艺条件;模型

中图分类号: TS225.3

文献标识码: A

文章编号: 1671-8798(2006)04-0280-06

On Drying Process of West Celery with Heated Wind

ZHU Ai-shi, CHENG Zhong

(School of Biological and Chemical Engineering, Zhejiang University of Science and Technology, Hangzhou 310023, China)

Abstract: The dehydration process of west celery was studied in this paper. The effects on the drying process by such factors, including the pretreatment time and its temperature, the drying temperature, the wind rate, the shape and the capacity, were investigated. The experimental results show that the west celery drying process appears drying temperature increasing, constant drying rate and fall drying rate the three typical periods, and that to increase the wind rate and drying temperature is favorable to strengthen the drying process. The better drying processes conditions: precooking with 3 min in the 90 °C water, 80 °C drying wind, 0.021 cubic meters per second wind rate, the thin and double layers material. The dry equation accords with the so-named Page model.

Key words: west celery; dehydration; process condition; model

西芹又称西洋芹菜,为引进国外的大型芹菜品种,株形紧凑粗大,叶柄宽而肥大、纤维少,品质脆嫩,是优良的芹菜品种,每 100 g 鲜重含水分 94 g、碳水化合物 2 g 左右、蛋白质约 2.2 g 和矿物盐及维生素等多种营养物质,还含有芹菜油,具芳香气味,

有降低血压、健脑和清肠通便的作用^[1]。西芹在采后若不及时食用、加工,则容易腐烂。因此西芹的储存和保鲜是必要的,而脱水则是一种较好的保鲜方法,它可调剂季节差别。脱水储藏除可基本保持其原有的品味外,还有缩小体积降低重量(便于储存和

收稿日期: 2006-10-09

作者简介: 诸爱士(1966—),男,浙江湖州人,副教授,主要从事单元操作教学与研究。

运输),抑制微生物的繁殖及增加蔬菜本身价值等优点。目前,国内只有龚卫清等关于《西芹冷冻干燥工艺条件的研究》的报道^[2],它是用冷冻干燥技术来干燥西芹,得到西芹的共晶点、共熔点、冻干曲线,以及西芹的预热、预泵时间、冷冻干燥时间等参数。虽冻干产品具有品质好的优点,但其具有易吸潮、易破碎、设备投资和操作费用高等缺点。关于采用热风干燥西芹方法未见报道。本实验采用热风进行干燥,考察了影响干燥性能的预处理时间、预处理温度、干燥热风温度、热风流量、物料厚度及装载量等因素,得到干燥曲线和速度曲线以及复水性能,确定了较佳干燥工艺参数,为工业化生产提供依据。

1 干燥实验

1.1 实验设备与物料

新鲜西芹(市售),FS西芹3号,选择叶柄宽2~4 cm的内外(老、嫩)茎干若干,实验时切片后掺匀备用。

干燥实验采用隧道式干燥器,实验时干燥条件恒定,采用减重法测定物料质量随时间的变化情况,至质量不变时停止实验。物料的初始状态为预处理后的西芹。

1.2 实验步骤

工艺流程为:原料→清理→清洗→沥水→切制→烫漂→脱水干制。

烫漂可破坏或钝化蔬菜中的氧化酶系统,防止褐变和维生素的氧化^[3],并有利于加快干燥速度,使干制品复水时易重新吸水。但过度烫漂会导致蔬菜色泽、风味和组织劣变及营养成分的损失,同时也会过多地消耗能源。因此烫漂时间与温度应该适宜。

1.3 测定项目和方法

物料干基含水率:水分质量与绝干物料质量之比,以 X 表示,即:

$$X = (\text{水分质量} / \text{湿物料中干物料的质量}) \times 100\%$$

临界含水量 X_c :恒速阶段转入降速阶段的转折点所对应的含水率。

某时刻 t_i 的干燥速率 U_i :

$$U_i = G_{i-1} - G_{i+1} / A(t_{i+1} - t_{i-1})$$

式中: A 为干燥接触面积, m^2 ; G_{i-1} 、 G_{i+1} 为 t_{i-1} 、 t_{i+1} 时刻物料质量(包括附件质量), kg ; U_i 为 t_i 时刻干燥速率, $\text{kg}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$ 。

复水比:

$$R = G_{\text{复}} / G_{\text{干}}$$

式中: $G_{\text{干}}$ 为干制品复水前的质量; $G_{\text{复}}$ 为干制品复水后沥干后的质量^[4]。

感官指标:色、味。

2 实验结果与讨论

2.1 预处理条件的考察

2.1.1 烫漂时间对干燥的影响 在烫漂温度 90°C 、干燥温度 80°C (湿球温度为 42°C ,相对湿度 $\Phi=0.33$)、风量 $0.021 \text{ m}^3/\text{s}$ (风速 1.34 m/s ,下同)、装载量 $1.75 \text{ kg}/\text{m}^2$ 、西芹为片状(约 2 mm 厚)的条件下考察了烫漂时间分别为0、2、3、4、5 min对干燥过程的影响,得到各条件下的干燥曲线见图1,速度曲线见图2及复水性见表1。

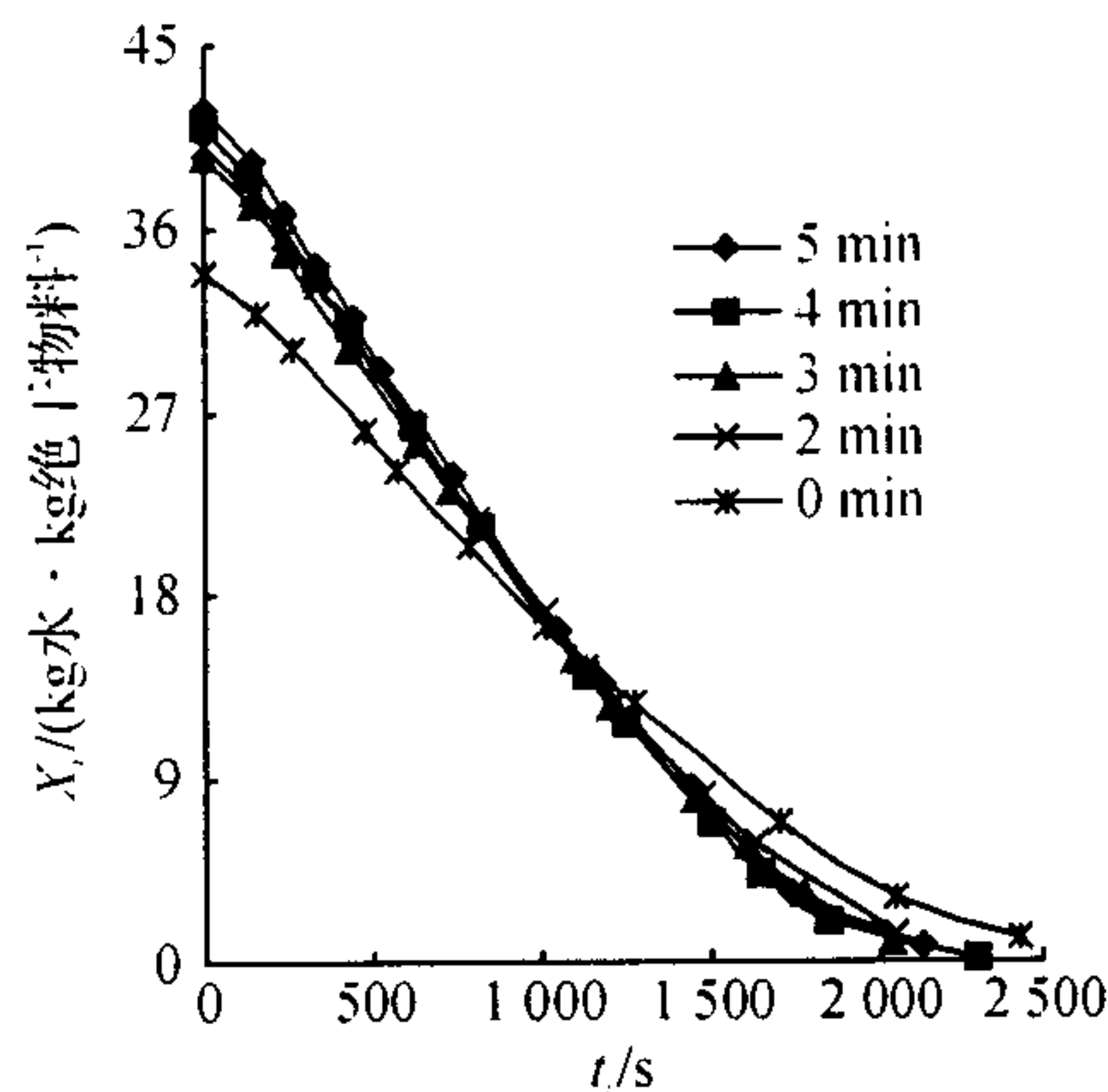


图1 不同烫漂时间的干燥曲线

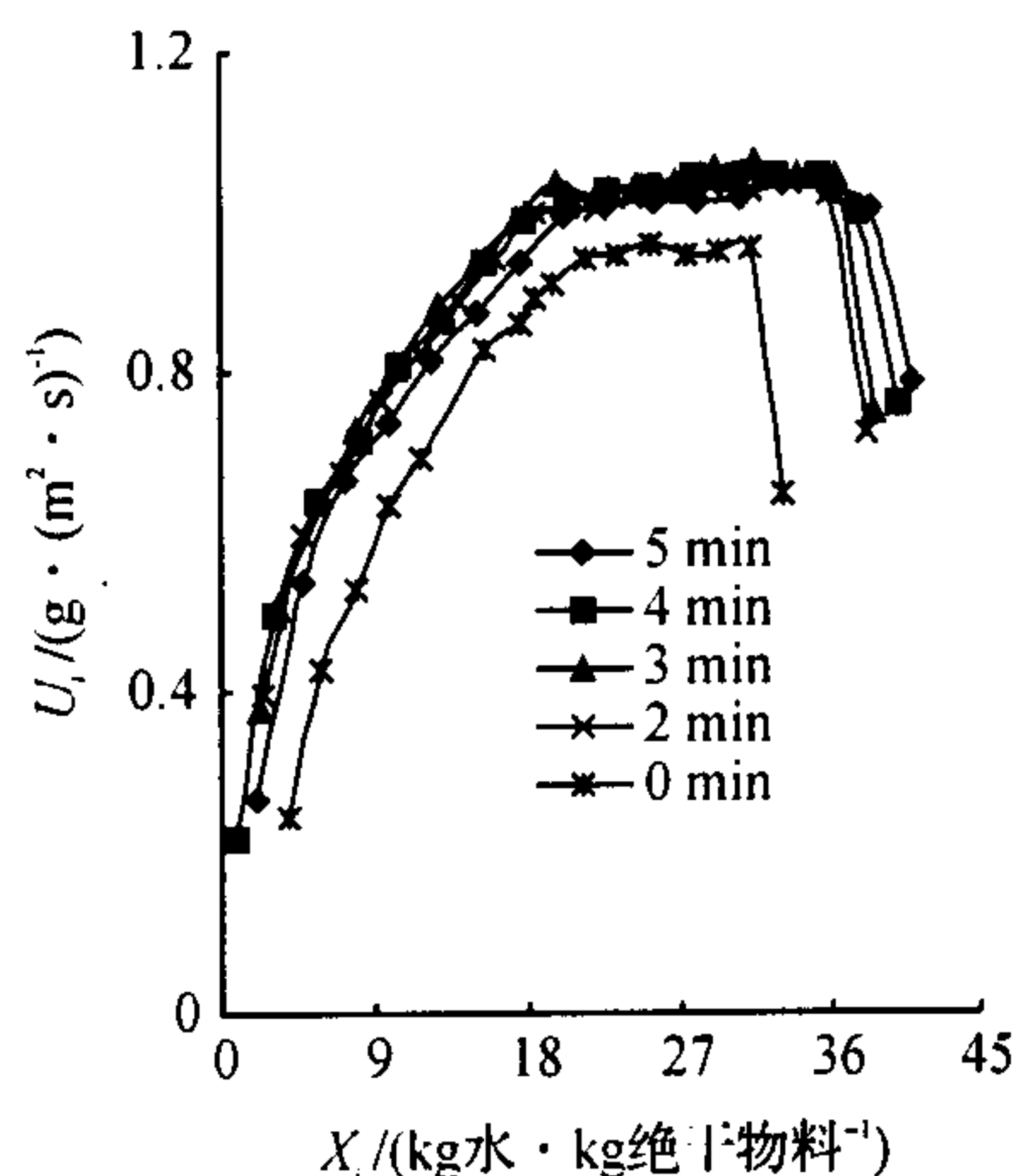


图2 不同烫漂时间的速率曲线

表1 不同烫漂时间下的复水性能

| 时间/min | 0 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|--------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 复水性 R | 14.75 | 23.91 | 26.92 | 26.83 | 22.93 |

干制品保持西芹原有颜色,具有比新鲜料更浓的芳香味;复水后能基本恢复西芹新鲜时的状态,但手感比新鲜的软一些。

由图 1、2 可见,在相同的干燥条件下,随着烫漂时间的增加,西芹的初始含水量也增大。这是因为烫漂对细胞组织有影响,烫漂时间越长组织中的细胞膜被破坏的越多,使水分渗入的也越多,则含水量越高;但是烫漂时间过长也会导致细胞组织严重破坏而变烂且能耗增大。从图 2 可以看出,烫漂时间在 3 min 和 4 min 时干燥速度最快。由表 1 复水性得知,烫漂有利于提高复水比,同样是 3 min 和 4 min 时的复水性明显好于其他时间的复水性。考虑到能耗问题,选择烫漂时间为 3 min。

2.1.2 烫漂温度对干燥的影响 在烫漂时间 3 min、干燥温度 80 °C (湿球温度 42 °C,相对湿度 $\phi=0.33$)、风量 0.021 m³/s (1.34 m/s)、装载量 1.75 kg/m²、片状的条件,考察了烫漂温度为 80 °C、90 °C 和 100 °C 时对干燥过程的影响。干燥曲线见图 3,速率曲线见图 4,复水性如表 2 所示,感官指标差别不明显。

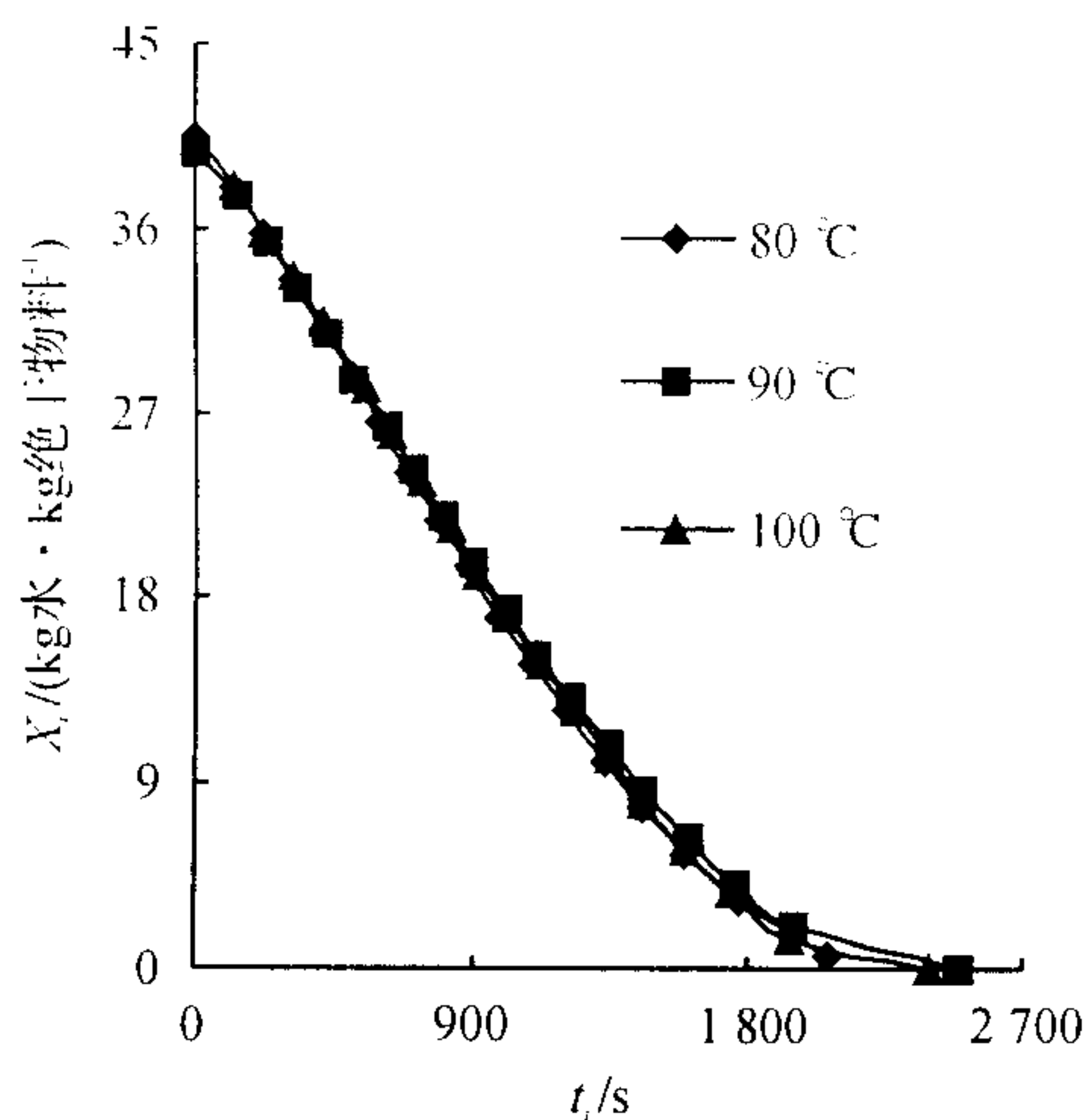


图 3 不同烫漂温度的干燥曲线

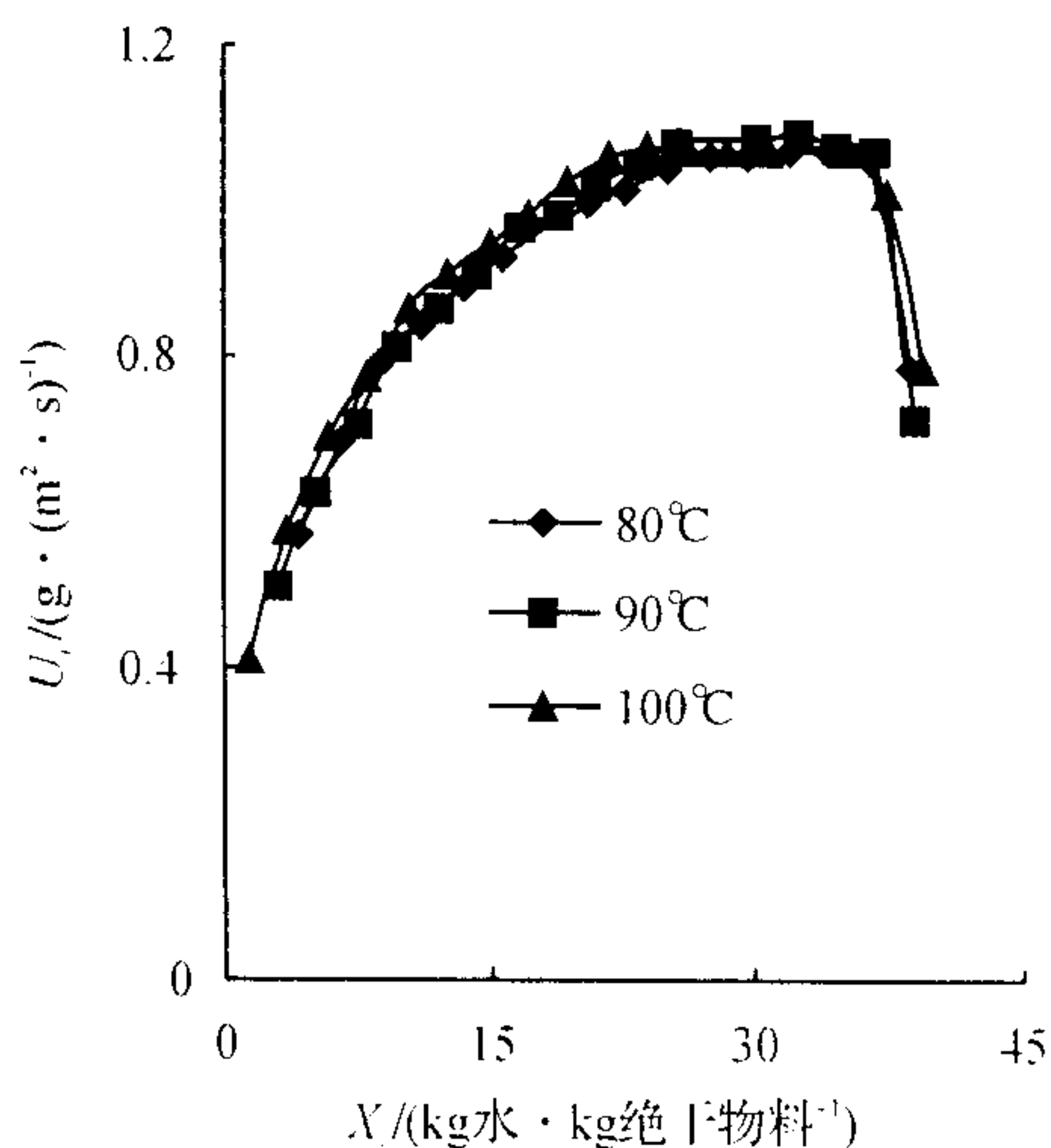


图 4 不同烫漂温度的速率曲线

表 2 不同烫漂温度下的复水性能

| 温度/°C | 80 | 90 | 100 |
|-------|-------|-------|-------|
| 复水性 R | 26.36 | 26.91 | 17.00 |

图 3、4 显示,在其他条件相同的情况下,烫漂温度在 80 °C、90 °C 和 100 °C 下,干燥速度没有明显的差别,在 90 °C 时干燥速度为最好。从表 2 可得,烫漂温度在 100 °C 时的复水性最差,分析是由于温度过高对西芹的细胞组织结构产生了破坏而导致组织糜烂,复水差。比较 80 °C 和 90 °C 下的复水性,可知 90 °C 下复水性略好,故最佳烫漂温度可选为 90 °C。

由以上情况可以得出,物料在 90 °C 下烫漂 3 min 较佳,以下考察就以此为预处理条件。

2.2 干燥条件的考察

2.2.1 干燥温度对干燥过程影响 片状的西芹经 90 °C 的热水烫漂 3 min 后,在风量为 0.021 m³/s (1.34 m/s)、装载为 1.75 kg/m² 的条件下分别考察了干燥温度为 60 °C (湿球温度 35 °C)、70 °C (湿球温度 39 °C)、75 °C (湿球温度 41 °C)、80 °C (湿球温度 42 °C)、85 °C (湿球温度 44 °C) 对干燥过程的影响,得到的干燥曲线见图 5,速度曲线见图 6,复水性如表 3 所示,感官指标差别不明显。

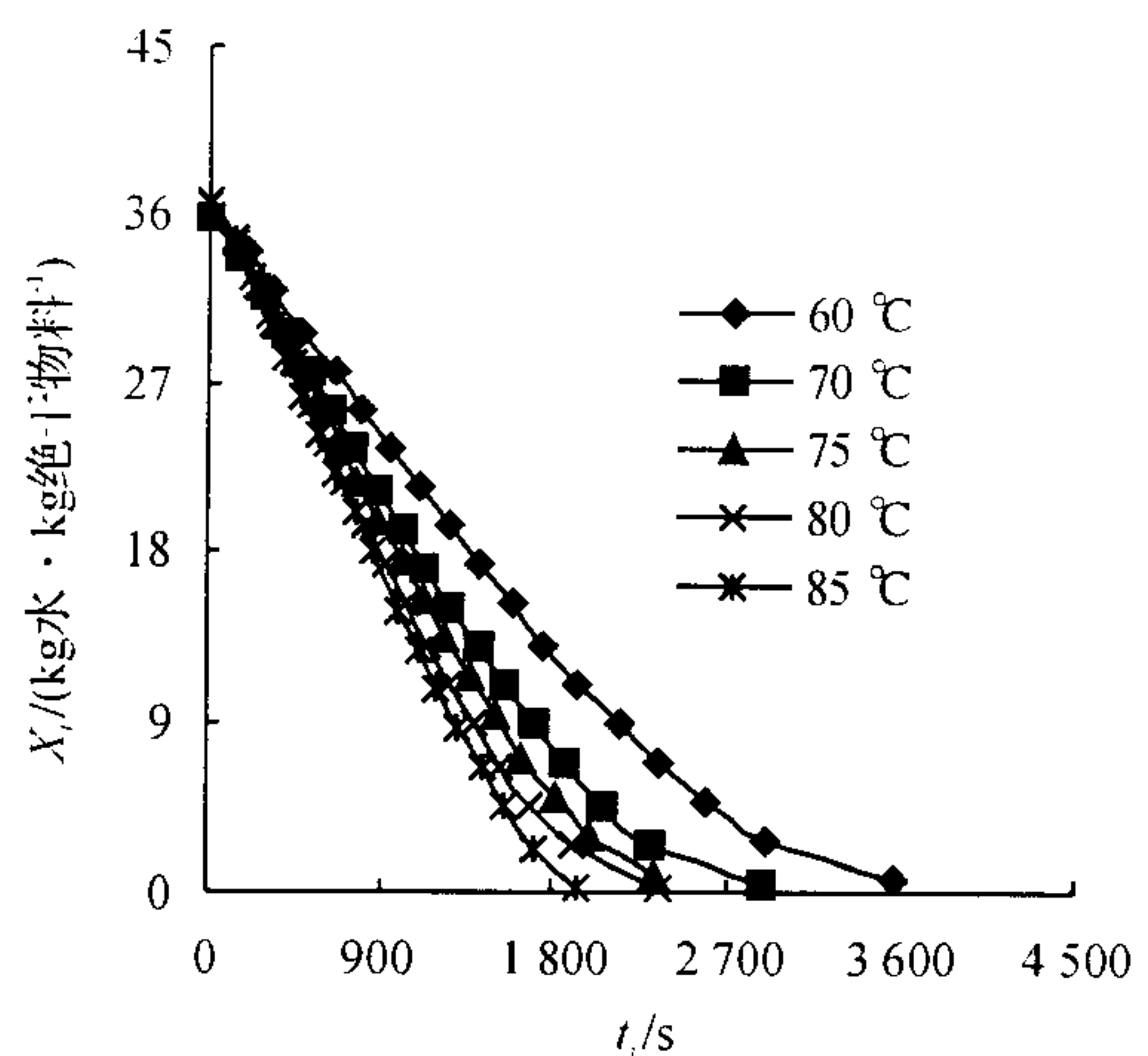


图 5 不同干燥温度下的干燥曲线

表 3 不同干燥温度复水性的比较

| 温度/°C | 60 | 70 | 75 | 80 | 85 |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 复水性 R | 18.25 | 23.40 | 25.21 | 26.94 | 27.02 |

图 5 显示,温度越高,经相同时间干燥物料的含水量就越低。这是由于温度越高,空气相对湿度就越低,空气与物料之间的湿度差就越大,使得传热推动力—温度差、传质推动力—湿度差就越大,干燥速度也就越大,要达到一定的含水量所需时间就越短。因此,提高干燥温度对过程有利。由图 6 可见,在恒

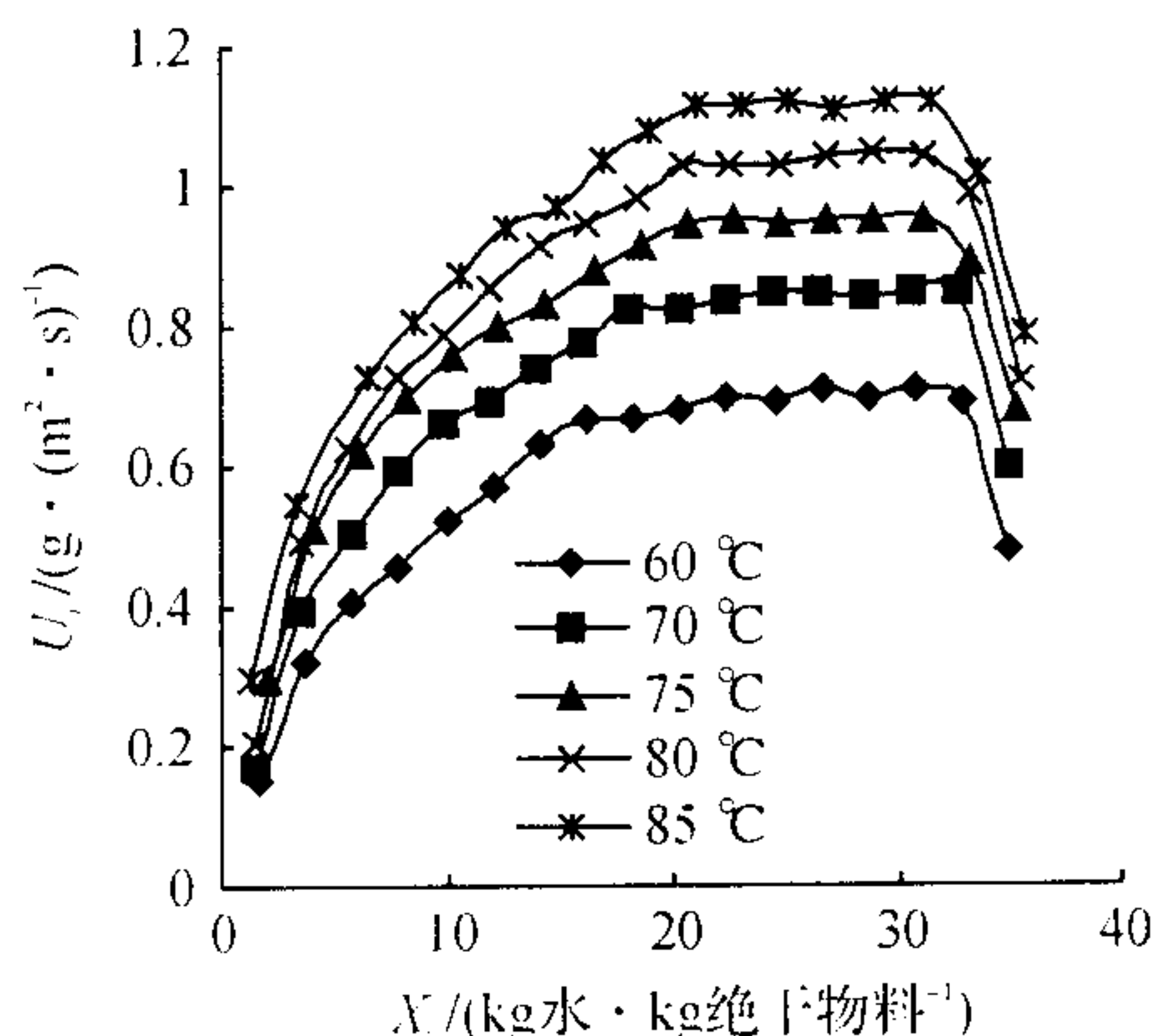


图6 不同干燥温度下的速率曲线

速干燥过程中,从60 °C到70 °C,它的恒速速率增幅较大,以后速率增幅就逐渐减小,从热量损耗考虑,干燥温度就不宜过高。再由表3得出,虽然随着干燥温度的升高复水性也随之增大,但由于在80 °C和85 °C干燥情况下复水性相差不大,鉴于物料为热敏性,温度过高营养成分被破坏得越多,因此温度以80 °C干燥为宜。

2.2.2 不同风量对干燥过程的影响 片状的西芹经90 °C的热水烫漂3 min后,在干燥温度80 °C(湿球温度42 °C,相对湿度 $\Phi=0.33$)、装载1.75 kg/m²的条件下考察了风量分别为0.015 m³/s(0.92 m/s)、0.018 m³/s(1.14 m/s)、0.021 m³/s(1.34 m/s)、0.024 m³/s(1.51 m/s)、0.027 m³/s(1.69 m/s)对干燥过程的影响,得到干燥曲线见图7,速率曲线见图8及复水性见表4,感官指标差别不明显。

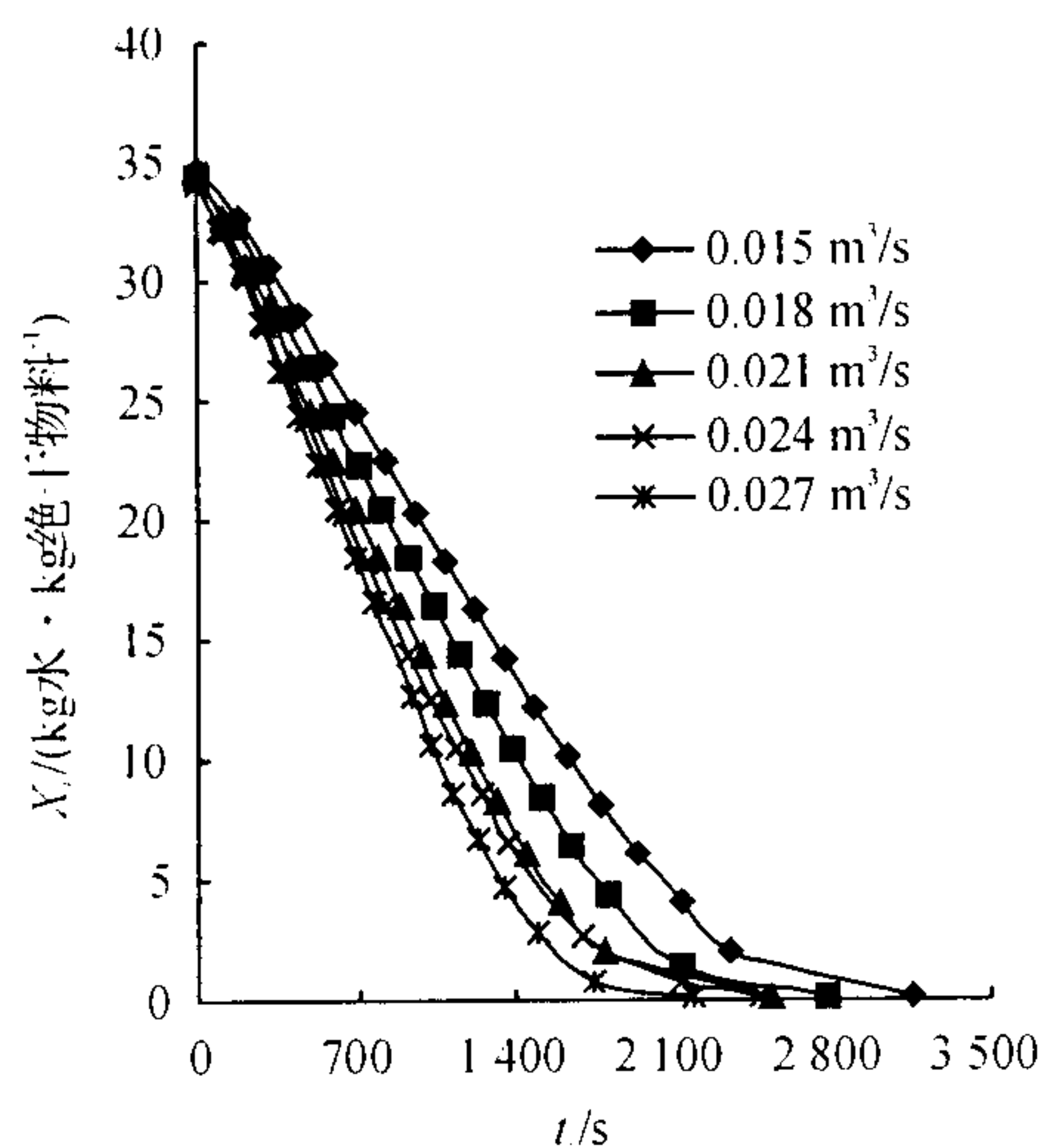


图7 不同干燥风量下的干燥曲线

表4 不同干燥风量复水性的比较

| 风量/(m ³ ·s ⁻¹) | 0.015 | 0.018 | 0.021 | 0.024 | 0.027 |
|---------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 复水性 R | 26.43 | 26.24 | 26.90 | 26.98 | 27.12 |

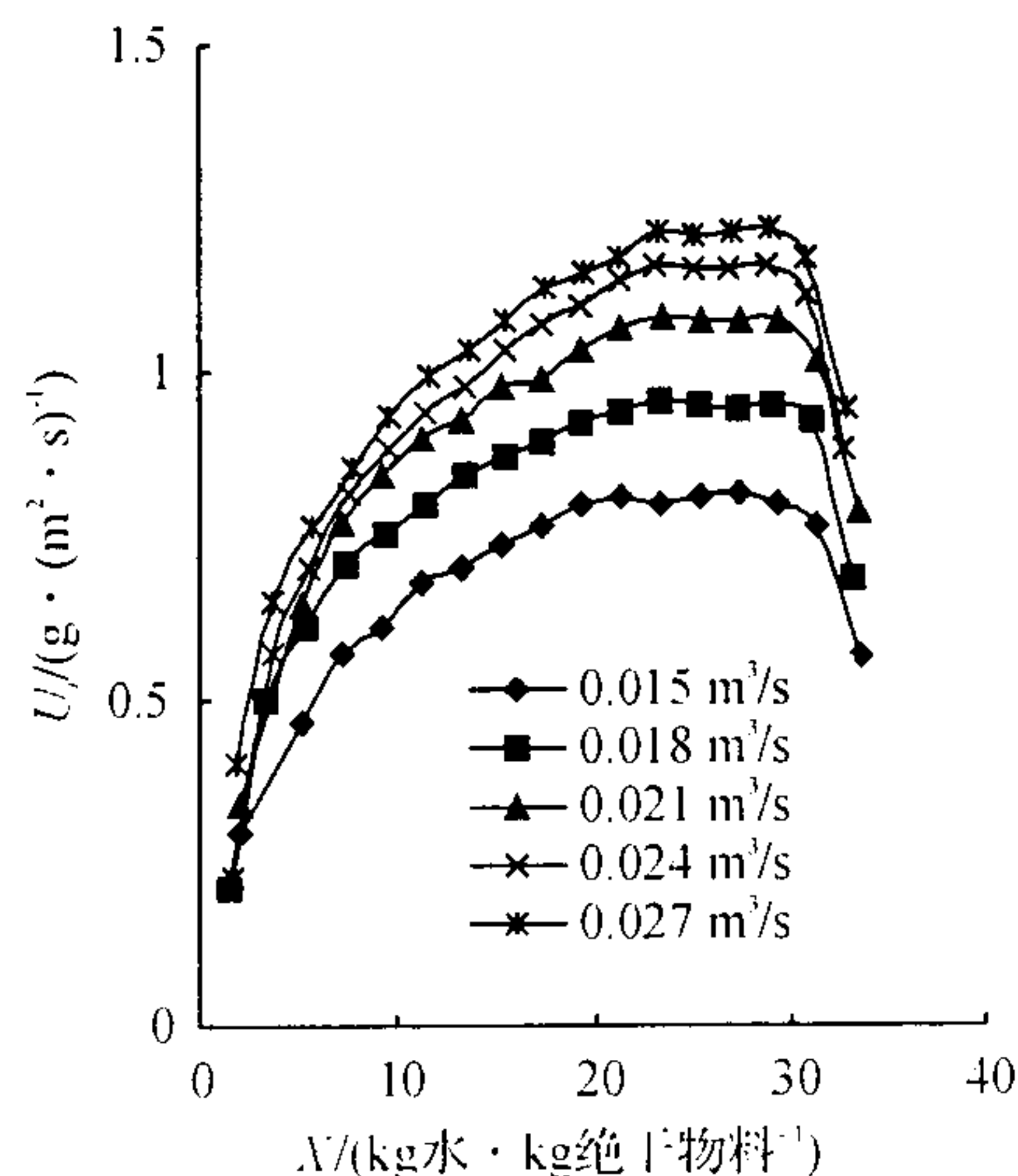


图8 不同干燥风量下的速率曲线

如图7、8所示,风量越大,经相同时间干燥物料的含水量越低。其原因是风量越大,空气中的含水量越小,空气与物料间的湿度差就越大,同时边界层减薄,传热系数增大干燥速度也就越大。因此,提高风量对干燥过程有利,但风量越大能量损耗也越大。表4显示,不同风速下复水性有差别,但相差不大,综合考虑,以0.021 m³/s(1.34 m/s)干燥为佳。

2.2.3 不同物料厚度对干燥过程的影响 在干燥温度为80 °C、风量为0.021 m³/s、装载1.75 kg/m²、片状条件下,分别考察了厚度为2 mm、3 mm物料的干燥过程,干燥曲线见图9和速率曲线见图10,感官指标差别不明显。

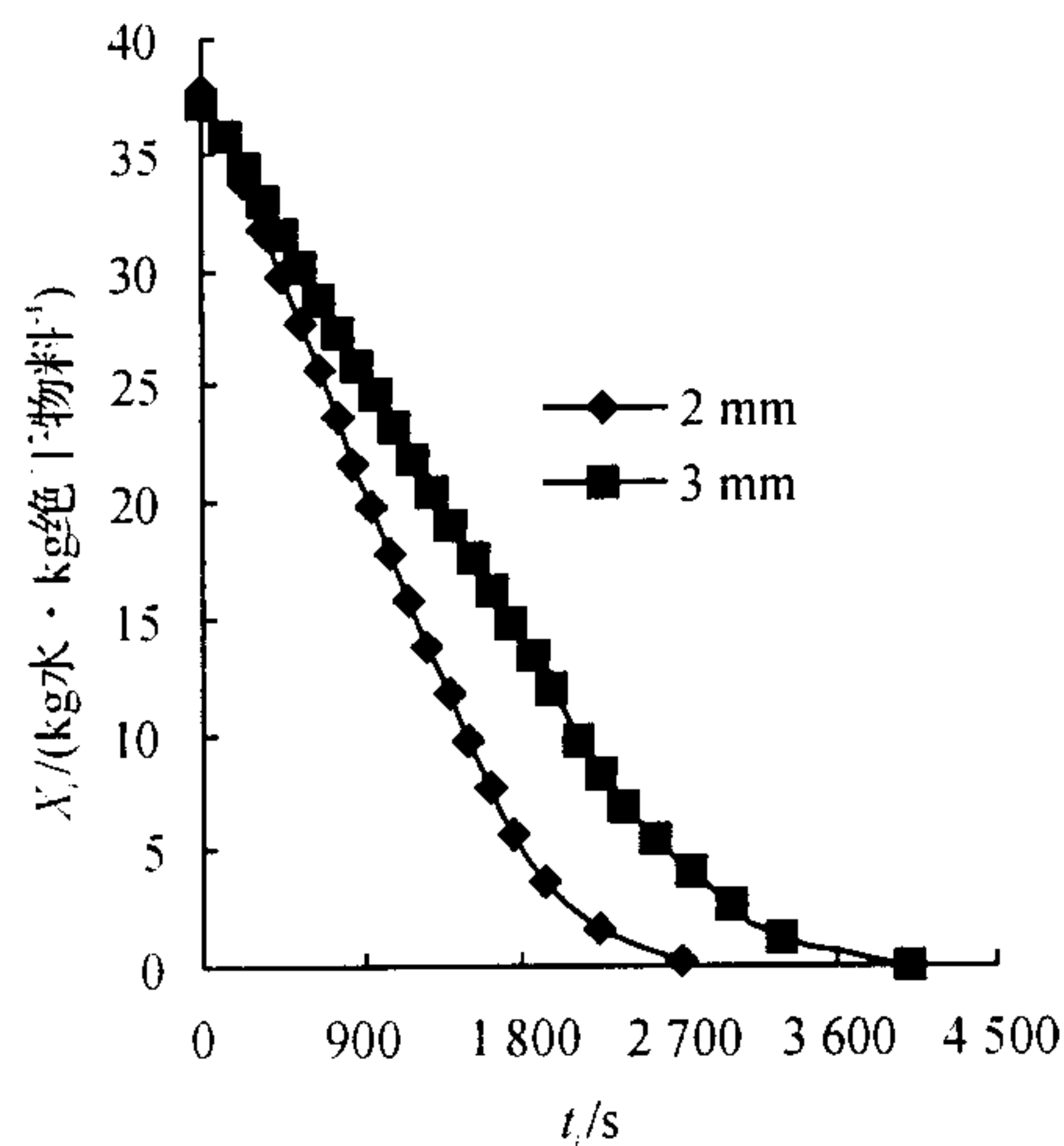


图9 不同厚度下的干燥曲线

如图10所示,物料为2 mm的干燥速度明显比物料为3 mm的快,这是因为物料越薄,水分越容易从西芹内部迁移,干燥速度也就越大,要达到一定的含水量所需时间就越短。因此在实际生产过程中,

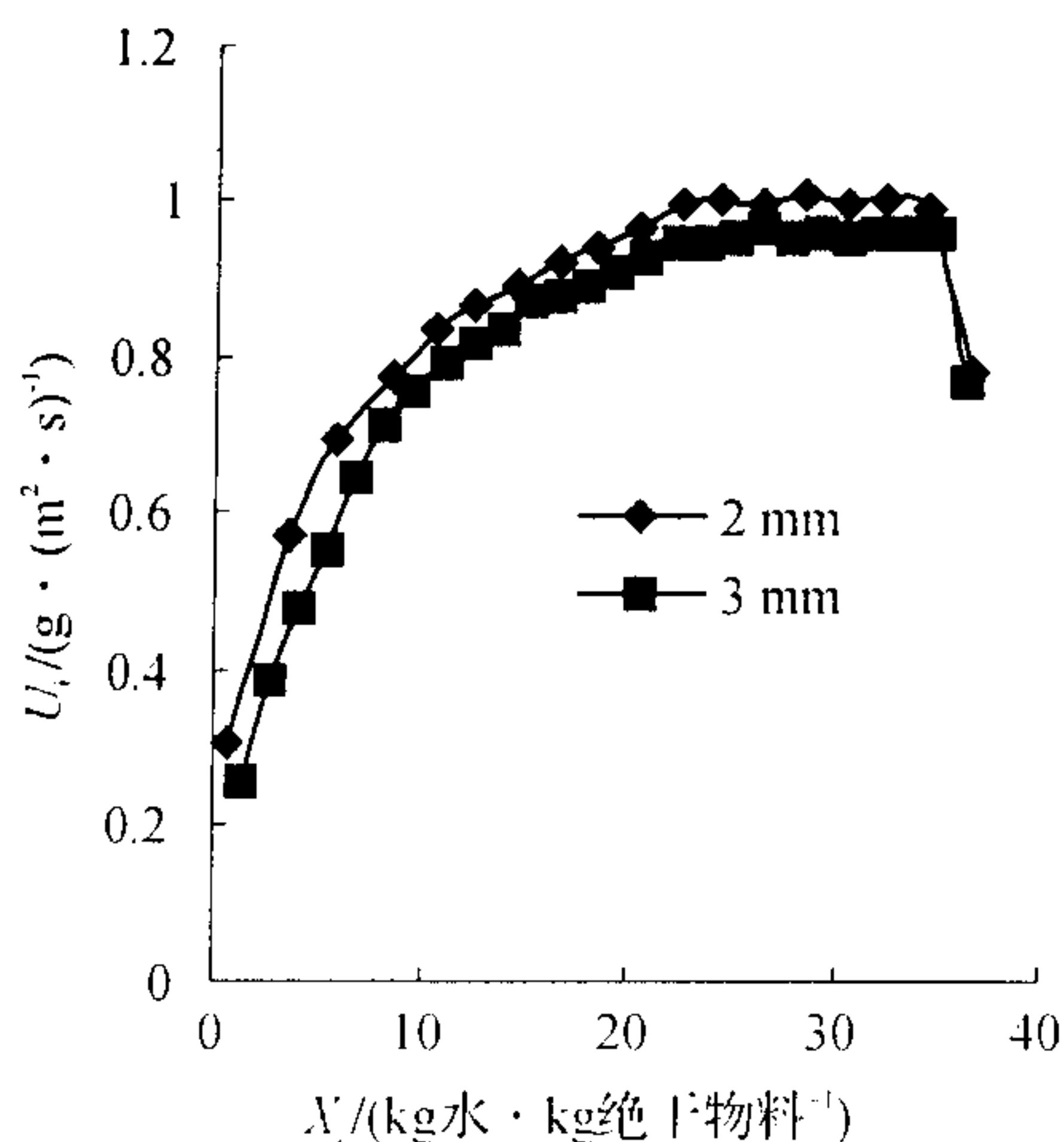


图 10 不同厚度下的速率曲线

物料尽可能薄。

2.2.4 不同装载量对干燥过程的影响 在干燥温度为 80 °C、风量 0.021 m³/s、片状的条件,分别考察了单层物料(1.75 kg/m²)和双层物料(3.52 kg/m²)的干燥过程,其干燥曲线见图 11 和速率曲线见图 12,感官指标差别不明显。

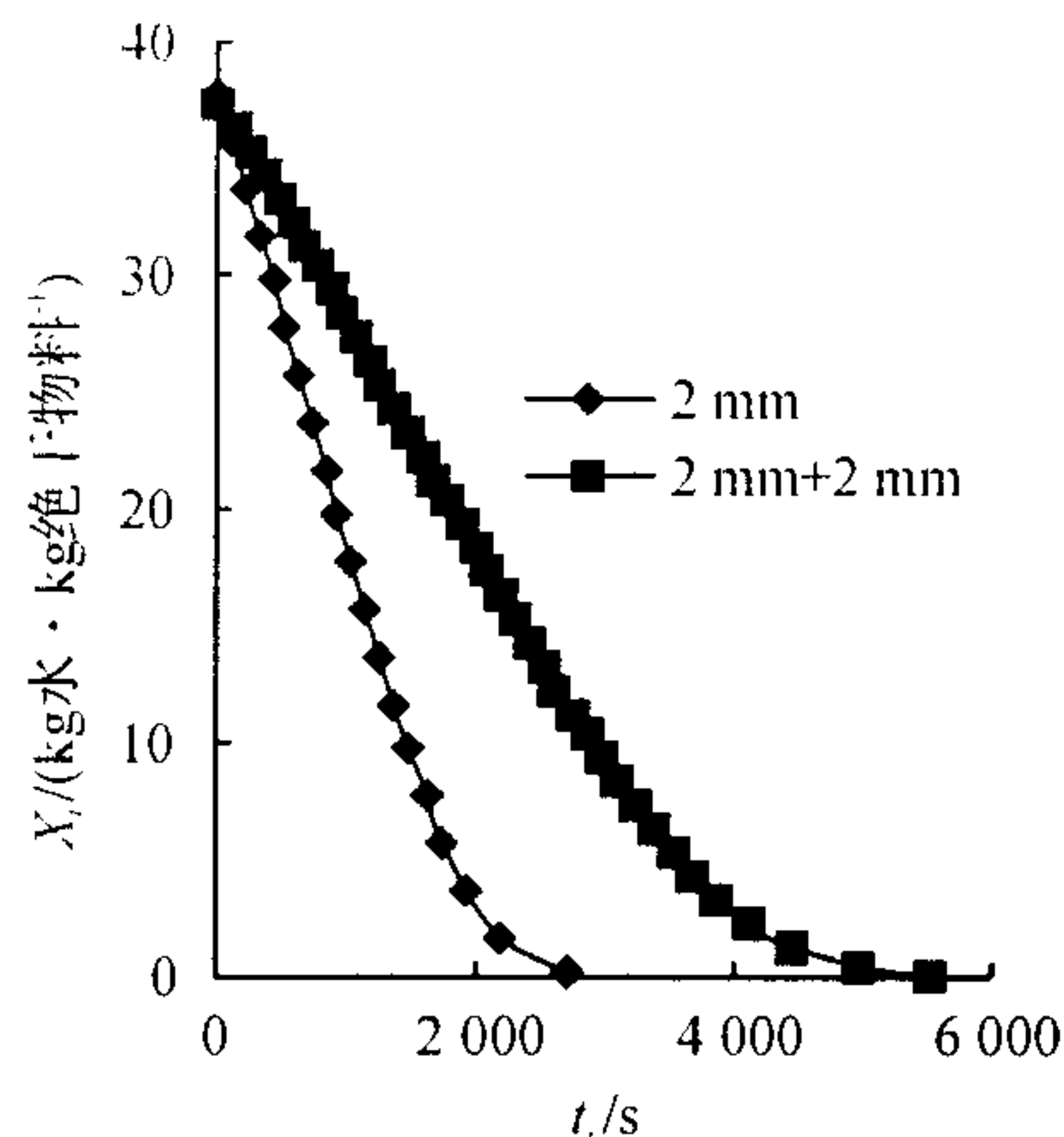


图 11 单层与双层下的干燥曲线

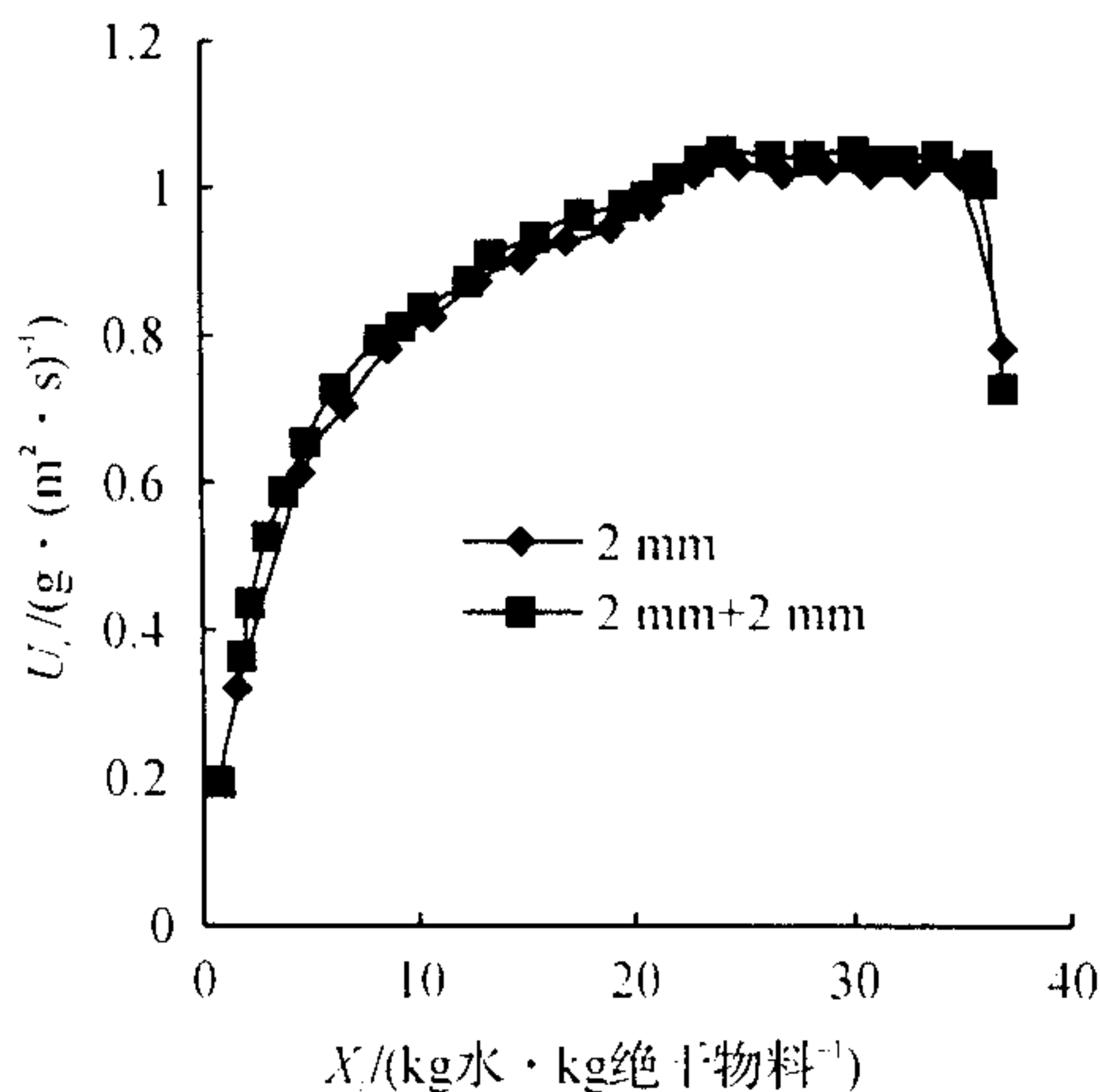


图 12 单层与双层下的速率曲线

如图 11、图 12 所示,物料双层与单层要达到相同的含水率,双层所需的干燥时间要大,这是由于物料层厚,传递阻力大;但双层的干燥速度比单层的大。这是因为干燥速度是单位时间单位面积上的水分挥发量,水分的挥发量与总物料量有关。只要传热速度足够快,装载量越多,干燥速度就越高。在实际生产过程中,需要结合经济因素考虑合适的装载量,可以选择多层物料干燥。

2.3 干燥过程分析与较佳工艺条件确定

由干燥曲线可看出,西芹热风干燥过程分为三个明显不同的阶段,即调整段、恒速干燥段和降速干燥段。

在调整段,气固两相进行传热和传质,热空气传给西芹的热量,一部分用于提高西芹片的温度,使其由初始温度逐渐提高到热空气状态下的湿球温度;另一部分热量用于汽化水分,故西芹片含水率下降较慢,干燥速度上升,该段所需时间较短。在恒速干燥段,西芹片维持热空气状态下的湿球温度不变,热空气传递给西芹片的热量全部用于汽化水分,含水率呈直线下降,干燥速率基本保持不变。此阶段是干燥过程的主要阶段,所用时间较长,说明其内部组织结构比较疏松,干燥时内部水分的扩散阻力较小,其内部水分扩散速率大于表面水分蒸发速率。一般而言,恒速干燥阶段越长,制品的品质越好。在降速干燥段,西芹片内部水分移动到表面的速度赶不上表面水分的汽化速率,表面局部出现“干区”,进而表面都成为干区,非结合水分全部除去,接下去所汽化的是结合水。此时热空气传递的热量,一部分用于汽化水分,一部分用于提高西芹片的温度,故西芹片含水率下降速度变慢,从图线上可看出有两个降速阶段^[5]。同时,由图可见,风温越高,风速越大,切片越薄,载量多层,干燥速率就越大,且风温是各个因素之中对干燥速率影响效应最大的。

由实验结果可知,较佳干燥工艺条件为风温 80 °C、风速 0.021 m³/s(1.34 m/s),物料选择为薄而双层。

2.4 干燥方程

采用薄层 Page 模型对实验数据进行拟合^[6],方程为

$$(X - X^*) / (X_0 - X^*) = \exp(-K\tau^n) \quad (1)$$

对式(1)线性化后得出:

$$\ln[-\ln(X - X^*) / (X_0 - X^*)] = n \ln \tau + \ln K \quad (2)$$

式中: X 为干基含水量,kg水/kg绝干料; X_0 为初始含水量,kg水/kg绝干料; X^* 为平衡含水量,kg水/kg绝干料; τ 为时间,s; K 、 n 为方程参数。将实验数据分别在 $\ln[-\ln MR]$ 与 $\ln \tau$ 坐标上画图, $MR = (X - X^*) / (X_0 - X^*)$,得到方程的斜率即为 n ,截距为 $\ln K$ 。

以 $\ln[-\ln MR]$ 为 y 轴, $\ln \tau$ 为 x 轴,得到风量 $0.021 \text{ m}^3/\text{s}$ 时不同干燥温度下和温度 80°C 时不同干燥风速下的方程如下:

风量 $0.021 \text{ m}^3/\text{s}$ 时,

60°C 干燥方程:

$$(X - X^*) / (X_0 - X^*) = \exp(-1.5142 \times 10^{-5} \tau^{1.4999});$$

70°C 干燥方程:

$$(X - X^*) / (X_0 - X^*) = \exp(-1.8513 \times 10^{-5} \tau^{1.5262});$$

75°C 干燥方程:

$$(X - X^*) / (X_0 - X^*) = \exp(-1.5021 \times 10^{-5} \tau^{1.5731});$$

80°C 干燥方程:

$$(X - X^*) / (X_0 - X^*) = \exp(-7.444 \times 10^{-6} \tau^{1.6974});$$

85°C 干燥方程:

$$(X - X^*) / (X_0 - X^*) = \exp(-8.824 \times 10^{-6} \tau^{1.6891}).$$

温度 80°C 时,

风量 $0.015 \text{ m}^3/\text{s}$ 干燥方程:

$$(X - X^*) / (X_0 - X^*) = \exp(-9.732 \times 10^{-6} \tau^{1.6051});$$

风量 $0.018 \text{ m}^3/\text{s}$ 干燥方程:

$$(X - X^*) / (X_0 - X^*) = \exp(-1.014 \times 10^{-5} \tau^{1.6334});$$

风量 $0.021 \text{ m}^3/\text{s}$ 干燥方程:

$$(X - X^*) / (X_0 - X^*) = \exp(-4.3663 \times 10^{-5} \tau^{1.4591});$$

风量 $0.024 \text{ m}^3/\text{s}$ 干燥方程:

$$(X - X^*) / (X_0 - X^*) = \exp(-5.1496 \times 10^{-5} \tau^{1.442});$$

风量 $0.027 \text{ m}^3/\text{s}$ 干燥方程:

$$(X - X^*) / (X_0 - X^*) = \exp(-1.1195 \times 10^{-5} \tau^{1.6851}).$$

各条件下的方程线性相关均较好,说明干燥方程符合 Page 模型。

3 结 语

实验得出:

1) 西芹薄片在 90°C 热水中烫漂 3 min ,为较适宜的预处理条件。

2) 西芹干燥呈现出典型的三段脱水性质,即调整阶段、恒速阶段和降速阶段。

3) 提高干燥温度与风量,对强化干燥过程有利。较佳的干燥工艺条件为风温 80°C 、风量 $0.021 \text{ m}^3/\text{s}$ (1.34 m/s),物料选择为薄而双层。

4) 西芹热风干燥后与新鲜西芹相比,重量大为减轻,体积减小,从而方便了运输与储藏。西芹在热风干燥后其物理性状保持良好,保持原有西芹特有的色香味,在常温的水中一定时间就能复水,复水后能基本恢复西芹新鲜时的状态。

5) 干燥方程符合 Page 模型。

参考文献:

- [1] 勇鹏,佳佳. 大有开发前景的特菜生产(一)[J]. 农民致富之友,1993(10):13.
- [2] 龚卫清,章程,郑荣珍. 西芹冷冻干燥工艺条件的研究[J]. 热带农业科学,1996,3(6):36-39.
- [3] 张德权,艾启俊. 蔬菜深加工新技术[M]. 北京:化学工业出版社,2003:150,194.
- [4] 纪丽莲,孙金凤. 蒲菜脱水工艺的试验研究[J]. 食品研究与开发,2003,24(3):47-49.
- [5] 何潮洪,冯霄. 化工原理[M]. 北京:科学出版社,2001:544-569.
- [6] 诸爱士. 洋葱薄层脱水动力学研究[J]. 浙江科技学院学报,2006,18(1):31-34.