

## 化学元素对钢的力学性能的影响

张雪亚, 杨宗月, 刘阳, 韩毅华

(华北理工大学冶金与能源学院, 河北 唐山 063000)

**摘要:** 本文通过对影响螺纹钢力学性能的 C、Mn、S、P、Si、Ceq、V、Cr、Ni、Cu、Mo、Al 等化学元素进行相关性分析, 选取相关性较强的元素作为主要影响因素, 得到抗拉强度、屈服强度、延伸率与主要影响因素的回归方程。根据抗拉强度、屈服强度和延伸率的取值范围, 进而建立以铬含量最大为目标函数, 以化学元素总量恒定为约束条件的优化模型, 最终得出当 Cr 含量的增加量不超过 0.0720, C、Mn、Si、Ce、V、Cu 含量的减少量分别不超过 0.0096, 0.0224, 0.0162, 0.0205, 0.0003, 0.0030 时, 可以最大限度的提高螺纹钢的力学性能。

**关键词:** 螺纹钢; 化学元素; 力学性能; 相关性分析; 多元回归分析; 最优化模型

doi:10.3969/j.issn.1000-6532.2018.05.033

中图分类号: TQ12; TQ13

文献标志码: A

文章编号: 1000-6532 (2018) 05-0147-05

螺纹钢是加固混凝土结构的骨架, 需要一定的机械强度、弯曲变形性能以及焊接性能, 而化学成分是影响其最终组织性能的基本元素。大多数的螺纹钢采用微合金化方法, 即通过添加昂贵的微量元素 (如 Mn 合金、V 合金等) 并调整各元素含量, 提高其力学性能<sup>[1]</sup>。钢中的元素铬可以显著提高钢的强度、硬度和耐磨性, 且价格低廉, 因此可以通过增加铬含量, 降低其他合金元素含量以控制成本。据此, 本文建立了基于多元回归分析的各化学元素对螺纹钢的力学性能的影响模型, 进而建立了以铬含量最大为目标函数, 以抗拉强度、屈服强度和延伸率的取值范围以及化学元素总量恒定为约束条件的优化模型, 从而确定各元素的变化范围, 降低成本<sup>[2]</sup>。

### 1 相关性分析

本文数据为某钢铁集团公司测量的 7215 组针对某一直径的螺纹钢的 C、Mn、S、P、Si、Ceq、V、

Cr、Ni、Cu、Mo、Al 等化学元素含量以及力学性能参数。由于影响螺纹钢力学性能的因素很多, 若将所有的影响都加以考虑, 则不仅使计算工作量极为庞大, 也使得回归模型极为复杂, 算法可能也会难以运行。因此, 必须对这些因素进行分析处理, 以突出主要影响因素, 忽略次要因素, 尽量得到较优的回归模型。

为分析影响螺纹钢的屈服强度, 抗拉强度和延伸率等力学性能的主要因素和次要因素, 本文首先构造螺纹钢的抗拉强度, 屈服强度和延伸率等力学性能与各化学元素的关联度矩阵, 然后根据由 SPSS 分析出的相关性系数, 分别得到与螺纹钢的抗拉强度、屈服强度、延伸率的相关性比较强的化学元素和比较弱的元素。综合考虑各化学元素与力学性能的相关性从而将相关性强的元素作为主要因素, 相关性弱的作为次要因素。

#### 1.1 关联度矩阵的建立

根据所测的化学元素和力学性能的指标, 首

收稿日期: 2017-03-12; 改回日期: 2017-08-22

项目基金: 河北省自然科学基金—钢铁联合研究基金 (E2014209144、E2015209207); 河北省高等学校科学技术研究项目 (ZD2014012); 省级大学生创新训练计划项目 (X2016054)

作者简介: 张雪亚 (1995-), 女, 主要研究方向为氧化物冶金。

通讯作者: 韩毅华 (1982-), 男, 副教授, 博士, 主要研究方向为氧化物冶金。

先计算出任意两者之间对应的理化指标的关联性，从中筛选出关联性高的指标对进行分析。

Pearson 相关系数用于衡量定距变量间的线性关系，其定义式<sup>[6]</sup>如下：

$$\gamma = \frac{N \sum x_i y_i - \sum x_i \sum y_i}{\sqrt{N \sum x_i^2 (\sum x_i)^2} \sqrt{N \sum y_i^2 (\sum y_i)^2}}$$

式中， $\gamma$ 表示 Pearson 相关系数； $x$  和  $y$  分别对应两组分析对象的数据序列。 $\gamma$ 值的值域为  $[-1,1]$ ，相关系数的绝对值越大，关联度越高，即相关系数越接近于 1 或 -1，两者关联度越高，相关系数越接近于 0，两者关联度越低<sup>[3]</sup>。

在此，引入 Pearson 相关系数以描述化学元素与螺纹钢的力学性能的理化指标的关联性，分别对各化学元素与其抗拉强度，屈服强度和延伸率等力学性能的所有组合指标进行关联性分析，计算其关联度矩阵：

$$D = \begin{bmatrix} \gamma_{1-1} & \gamma_{1-2} & \cdots & \gamma_{1-j} \\ \gamma_{2-1} & \gamma_{2-2} & \cdots & \gamma_{2-j} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \gamma_{i-1} & \gamma_{i-2} & \cdots & \gamma_{i-j} \end{bmatrix}$$

矩阵中， $\gamma_{i-j}$ 表示化学元素中编号为  $i$  的理化指标与力学性能中编号为  $j$  的指标的关联度。其中依照附件中的化学元素从左往右的次序排列编号，从左往右的次序排列编号，分别为抗拉强度、屈服强度、延伸率。

### 1.2 关联系数的求解

首先利用 SPSS 软件处理，得到各化学元素与螺纹钢的抗拉强度、屈服强度、延伸率等力学性能指标的关联性矩阵（其中，\* 和 \*\* 分别表示关联度值在 0.05 和 0.01 水平上的显著性相关），见表 1。

表 1 化学元素与机械性能之间的相关系数

Table 1 Correlation coefficient between chemical elements and mechanical properties

|      | C       | Mn      | S        | P       | Si      | Ceq     | V       | Cr       | Ni       | Cu       | Mo      | ALT     |
|------|---------|---------|----------|---------|---------|---------|---------|----------|----------|----------|---------|---------|
| 抗拉强度 | 0.088** | 0.037** | -0.053** | 0.006   | 0.109** | 0.080** | 0.056** | -0.059** | -0.008   | -0.063** | 0.037** | -0.024  |
| 屈服强度 | 0.038** | 0.03*   | 0.053**  | -0.031* | 0.139** | 0.030*  | 0.099** | -0.138** | -0.045** | -0.094** | -0.010  | -0.014  |
| 延伸率  | 0.025   | -0.032* | -0.038** | 0.074*  | 0.014   | 0.099** | -0.011  | 0.047**  | -0.003   | -0.015   | 0.068** | 0.074** |

在 SPSS 得出的相关性分析的结果中选取 P 值小于 0.05（有统计学意义）的相关性数据进行统计，选出与螺纹钢的抗拉强度、屈服强度、延伸率的相关性比较强（\*\*）的化学元素和比较弱（\* 或不带）的元素。

由表 1 可知，C、Mn、S、Si、Ceq、V、Cr、Cu、Mo 与螺纹钢的抗拉强度具有显著相关性，属于主要影响因素，P、Ni、ALT 属于次要因素；而与螺纹钢的屈服强度显著相关的化学元素有 C、S、Si、V、Cr、Ni、Cu，属于主要影响因素，Mn、P、Ceq、Mo、ALT 属于次要影响因素；同理 S、Ceq、Cr、Mo、ALT 是螺纹钢的延伸率的主要因素，C、Mn、P、Si、V、Ni、Cu 是次要因素。

## 2 多元回归模型的建立

以与力学性能相关性较大的化学成分为自变量，各力学性能为因变量，进行多元线性回归统计分析，回归模型中各回归系数由相关矩阵方程（其中  $D$  是正规方程组的系数矩阵， $E$  是回归系数矩阵， $F$  是正规方程组的常数项矩阵）求得，并利用方差分析的检验对模型进行显著性检验<sup>[8]</sup>。

由于测量数据极为庞大，首先将数据进行整理统计，结果见表 2、3。

表 2 钢筋的化学成分 /%

Table 2 Chemical composition of rebar

| 化学成分 | 最大值    | 最小值    | 平均值    |
|------|--------|--------|--------|
| C    | 0.2500 | 0.1900 | 0.2141 |
| Mn   | 1.5900 | 1.3000 | 1.4266 |
| S    | 0.0450 | 0.0050 | 0.0254 |
| P    | 0.0450 | 0.009  | 0.0266 |
| Si   | 0.7000 | 0.4100 | 0.5365 |
| Ceq  | 0.5200 | 0.4300 | 0.4639 |

|     |        |        |        |
|-----|--------|--------|--------|
| V   | 0.0390 | 0.0250 | 0.0299 |
| Cr  | 0.0780 | 0.000  | 0.0213 |
| Ni  | 0.0590 | 0.000  | 0.0143 |
| Cu  | 0.0900 | 0.0006 | 0.0143 |
| Mo  | 0.0320 | 0.0000 | 0.0010 |
| ALT | 0.2873 | 0.0000 | 0.0075 |

表3 钢筋的机械性能  
Table 3 Mechanical properties of rebar

| 性能指标      | 最大值       | 最小值      | 平均值      |
|-----------|-----------|----------|----------|
| 抗拉强度 /Mpa | 757.9188  | 622.5000 | 684.2418 |
| 屈服强度      | 6682.1109 | 435.000  | 493.4611 |
| 断裂伸长率 /%  | 30.0000   | 20.2500  | 24.5000  |

首先,利用Z变换将数据进行标准化,标准化公式为

$$z = \frac{x_i - \mu}{\sigma}$$

其中,  $x_i (i=1,2,\dots,12)$  表示 C、Mn、S、P、Si、Ce<sub>q</sub>、V、Cr、Ni、Cu、Mo、Alt 等化学元素的含量。

由于 C、Mn、S、Si、Ce<sub>q</sub>、V、Cr、Cu、Mo 与螺纹钢的抗拉强度具有显著相关性,属于主要影响因素,因此将这九种化学元素作为自变量,抗拉强度作为因变量,利用 SPSS 软件进行多元回归分析,在 0.01 的置信水平上得到抗拉强度的表达式为:

$$y_{21} = 650.626 + 120.921x_1 - 18.395x_2 - 197.158x_3 + 47.295x_5 + 19.464x_6 + 266.343x_7 + 60.53x_8 - 169.026x_{10} + 317.859x_{11}$$

可以从表达式中看出,抗拉强度与 C、Mn、S、Si、Ce<sub>q</sub>、V、Cr、Cu、Mo 具有线性关系,其中与 C、Si、Ce<sub>q</sub>、V、Cr、Mo 呈正相关,与 Mn、S、Cu 呈负相关。各化学元素对抗拉强度的影响程度依次为: Mo>V>S>Cu>C>Cr>Si>Ce<sub>q</sub>>Mn。

运用相同的方法,得到屈服强度与各化学元素的关系如下:

$$y_{22} = 450.157 + 48.287x_1 + 160.848x_3 + 35.444x_5 + 552.225x_7 + 219.781x_8 + 69.42x_9 - 192.196x_{10}$$

屈服强度与 C、S、Si、V、Cr、Ni 呈正相关,与 Cu 呈负相关。各化学元素对拉伸强度的影响程度为: V>Cr>Cu>S>Ni>C>Si。

断裂延伸率与各化学元素的关系如下:

$$y_{23} = -0.051x_2 - 0.041x_3 + 0.077x_4 + 0.033x_8 - 0.071x_{10}$$

断裂延伸率与 P 和 Cr 呈正相关,与 Mn、S、Mo 呈负相关,各化学元素对延伸率的影响程度依次为: Mo>P>S>Cr>Mn。

### 3 化学元素含量

通过研究结果可知,钢中的铬元素可以显著提高钢的强度、硬度和耐磨性,且价格低廉,因此可以通过增加铬元素含量,降低其他合金元素含量以控制成本<sup>[10-11]</sup>。为求解各化学元素的含量的变化范围,将化学元素含量的变化量按附件中顺序从左到右依次设为,其中  $a_i$  为正数,表示铬元素的增加量,其余为负数,表示各元素的减少量。则必有铬元素的增加量等于其余元素的减少量。铬的价格相对于其他合金元素较低,为使成本最低,则要求铬元素的增加量最大,因此目标函数为求  $a_8$  的最大值。约束条件为铬元素的增加量等于其余元素的减少量,将各化学元素含量调整后带入以上所建立的力学性能与化学元素的多元回归模型,求得抗拉强度、屈服强度和延伸率仍然在要求范围内。各力学性能指标的要求范围由表3中的最值确定,铬元素的增加量以表2中铬元素的上限为基准,在其上限上增加,其余各化学元素的减少量在其下限上减少。基于此,建立以铬含量最大为目标函数,以抗拉强度、屈服强度和延伸性的取值范围以及化学元素总量恒定为约束条件的优化模型。

$$\text{目标函数} \quad \max a_8$$

约束条件

$$\left\{ \begin{array}{l} a_8 = -\sum_{i=1}^7 a_i - \sum_{i=9}^{12} a_i \\ x_8 + a_8 \leq 0.15 \\ y_1 = \sum_{i=1}^{12} \beta_{1i} \times (x_i + a_i) \\ y_2 = \sum_{i=1}^{12} \beta_{2i} \times (x_i + a_i) \\ y_3 = \sum_{i=1}^{12} \beta_{3i} \times (x_i + a_i) \\ x_i + a_i \geq 0 \\ y_{1\min} \leq y_1 \leq y_{1\max} \\ y_{2\min} \leq y_2 \leq y_{2\max} \\ y_{3\min} \leq y_3 \leq y_{3\max} \end{array} \right.$$

其中,  $x_i$  表示各化学元素的含量上下限 ( $x_8$  为铬元素含量上限,其余分别为各元素下限);

$y_1, y_2, y_3$  分别表示螺纹钢的抗拉强度、屈服强度、延伸率;  $\beta_{1i}, \beta_{2i}, \beta_{3i}$  分别表示各力学性能指标中各化学元素所对应的系数。

利用 MATLAB 求出最优解, 以及  $a_1, a_2, \dots, a_{12}$  的值, 确定各化学元素的调整范围, 进而求得各元素含量的优化组合。求解结果为:

$$\begin{cases} a_1 = 0.0096 \\ a_2 = 0.0224 \\ a_3 = 0.0162 \\ a_4 = 0.0205 \\ a_5 = 0.0003 \\ a_6 = 0.0720 \\ a_{10} = 0.0030 \end{cases}$$

其他值为零。

由此可得, Cr 含量的增加量不能超过 0.0720, C, Mn, Si, Ceq, V, Cu 含量的减少量分别不能超过 0.0096, 0.0224, 0.0162, 0.0205, 0.0003, 0.0030。

## 4 结 语

(1) 分别对抗拉强度、屈服强度和拉伸率与各化学元素的含量进行了相关性分析, 将相关性强的化学元素作为主要影响因素, 相关性弱的作为次要影响因素。

(2) 将相关性较强的元素作为主要影响因素并分别建立抗拉强度、屈服强度、延伸率与主要影响因素的回归方程。

(3) 建立了以铬含量最大为目标函数, 以抗拉强度、屈服强度和延伸率的取值范围以及化学元素总量恒定为约束条件的优化模型, 从而得出 Cr 含量的增加量不超过 0.0720, C, Mn, Si, Ceq, V, Cu 含量的减少量分别不超过 0.0096, 0.0224, 0.0162, 0.0205, 0.0003, 0.0030 时, 可以最大限度的提高螺纹钢的力学性能。

## 参考文献:

- [1] 姜启源. 数学模型 4 版. [M]. 北京: 高等教育出版社, 2011.
- [2] 王翠娜, 张大江, 石成刚, 等, 基于逐步回归法研究 Q345B 成分及轧制规格与力学性能的关系 [J]. 河南冶金, 2015 (04): 14-16.
- [3] 刘锋, 唐华, 苏理云, 等, 对低合金高强度钢力学性能与化学成分关系的一种统计分析 [J]. 重庆理工大学学报: 自然科学版, 2010 (7): 54-59.
- [4] 韩力军, 高志刚, 方旭芳, 等, 螺纹钢性能影响因素浅析 [J]. 科技与企业, 2013 (10): 359.
- [5] 熊育, 合金元素对 40MnBH 钢组织性能的影响研究 [D]. 江苏大学, 2010.
- [6] 刘宇雁, 高箭宇, 陈林, 等, 基于逐步回归法研究薄板钢化学成分与力学性能的关系 [J]. 包头钢铁学院学报, 2006(01): 18-21.
- [7] 苏理云, 邓燕, 冉雪竹, 等, 低合金高强度钢力学性能与化学成分之间的统计建模与分析 [J]. 重庆工学院学报: 自然科学版, 2009 (2): 36-40.
- [8] 卢德宏, 朱凌云, 蒋业华, 等, 合金元素对钢基复合材料组织和性能的影响 [J]. 昆明理工大学学报: 理工版, 2005(1): 25-27.
- [9] 冯春雨, 浅谈合金元素在钢中的作用 [J]. 冶金标准化与质量, 1996 (8): 20-23.
- [10] Varshney, S. Sangal, S. Kundu, K. Mondal, Super strong and highly ductile low alloy multiphase steels consisting of bainite, ferrite and retained austenite [J]. Materials & Design, 2016, 95:56-78.
- [11] Ali Ghatei Kalashami, Ahmad Kermanpur, Abbas Najafizadeh, Yousef Mazaheri, Development of a high strength and ductile Nb-bearing dual phase steel by cold-rolling and intercritical annealing of the ferrite-martensite microstructures [J]. Materials Science & Engineering A, 2016, 658:32-42.

## Effect of Chemical Elements on Mechanical Properties of Steel

Zhang Xueya, Yang Zongyue, Liu Yang, Han Yihua

(School of Metallurgy and Energy, North China University of Science and Technology, Tangshan, Hebei, China)

**Abstract:** Based on the co-relation analysis of C, Mn, thread S, P, Si, Ce, V, Cr, Ni, Cu, Mo, Al and such chemical elements which can influence the mechanical properties of deformed steel bars, this paper selects strong elements as the main factors and got the regression equation of the tensile strength, yield strength, elongation and the main impact factor. According to the span of tensile strength, yield strength and elongation, an optimization model with the maximum chromium content as the objective function and an optimization model with constant quantity of chemical elements as the constraint conditions. Finally, when the increase of Cr content is less than 0.0720, and the decreased content of C, Mn, Si, Ce, V, Cu are less than 0.0096, 0.0224, 0.0162, 0.0205, 0.0003, 0.0030, respectively, the mechanical properties of the screw thread steel can be maximized.

**Keywords:** Screw thread steel; Chemical elements; Mechanical properties; Correlation analysis; Multiple regression analysis; Optimization model

////////////////////////////////////  
(上接 75 页)

## Experimental Study on Two-step Flotation and Magnetic Process for the Refractory High Sulfur Zinc Ore

Qiao Jibo<sup>1,2</sup>, Liu Quanjun<sup>1</sup>, Jian Sheng<sup>2</sup>

(1. Faculty of Land Resource Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming, Yunnan, China; 2. Kunming metallurgy Research Institute, Kunming, Yunnan, China)

**Abstract:** A ore property of refractory high sulfur zinc ore is complicated and valuable minerals are of various types. The technological process with zinc and sulfur two-step bulk flotation-separation and magnetic process is adopted., which brings the different zinc and sulfur minerals with different floatability are recovered respectively and creates a good condition for posterior tin separation. The closed-circuit test can obtain a zinc concentrate having a zinc content of 43.59% and recovery of 89.67% and a sulfur concentrate having a sulfur content of 34.97% and recovery of 61.49%.

**Keywords:** High sulfur zinc ore; Pyrrhotite; Two-step flotation process; Zinc and sulfur bulk flotation-separation