

万能型钢轧机轧制规程优化设计

Optimized Pass Design to Universal H-Beam Rolling Mill

周庆田 李艳文 张文志 张春山

摘要 采用综合约束函数双下降法研究了万能可逆连轧 H 型钢降低电耗的优化轧制规程,以总轧制能耗最小为目标,各道次轧件出口厚度为优化计算的自变量进行了优化。优化计算结果应用于生产试验表明节能效果良好。由于在轧制规程优化过程中考虑了各种约束条件,所以求得的优化轧制规程不但能满足轧机强度和电机功率要求,而且能保证所轧制的 H 型钢具有良好的尺寸精度。

关键词 H 型钢, 轧制规划, 优化。

Abstract In this paper, the pass schedule to the universal reversible tandem H-beam mill is optimized in SCDD (Synthesized Constrained Dual Descent) method. It targets to minimize the overall power consumption with the discharge thickness of each pass as the arguments. The optimized results used for productive test show that have a good effective on energy-saving. Concerning so many kinds of constraint conditions, the optimized pass schedule can not only meet the requirement of rolling mill strength and that of power of motor but ensure the H-beam with a sound dimensional precision as well.

Key words H-beam, pass schedule, optimism.

0 前言

我国钢铁工业能耗占整个工业部门能耗的 12%~13%,而轧钢生产的总能耗占整个钢铁工业总能耗的 13%~15%。由此可见,我国在钢铁轧制上节约能源的潜力很大。同时也必须强调,轧钢生产中可控部分主要是能源消耗^[1]。节约能耗的途径大致有两个:一是引进现代化设备。二是在我国现有设备上,采用较为节能的生产工艺。目前,我国钢铁企业的外购能源费用,已占钢铁产品成本的 25%~40%,能源费用已对钢铁企业形成很大的压

力^[1]。而在现有的设备条件下,通过对工艺的改造来达到节能目的则是一条行之有效的途径。

H 型钢轧制规程优化就是以节约轧制能耗为追求目标,应用最优化理论(本文用综合约束函数双下降法)优化 H 型钢万能轧制的压下规程,从而使生产在低能耗、低成本的条件下进行。

1 优化的数学模型

传统的轧制规程是根据生产经验或按等负荷的观点加以确定的。制定轧制规程的原则应当是在满足产量、质量和设备能力要求的条件下使总轧制能耗(轧制各道次功率之和)达到最小值,那么可设总能耗最小为目标函数,采用最优化方法求出该目标函数的最优解,进而得到优化的轧制规程。

1.1 设计变量与目标函数

对于 H 型钢万能可逆连轧而言,在原料和成品规格、钢种、轧辊直径、摩擦系数、出口速度给定的条件下,轧机消耗功率只与腹板和翼缘的压下量有关。以压下量为设计变量,以万能轧机各道次功率消耗之和最小为追求目标,则目标函数为

$$F(x) = \sum_{i=1}^m E_i(x) \quad (1)$$

式中, E_i 为第 i 道次的轧制功率; x 为设计变量, $x = (x_1, x_2, \dots, x_n)$; n 为设计变量的个数; m 为道次数。

1.2 约束函数

2001 年 9 月 12 日收到。国家九五科技攻关项目(95-528-3-02-01B)。

周庆田(Zhou Qingtian), 李艳文(Li Yanwen), 张文志(Zhang Wenzhi), 燕山大学机械工程学院, 秦皇岛 066004 (The College of Mechanical Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao 066004)。

张春山(Zhang Chunshan), 鞍山第一轧钢厂, 鞍山 114002 (First Rolling mill of Anshan, Anshan 114002)。

约束函数也是设计变量的函数,各个约束函数均可表示成以设计变量为变量的等式或不等式,也就是说,约束函数是在优化处理过程中,对设计变量附加的限制条件。表达式为

$$g(x) \geq 0 \quad j=1, 2, \dots, p \quad (2)$$

$$h(x)=0 \quad i=1, 2, \dots, q \quad q(q < n) \quad (3)$$

这些限制条件来源于生产设备能力、工艺变形规律或经验等,就 H 型钢生产工艺而言,主要约束条件如下。

1.2.1 设备能力约束

在可逆轧制条件下,电机需要频繁启动、制动,因此应进行电机发热校核

$$M_i \leq M_n \quad (4)$$

式中, M_i 为电机轴上的均方根力矩; M_n 为电机的额定力矩。

最大轧制压力、轧制力矩受轧辊强度的限制

$$P_i \leq [p] \quad (5)$$

$$M_i \leq [m] \quad (6)$$

式中, $[p]$, $[m]$ 为设备允许的轧制力、轧制力矩; p_i , M_i 为第 i 道次的轧制压力、轧制力矩。

1.2.2 工艺条件约束

H 型钢在万能孔型中轧制,其变形规律较为复杂,腹板的压下量与翼缘的压下量必须成一定比例,才能轧出合格产品,即要求满足

$$\frac{\Delta d_i}{\Delta t_i} = \frac{d_{i-1}}{t_{i-1}} \quad (7)$$

式中, Δd_i 为第 i 道次腹板压下量; Δt_i 为第 i 道次翼缘压下量; d_{i-1} 为第 i 道次的入口腹板厚度; t_{i-1} 为第 i 道次的入口翼缘厚度。

1.2.3 产品结构约束

$$d \geq d_{i-1} \quad (8)$$

$$t_i \geq t_{i-1} \quad (9)$$

$$d_0 - \sum_{i=1}^m \Delta d_i = d_m \quad (10)$$

$$t_0 - \sum_{i=1}^m \Delta t_i = t_m \quad (11)$$

式中, t_0 , d_0 , t_m , d_m 分别为原料及成品的翼缘厚度和腹板厚度。

1.3 轧制力和轧制力矩的数学模型

在不等式的约束条件中,轧制力和轧制力矩是很重要的约束参数,本文采用文献 [2]、[3] 的方法,并加以适当简化,应用上限法建立了万能轧制水平辊和立辊的轧制力和轧制力矩的数学模型。

1.3.1 万能轧机功率

将变形区分为 I 区(翼缘单独与轧机接触)和 II 区(腹板和翼缘同时与轧机接触),水平辊轧制力为

$$P_m = \frac{p_w(N_4 + N_1 + N_2 + N_{f1} + N_5 + N_{f2})}{2\psi_w l_w v_w} \quad (12)$$

式中, p_w 为水平辊半径; N_4 为塑性区中消耗的功率; N_1 为 II 区中翼缘与腹板连接的断面上消耗的功率; N_2 为入口断面上消耗的功率; N_f 为水平辊与腹板表面的摩擦功率; N_5 为出口断面翼缘对腹板作用压力所消耗的功率; N_f 为翼缘与水平辊侧面的摩擦功率; ψ_w 为水平辊力臂系数,取 0.4。

立辊轧制力为

$$P_y = \frac{R(N_6 + N_3 + N_4 + N_{f3} + N_6)}{\psi_y l_y v_y} \quad (13)$$

式中, R 为立辊半径; N_6 为塑性区中消耗的功率; N_3 为 I 区立辊与翼缘接触面上消耗的功率; N_4 为入口断面上消耗的功率; N_f 为立辊与翼缘间摩擦消耗的功率; N_5 为出口断面腹板对翼缘作用拉力所消耗的功率, $N_6 = -N_5$ 。

轧制力矩

$$M_i = R_w(N_4 + N_1 + N_2 + N_{f1} + N_{f2} + 2N_6 + 2N_3 + 2N_4 + 2N_{f3}) / v_w \quad (14)$$

第*i*道次万能轧机电机总功率

$$E_i = \frac{(M_{f_i} + M)\omega_v}{\eta} \quad (15)$$

$$M_{f_i} = M_{f_{i0}} + M_{f_{i1}} = 2\rho_{i0} f_{i0} R_{i0} \omega + \frac{2P_{i1} f_{i1} R_{i1}}{i\omega_i} \quad (16)$$

式中, ω_v 为万能轧机水平辊角速度; $M_{f_{i0}}$ 为水平辊轴承的附加摩擦力矩; $M_{f_{i1}}$ 为立辊轴承摩擦力矩转换到水平辊上的当量摩擦力矩; R_{i0} 为水平辊半径; f_{i0} 为水平辊轴承摩擦系数; R_{i1} 为立辊半径; f_{i1} 为立辊轴承摩擦系数。

1.4 数学模型的标准形式

$$\min F(x) \quad (17)$$

Subject to:

$$g_j(x) \geq 0 \quad j=1, 2, \dots, p$$

$$h_j(x) = 0 \quad j=1, 2, \dots, q \quad (q < n)$$

2 优化求解过程

考虑到本问题的设计变量较多、目标函数的求解过程较复杂、等式约束函数及不等式约束函数也较多, 本文采用综合约束函数双下降法对其进行优化处理。

综合约束函数双下降法的寻优过程是: 引入一个由所有约束条件组成的综合约束函数

$$\phi(X) = \sqrt{\sum_{i=1}^p \left[\frac{g_i(X) - |g_i(X)|}{2} \right]^2 + \sum_{j=1}^q [h_j(X)]^2} \quad (18)$$

这样, 一般约束优化问题的可行域可表示为

$$D = \{X | X \in R^n, \phi(X) = 0\}$$

当选定初始点 $X_0(i)$, $i=1, 2, \dots, N$, 初始步长 t_0 及一组正的实参数 $\alpha, \beta, \gamma, \delta, \lambda, \mu$, 并令 $\phi_0 = \alpha t_0$ 时, 可得初始近似可行域

$$D_0 = \{X | X \in R^n, \phi(X) \leq \phi_0\}$$

从 X_0 点出发, 沿目标函数 $F(X)$ 的负梯度方向以步长 t_0 进行下降迭代计算。当所得的迭代点属于 D_0

时, 再从此点出发, 对 $F(X)$ 进行下降迭代; 否则, 从此点出发对 $\phi(X)$ 按负梯度方向以步长 $\tau_0 = \beta t_0$ 进行下降迭代计算。这样, 经过 K 次负梯度迭代计算后, 若 $X^{(k)} \in D = \{X | X \in R^n, \phi(X) \leq \phi_k\}$, 则从 $X^{(k)}$ 出发沿 $-\nabla F(X^{(k)})$ 方向以步长 t_k 进行下降迭代计算, 并要求所求得的 $X^{(k+1)} \in D_k$ 。若 $X^{(k+1)} \notin D_k$, 则从 $X^{(k)}$ 点出发取步长 $\tau_k = \beta t_k$ 对 $\phi(X)$ 进行下降迭代直至得到属于 D_k 的点, 并把它作为 $X^{(k+1)}$ 点。当满足 $\left| \frac{F(X^{(k+1)}) - F(X^{(k)})}{F(X^{(k)})} \right| \leq \varepsilon$ 和 $S_k \leq \varepsilon$ 时, 终止迭代计算并输出最优解。

3 优化结果的应用与分析

应用上述数学模型、优化方法和程序框图, 对鞍山市第一轧钢厂的 H 型钢可逆连轧机组进行轧制规程优化理论计算, 并将应用于生产试验的优化轧制规程与该厂原来应用的轧制规程进行对比分析。

该厂轧机轧制条件

粗轧机为万能一轧边、可逆连轧; 精轧为一架万能轧机。

万能轧机 (粗、精连轧):

水平辊直径 $\phi 1120\text{mm}$

立辊直径 $\phi 850\text{mm}$

万能轧制线入口温度: 1150°C

坯料规格: $950\text{mm} \times 230\text{mm} \times 2900\text{mm}$

万能轧制线来料:

腹板厚 48mm

翼缘厚 115mm。

成品规格: $H390\text{mm} \times 300\text{mm} \times 12\text{mm} \times 25\text{mm}$

($H400\text{mm} \times 300\text{mm}$)

在上述轧制条件下原来应用的轧制规程见表 1。在同样轧制条件下现场应用本文优化轧制规程见表 2。现场应用本文优化轧制规程与原来轧制规程比较见表 3。

由于轧边道次压下功率与万能轧机水平辊和立辊的压下功率相比甚少, 在优化设计中没有考虑。

表 1 原来应用的轧制规程

Tab. 1 Rolling rules of original usage

腹板厚度/mm		翼缘厚度/mm		温度/℃		力矩/kNm	功率/kW
入口	出口	入口	出口	腹板	翼缘		
48.00	45.50	115.00	112.50	1148.0	1149.1	0.4080E+0.5	0.2051E+0.4
45.50	43.30	112.50	101.50	1142.7	1146.8	0.3780E+05	0.1900E+04
43.30	39.30	101.50	91.50	1136.6	1144.0	0.5992E-05	0.3012E+04
39.90	36.30	91.50	83.00	1129.0	1140.5	0.4968E+05	0.2293E+04
36.30	33.30	83.00	76.50	1120.4	1136.4	0.5165E+05	0.2384E+04
33.30	30.30	76.50	70.00	1110.8	1131.8	0.5417E+05	0.2556E+04
30.30	27.50	70.00	63.50	1100.7	1126.9	0.5486E+05	0.2870E+04
27.50	24.80	63.50	57.00	1074.3	1113.8	0.5614E+05	0.2879E+04
24.80	22.30	57.00	50.80	1061.4	1107.2	0.5866E+05	0.3129E+04
22.30	19.80	50.80	44.70	1045.9	1098.8	0.6254E+05	0.3272E+04
19.80	17.30	44.70	38.70	1028.7	1089.3	0.6868E-05	0.3945E+04
17.30	15.20	38.70	34.00	1008.2	1077.5	0.6543E+05	0.3759E+04
15.20	13.70	34.00	30.10	984.7	1063.2	0.5503E+05	0.3161E+04
13.70	12.60	30.10	29.70	961.1	1049.1	0.4733E+05	0.2767E+04
12.60	11.70	29.70	24.50	934.9	1031.0	0.4426E+05	0.2679E+04
11.70	10.90	24.50	22.45	908.1	1012.4	0.4423E+05	0.2722E+04
10.90	10.40	22.45	21.40	881.4	992.0	0.3331E+05	0.2016E+04
10.40	10.00	21.40	20.00	858.5	973.5	0.3043E+05	0.1873E+04

表 2 现场应用本文优化轧制规程

Tab. 2 Field service rolling rules which optimized in this article

腹板厚度/mm		翼缘厚度/mm		温度/℃		力矩 $\times 10^3$ /kNm	功率 $\times 10^3$ /Kw
入口	出口	入口	出口	腹板	翼缘		
48.00	45.63	115.00	112.34	1148.0	1149.1	0.3929	0.1957
45.63	43.53	112.34	101.51	1142.8	1146.7	0.3659	0.1821
43.53	39.37	101.51	91.51	1136.7	1144.0	0.6162	0.3079
39.37	36.31	91.51	83.02	1129.1	1140.5	0.5035	0.2306
36.31	33.27	83.02	76.52	1120.5	1136.4	0.5207	0.2485
33.27	30.07	76.52	70.01	1110.8	1131.8	0.5697	0.2670
30.07	27.58	70.01	63.52	1100.7	1126.9	0.5021	0.2609
27.58	24.64	63.52	57.05	1074.2	1113.8	0.5990	0.3054
24.64	22.36	57.05	50.83	1061.4	1107.2	0.5480	0.2905
22.36	19.48	50.83	44.73	1045.7	1098.8	0.7004	0.3646
19.48	17.13	44.73	38.74	1028.3	1089.3	0.6868	0.3945
17.13	14.84	38.74	34.04	1007.2	1007.4	0.7059	0.4037
14.84	12.59	34.04	30.89	82.8	1063.5	0.7743	0.4430
12.59	12.50	30.89	28.96	958.7	1048.6	0.7782	0.4532
12.50	11.10	28.96	24.52	931.9	1031.2	0.6387	0.3847
11.10	10.74	24.52	22.48	904.7	1011.6	0.2392	0.1454
10.74	10.30	22.48	21.41	878.0	991.2	0.3060	0.1834
10.30	10.00	21.41	20.00	855.5	972.8	0.2488	0.1513

表 3 原轧制规程与现场应用本文优化轧制规程的比较

Tab. 3 Comparison of rolling rules between original usage and field usage which optimized in this article

原轧制规程消耗 总功率 N_0 /kW	现场应用本文优化轧制 规程消耗总功率 N_1 /kW	节能 e (%)
49268	47855.2	2.87

4 结论

1) 采用综合约束函数双下降法, 可以对复杂断面的型钢进行轧制规程优化设计, 优化的轧制规

(下转第 19 页)

其准确解为 $y(x) = 3e^{\frac{1}{2}x} - x - 2$ 。取步长为 $h=0.05$ ，用公式 (9) 计算得

x_i	t_i	$y(x_i)$	$ y_i - j(x_i) $
1.10	2.090466	2.099759	9.293556E-03
1.20	2.256296	2.266356	8.060932E-03
1.30	2.439684	2.446622	6.937981E-03
1.40	2.635319	2.641258	5.939722E-03
1.50	2.845919	2.851000	5.081177E-03
1.60	3.072244	3.076623	4.379034E-03
1.70	3.315089	3.318941	3.852129E-03
1.80	3.575290	3.578809	3.519535E-03
1.90	3.853726	3.857129	3.402948E-03
2.00	4.151321	4.154846	3.524780E-03

4 结论

由上节计算结果可以看出，式 (9) 的精度远远超过文献 [1] 和文献 [3] 中的单步公式，且适

(上接第 6 页)

本文导出了有限变形体的变形能原理，应用这一原理和文献 [1] 所建立的有限变形体的功的互等定理，导出了有限变形体的势能泛函和余能泛函，这证明该两原理的正确性。同时也建立了该两原理与有限变形体势能原理和余能原理的联系。

参考文献

- 1 Clapeyron B P E. Memoire sur le travail des forces elastiques dans un corps solide elastique deforme par l'action de forces exterieures.

(上接第 6 页)

程比常规轧制规程节约能量，提高型钢轧制经济效益。鞍山市第一轧钢厂原来应用的轧制规程是用三十万元人民币从日本购置。在原日本为该厂设计的轧制规程的基础上进行优化设计，优化的轧制规程经现场生产实验验证可节省能量 2.7%。

2) 在轧制规程优化过程中，由于考虑了设备能力约束、变形规律约束和 H 型钢结构等约束，所以最后求得的优化轧制规程满足轧机强度和电机功率的要求，降低金属和轧辊的消耗，保证所轧制的型钢具有良好的尺寸精度。

3) 由于计算机在中小型轧钢厂的普及，借助于计算机优化轧制规程的方法，可以迅速在生产中应用，以提高我国复杂断面型钢生产水平。

合计算机求解。这说明本文关于强稳定二阶 Runge-Kutta 公式最优化的目的已经达到，算法是可行的。

参考文献

- 1 李庆杨，王能超，易大义. 数值分析. 武汉：华中工学院出版社，1982
- 2 南京大学数学系计算数学专业编. 常微分方程数值解法. 北京：科学出版社，1979
- 3 [美] 沃德·切尼，戴维·金凯德著. 数值数学和计算. 上海：复旦大学出版社，1991

陈一鸣 男，1957 年出生，教授。从事最优化计算方法、边界元法分析接触问题及在精密轧制中的应用等方面的研究，已发表学术论文 30 余篇。

Comptes rendes, Paris, 1858,46: 208-212

- 2 Williams D. The reations between the energy theorems applicable in structural theory. philo, Mag. Ser, 1928,17,28: 617-635
- 3 钱伟长，叶开源. 弹性力学. 北京：科学出版社，1980.
- 4 付宝连. 功的互等定理和线弹性变分原理. 应用数学和力学, 1989,10 (3): 253-258
- 5 付宝连. 有限变形非线性弹性力学的到易定理. 燕山大学学报 [待发]

付宝连 男，1934 年 1 月出生。教授。从事固体力学能量原理及应用、广义物理模拟力学及回弹能量原理的研究与开发。

参考文献

- 1 陆钟武，翟庆国，谢安国，等. 我国钢铁工业能耗预测. 钢铁, 1997 (5): 694
- 2 Zhang Wenzhi. On the use of the upper-bound method for load determination in H-beam rolling. Journal of Materials Processing Technology, 1996, (50): 820-333
- 3 金晓光. H 型钢万能-万能连轧过程的实验研究. 重型机械, 1993, (15): 461
- 4 王国彪. 机械优化设计方法微程序与应用. 北京：机械工业出版社，1994
- 5 刘战英. 轧机变形规律优化设计. 北京：冶金工业出版社，1996

周庆田 男，1949 年出生。教授。从事型钢轧机设备与轧制工艺理论的研究与教学。完成省部级科研课题 5 项，获部科技进步二等奖 1 项，发表论文 12 篇。