

# 1Cr15Ni4Mo3N 不锈钢材成分与力学性能的回归分析

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

(1 钢铁研究总院结构材料研究所,北京 100081; 2 抚顺特殊钢股份有限公司,抚顺 113001)

**摘要** 对 1Cr15Ni4Mo3N 不锈钢(∕% :0.11~0.16C,0.50~1.25Mn,≤0.70Si,4.0~5.0Ni,14.5~15.5Cr,2.3~2.8Mo,0.05~0.1N)Φ60~90 mm 棒材随机抽取 58 炉次进行化学分析,同时对各炉次钢材纵向力学性能试样进行 1 070 ℃ 1 h 空冷, -70 ℃ 4 h 冷处理,再进行 200 ℃ 2 h 回火,并测定其力学性能。通过统计回归分析,得出该钢材成分与力学性能之间的回归方程。

**关键词** 1Cr15Ni4Mo3N 不锈钢 化学成分 力学性能 回归方程

## A Regression Analysis on Chemical Composition and Mechanical Properties of Stainless Steel 1Cr15Ni4Mo3N Round Products

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

(1 Institute for Structural Materials, Central Iron and Steel Research Institute, Beijing 100081; 2 Fushun Special Steel Co Ltd, Fushun 113001)

**Abstract** The analysis on elements content in 58 heats stainless steel 1Cr15Ni4Mo3N (∕% : 0.11~0.16C, 0.50~1.25Mn, ≤0.70Si, 4.0~5.0Ni, 14.5~15.5Cr, 2.3~2.8Mo, 0.05~0.1N) random-sampling from Φ60~90 mm bars are carried out, while the longitudinal mechanical properties of each heat products heat-treated with 1 070 ℃ 1 h, air cooling, -70 ℃ 4 h cold treatment then 200 ℃ 2 h tempering are measured. The regression equations between the chemical composition and the mechanical properties of steel are obtained by statistic regression analysis.

**Material Index** Stainless Steel 1Cr15Ni4Mo3N, Chemical Composition, Mechanical Properties, Regression Equation

1Cr15Ni4Mo3N 钢属于沉淀硬化不锈钢,退火状态下组织主要为奥氏体,切削加工性能良好;经过淬火处理和冷处理后组织结构大量转变为马氏体组织,经回火后析出强化相,具有较高的强度、塑性配合和抗腐蚀能力<sup>[1]</sup>。该钢在航空领域被大量应用,制作螺栓、起落架接头、发动机风扇轴等关键承力部件<sup>[2]</sup>。

### 1 试验方案的设计

在钢厂连续生产的钢棒中随机抽取了 58 个炉次、规格为 Φ60~90 mm 的 1Cr15Ni4Mo3N 不锈钢棒材。在棒材截面 1/2 半径钻取样屑,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 1 070 ℃ 保温 1 h 空冷, -70 ℃ 保温 4 h,再进行 200 ℃ 回火 2 h,测定其屈服强度、抗拉强度、伸长率、断面收缩率和冲击吸收功(表 1)。

### 2 1Cr15Ni4Mo3N 不锈钢性能的回归分析

使用 SPSS 统计软件按多元线性回归统计分析建立回归模型<sup>[3]</sup>。

回归模型中的各回归系数由各相关矩阵方程  $Ab = B$  (式中:  $A$ - 正规方程组的系数矩阵;  $b$ - 回归系数矩阵;  $B$ - 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。

得到回归方程后,首先进行方程的显著性检验,

表 1 58 炉次钢棒的力学性能与化学成分的统计特征

Table 1 Statistic characteristics of mechanical properties and chemical composition of 58 heats steel bars

项目	因变量					自变量化学成分/∕%						
	屈服强度 ( $\sigma_s$ )/MPa	抗拉强度 ( $\sigma_b$ )/MPa	伸长率 ( $A$ )/%	断面收缩率 ( $Z$ )/%	冲击吸收功 ( $A_{KU}$ )/J	C	Mn	Si	Ni	Cr	Mo	N
变量指标 区间	≥1 030	≥1 420	≥15	≥50	≥78	0.11~ 0.16	0.50~ 1.25	≤0.70	4.0~ 5.0	14.5~ 15.5	2.3~ 2.8	0.05~ 0.1
平均值	1 201.5	1 450.3	18.1	63.8	163.7	0.14	0.67	0.28	4.45	14.70	2.57	0.08
标准差	51.7	25.67	1.1	2.6	21.0	0.01	0.06	0.06	0.08	0.13	0.04	0.01
标准误差	6.8	3.40	0.1	0.3	2.8	0.001	0.008	0.007	0.010	0.018	0.006	0.001

如方程的统计量:

$$F \geq F_{\alpha}(p, n-p-1)$$

式中:  $F$ - 检验统计量, 计算方法参阅文献[3];  $F_{\alpha}(p, n-p-1)$ - 查  $F$  分布表所得;  $n$ - 实测数据个数;  $p$ - 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  $t_{\alpha/2}(n-p-1)$ ;

$$\text{若 } |t_{\beta_i}| \geq t_{\alpha/2}(n-p-1)$$

式中:  $|t_{\beta_i}|$ - 检验统计量, 计算方法参阅文献[3];  $t_{\alpha/2}(n-p-1)$ - 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。

以屈服强度的回归分析过程为例。回归方程的实测数据数  $n=58$ , 变量个数  $p=7$  ( $[C]$ ,  $[Mn]$ ,  $[Si]$ ,  $[Ni]$ ,  $[Cr]$ ,  $[Mo]$ ,  $[N]$ ), 选取显著性水平为  $\alpha=0.1$ 。经过初步回归分析, 认为  $[C]$ ,  $[Ni]$ ,  $[Cr]$ ,  $[N]$  4 个变量不显著, 予以剔除, 得出:

$$\sigma_s = 35.229 + 395.907[Mn] + 321.406[Si] + 315.30[Mo] \quad (1)$$

实测数据数  $n=58$ , 自变量个数  $p=3$ 。统计量  $F=8.933 > F_{\alpha}(p, n-p-1) = F_{0.1}(3, 54) \approx 2.19$ , 方程在显著性水平  $\alpha=0.1$  时具有显著意义;

表 2 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。由表 2 可见, 除常数项外, 3 个变量的  $P_i$  值均小于  $\alpha=0.1$ ;  $t_{\beta_i}$  统计值均大于  $t_{\alpha/2}(n-p-1) = t_{0.05}(54) \approx 1.67$ 。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。

其余因变量的回归方程为:

表 2 方程 1 中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	Mn	Si	Cr
$P_i$	0.922	0	0.003	0.021
$t_{\beta_i}$	0.098	3.946	3.135	2.369

$$\sigma_b = 1818.735 + 619.737[C] + 136.182[Mn] - 58.052[Cr] + 147.634[Mo] - 1237.756[N] + 97.936[Si] \quad (2)$$

$$A = 58.794 + 23.348[C] - 5.672[Mn] - 3.287[Si] - 2.526[Cr] - 26.540[N] \quad (3)$$

$$Z = 41.643 - 10.682[Si] - 94.443[N] + 12.745[Mo] \quad (4)$$

$$A_{Ku} = 52.830 + 386.099[C] - 124.175[Mo] + 146.453[Mn] + 62.385[Ni] \quad (5)$$

### 3 对回归分析结果的讨论

(1) 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,  $Si$  元素对屈服强度和抗拉强度有强烈的促进作用, 而对于伸长率和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;

(2) 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反相, 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。

### 4 结论

(1) 1Cr15Ni4Mo3N 钢棒 ( $\Phi 60 \sim 90$  mm) 的屈服强度、抗拉强度、伸长率、断面收缩率及室温冲击吸收功分别与  $C$ 、 $Mn$ 、 $Si$ 、 $Ni$ 、 $Cr$ 、 $Mo$ 、 $N$  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并辅助设计和指导生产。

(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

- 赵先存, 宋为顺, 杨志勇, 等. 高强度超高强度不锈钢. 北京: 冶金工业出版社, 2008
- 古立新, 金建军. 回火温度对 1Cr15Ni4Mo3N 钢组织和性能的影响. 材料工程, 2007(1): 7
- 汪荣鑫. 数理统计. 西安: 西安交通大学出版社, 1983

孙永庆 (1978-), 男, 博士, 高级工程师, 高强度不锈钢研究。

收稿日期: 2011-08-08