压下规程厚度分配两种数学模型分析比较

周宜森[1]，周紫箭[2]，王 捷[2]

（1.江苏省冶金研究所有限公司，江苏 南京 210007；
2.古河金属（无锡）有限公司 江苏 无锡 214028）

摘 要：通过两个实例对轧制板带材的道次厚度分配数学模型做了分析和比较，认为 K_H 模型比指数模型优越。K_H 模型可以为优化压下规程创造条件，并将产生经济效益。

关键词：轧制；压下规程；数学模型；K_H 模型；指数模型

中图分类号：TG335 **文献标识码**：A **文章编号**：1001－196X（2005）01－0037－03

Analysis and comparison of two mathematical models for rolling schedule

ZHOU Yi-maio[1]，ZHOU Zi-jian[2]，WANG Jie[2]

（1.Jiangsu Metallurgical Research Institute Co.Ltd.，Nanjing 210007，China；
2.Guhe Metal Ltd. Wuxi，Wuxi 214028，China）

Abstract：Two mathematical models are analysed and compared for rolling schedule with two practical cases in this paper. K_H model is advatageous over index's. K_H model will provide a basis for optimization of pass schedule，and makes better economic profit.

Key words：rolling；rolling schedule；mathematical model；K_H model；index model

轧制生产中压下规程的设计和计算一直是轧制工艺的核心，它关系到轧制过程的控制和优化。

压下规程最终以道次厚度分配来体现。目前大多还是以经验法分配道次厚度。随着控制技术和优化技术的发展，手工分配道次厚度做法已满足不了要求，于是逐渐出现道次厚度分配的数学模型，以利完善控制和优化技术。

本文对两种数学模型做分析和比较，以便不断改进这方面的探索工作。

1 两种数学模型简介

文献［1～3］中叙述了编制板带压下规程的 K_H 计算法，经过近 50 个实例的运算和模拟，表明 K_H 计算法是完全可行的，在这里我们称它为“K_H 数学模型”，以下简称“K_H 模型”。

收稿日期：2004－10－09；**修订日期**：2004－11－13

作者简介：周宜森（1931－），男，江苏省冶金研究所有限公司高级工程师。

设 H_i 为轧后各道次板带厚度，H_0 为坯料厚度，H_n 为末道次或成品厚度（mm），i 为道次序数，n 为轧制道次数，则压下系数 K_{Hi}（或称“厚度减缩系数”），压下率 ε_i(%)定义为

$$K_{Hi}=\frac{H_{i-1}}{H_i} \quad (i=1,2,\cdots\cdots,n) \tag{1}$$

$$\varepsilon_i=\frac{H_{i-1}-H_i}{H_{i-1}}=\frac{\Delta h_i}{H_{i-1}}\times100\% \quad (i=1,2,\cdots\cdots,n) \tag{2}$$

它们的关系为

$$K_{Hi}=\frac{1}{1-\varepsilon_i} 或 \varepsilon_i=1-\frac{1}{K_{Hi}} \tag{3}$$

按文献［1～3］中推荐，取 K_{Hi} 为

$$K_{Hi}=a_i\left[K_{H.jp}\pm\left(\frac{n+1}{2}-i\right)\Delta H_j\right] \quad (i=1,2,\cdots\cdots,n) \tag{4}$$

则按公式（1）、（4）得道次厚度分配的数学模型为

$$H_i=\frac{H_{i-1}}{K_{Hi}}=\frac{H_{i-1}}{a_i\left[K_{Hjp}\pm\left(\frac{n+1}{2}-i\right)\Delta H_j\right]}$$

$(i=1, 2, \cdots\cdots, n)$ (5)

式中，a_i 为道次修正系数，它是根据设备条件和产品工艺要求而凭经验或统计资料选取的系数，对无需修正的道次，a_i 皆取值为 1；K_{Hjp} 为计算用平均道次压下系数，取

$$K_{Hjp}=\left[\frac{\frac{H_0}{H_n}}{a_1a_2\cdots\cdots a_n}\right]^{\frac{1}{n}} \tag{6}$$

（注：当 a_1、$a_2\cdots a_n$ 全部取值均为 1 时，则 K_{Hjp} 就是常规意义上的平均道次压下系数）

ΔH_j 为 K_{Hj} 的基础数列的等差数列公差，一般取 $\Delta H_j=0.005\sim0.05$（合理选取 ΔH_j 值，可参考文献［1］或文献［2］）。

所谓 K_{Hi} 的“基础数列”，是指 a_i 全部取值为 1 时的 K_{Hi} 数列。公式（5）中 K_{Hjp} 项后面的“±”号，“+”号适用于基础数列为递减数列类型，“−”号则适用于递增数列类型。后者在热轧中使用较多。经 a_i 修正后的 K_{Hi} 数列，则由线性分布转变为非线性分布；有的出现峰值。

考虑到公式（4）、（5）是近似公式，需要对 K_{Hi} 数列计算值作出局部修正[1~3]。定义计算“不到位”，系数 C_j 为

$$C_j=\frac{\frac{H_0}{H_n}}{K_{H1}\cdot K_{H2}\cdots\cdots K_{Hn}} \tag{7}$$

只要将 C_j 值与某项 K_{Hi} 值（本文取 $K_{H.n-1}$ 项）相乘，作为该项 K_{Hi} 的新值，就完成了修正任务。

另一种道次厚度分配模型在文献［4］中称“道次变形量自动分配模型”，本文简称为“指数模型”，其表达式为

$$H_i=H_0+\left[\frac{H_n-H_0}{\exp\left(\frac{-n}{t}-1\right)}-1\right]\exp\left(\frac{-i}{t}\right)$$

本文认为有误，并作了较大修改，修改后为

$$H_i=H_0-(H_0-H_n)\frac{1-\exp\left(\frac{-i}{t}\right)}{1-\exp\left(\frac{-n}{t}\right)}$$

$(i=1,2,\cdots\cdots,n)$ (8)

式中，t 为相关系数；

考虑到轧制板带材时为保证板形和厚度偏差的要求，对最后道次压下率 ε_n 进行控制，例如取 $\varepsilon_n=10\%\sim15\%$[4,5]，此时倒数第 2 道次的厚度值 H_{n-1} 的变化范围就不大了。因此公式（8）中的相关系数 t 可以通过 H_{n-1} 值由公式（8）反算求得。至此，由 H_0、H_n、H_{n-1}、n 和 t 值就可以确定出与各道次对应的 H_1、H_2、……、H_{n-2} 值，即得一组压下规程。

2 计算实例

本文选用文献［5］中的两个连轧实例，分别用 K_H 模型和指数模型进行计算，计算结果见表 1。

为了更好地进行比较和分析，对 ε_n 均取值与原规程同。使用 K_H 模型时，均参考了文献［5］中 ε_i 分布情况，选定 $K_{H.i}$ 基础数列的类型和某些道次的 a_i 值（见表 1 备注）。因为它们是反映实际设备和工艺的具体情况和要求。

例如，例 1 中的 a_1 值取 0.9，是为了给第 1 机架留有余地，以防来料厚度正偏差超值[5]。

为了确保 ε_n 的特定值，本文选用调整 ΔH_j 值的方法，控制 $K_{H.n}$ 值（有关这方面的各种详细措施，可参考文献［1］或［2］），取

$$\Delta H_j=\frac{2\left(K_{H.jp}-K_{H.n}\right)}{n-1} \tag{9}$$

编制规程的操作顺序：①选定基础数列的类型；②选定 ΔH_j 和 a_i 的取值；③求出 $K_{H.i}$ 数列（按公式（4））；④计算“不到位”系数 C_j；⑤修正原 $K_{H.i}$ 数列（本文取 $K_{H.n-1}$ 为被修正项）；⑥用修正后 $K_{H.i}$ 数列按公式（5）求出 H_i 数列，即得一个完整的压下规程。

3 对两种模型的分析和比较

（1）K_H 模型能较好地模拟现场压下规程（见表 1 和表 2），基本上反映了原规程 ε_i 的分布情况及其走向（例 1 原规程 ε_i 分布有峰值）。K_H 模型是一种非常灵活的分配道次厚度 H_i 的数学模型，它通过 a_i 适应现场压下规程多样性的特点。由表 2 中的数据表明：它比指数模型优越，计算的 ε_i 值与原规程 ε_i 值之差 $\Delta\varepsilon_i$ 远小于指数模型。

表 1 两种模型的实例计算结果

例号	规程	参数	道次 1	2	3	4	5	6	7	备注
1	原规程	H	23	13	7.6	4.75	3.28	2.44	2.00	$H_0=38$ mm
		Δh	15	10	5.4	2.85	1.47	0.84	0.44	
		ε/%	39.47	43.48	41.54	37.50	30.95	25.61	18.03	
	K_H 规程	H	23.03	13.30	7.93	4.90	3.44	2.44	2.00	取递减型 $H_0=38$ mm $a_1=0.90$
		Δh	14.97	9.73	5.37	3.03	1.46	1.00	0.44	$a_3=1.03$ $a_4=1.06$
		ε/%	39.39	42.25	40.38	38.21	29.80	29.07	18.03	$\Delta H_j=0.10225$
	指数规程	H	21.43	12.38	7.43	4.73	3.25	2.44	2.00	$H_0=38$ mm
		Δh	16.57	9.05	4.95	2.70	1.48	0.81	0.44	$t=1.655$
		ε/%	43.61	42.23	39.98	36.34	31.29	24.92	18.03	
2	原规程	H	12.7	6.7	4.3	2.84	2.00	1.50	1.27	$H_0=32$ mm
		Δh	19.3	6.0	2.4	1.46	0.84	0.50	0.23	
		ε/%	60.31	47.24	35.82	33.95	29.58	25.00	15.33	
	K_H 规程	H	13.44	7.09	4.39	2.91	2.08	1.50	1.27	取递减型 $H_0=32$ mm $a_1=1.3$
		Δh	18.56	6.35	2.70	1.48	0.83	0.58	0.23	$a_2=1.1$
		ε/%	58.00	47.25	38.08	33.71	28.52	27.88	15.33	$\Delta H_j=0.10850$
	指数规程	H	16.35	8.62	4.79	2.90	1.96	1.50	1.27	$H_0=32$ mm
		Δh	15.65	7.73	3.83	1.89	0.94	0.46	0.23	$t=1.420$
		ε/%	48.91	47.28	44.43	39.46	32.41	23.47	15.33	

表 2 计算值与原规程值之差（$\Delta\varepsilon=\varepsilon_{算}-\varepsilon_{原}$） %

例号	所用模型	道次 1	2	3	4	5	6	7
1	K_H 模型	−0.08	−1.23	−1.16	0.71	−1.15	3.46	0.00
	指数模型	4.14	−1.25	−1.56	−1.16	0.34	−0.69	0.00
2	K_H 模型	−2.31	0.01	2.26	−0.24	−1.06	2.88	0.00
	指数模型	−11.40	0.04	8.61	5.51	2.83	−1.53	0.00

（2）用指数模型分配 H_i，不可能出现 ε_i 峰值，ε_i 只能是单调递减。因此在现场使用时有一定的局限性，不能适应千变万化的 ε_i 分配方案。

（3）由公式（8）可知，当 H_n 和 H_{n-1} 一定时（大多由工艺因素决定），那么相关系数 t 的值就确定，这就排除利用指数模型优化压下规程的可能性，通过模型本身就没有进一步调整压下规程的余地。甚至有可能使模型“失效”，例如在 H_1、H_{n-1} 均有一定要求（约束条件）的情况下就可能出现，因为热轧大厚坯时还要受 Δh_{max} 或咬入角的限制。

（4）在手工调整压下率 ε_i 分配中，人们常将不恰当的 ε_i 作出或增或减的修正，并把增量或减量在其它道次上“消化”掉。但这种做法大多集中在少数局部道次上，并且具有一定的随机性。用 K_H 模型则可通过选取个别道次上的 a_i 值来实现。需要增大 ε_i 或 $K_{H.i}$ 时，取 $a_i>1$；反之，取 $a_i<1$。这种局部调整，却带来了 ε_i 数列或 $K_{H.i}$ 数列和 H_i 数列在数值上的“联动”变化（参考公式（5）或（6）），从而做到均衡“消化”，这就为计算机优化压下规程创造了条件。这正是 K_H 模型在编制压下规程中的突出优点和灵活性。

（5）指数模型中的相关系数 t 缺少明确的物

（下转第 50 页）

tran 语言编制了优化通用程序。程序通用性强，只要输入不同规格的原始数据和参数范围，就能求得满足滚切条件的最优参数。同时，本程序也能满足双轴双偏心滚切剪杆件的优化。

3.4 计算实例

本文以酒钢和韶钢滚切式定尺剪为例，用上述复合形方法建立的数学模型，用编制的通用程序对其杆件进行优化。酒钢和韶钢定尺剪原始机构参数如表 1、表 2 所示，优化后的参数如表 3 所示。

表 1 酒钢定尺剪机构参数 mm

刀弧半径 r	曲柄半径 R_b	连杆长度 L_3	连杆长度 L_4	铰接点距离 L_2	刀架宽度 L_5	初始距离 L_6	刀片高度 L_7
60 000	95	860	860	2 200	3 100	775	1 035

表 2 韶钢定尺剪机构参数 mm

刀弧半径 r	曲柄半径 R_b	连杆长度 L_3	连杆长度 L_4	铰接点距离 L_2	刀架宽度 L_5	初始距离 L_6	刀片高度 L_7
60 000	78	848	848	1 600	2 500	780	855

表 3 优化后的机构参数 mm

酒钢			韶钢		
R_b	L_3	L_4	R_b	L_3	L_4
95	861	861	78	847	847

4 结论

（1）本文用复合形方法建立的数学模型，经过对酒钢和韶钢滚切剪的机构参数优化设计计算，证明是有效的。

（2）以相位差相等为条件，且满足剪切运动的滚切剪剪切优化设计结果表明：优化后滚切剪的曲柄半径与酒钢和韶钢实际应用的曲柄半径相等，两连杆的长度相差很小，这就更证明了该 Fortran 语言编制的优化通用程序的正确性。

参考文献：

[1] 邹家祥. 轧钢机械 [M]. 北京：冶金工业出版社，2000.

[2] 王海文. 轧钢机械设计 [M]. 北京：机械工业出版社，1983.

[3] 杨如民. 单轴转动式滚切剪优化设计及通用软件 GGD 系统的开发 [D]. 重庆：重庆大学，1991.

[4] 陈健. 滚动式剪切机机构的理论分析及 3300mm 轧机横切滚切剪剪切机构的优化设计 [D]. 重庆：重庆大学，1996.

（上接第 39 页）

理意义，所以在具体运用时只能“暗箱”操作。相反，K_H 模型的三个参数（n、ΔH_j 和 a_i）均有明确的物理意义，在运用时可以做到“明箱”操作。

4 结束语

K_H 模型较指数模型优越，能适应编制压下规程的多样性；K_H 模型能较好地模拟现场千变万化的压下规程。且使用 K_H 模型可为压下规程优化创造条件，并将产生经济效益。

K_H 模型中压下系数 $K_{H.i}$ 的基础数列的等差数列公差 ΔH_j、轧制道次数 n 和道次修正系数 a_i 这三个参数的合理组合（要满足轧制设备和工艺的约束条件），就能构成可供优选的多个压下规程，我们已在铜板带压下规程优化方面作了初探[6]。

为了推广使用 K_H 模型，各厂可以针对本厂的特点（具体情况），用科学统计方法，建立自己专用的三个参数（ΔH_j、$K_{H.p}$ 和 a_i）的数据库，以利高效组织生产。

参考文献：

[1] 周宜淼，夏桂芳，周紫箭. 用 K_H 计算法编制铝板带压下规程 [J]. 轻合金加工技术，2003，(3)：23－28.

[2] 周紫箭，王捷，周宜淼. 用 K_H 计算法编制铜板带压下规程 [J]. 上海有色金属，2003，(3)：105－110.

[3] 王捷，周紫箭，夏桂芳等. 利用压下系数 K_H 编制钢板带压下规程 [J]. 重型机械，2003，(5)：48－51.

[4] 胡建平，黄玲，黄幼知. 热连轧宽带钢中道次变形量的自动分配模型 [J]. 钢铁研究学报，2003，(1) 27－30.

[5] 孙一康. 带钢热连轧数学模型基础 [M]. 北京：冶金工业出版社，1979.

[6] 周紫箭，周宜淼，夏桂芳等. 铜板带压下规程优化初探 [A]. 二〇〇四——中国铜加工年会论文集 [C]. 中国有色金属加工工业协会重有色分会. 温州：2004. 90－101.