

0Cr16Ni5Mo 钢 Φ120 ~ 160 mm 棒材成分和力学性能的回归分析

张秀丽¹ 孙永庆² 梁剑雄² 杨志勇² 刘振宝² 李文辉²

(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 0Cr16Ni5Mo 钢由 6 t 真空感应炉 + 电渣重熔工艺冶炼,并锻造成 Φ120 ~ 160 mm 钢材,终锻温度 ≥ 900 °C,力学性能试样经 950 °C 1 h 空冷 + 520 °C 4 h 回火处理。对该钢 47 炉次的棒材回归分析,得到了 0Cr16Ni5Mo 钢材成分与力学性能的定量回归关系式: $\sigma_s = -1\,043.3 + 5\,507.6[C] - 1\,177.0[Si] + 212.6[Ni] + 1\,160.3[Mo]$; $\sigma_b = -648.2 + 4\,136.7[C] - 424.7[Si] + 137.2[Ni] + 1\,018.4[Mo]$; $A = 11.9 - 137.6[C] + 25.1[Si] - 4.9[Ni] - 2.5[Cr] - 29.9[Mo]$; $A_{KV} = -473.3 - 451.3[Si] + 103.3[Ni] + 321.3[Mo]$,其显著性水平为 0.1。

关键词 0Cr16Ni5Mo 钢 Φ120 ~ 160 mm 棒材 化学成分 力学性能 回归分析

Regression Analysis on Chemical Composition and Mechanical Properties of Steel 0Cr16Ni5Mo Φ120 ~ 160 mm Bar

Zhang Xiuli¹, Sun Yongqing², Liang Jianxiong², Yang Zhiyong², Liu Zhenbao² and Li Wenhui²

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

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

Abstract The test steel 0Cr16Ni5Mo is melted by a 6 t vacuum induction furnace + electro-slag remelting process, forged to Φ120 ~ 160 mm steel products, finishing forging at ≥900 °C, and the samples for mechanical properties test are treated at 950 °C for 1 h, air cooling + tempered at 520 °C for 4 h air cooling. The quantity regression relationships between composition and mechanical properties of products of steel 0Cr16Ni5Mo are obtained by regression analysis on steel products of 47 heats that are $\sigma_s = -1\,043.3 + 5\,507.6[C] - 1\,177.0[Si] + 212.6[Ni] + 1\,160.3[Mo]$, $\sigma_b = -648.2 + 4\,136.7[C] - 424.7[Si] + 137.2[Ni] + 1\,018.4[Mo]$, $A = 11.9 - 137.6[C] + 25.1[Si] - 4.9[Ni] - 2.5[Cr] - 29.9[Mo]$ and $A_{KV} = -473.3 - 451.3[Si] + 103.3[Ni] + 321.3[Mo]$, its significance level is 0.1.

Material Index Steel 0Cr16Ni5Mo, Φ120 ~ 160 mm Bar Products, Chemical Composition, Mechanical Properties, Regression Analysis

0Cr16Ni5Mo 钢属于低碳马氏体不锈钢^[1-2],为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,实现钢材力学性能的进一步提高^[3-4]。

1 试验方案的设计

在钢厂连续生产的钢棒材中随机抽取了 47 个炉次、规格为 Φ120 ~ 160 mm 的 0Cr16Ni5Mo 不锈钢棒材。棒材全部使用 6 t 真空感应 + Φ360 mm 电渣重熔工艺冶炼;由 3 500 t 液压机经开坯、镦拔后锻造成型。材料的加热温度为 1 150 °C,终锻温度 ≥ 900 °C。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 950 °C 1 h 空冷淬火,520 °C 回火 4 h(表 1)。

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^[5]。

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

表 1 47 炉次 0Cr16Ni5Mo 钢棒的力学性能与化学成分

Table1 Mechanical properties and chemical composition of steel 0Cr16Ni5Mo bar products, 47 heats

项目	力学性能(因变量)				化学成分/%(自变量)					
	σ_s /MPa	σ_b /MPa	A/%	A_{KV} /J	C	Mn	Si	Ni	Cr	Mo
指标值	≥820	≥900	≥16	≥90	≤0.07	0.5~1.0	≤1.0	3.5~5.5	15.0~17.0	0.6~1.2
平均值	905	1 043	22.1	167.8	0.05	0.70	0.39	4.80	15.64	1.00
标准值	75.0	157.5	0.2	24.2	0	0	0	0.01	0.07	0
标准误差	8.7	12.5	0.4	4.9	0.006 4	0.001 3	0.008 0	0.093 4	0.267 8	0.012 3

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

首先进行方程的显著性检验^[3],如方程的统计量 $F \geq F_{\alpha}(p, n-p-1)$ [F 为检验统计量; $F_{\alpha}(p, n-p-1)$ 为查 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 α 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, 计算方法请参阅相关文献^[5], $t_{\alpha/2}(n-p-1)$ 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 0Cr16Ni5Mo 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 $n = 47$, 变量个数 $p = 6$ ([C], [Mn], [Si], [Ni], [Cr], [Mo]), 选取显著性水平为 $\alpha = 0.1$ 。经过初步回归分析, 认为 [Mn], [Cr] 2 个变量不显著, 予以剔除。最后得到的回归方程为:

$$\sigma_s = -1\,043.3 + 5\,507.6[C] - 1\,177.0[Si] + 212.6[Ni] + 1\,160.3[Mo] \quad (1)$$

此时实测数据数 $n = 47$, 自变量个数 $p = 4$ 。方程统计量 $F = 2.86 > F_{\alpha}(p, n-p-1) = F_{0.1}(4, 42) \approx 2.02$, 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 α , 则该自变量的回归系数具有显著性。可见, 除常数项外, 3 个变量的 P_i 值均小于 $\alpha = 0.1$; t_{β_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。

按照同样的计算过程, 可得:

表 2 方程(1)中各偏回归系数的显著性检验

Table 2 Significance examination of partial regression coefficients in equation (1)

项目	常数项	C	Si	Ni	Mo
P_i	0.303	0.052	0.078	0.056	0.033
t_{β_i}	1.076	2.161	1.832	1.994	2.369

$$\sigma_b = -648.2 + 4\,136.7[C] - 424.7[Si] + 137.2[Ni] + 1\,018.4[Mo] \quad (2)$$

$$A = 11.9 - 137.6[C] + 25.1[Si] - 4.9[Ni] - 2.5[Cr] - 29.9[Mo] \quad (3)$$

$$A_{KV} = -473.3 - 451.3[Si] + 103.3[Ni] + 321.3[Mo] \quad (4)$$

4 对回归分析结果的讨论

得出回归方程的应用主要有以下几个方面:

(1) 所得到的回归方程(1)~(4)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)~(4)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, C 元素对屈服强度和抗拉强度有强烈的促进作用, 而对于伸长率和冲击韧性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) 建立 $\Phi 120 \sim 160$ mm 0Cr16Ni5Mo 钢材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] 秦 斌, 王 军. 低碳马氏体不锈钢 0Cr16Ni5Mo 的研制[J]. 宝钢技术, 2001(5): 56-59.
- [2] 过 洁, 龙友松. 0Cr16Ni5Mo 不锈钢应用特性的研究[J]. 大电机技术, 2001(3): 44-47.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] 汪荣鑫. 数理统计[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1983.

张秀丽(1970-), 女, 硕士(东北大学), 高级工程师, 1992 年东北工学院毕业, 不锈钢新材料研发和试制。

收稿日期: 2014-08-20