

建筑钢结构钢材硬度与拉伸强度相关性研究

秦忠义

上海樵石建筑装饰工程有限公司 上海 202150

摘要: 钢结构主要是指由热轧型钢、薄壁型钢、钢管和钢板等构件组合而成的结构,是目前主要的建筑结构类型,在工程中得到广泛应用和发展。在对钢结构工程质量进行检测时,判断其强度等级是对建筑钢结构质量做出评价的基础。传统的检测方法是从小构件上选取样本进行拉伸试验,但这种方法可能对原来的结构造成一定的损伤,并且某些情况下也不便或不允许进行取样。

关键词: 钢结构; 钢材硬度; 拉伸强度

国内外学者对钢材强度在工程现场无损检测的研究,主要从化学成分和硬度两方面着手,并得到了一些经验公式。这些经验公式可以归结为两大类:第一类是由化学成分推算拉伸强度,如 GB/T 56021-2010《钢结构现场检测技术标准》中提到的公式。但该方法受化学成分和制造工艺的影响较大,依此推算钢材强度可能会出现较大偏差;第二类则是由硬度推算拉伸强度,相关研究表明,钢材硬度和拉伸强度之间存在正相关关系,通过硬度试验的结果可以估算出材料的拉伸强度,这也是工程上实际应用较多的方法。因此,通过对建筑钢结构钢材硬度与拉伸强度进行相关性研究,通过回归模型对其进行推算,在现场检测工作中有着一定的现实意义。

为了解钢材硬度和拉伸强度两个变量间的关系,探索建立两者的关联模型,提高检测工作效率,进行实验并做回归分析。

1. 试样制备与试验方法

1.1 试样制备

实验样品的制备在整个试验环节中是非常重要的环节,样品好坏直接影响到结果是否准确。由于洛氏硬度在理论上是以平均值为基准的,对于凹凸不平的表面,即表面粗糙度较大的表面,在相同试验条件下较表面粗糙度小的表面压头压入深度要更浅些,因此测得的洛氏硬度值偏低。随着试样表面粗糙度的增加,不同硬度范围试样的洛氏硬度测试误差逐渐增加,但低硬度试样的增加趋势更为明显,且误差绝对值也更小,即表面粗糙度对低硬度试样的洛氏硬度测试结果的影响更为明显。因此,在制备试样时使用砂轮机对其表面进行打磨,去除氧化层及污物,保证表面平坦光滑且粗糙度 $Ra \leq 2\mu m$;试验中采用金刚石圆锥压头,故试样厚度应不小于参与压痕深度的10倍。

1.2 洛氏硬度试验方法

依据 GB/T 230.1-2018《金属材料 洛氏硬度试验 第1部分:试验方法》,为避免温度变化对试验结果产生影响,要求试验在10~35℃室温下进行。同时,试验台应平稳放置,表面不得有铁屑及其它脏污,并使压头轴线与试样表面垂直。

使压头与试样表面接触,无冲击、振动、摆动和过载地施加初试验力 F_0 ,初试验力加载时间不应超过2s,保持时间3s。从 F_0 施加至总试验力 F 的时间应为1~8s之间。总试验力 F 保持时间为5(+1, -3)s,卸除主试验力 F_1 ,保持初试验力 F_0 2s后,进行最终读数并记录。每组取6点洛氏硬度计算其均值,实验结果见表1。

1.3 拉伸试样的制备

拉伸试样的形状与尺寸取决于要被试验的金属产品的形状与尺寸,本次试验取自建筑工程钢结构中常见的角钢,按 GB/T228.1-2010 中附录 D 规定制成矩形试样。

1.4 拉伸试验的方法

所用拉伸试验机型号为:WES-600B。室温拉伸试验温度为(23±5)℃。试验时确保被夹持试样受轴向拉力作用,避免斜拉引起的受力不均匀从而影响实验结果。实验速度控制模式:位移,横梁位移速度:1.3mm/min。在应力应变控制模式下,试验结果见表1。

表1 抗拉强度 R_m 与洛氏硬度均值

洛氏硬度/HRC ($\bar{x}$)	抗拉强度 R_m ($\bar{y}$)	洛氏硬度/HRC ($\bar{x}$)	抗拉强度 R_m ($\bar{y}$)	洛氏硬度/HRC ($\bar{x}$)	抗拉强度 R_m ($\bar{y}$)	洛氏硬度/HRC ($\bar{x}$)	抗拉强度 R_m ($\bar{y}$)
25.1	884.76	26.4	896.03	22.7	871.05	27.9	900.45
23.6	877.47	26.5	891.98	27.5	887.29	26.3	896.89
30.3	894.58	24.6	885.42	25.1	885.67	28.1	894.62
24.7	887.57	25.7	884.57	25.1	882.34	26	896.03
27.5	889.41	24.8	881.86	24.9	875.16	28.9	894.77
24.7	877.08	22	879.33	23.7	880.91	23.5	869.39
27.1	893.36	25	884.90	23.5	873.81	22.4	872.69
23.5	883.05	22.9	873.65	21.8	862.65	23.2	870.23

2. 试验结果分析

2.1 散点图

散点图是质量管理常用工具之一,常用来描述一组连续变量之间的关系。通过对本次试验中“洛氏硬度”与“拉伸强度”作散点图如下,并初步观测其分布特性。

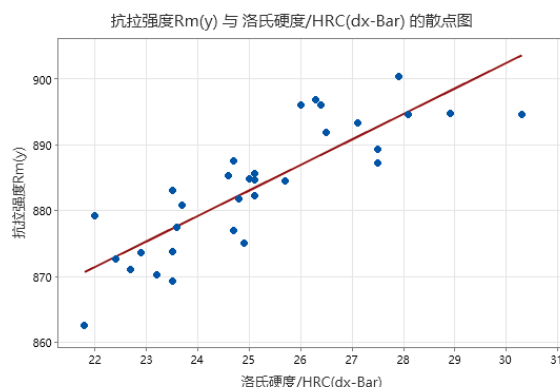


图1 洛氏硬度与抗拉强度散点图

通过上图可以看出,“洛氏硬度”与“拉伸强度”两个变量之间的确存在某种关系:当试样的“洛氏硬度”增大时,其“拉伸强度”也相应增大;反之则减小。两者呈现出较强的正相关关系。

2.2 相关系数 r

从图1可以看出,30个点子在一条直线附近,但又不完全在一条直线上,图形仅可以提供定性的分析。因此,为了能够表示硬度与强度这两个变量之间线性相关的程度,我们使用相关系数 r 来做定量分析,计算如下:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^{30} (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{30} (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^{30} (y_i - \bar{y})^2}}$$

其中 x 表示洛氏硬度, y 表示拉伸强度

根据相关系数 r 的性质,当 $r = \pm 1$ 时,这些点子在一直线,

表示完全线性相关；当 $r > 0$ 时表示两个变量正相关，即 x 越大 y 就有增大的趋势；当 $r < 0$ 时表示两个变量负相关，即 x 越大 y 就有减小的趋势；当 $r = 0$ 时表示两个变量不相关，这时散点图上的点子分布毫无规律，但无法排除 x 和 y 之间存在其他非线性关系。那么相关系数 r 的绝对值为多大时，才可以有把握的认为两者间存在线性相关？这就涉及到相关系数的检验。

2.3 相关系数的检验及检验统计量

假设检验的基本思想是：根据所获得的样本，运用数理统计分析的方法，对总体 X 的某种假设 H_0 做出接受或拒绝的判断。

我们先假定实际相关系数为 ρ ，建立假设为：

$$H_0: \rho = 0, H_1: \rho \neq 0$$

原假设 H_0 是指，假设真实的相关系数等于 0，即洛氏硬度与拉伸强度之间不相关，即不存在线性关系；备择假设 H_1 是指当洛氏硬度与拉伸强度不存在线性关系被拒绝，即两者之间存在线性关系。

通过已知的检验法则，相关系数检验的拒绝域为：

$$W = \{|r| > r_{1-\alpha/2}(n-2)\}$$

其中 n 为样本量 30， α 为显著性水平，置信度要求一般取值 5% 或 1%， $r_{1-\alpha/2}(n-2)$ 是检验相关系数的临界值，其值可以从表 2 查到。

$n-2$	$\alpha=5\%$	$\alpha=1\%$	$n-2$	$\alpha=5\%$	$\alpha=1\%$	$n-2$	$\alpha=5\%$	$\alpha=1\%$
1	0.997	1.000	16	0.468	0.590	35	0.325	0.418
2	0.950	0.990	17	0.456	0.575	40	0.304	0.393
3	0.878	0.959	18	0.444	0.561	45	0.288	0.372
4	0.811	0.917	19	0.433	0.549	50	0.273	0.354
5	0.754	0.874	20	0.423	0.537	60	0.250	0.325
6	0.707	0.834	21	0.413	0.526	70	0.232	0.302
7	0.666	0.798	22	0.404	0.515	80	0.217	0.283
8	0.632	0.765	23	0.396	0.505	90	0.205	0.267
9	0.602	0.735	24	0.388	0.496	100	0.195	0.254
10	0.576	0.708	25	0.381	0.487	125	0.174	0.228
11	0.553	0.684	26	0.374	0.478	150	0.159	0.208
12	0.532	0.661	27	0.367	0.470	200	0.138	0.181
13	0.514	0.641	28	0.361	0.463	300	0.113	0.148
14	0.497	0.623	29	0.355	0.456	400	0.098	0.128
15	0.482	0.606	30	0.349	0.449	1000	0.062	0.081

表 2 检验相关系数的临界值表

$$\text{计算相关系数 } r = \frac{\sum_{i=1}^{32} (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{32} (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^{32} (y_i - \bar{y})^2}} = 0.842,$$

查阅检验相关系数的临界值表，对于 $n=32$ ，在显著性水平 $\alpha=0.05$ 时的临界值为 0.349，由于计算得出相关系数 $r=0.842 > 0.349$ 落在拒绝域区域，因此拒绝原假设 $H_0: \rho=0$ ，选择备择假设 $H_1: \rho \neq 0$ ，即洛氏硬度与抗拉强度存在正线性相关关系。

3. 洛氏硬度与抗拉强度回归分析

通过上述计算，我们已经可以得出试样的洛氏硬度与抗拉强度存在正线性相关，下面我们进一步建立两个相关变量之间的定量关系表达，即一元线性回归方程。

一元线性回归方程的表达式为：

$$\hat{y} = a + bx$$

但在实际情况中，观测值 y_i 与回归值 $\hat{y}_i$ 之间往往存在偏差，我们期望求得的直线使这种偏差越小越好，即 $\sum (y_i - \hat{y}_i)^2$ 残差平方和最小。使用最小二乘法计算 a 与 b 的系数，算得回归方程为：

$$\text{抗拉强度 } R_m(y) = 786.3 + 3.872 \text{ 洛氏硬度/HRC } (dx\text{-Bar})$$

4. 回归方程的显著性检验

建立回归方程的目的是表达具有线性相关的变量间的定量关系。因此，只有当两个变量具有线性相关关系时所建立的回归方程才是有意义的。通常，我们可以采用以下两种方法来进行回归方程的显著性检验。

方法 1：通过对相关系数进行假设检验，确定拒绝域和显著性水平 α 。上文中通过计算已经得出可以 95% 的置信度认为 x 与 y 之间存在线性相关关系，因此认为建立的回归方程是有意义的。

方法 2：由于数理统计的基本原理是通过样本推断总体，而受限于试验条件、人员操作、设备误差等诸多干扰因素，试验结果与真值之间必定存在着波动。但若此类由随机误差造成的波动远远小于由自变量 x 取值不同而引起的波动，那我们就认为，自变量 x 是显著的，或者说可以忽略这些随机误差。这就是方差分析的原理。

简便起见，因采用方法 1 对回归方程进行了显著性检验并得出结论，方法 2 方差分析就不做展开，仅计算结果如下表 3：

来源	自由度	Adj SS	Adj MS	F 值	P 值
回归	1	2018.1	2018.12	72.91	0.000
洛氏硬度/HRC (dx-Bar)	1	2018.1	2018.12	72.91	0.000
误差	30	830.4	27.68		
失拟	24	670.1	27.92	1.05	0.525
纯误差	6	160.2	26.71		
合计	31	2848.5			

表 3 回归方程显著性检验方差分析表

通过上表可以看出与采用方法 1 的结论相一致，即以 95% 的置信度认为 x 与 y 之间存在线性相关关系，并认为建立的回归方程是有意义的。

5. 体会

(1) 无论是国标、美标、德标中，都有拉伸强度与硬度的换算表，但都不可能也做不到给出任意硬度、强度的换算值，所以通过试验对大量数据进行计算机回归分析，求得两者间的回归方程是有实际应用意义的。

(2) 本次试验，仅研究了洛氏硬度与抗拉强度之间的线性关系，但通过软件分析可以看到，他们之间还存在着曲线关系，只是就本次试验所获得的数据而言，线性回归拟合度较曲线回归拟合度更高，因此不做展开。但若在实际工作中遇到超出本次数据范围的，应当进一步研究其回归方程，以期获得更加拟合度的回归模型。

参考文献：

- [1] 山刘金昌. 建筑施工组织与现代化管理 中国建筑工业出版社
- [2] 钱昆润等. 建筑施工组织设计 东南大学出版社
- [3] GB/T230.1-2018 金属材料洛氏硬度试验 第 1 部分：试验方法
- [4] 全国质量专业技术人员职业资格考试办公室组织编写 质量专业理论与实务
- [5] 邹庆化 金属材料强度与硬度之间的相关关系 金属热处理 1993 年第 1 期
- [6] 李晓东 洛氏硬度试验结果的影响因素 理化检验-物理分册