

· 组织和性能 ·

## X20Cr13 钢材成分对力学性能影响的回归分析

张丽娜<sup>1</sup> 孙永庆<sup>2</sup> 梁剑雄<sup>2</sup> 杨志勇<sup>2</sup> 刘振宝<sup>2</sup> 李文辉<sup>2</sup>

(1 抚顺特殊钢股份有限公司技术中心, 抚顺 113001; 2 钢铁研究总院特殊钢研究所, 北京 100081)

**摘要** 对钢厂 6 t 电弧炉 + LF + VOD + 3 t ESR 生产的 40 mm × 40 mm ~ 80 mm × 80 mm X20Cr13 不锈钢方钢棒材( /% : 0.17 ~ 0.22C, 0.30 ~ 0.80Mn, 0.10 ~ 0.50Si, 0.30 ~ 0.80Ni, 12.5 ~ 14.0Cr) 随机抽取 89 炉次, 进行化学成分与力学性能的统计回归分析, 得到了该类钢材成分与其力学性能的定量回归关系式:  $\sigma_s = 704.9 + 121.9 [Ni] - 84.9 [Mn]$ ;  $\sigma_b = 638.7 + 51.1 [Ni] - 40.5 [Mn] + 16.9 [Cr]$ ;  $A = 81.8 - 24.8 [C] + 2.7 [Mn] - 4.4 [Cr]$ ;  $Z = 49.4 + 47.5 [C] + 4.8 [Si] + 4.3 [Ni]$ ;  $A_{KV} = -90.8 - 55.8 [Mn] + 10.2 [Cr] + 154.1 [Si]$ 。如工艺参数和棒材规格等因素改变时, 应重新回归分析, 修正方程系数。

**关键词** EAF-LF-VOD-ESR 工艺 X20Cr13 钢 力学性能 统计回归分析

## Regression Analysis of Effect of Chemical Composition on Mechanical Properties of X20Cr13 Steel Products

Zhang lina<sup>1</sup>, Sun Yongqing<sup>2</sup>, Liang Jianxiong<sup>2</sup>, Yang Zhiyong<sup>2</sup>, Liu Zhenbao<sup>2</sup> and Li Wenhui<sup>2</sup>

(1 Technology Center, Fushun Special Steel Co Ltd, Fushun 113001;

2 Institute for Special Steel, Central Iron and Steel Research Institute, Beijing 100081)

**Abstract** The statistic regression analysis on chemical composition and mechanical properties of random sampling 89 heats of steel X20Cr13 ( /% : 0.17 ~ 0.22C, 0.30 ~ 0.80Mn, 0.10 ~ 0.50Si, 0.30 ~ 0.80Ni, 12.5 ~ 14.0Cr) 40 mm × 40 mm ~ 80 mm × 80 mm square bar products produced by 6 t EAF + LF + VOD + 3 t ESR process at steelworks has been carried out to get the quantitative regression relation between chemical composition and mechanical properties of this steel series:  $\sigma_s = 704.9 + 121.9 [Ni] - 84.9 [Mn]$ ;  $\sigma_b = 638.7 + 51.1 [Ni] - 40.5 [Mn] + 16.9 [Cr]$ ;  $A = 81.8 - 24.8 [C] + 2.7 [Mn] - 4.4 [Cr]$ ;  $Z = 49.4 + 47.5 [C] + 4.8 [Si] + 4.3 [Ni]$ ;  $A_{KV} = -90.8 - 55.8 [Mn] + 10.2 [Cr] + 154.1 [Si]$ . As the process parameters and size of bar products change, the re-regression analysis should be carried out to revise the equation factors.

**Material Index** EAF-LF-VOD-ESR Process, Steel X20Cr13, Mechanical Properties, Statistic Regression Analysis

X20Cr13 钢属于马氏体不锈钢, 经空冷或油冷后可淬透获得马氏体组织, 经回火后转变为回火马氏体以及少量逆转变奥氏体。由于其在具有高强度的同时具有韧性好、耐腐蚀的特点, 被广泛应用于刀具、汽轮机叶片、轴承、阀门、结构件和耐磨件等重要零部件<sup>[1-3]</sup>。

为了进一步提高钢铁材料的力学性能, 通过研究材料成分与力学性能的关系, 精确控制材料成分, 实现钢材力学性能的进一步提高, 一直是近年来研究工作的重点<sup>[4-6]</sup>。本文通过对钢厂生产中随机收集的 89 炉次边长为 40 ~ 80 mm 的 X20Cr13 不锈钢方钢棒材进行化学成分分析和力学性能测定, 采用统计回归的分析方法找出了成分与力学性能的定量相关关系, 为该类钢材的成分设计提供了依据。

### 1 试验方案的设计

在钢厂连续生产的钢棒中随机抽取了 89 个炉次、规格为边长 40 ~ 80 mm 的 X20Cr13 不锈钢方钢

棒材。使用 6 t 电弧炉 + LF + VOD 冶炼后浇铸电极棒, 电极棒尺寸为  $\Phi 480$  mm, 再将电极棒进行电渣重熔, 电渣冷凝后得到锭型为  $\Phi 610$  mm 的铸锭 2 支, 单重约 3 t。材料由 3 500 t 液压机经开坯后精锻成型。锻造的加热温度为 1 150 °C, 终锻温度为不低于 900 °C。

在棒材截面 1/4 边长处钻取样屑, 分析其主要合金元素的成分; 同样在此处取棒材纵向力学性能试样, 经 980 °C 保温 1 h 空冷淬火, 660 °C 回火 4 h, 测定其抗拉强度、屈服强度、伸长率、断面收缩率和冲击吸收功。表 1 列出了该批 89 组钢棒化学成分与力学性能的统计特征的数据, 其中“性能指标/成分区间”取自钢厂内部关于 X20Cr13 棒材的技术条件。图 1 列出了所有力学性能、化学成分的正态分布曲线。

### 2 数据的回归处理方法

数据处理时以化学成分为自变量, 各项力学性

能为因变量,使用 SPSS 统计软件按多元线性回归统计分析建立回归模型。计算原理请参阅相关文献,仅对计算过程作简要介绍<sup>[7]</sup>。

### 2.1 多元线性回归模型的建立

回归模型中的各回归系数由各相关矩阵方程  $Ab = B$  (其中  $A$  是正规方程组的系数矩阵,  $b$  是回归系数矩阵,  $B$  是正规方程组的常数项矩阵) 求出,模型的显著性检验按方差分析的  $F$  检验进行,偏回归系数的显著性检验按  $t$  检验法进行。

### 2.2 多元线性回归模型的显著性分析

得到回归方程后,首先进行方程的显著性检验,如方程的统计量  $F \geq F_{\alpha}(p, n - p - 1)$  [ $F$  为检验统计量,计算方法请参阅文献<sup>[4]</sup>;  $F_{\alpha}(p, n - p - 1)$  为查

表 1 89 炉次 X20Cr13 钢棒的力学性能与化学成分的特征数据

Table 1 Statistic characteristics data of mechanical properties and chemical composition of steel X20Cr13 bars, 89 heats

分类	变量名称	性能指标/成分区间	平均值	最小值	最大值	标准差
因变量	屈服强度( $\sigma_s$ )/MPa	$\geq 600$	704	650	840	32.7
	抗拉强度( $\sigma_b$ )/MPa	800 ~ 900	856	818	920	20.3
	伸长率( $A$ )/%	$\geq 15$	20	16	23	1.5
	断面收缩率( $Z$ )/%	$\geq 50$	62	54	68	2.0
	冲击吸收功( $A_{KV}$ )/J	$\geq 20$	52	26	87	11.2
自变量	C/%	0.17 ~ 0.22	0.20	0.17	0.22	0.01
	Mn/%	0.30 ~ 0.80	0.61	0.48	0.69	0.04
	Si/%	0.10 ~ 0.50	0.28	0.18	0.36	0.03
	Ni/%	0.30 ~ 0.80	0.42	0.38	0.58	0.11
	Cr/%	12.50 ~ 14.00	13.10	12.80	13.20	0.03

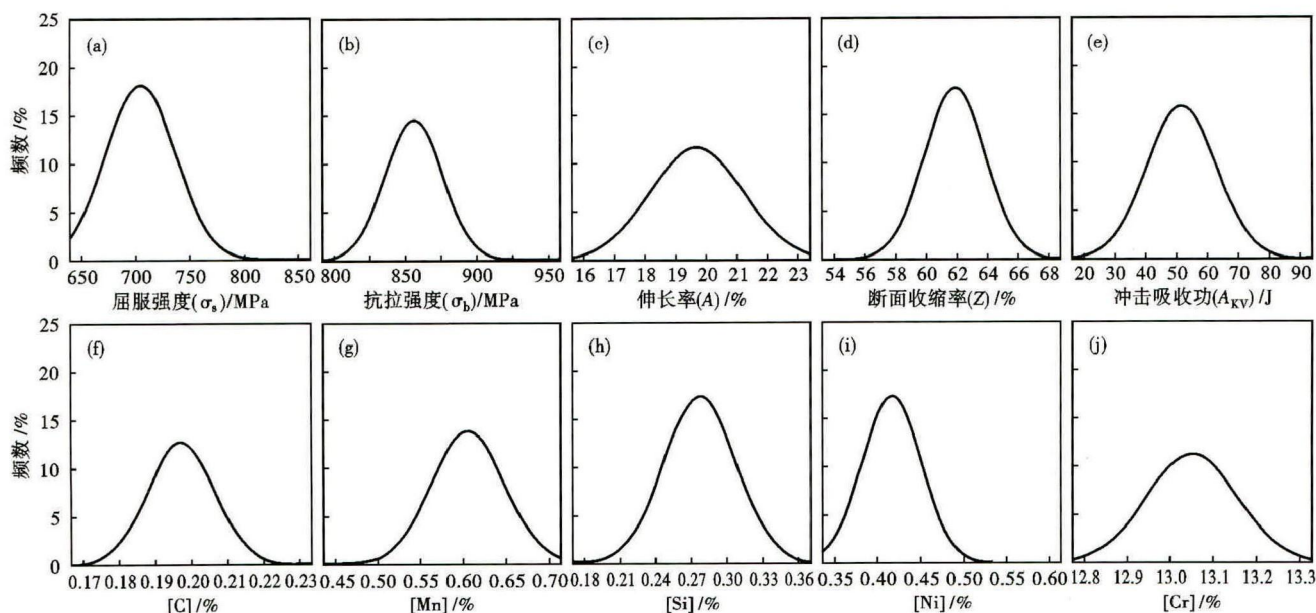


图 1 89 炉次 X20Cr13 钢棒的力学性能与化学成分的正态分布曲线:(a)屈服强度;(b)抗拉强度;(c)伸长率;(d)断面收缩率;(e)冲击能;(f)碳;(g)锰;(h)硅;(i)镍;(j)铬

Fig.1 Normal distribution curves of mechanical properties and chemical composition of steel X20Cr13 bars, 89 heats: (a) yield strength; (b) tensile strength; (c) elongation; (d) reduction of area; (e) impact energy; (f) carbon; (g) manganese; (h) silicon; (i) nickel; (j) chromium

$F$  分布表所得,  $n$  为实测数据个数,  $p$  为自变量个数],则认为回归方程是显著的;反之,则认为回归方程无显著意义。其次需要进行每个变量的偏回归系数的显著性检验。在给定显著性水平  $\alpha$  下,对于每一个回归系数,确定临界值  $t_{\alpha/2}(n - p - 1)$ ;若  $|t_{\beta_i}| \geq t_{\alpha/2}(n - p - 1)$ , [ $t_{\beta_i}$  为检验统计量,计算方法请参阅文献<sup>[7]</sup>,  $t_{\alpha/2}(n - p - 1)$  为查  $t$  分布表所得],则该变量的偏回归系数具有显著意义。当经显著性检验有几个不显著的偏回归系数时,一次只能剔除一个不显著的偏回归系数对应的自变量,被剔除的自变量的偏回归系数是所有不显著的偏回归

系数中的  $|t_{\beta_i}|$  值最小者。然后对剔除该变量后重新建立的回归方程进行检验,有不显著变量再剔除,直到保留的变量都显著为止。

### 3 X20Cr13 钢性能的回归分析结果

以屈服强度的回归分析过程为例。回归方程的实测数据数  $n = 89$ , 变量个数  $p = 5$  ([C], [Mn], [Si], [Ni], [Cr]), 选取显著性水平为  $\alpha = 0.1$ 。经过初步回归分析,认为 [C], [Cr], [Si] 三个变量不显著,予以剔除。最后得到的回归方程为:

$$\sigma_s = 704.9 + 121.9[\text{Ni}] - 84.9[\text{Mn}] \quad (1)$$

表 2 方程(1)各偏回归系数的显著性检验

Table 2 Significance test of each partial regression coefficient in equation (1)

项目	常数项	Ni	Mn
$P_i$	0.153	0.035	0.021
$t_{\beta_i}$	1.087	1.754	1.685

此时实测数据数  $n=89$ , 自变量个数  $p=2$ 。方程统计量  $F=2.54 > F_{\alpha}(p, n-p-1) = F_{0.1}(2, 86) \approx 2.37$ , 方程在显著性水平  $\alpha=0.1$  时具有显著意义。

方程偏回归系数的显著性检验值如表 2 所示。其中  $P_i$  为  $P$  值检验的统计值; 若  $P_i$  小于显著性水平  $\alpha$ , 则该自变量的回归系数具有显著性。可见, 除常数项外, 2 个变量的  $P_i$  值均小于  $\alpha=0.1$ ;  $t_{\beta_i}$  统计值均大于  $t_{\alpha/2}(n-p-1) = t_{0.05}(86) \approx 1.66$ 。该方程各变量的偏回归系数均具有显著意义。常数项虽然不显著, 但仍应予以保留。

按照同样的计算过程, 可以得出其余因变量的回归方程:

$$\sigma_b = 638.7 + 51.1[\text{Ni}] - 40.5[\text{Mn}] + 16.9[\text{Cr}] \quad (2)$$

$$A = 81.8 - 24.8[\text{C}] + 2.7[\text{Mn}] - 4.4[\text{Cr}] \quad (3)$$

$$Z = 49.4 + 47.5[\text{C}] + 4.8[\text{Si}] + 4.3[\text{Ni}] \quad (4)$$

$$A_{KV} = -90.8 - 55.8[\text{Mn}] + 10.2[\text{Cr}] + 154.1[\text{Si}] \quad (5)$$

#### 4 对回归分析结果的讨论

选取的 89 炉 X20Cr13 钢棒边长均在 40 ~ 80 mm, 尺寸差别不大; 棒材均为同一厂家依据同样的工艺规程在相同的冶炼炉和锻造机械上生产, 冶炼、锻造、热处理等工艺参数已固化。根据数量冶金学的概念, 如果冶炼、锻造、热处理等工艺相对稳定, 可认为 X20Cr13 钢棒各炉间的显微组织差别不大, 影响力学性能的主要因素是化学成分。其应用主要有以下几个方面。

(1) 所得到的回归方程(1)~(5)的显著性水平为 0.1, 具有一定的实际参考价值;

(2) 由方程(1)~(5)可根据偏回归系数的绝对值大小正确评价各种合金元素对不同力学性能的影响。

例如, Si 元素对提高冲击值有强烈的促进作用, 而对于断面收缩率则具有一定的抑制作用。因此可以为平衡各项力学性能指标提供依据;

(3) 可以使用化学成分与力学性能之间的回归方程来估算力学性能, 或者为设定的力学性能目标反推成分设计区间。

诚然, 在回归方程式中, 有的合金元素对力学性能影响的规律可能与之前的报道或者公认的相反, 这是由于多元素交互作用或各种工艺参数、组织参数交互作用的结果, 对此还需进行深入细致的研究。

#### 5 结论

(1) X20Cr13 钢棒(边长 40 ~ 80 mm)的抗拉强度、屈服强度、伸长率、断面收缩率及室温冲击吸收功分别与 C、Mn、Si、Ni、Cr 等合金元素的含量之间存在一定的线性关系, 建立的多元线性回归方程显著(显著性水平  $\alpha=0.1$ ), 可用于预测力学性能、辅助设计、指导生产。

(2) 该系列回归方程也具有一定的局限性。如果工艺参数或其它因素(例如棒材规格)发生变化, 可能需要进行重新回归分析, 对方程系数进行修正。

#### 参考文献

- [1] 白鹤, 王伯健. 马氏体不锈钢成分、工艺和耐蚀性的进展[J]. 特殊钢, 2009, 30(2): 30-33.
- [2] 程鹏辉, 贺东风, 田乃媛. 我国不锈钢发展现状及展望[J]. 特殊钢, 2007, 28(3): 50-52.
- [3] 赵先存, 宋为顺, 杨志勇, 等. 高强度超高强度不锈钢[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2008.
- [4] 周压西, 刘彦庆, 刘静华. 双相钢组织与性能关系的回归分析[J]. 西安交通大学学报, 1986, 20(2): 111-118.
- [5] 张海, 刘德富. 化学成分回归分析预测 20CrMnTiH 钢的淬透性和机械性能[J]. 特殊钢, 2001, 22(4): 22-23.
- [6] 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, 23(2): 36-40.
- [7] 汪荣鑫. 数理统计[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1983.

张丽娜(1980-), 女, 工程师, 2004 年沈阳大学毕业, 不锈钢新材料研发。

收稿日期: 2015-08-23

**欢迎全国冶金、机械、耐材及相关行业在《特殊钢》杂志上刊登工艺设备和技术、产品研发宣传广告**