

化学工程

习题解答汇编(SI)



本书是〔英〕J. M. 柯尔森、J. F. 李嘉森所著《化学工程》第二卷(第三版)的习题解答汇编, 作为“化学工程”第V卷出版。

全书共分十六章, 有流体中的颗粒运动, 流态化, 浸取、蒸馏、吸收、蒸发、干燥, 结晶等化工单元操作的习题及解答。本书涉及到真实流体, 并联系工业装置和工业条件下的实际问题, 也有一些较深的题目。全书采用国际单位制(SI)。

本书适用于大专院校化工系师生阅读, 也可供化工设计单位, 化工厂的工程技术人员参考。

本书由成都科技大学余华瑞、蒋述曾、白德蕙、杨积义、杨清霞等翻译, 傅炳街、孙本文校阅。

CHEMICAL ENGINEERING

Volume 5

J. M. Coulson and J. F. Richardson Solutions to the Problems
in Chemical Engineering Volume 2

J. R. Backhurst and J. H. Harker

PERGAMON PRESS 1979

OXFORD • NEW YORK • TORONTO • SYDNEY

PARIS FRANKFURT

化 学 工 程

卷 V

习题解答汇编 (SI)

成都科技大学 余华瑞 等译

责任编辑: 陈 丽

封面设计: 任 辉

*

化学工业出版社出版

(北京和平里七区十六号楼)

化学工业出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行

*

开本 $787 \times 1092 \frac{1}{32}$ 印张 $10 \frac{1}{2}$ 字数233千字印数1—5,690

1985年11月北京第1版1985年11月北京第1次印刷

统一书号15063·3751定价2.05元

序 言

在《化学工程》卷四第一版的序言中，我们引用了柯尔森和李嘉森在《化学工程》卷一第一版的序言中所写的下述一段话：

“我们在每一章中都引入了一些例题。我们认为，这些例题对正确理解教本中所述的处理方法是必要的。希望学生在自己解决新的实际问题之前先看懂例题。化学工程问题是要求得到数值解答的，故要紧的是要熟悉不同的方法，以便能用科学的方法，而不是凭直觉地得出答案。”

我们正是抱着上述目的才编纂了卷五。此卷是《化学工程》卷二第三版习题的解答。本卷按相应于卷二的各章编排成章。此书大量参照了卷二各部分的方程式和原始数据，所以是卷二的补充。本书与卷二的修订版同时编写，并采用SI制。

此卷中的习题在许多方面比卷四中的习题繁难和冗长。因为卷四只对卷一的习题作出解答，而本卷中有一个很大的优点，它既涉及到真实流体，更为重要的是联系了工业装置和工业条件。为此，我们希望我们的工作不仅对学生，而且对工业部门的专业工程师都会有所裨益，确信他们会对本卷中许多有指导性的和检查性的习题感到兴趣。

我们再次衷心地感谢柯尔森和李嘉森二教授在多方面给予的帮助。前者有令人羡慕的才能，他能以最少的数据简明地说明主要论点，以此完善地指出问题的症结所在。后者非

常耐心地和详尽地修改了我们所犯的小量错误，并校核了全书。泰因新堡大学的同事们在许多情况下多次帮助我们，对此也表示谢意。

J. R. 巴克霍斯特

J. H. 哈克

1978年

于泰因新堡大学

目 录

第一章	颗粒物料	1
第二章	固体的破碎	12
第三章	流体中的颗粒运动	22
第四章	通过粒状床层及填料塔的流体流动	46
第五章	沉降	56
第六章	流态化	65
第七章	气力输送及水力输送	78
第八章	气体净制	82
第九章	过滤	89
第十章	浸取	118
第十一章	蒸馏	143
第十二章	吸收	215
第十三章	液-液系统	247
第十四章	蒸发	269
第十五章	结晶	320
第十六章	干燥	323

第一章 颗粒物料

题1.1 一粉粒物料, 以质量为基准的粒度分布, 在粒度 $1\mu\text{m}$, 0% (质量) 至 $101\mu\text{m}$, 100% (质量) 的范围内为一直线。试计算此粉粒的表面平均直径。

解

由式1.15, 表面平均直径可由下式求得:

$$d_s = 1 / \Sigma(x_i / d_i)$$

因为粒度分析为一连续直线

$$d = 100x + 1 \quad (\text{图1.7})$$

$$\begin{aligned} d_s &= 1 / \int_0^1 dx / d \\ &= 1 / \int_0^1 dx / (100x + 1) \\ &= 100 / \ln 101 \\ &= \underline{21.7\mu\text{m}} \end{aligned}$$

题1.2 求得粉粒料颗粒数分布曲线的方程式如下: 当粒度范围为 $0 \sim 10\mu\text{m}$, $dn/dd = d$, 当粒度范围为 $10 \sim 100\mu\text{m}$, $dn/dd = 100000/d^4$ 。试绘出粉粒数、表面积及质量分布曲线, 并计算粉粒的表面平均直径。

扼要说明构成上述曲线的数据是如何由试验得到的。

解

在 $d = 0 \sim 10\mu\text{m}$ 的范围内

$$\frac{dn}{dd} = d$$

积分得 $n = 0.5d^2 + c_1$ (i)

式中 c_1 为积分常数。

在 $d = 10 \sim 100 \mu\text{m}$ 的范围内,

$$\frac{dn}{dd} = 10^5 d^{-4}$$

积分得 $n = c_2 - 0.33 \times 10^5 d^{-3}$ (ii)

当 $d = 0$ 时, $n = 0$, 因而由式 (i) 得 $c_1 = 0$

当 $d = 10 \mu\text{m}$ 时, 在式 (i) 中 $n = 0.5 \times 10^2 = 50$

$$\text{在式 (ii) 中 } 50 = c_2 - 0.33 \times 10^5 \times 10^{-3}$$

于是 $c_2 = 83.0$

因而, 当 $d = 0 \sim 10 \mu\text{m}$ 时, $n = 0.5d^2$

当 $d = 10 \sim 100 \mu\text{m}$ 时, $n = 83.0 - 0.33 \times 10^5 d^{-3}$

应用上二方程, 求得 n 值如下:

$d(\mu\text{m})$	n	$d(\mu\text{m})$	n
0	0	10	50.0
2.5	3.1	25	80.9
5.0	12.5	50	82.7
7.5	28.1	75	82.9
10.0	50.0	100	83.0

将上述数据绘于图 1 a 中

利用此图选定一 n 值, 就可得相应的 d 值, 因而对 n 的每一增量, 均可得到相应的 n_i 及 d_i 。计算 $n_i d_i^2$ 和 $n_i d_i^3$ 值, 并求出其总量, 则与每一增量 n 相应的颗粒表面积由下式求得:

$$s_i = n_i d_i^2 / \sum n_i d_i^2$$

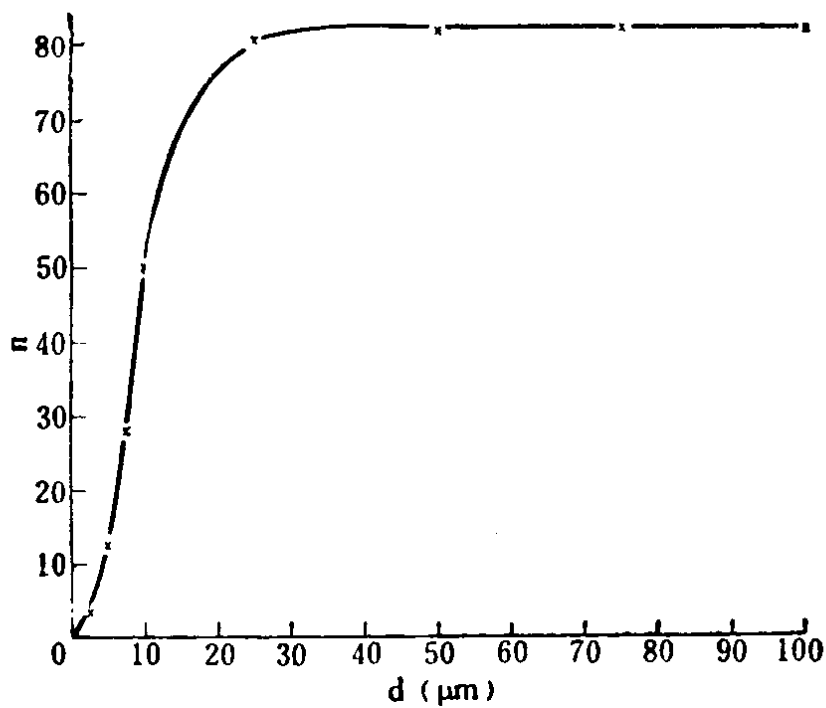


图 1 a

总表面积 s 等于 Σs_1 。类似地，颗粒分量 $x = \Sigma x_1$ ，式中

$$x_1 = n_1 d_1^3 / \Sigma n_1 d_1^3$$

根据上述方法，各计算值列表如下：

n	d	n_1	d_1	$n_1 d_1^2$	$n_1 d_1^3$	s_1	s	x_1	x
0	0								
20	6.2	20	3.1	192	596	0.014	0.014	0.001	0.001
40	9.0	20	7.6	1155	8780	0.085	0.099	0.021	0.022
50	10.0	10	9.5	903	8573	0.066	0.165	0.020	0.042
60	11.4	10	10.7	1145	12250	0.084	0.249	0.029	0.071
65	12.1	5	11.75	690	8111	0.051	0.300	0.019	0.090
70	13.6	5	12.85	826	10609	0.061	0.361	0.025	0.115
72	14.7	2	14.15	400	5666	0.029	0.390	0.013	0.128
74	16.0	2	15.35	471	7234	0.035	0.425	0.017	0.145
76	17.5	2	16.75	561	9399	0.041	0.466	0.022	0.167
78	19.7	2	18.6	692	12870	0.051	0.517	0.030	0.197

续表

<i>n</i>	<i>d</i>	<i>n</i> ₁	<i>d</i> ₁	<i>n</i> ₁ <i>d</i> ₁ ²	<i>n</i> ₁ <i>d</i> ₁ ³	<i>s</i> ₁	<i>s</i>	<i>x</i> ₁	<i>x</i>
80	22.7	2	21.2	899	19056	0.065	0.582	0.045	0.242
		1	24.1	581	14000	0.043		0.033	0.275
81	25.5	1	28.5	812	23150	0.059	0.684	0.055	0.330
82	31.5	1	65.75	4323	284240	0.316	1.000	0.670	1.000
83	100								
				13650	424534				

将 *s* 与 *x* 值作为 *d* 的函数绘于图1b中。

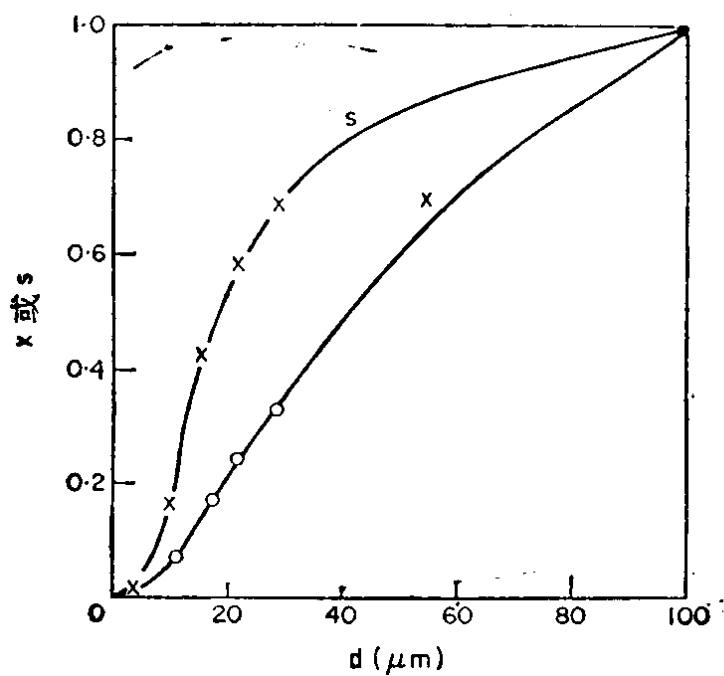


图 1 b

表面平均直径

$$\begin{aligned} d_s &= \Sigma (n_1 d_1^3) / \Sigma (n_1 d_1^2) = 1 / \Sigma (x_1 / d_1) \\ &= \int d^3 dn / \int d^2 dn \end{aligned}$$

当 $0 < d < 10 \mu\text{m}$, $dn = d dd$

当 $10 < d < 100 \mu\text{m}$, $dn = 10^5 d^{-4} dd$

$$\begin{aligned}
 \therefore d_r &= \left(\int_0^{10} d^4 dd + \int_{10}^{100} 10^5 d^{-1} dd \right) / \left(\int_0^{10} d^3 dd + \int_{10}^{100} 10^5 d^{-2} dd \right) \\
 &= ([d^5/5]_0^{10} + 10^5 [\ln d]_{10}^{100}) / ([d^4/4]_0^{10} + 10^5 (-d^{-1})_{10}^{100}) \\
 &= (2 \times 10^4 + 2.303 \times 10^5) / (2.5 \times 10^3 + 9 \times 10^3) \\
 &= \underline{21.8 \mu\text{m}}
 \end{aligned}$$

对于物料的粒度，当其粒度较大时，一般用筛析法确定，而对于太细不能筛析的粉粒，则用沉降法测定。此种方法已在卷二第一章内介绍。

题1.3 粉粒料的粒度特性可用一直线表示(累计基准)。此直线的适用的粒度范围为0到50 μm 时，过筛量为100%。若粉粒最初是均匀分散在液柱中，试计算粒度为40 μm 的粉粒，由开始沉降至沉降了液柱总高这段时间内，仍悬浮在液柱内的粉粒质量分率。

解

在滞流状况下流动时，速度与直径的平方成正比。因此40 μm 的粉粒沉降了 h 距离所需的时间为

$$h/40^2 k \quad \text{s}$$

此时直径为 $d \mu\text{m}$ 的粉粒，其沉降距离相应为

$$kd^2 h/40^2 k = hd^2/40^2 \quad \text{m}$$

因此，仍在悬浮液中粒度为 d 的粉粒的比分率 = $(1 - d^2/40^2)$ ，相应地在悬浮液中的质量分率为

$$= \int_0^{40} (1 - d^2/40^2) dw$$

因为 $dw/dd = 1/50$ ，故质量分率

$$\begin{aligned}
 &= (1/50) \int_0^{40} (1 - d^2/40^2) dd \\
 &= (1/50) [d - d^3/4800]_0^{40} = 0.533
 \end{aligned}$$

即留在悬浮液内的粉粒为53.3%

题1.4 石英-方铅矿混合物的粒度范围为 0.0052 至 0.025mm, 石英的比重为2.65, 方铅矿的比重为7.5。

在自由沉降条件下将混合物在水力选粒机中进行分离, 可得三部分产品。一部分只含石英, 一部分为石英和方铅矿混合物, 另一部分只含方铅矿。试问混合产品中此二种物料的粒度范围为多大?

解

应用式3.17, 并改写为

$$u = kd^2 (\rho_s - \rho)$$

$$\begin{aligned}
 \text{对方铅矿大颗粒} \quad u &= k \times 0.025^2 (7.5 - 1.0) \\
 &= 0.00406 k \quad \text{mm/s}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{对方铅矿小颗粒} \quad u &= k \times 0.0052^2 (7.5 - 1.0) \\
 &= 0.000175 k \quad \text{mm/s}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{对大石英颗粒} \quad u &= k \times 0.025^2 (2.65 - 1.0) \\
 &= 0.00103 k \quad \text{mm/s}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{对小石英颗粒} \quad u &= k \times 0.0052^2 (2.65 - 1.0) \\
 &= 0.000045 k \quad \text{mm/s}
 \end{aligned}$$

当颗粒以 0.00103 k mm/s 的速度沉降时, 则底部产品将含有石英, 而悬浮在悬浮液中的方铅矿的最大粒度为:

$$0.00103 k = kd^2 (7.5 - 1.0)$$

$$\therefore d = 0.0126 \text{mm}$$

同理, 当颗粒以小于 0.000175 k mm/s 的速度沉降时, 则顶部产品将含有方铅矿, 而在悬浮液中石英的最小粒

度为

$$0.000175 k = k d^2 (2.65 - 1.0)$$

即

$$d = 0.0103 \text{ mm}$$

因此，在滞流时，混合产品中石英和方铅矿的粒度范围分别为：0.0103~0.025mm和0.0052~0.0126mm

题1.5 若用阻滞沉降法将粒度范围为0.015mm至0.065mm的石英-方铅矿分离成二纯组成。试问流体的最小表观密度应为多大才能完成此种分离？床层粘度又是怎样影响所需最小密度的？

(方铅矿密度=7500kg/m³，石英密度=2650kg/m³)

解

设方铅矿及石英颗粒的形状相同，则由式1.31，在滞流状况下， $s = 0.5$ ，要求流体的密度为：

$$(0.065/0.015) = [(7500 - \rho)/(2650 - \rho)]^{0.5}$$

即

$$\rho = 2377 \text{ kg/m}^3$$

而在充分湍动状况时，由式1.31， $s = 1$ ，液体的密度则应为

$$(0.065/0.015) = (7500 - \rho)/(2650 - \rho)$$

即

$$\rho = 1196 \text{ kg/m}^3$$

因而进行有效分离的流体最小密度为1196kg/m³，这是假定在充分湍动状况下。如果粘度增大，雷诺数将减小，而在滞流状况时，液体的密度应增大到2377 kg/m³。

题1.6 试简明地说明用显微镜法，或用液体沉降法测定颗粒粒度分布的条件，并说明这两种测量方法的特点。

下表内粉尘粒度分布数据是用显微镜法测得的。试将此表内数据换算成以质量为基准的粒度分布，并算出比表面积。假设颗粒均为球形，其比重为2.65。

粒度范围, μm	颗粒数	粒度范围, μm	颗粒数
0~2	2000	12~16	15
2~4	600	16~20	5
4~8	140	20~24	2
8~12	40		

解

测定颗粒粒度的显微镜法和沉降法可参阅第 1.2.2 节中所述。简言之，沉降法适用于非常小的颗粒，由于颗粒太小，不可能用筛析法或观察的方法进行分级。

粒度为 d_1 的颗粒的质量为

$$x_1' = n_1 k_1 d_1^3 \rho_s$$

式中 k_1 为常数， n_1 为粒度 d_1 的颗粒数， ρ_s 为颗粒的密度 = 2650 kg/m³。因此质量分率为

$$x_1 = n_1 k_1 d_1^3 \rho_s / \Sigma n k d^3 \rho_s$$

此时

d	n	$k d^3 n \rho_s$	x
1	2000	5300000 k	0.011
3	600	42930000 k	0.090
6	140	80136000 k	0.168
10	40	106000000 k	0.222
14	15	109074000 k	0.229
18	5	77274000 k	0.162
22	2	56434400 k	0.118
		$\Sigma = 477148400 k$	$\Sigma = 1.0$

用式1.14可求得表面平均直径为

$$d_s = \Sigma (n_i d_i^3) / \Sigma (n_i d_i^2)$$

计算方法如下表所示：

<i>d</i>	<i>n</i>	<i>nd</i> ²	<i>nd</i> ³
1	2000	2000	2000
3	600	5400	16200
6	140	5040	30240
10	40	4000	40000
14	15	2940	41160
18	5	1620	29160
22	2	968	21296
		$\Sigma = 21968$	$\Sigma = 180056$

∴ $d_s = 180056 / 21968 = 8.20 \mu\text{m}$

此即为与混合物具有相同比表面的颗粒粒度。

直径8.20μm颗粒的体积 = $(\pi/6) \times 8.20^3$
= 288.7 μm³

直径 8.20μm 颗粒 的 表 面 积 = $\pi \times 8.20^2 = 211.2 \mu\text{m}^2$ ，
因此

比表面 = $211.2 / 288.7 = 0.731 \mu\text{m}^2 / \mu\text{m}^3$

或 $0.731 \times 10^6 \text{m}^2 / \text{m}^3$

题1.7 评定固粒混合器的性能，可用从混合器中取出选样，并计算其质量分率所产生方差的方法来进行。每隔30秒的时间对混合质量进行检验，并得到如下数据：

样本方差	0.025	0.006	0.015	0.018	0.019
混合时间(s)	30	60	90	120	150

若所分析的组分约为混合物的20%(重量), 而且每次取样均有约100个颗粒, 试评价所得混合物的混合质量, 并以图表形式表示混合指数随时间的变化。

解

对完全不混合系统,

$$s_0^2 = p(1 - p)$$
$$= 0.20(1 - 0.20) = 0.16$$

(式1.23)

对完全随机的混合物

$$s_r^2 = p(1 - p)/n$$
$$= 0.20(1 - 0.20)/100 = 0.0016$$

(式1.22)

混合度M可由式1.24求出, 为

$$M = (s_0^2 - s^2)/(s_0^2 - s_r^2)$$

此时

$$M = (0.16 - s^2)/(0.16 - 0.0016)$$
$$= 1.01 - 6.313s^2$$

由此算出的数据如下:

t(s)	30	60	90	120	150
s ²	0.025	0.006	0.015	0.018	0.019
M	0.852	0.972	0.915	0.896	0.890

上述数据绘于图 1 c, 由图可见在t=60s时有一最大值。

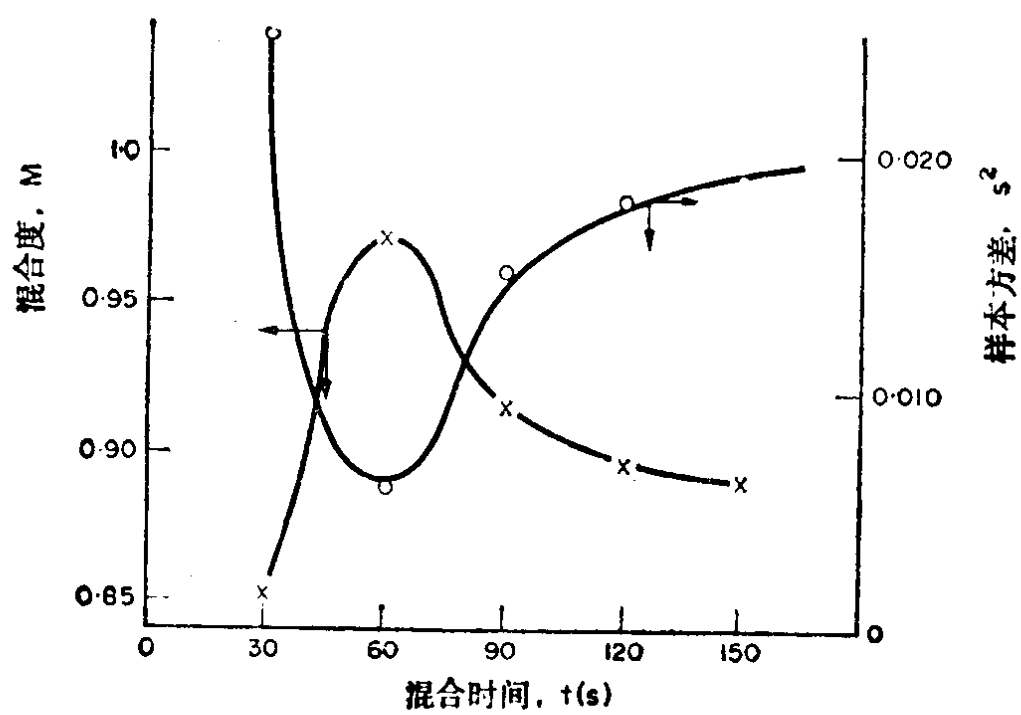


图 1c

第二章 固体的破碎

题2.1 在布莱克 (Blake) 颚式破碎机中, 破碎某一物料, 颗粒的平均粒度由50mm减小到10mm, 其能量消耗率为13.0kW/(kg/s)。若将同种物料从平均粒度为75mm破碎到平均粒度为25mm, 试问需要消耗的能量为多少?

(a) 假设雷廷哥 (Rittinger) 定律适用。

(b) 假设基克 (Kick) 定律适用。

哪一个定律所得到的结果更为可靠? 其原因何在?

解

(a) 雷廷哥定律

由式2.2可知:

$$E = K_R f_c \left(\frac{1}{L_2} - \frac{1}{L_1} \right)$$

$$\text{即} \quad 13.0 = K_R f_c \left(\frac{1}{10} - \frac{1}{50} \right)$$

$$\therefore K_R f_c = 13.0 \times 50 / 4 = 162.5 \text{ kW s / kg mm}$$

故将75mm的物料破碎到25mm, 所需要的能量由下式计算:

$$E = 162.5 \left(\frac{1}{25} - \frac{1}{75} \right) = \underline{4.33 \text{ kW / (kg / s)}}$$

(b) 基克定律

由式2.3可知:

$$E = K_K f_c \ln (L_1 / L_2)$$