

钢结构厚板力学性能的低温试验研究

王元清^a, 周 晖^a, 胡宗文^a, 石永久^a, 陈 宏^b

(清华大学 a. 土木工程系 土木工程安全与耐久教育部重点实验室; b. 建筑设计研究院, 北京 100084)

摘 要:厚板钢材在高层建筑和大跨结构中得到了广泛应用,然而厚度的增加会引起钢板力学性能的变化,特别是厚度方向的性能。采用圆棒拉伸试样,对厚度为60~150 mm的建筑结构用厚板Q345B进行了低温力学性能试验,试样分为垂直轧制方向的横向试样和贯穿厚度方向的Z向试样。试验获得了4种厚度钢板的屈服强度 f_y 、抗拉强度 f_u 和断面收缩率 ψ 等指标及其随温度和取样位置的变化关系,并测得4种厚度钢板Z向性能的相应指标。试验结果表明,随温度的降低,厚板的屈服强度和抗拉强度增大而断面收缩率减小;由钢板表面至中心,横向试样的断面收缩率呈下降趋势;随钢板厚度的增加,Z向试样的断面收缩率逐渐减小,且小于横向试样的断面收缩率。

关键词:钢结构;厚板;力学性能;低温;拉伸试验;Z向性能

中图分类号:TU391 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-4764(2011)05-0007-06

Experimental Analysis of Mechanical Properties of Thick Plate in Steel Structure at Low Temperature

WANG Yuan-qing^a, ZHOU Hui^a, HU Zong-wen^a, SHI Yong-jiu^a, CHEN Hong^b

(a. Key Laboratory of Civil Engineering Safety and Durability of China Education Ministry, Department of Civil Engineering; b. Architectural Design and Research Institute, Tsinghua University, Beijing 100084, P. R. China)

Abstract: Thick steel plates are widely used in high-rise buildings and large-span steel structures. However, the increase of steel plate thickness will induce variations of mechanical properties of steel plates, especially the thickness properties. The mechanical properties of structural steel Q345B with plate thickness from 60 to 150 mm were tested at low temperature through round bar tensile specimens which included two types, i. e. transverse specimen that is perpendicular to the rolling direction and Z-direction (or through thickness) specimen. The indices of yield strength f_y , ultimate tensile strength f_u , percentage reduction of area ψ and their variations with temperature and sampling locations were measured in the experiments; the corresponding indices for thorough thickness properties were also obtained. It is indicated that: (1) when temperature decreases, f_y and f_u of thick plate increase while ψ value decreases; (2) from surface to center of the thick plate, ψ values for transverse specimens decrease; (3) with the increase of plate thickness, ψ values for Z-direction specimens decrease and are smaller than those of transverse specimens. Useful material property data of thick steel plate are provided for thick plate steel structures.

Key words: steel structure; thick plate; mechanical property; low temperature; tensile test; Z-direction property

收稿日期:2011-02-13

基金项目:国家自然科学基金资助项目(50778102)

作者简介:王元清(1963-),男,教授,博士生导师,主要从事钢结构研究,(E-mail) wang-yq@mail. tsinghua. edu. cn.

近年来,厚板钢材在高层建筑和大跨度结构中得到了广泛的应用^[1]。例如,国家体育场“鸟巢”采用了厚 110 mm 的 Q460E-Z35 厚板^[2];央视新台址大楼钢结构工程中大量选用 Q390、Q420 钢材,厚度范围在 80~130 mm^[3]。由于对厚板钢材的力学性能和焊接性能等缺乏足够的认识,钢结构厚板工程在焊接施工和使用过程中,出现了各种裂纹事故。如天津国贸中心工程的箱形柱在车间焊接完工后即出现了严重的层状撕裂现象,造成 3 000 多 t 厚板钢材的浪费;重庆某高层钢结构酒店工程和上海某枢纽大厦工程也出现了类似的裂纹事故^[4]。钢板的冶炼、轧制工艺使厚板的 Z 向性能与轧制平面内的性能存在着较大差异,轧制后钢材内部的非金属夹杂物被压成薄片状而使厚板出现分层现象,使厚板的 Z 向受拉性能劣化^[4]。随着构件板厚的增大,构件中缺陷处的应力应变状态由平面应力向平面应变转变,发生脆性断裂的倾向增加^[5]。低温下焊接施工或低温下服役均容易引发钢结构的脆性断裂^[6-7],尤其是厚板焊接工程。

中国学者^[8]曾对常温下 A3 和 16Mn 厚板钢材的材性参数进行过分析研究,补充了《钢结构设计规范》(GBJ17-88)中厚板的强度设计值。然而,有关厚板钢材的低温力学性能的试验数据较为缺乏,厚度方向性能的研究则更少。中国冬季覆盖的范围很广且部分地区长期处于低温下,开展厚板钢材低温下的力学性能试验研究,对于防止钢结构厚板工程的低温冷脆具有重要的意义。

本文采用圆棒拉伸试样,对 60、90、120、150 mm 4 种厚度的结构用厚板钢材 Q345B 的低温力学性能进行了试验研究。试样分为垂直钢板轧制方向的横向试样和贯穿全厚度的 Z 向试样。试验获得了厚板钢材的屈服强度 f_y 、抗拉强度 f_u 和断面收缩率 ψ 等性能指标及其随温度和取样位置的变化规律;同时测得了 4 种厚度钢板 Z 向性能的相应指标;为厚板钢材积累了丰富的低温力学性能的试验数据。

1 试验概况

1.1 试验依据与目的

试验根据《金属材料 室温拉伸试验方法》(GB/T 228—2002)和《金属材料 低温拉伸试验方法》(GB/T 13239—2006)以及《厚度方向性能钢板》(GB 5313—85)等规范,在 +20、0、-20、-40、

-60℃ 5 个温度点下对结构钢材 Q345B 的厚板($t=60、90、120、150$ mm 4 种厚度)进行单轴拉伸试验。试验测量每个试样的屈服强度 f_y 、抗拉强度 f_u 和断面收缩率 ψ 等性能指标,得到各项指标随钢板厚度、取样位置以及温度的变化规律,并测得 4 种厚度钢板 Z 向性能的相应指标,为工程设计提供材性数据。

1.2 试样材料与尺寸

试验选用首钢生产的建筑结构用厚板钢材 Q345B,厚度规格有 60、90、120、150 mm 4 种,主要化学成分如表 1 所示。

表 1 Q345B 厚板的主要化学成分(质量分数/%)

厚度/mm	碳 C	锰 Mn	硅 Si	硫 S	磷 P
60	0.17	1.56	0.34	0.012	0.013
90	0.18	1.59	0.38	0.011	0.010
120	0.17	1.48	0.37	0.017	0.016
150	0.19	1.51	0.42	0.018	0.017

拉伸试样分为垂直轧制方向的横向试样和贯穿厚度方向的 Z 向试样 2 类,试样尺寸如图 1 所示。

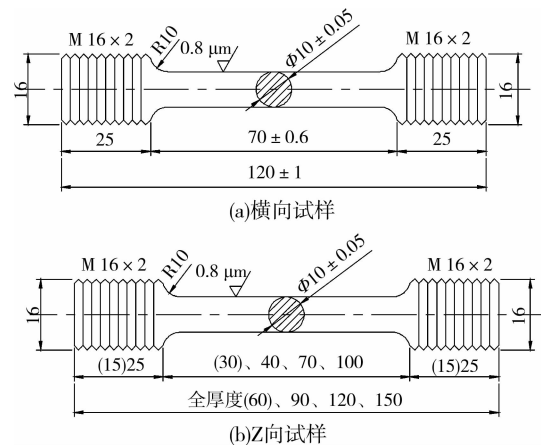


图 1 拉伸试样尺寸

为研究厚板的力学性能随厚度位置的变化规律,在钢板不同的厚度位置进行了取样,如图 2(a)、(b)所示;为研究厚板 Z 向性能与轧制平面内性能的差异,对厚板进行了贯穿全厚度方向的取样,如图 2(c)所示。试验分组情况如表 2 所示,共包括 156 个横向试样和 60 个 Z 向拉伸试样。

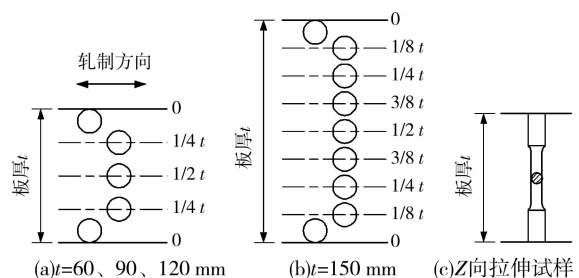


图 2 拉伸试样的取样位置

表2 常规拉伸和Z向拉伸试验的分组情况

板厚/mm	取样位置	试样数×温度点数(温度值/℃)
	0	3×2(20,-40)
60	1/4	3×5(20,0,-20,-40,-60)
90	1/2	3×2(20,-40)
120	Z向	3×5(20,0,-20,-40,-60)
	合计	126件
	0	3×5(20,0,-20,-40,-60)
	1/8	3×5(20,0,-20,-40,-60)
	1/4	3×5(20,0,-20,-40,-60)
150	3/8	3×5(20,0,-20,-40,-60)
	1/2	3×5(20,0,-20,-40,-60)
	Z向	3×5(20,0,-20,-40,-60)
	合计	90件

1.3 试验设备与注意事项

试验在清华大学航空航天学院力学系强度实验室进行,该实验室拥有全套进行低温试验的设备,如图3所示。试验中试样由空气和液氮的混合气体进行冷却,并由温度传感器、控制器、伺服阀等组成的温度调节装置控制保温箱内的温度保持在某一温度预设值,精度在 $\pm 1^\circ\text{C}$ 。

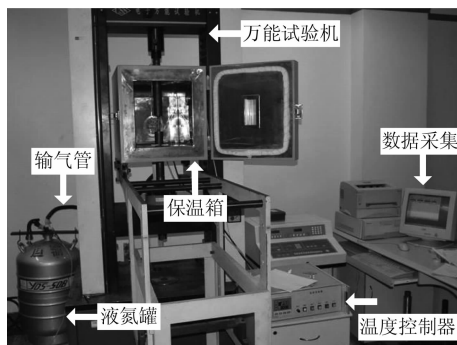


图3 低温拉伸试验设备

试验过程中应注意如下事项:

- 1) 试验机应保证试样轴心受拉,保持匀速加载,速率为 1 mm/min 。
- 2) 试验从高温到低温进行,多试样同时在低温箱内冷却,提高试验效率。
- 3) 冷却试样的时间不少于 15 min ,且在拉伸过程中保温箱内的温度不能偏离预设值 $\pm 2^\circ\text{C}$ 。
- 4) 试样破坏前荷载与位移的完整曲线由自动记录仪得到。

2 常规拉伸试验结果

2.1 不同厚度钢板的力学性能随温度的变化

《钢及钢产品力学性能试验取样位置及试样制备》(GB/T 2975—1998)规定,对于厚度大于 50 mm

的钢板,取样位置为距表面 $1/4$ 厚度处。因此,将板厚 $1/4$ 位置的拉伸试样试验值作为厚板整体力学性能的代表值。4种厚度钢板的基本力学性能指标(屈服强度 f_y 、抗拉强度 f_u 和断面收缩率 Ψ)随温度的变化关系如图4所示(数值为3个试样试验的平均值)。

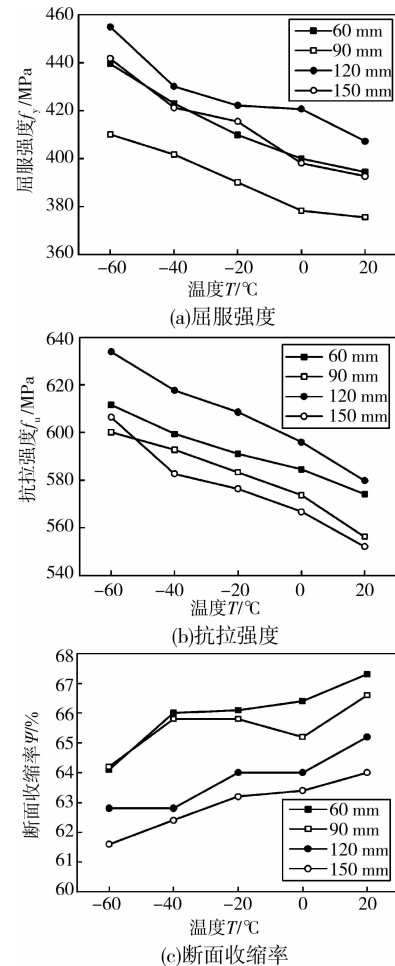


图4 不同厚度钢板力学性能指标随温度的变化

1) 由图4(a)和(b)可见,4种厚度钢板的屈服强度和抗拉强度均随着温度的降低而提高,由 $20\sim -60^\circ\text{C}$,增幅分别达 $9.2\%\sim 12.5\%$ 和 $6.5\%\sim 9.8\%$;屈服比随温度的降低,略有增大的趋势。

2) 由图4(c)可见,反映钢材塑性的断面收缩率指标随着温度的降低而降低,即塑性变差;同一温度点下,断面收缩率随钢板厚度的增加而减小,如 20°C 时,60、90、120、150 mm厚钢板的断面收缩率依次为 67.3% 、 66.6% 、 65.2% 、 64% 。

2.2 不同厚度钢板的力学性能随取样位置的变化

为研究厚板力学性能沿厚度方向不同位置的差异性,按图2所示,对厚板进行了不同厚度位置的取样,并在 $20^\circ\text{C}\sim -40^\circ\text{C}$ 2个温度点下进行了拉伸试验。基本力学性能指标如图5所示。

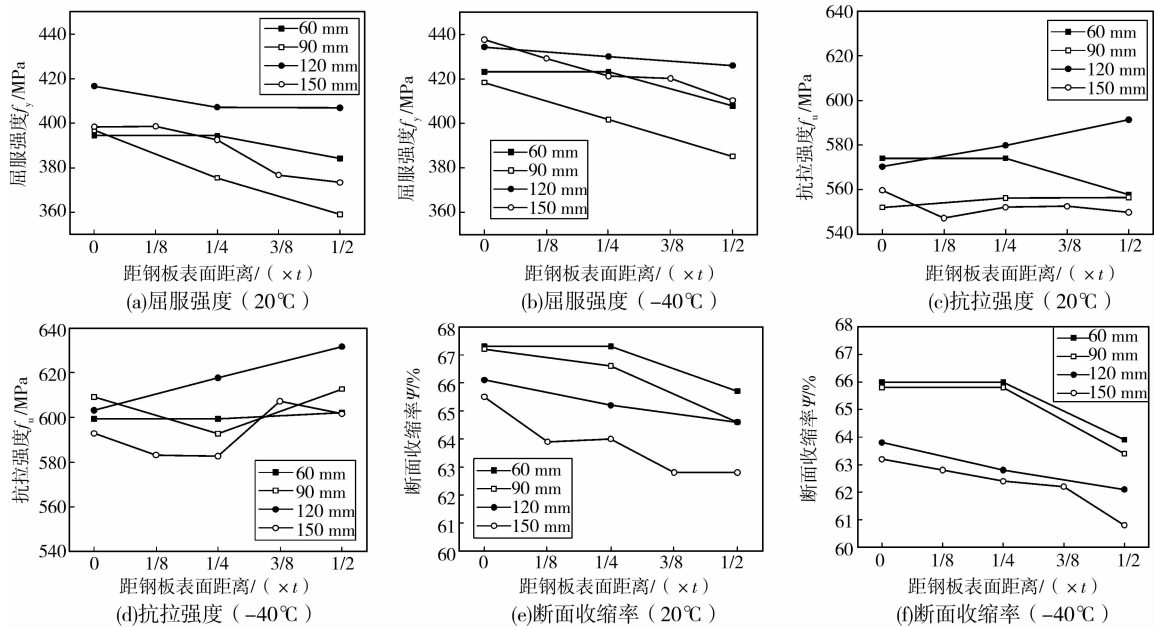


图 5 不同厚度钢板力学性能随取样位置的变化

1) 如图 5(a)、(b), 厚板的屈服强度从钢板表面至中心处呈下降的趋势, 90 mm 和 150 mm 厚板的这种趋势较为明显。如 20°C 时, 90 mm 钢板屈服强度从表面的 396.8 MPa 减小至中心的 359 MPa, 降幅为 9.5%; 150 mm 钢板屈服强度由表面的 398.4 MPa 减小至中心的 373.4 MPa, 降幅为 6.3%。

2) 如图 5(c)、(d), 厚板的抗拉强度沿厚度位置的变化规律与屈服强度的规律并不一致, 如厚度为 60 mm 的钢板, 中心位置的抗拉强度比表面处大。

3) 如图 5(e)、(f), 厚板的断面收缩率指标从钢板表面至中心处呈下降的趋势, 降幅在 2.3% ~ 4.1% 左右, 90 mm 和 150 mm 厚板的降幅更明显。

4) 屈服强度和断面收缩率指标的试验结果, 一定程度上反映了厚板中心的材性比表面处略差。

2.3 150 mm 厚板力学性能随温度及取样位置的变

对 150 mm 厚板的力学性能做进一步分析, 试验结果如图 6、7, 分别以温度和取样位置为横坐标。由图 6 可见, 不同厚度位置试样的屈服强度和抗拉强度均随温度的降低而提高, 而断面收缩率减小。由图 7 可见, 相同温度下, 厚板从表面至中心位置, 屈服强度和断面收缩率不断减小, 而抗拉强度随取样位置的变化无明显规律。

2.4 强度指标随温度变化关系的拟合

大量研究结果表明, 钢材的屈服强度和抗拉强度随温度的变化关系可用以下简化公式表示^[7,9]:

$$f_y(T) = f_y(T') \exp[q_s(T' - T)] \quad (1)$$

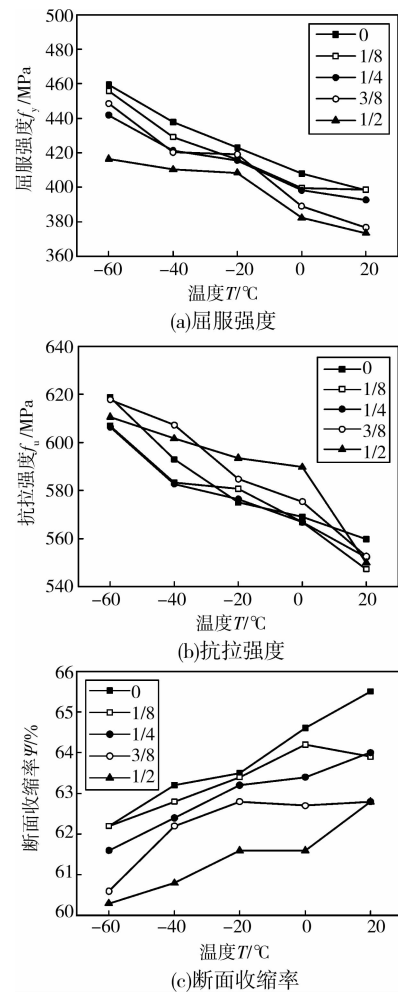


图 6 150 mm 厚板不同取样位置的力学性能随温度的变化

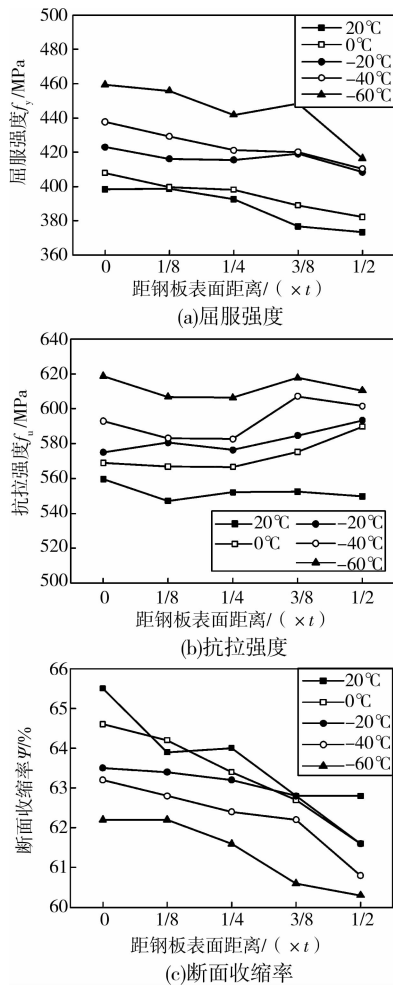


图 7 150 mm 厚板不同温度下力学性能随取样位置的变化

$$f_u(T) = f_u(T') \exp[q_b(T' - T)] \quad (2)$$

式中: $f_y(T)$ 、 $f_y(T')$ 和 $f_u(T)$ 、 $f_u(T')$ 分别为温度 T 和 T' 下的屈服强度和抗拉强度; q_s 和 q_b 分别为屈服强度和抗拉强度的温度敏感系数($1/^\circ\text{C}$)。

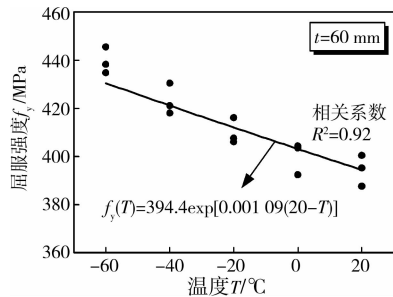


图 8 60 mm 厚板屈服强度随温度的变化曲线拟合

以 $T' = 20^\circ\text{C}$ 下的强度指标为参考,对 60、90、120、150 mm 厚钢板 1/4 厚度位置的屈服强度和抗拉强度随温度变化的曲线进行拟合(每个温度点含 3 个试样的试验值),其中 60 mm 厚钢板屈服强度随温度的变化曲线拟合结果如图 8 所示,类似地,其他

拟合参数结果如表 3 所示。

表 3 厚板强度指标的温度敏感系数拟合结果

板厚/mm	$q_s/^\circ\text{C}^{-1}$	相关系数 R^2	$q_b/^\circ\text{C}^{-1}$	相关系数 R^2
60	0.001 09	0.92	0.000 74	0.87
90	0.001 09	0.91	0.001 04	0.95
120	0.001 19	0.80	0.001 15	0.99
150	0.001 19	0.93	0.000 36	0.63

3 Z 向拉伸试验结果

厚板 Z 向拉伸试验结果如图 9 所示。

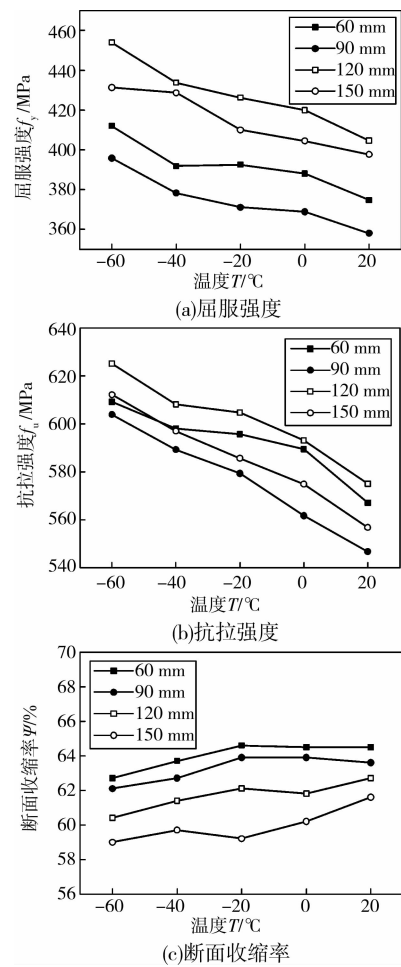


图 9 厚板 Z 向性能随温度的变化规律

对 4 种厚度钢板 Z 向试样的屈服强度和抗拉强度随温度的变化曲线进行了拟合,参数结果如表 4。

表 4 厚板 Z 向强度指标的温度敏感系数拟合结果

板厚/mm	$q_s/^\circ\text{C}^{-1}$	相关系数 R^2	$q_b/^\circ\text{C}^{-1}$	相关系数 R^2
60	0.000 90	0.56	0.000 96	0.55
90	0.001 28	0.87	0.001 20	0.92
120	0.001 24	0.93	0.001 00	0.91
150	0.001 16	0.87	0.001 19	0.91

1)如图9(a)、(b),厚板Z向拉伸的屈服强度和抗拉强度均随温度的降低而提高,从20~-60℃,增幅分别达8.4%~12.2%和7.5%~10.5%。

2)如图9(c),Z向断面收缩率随温度的降低而减小,从20~-60℃,降幅达2.4%~4.2%;相同温度下断面收缩率随板厚的增加而减小,从60~150mm,降幅达4.5%~8.4%。

3)厚板Z向断面收缩率是评价其抗层状撕裂性能的指标,Z向断面收缩率越大则抗层状撕裂性能越好,试验结果表明厚板抗层状撕裂性能随温度的降低和板厚的增加而变差。

4 结论

1)从20~-60℃,厚板的屈服强度和抗拉强度随温度的降低而提高,对于横向试样最大增幅分别为12.5%和9.8%;对于Z向试样最大增幅分别为12.2%和10.5%。

2)从20~-60℃,厚板的断面收缩率随温度的降低而减小,对于横向试样和Z向试样,最大降幅分别为4.8%和4.2%;从60~150mm,断面收缩率随板厚的增加而降低,对于横向试样和Z向试样,最大降幅分别为5.5%和8.4%;Z向试样的断面收缩率略小于横向试样的2.0%~6.3%。

3)从钢板表面至中心,屈服强度和断面收缩率逐渐降低,最大降幅分别为9.5%和4.1%;表明厚板的力学性能在不同厚度位置上存在着差异,厚度中心的材质较差。

4)论文积累了丰富的厚板低温力学性能数据,特别是Z向拉伸的材性数据,可为钢结构厚板工程的设计、施工提供有益参考。

参考文献:

- [1] 柴昶. 厚板钢材在钢结构工程中的应用及其材性选用[J]. 钢结构, 2004, 19(5): 47-53.
CHAI CHANG. Application of steel thick plates to steel work constructions and selection of their character [J]. Steel Construction, 2004, 19(5): 47-53.
- [2] 戴为志, 黄明鑫, 芦广平, 等. 国家体育场(鸟巢)钢结构安装工程焊接技术[J]. 电焊机, 2008, 38(4): 51-76.
DAI WEI-ZHI, HUANG MIN-XIN, LU GUANG-PING, et al. Welding technique of National Stadium

(Bird's nest) steel structure build project[J]. Electric Welding Machine, 2008, 38(4): 51-76.

- [3] 陈禄如. 中央电视台新台址主楼钢结构用钢特点[J]. 钢结构, 2007, 22(1): 1-4.
CHEN LU-RU. The characteristics of structural steel for the main building in new location of China Central Television Station[J]. Steel Construction, 2007, 22(1): 1-4.
- [4] 王元清, 周晖, 石永久, 等. 钢结构厚板层状撕裂及其防止措施的研究现状[J]. 建筑钢结构进展, 2010, 12(5): 26-34.
WANG YUAN-QING, ZHOU HUI, SHI YONG-JIU, et al. A research review on mechanism and prevention of lamellar tearing in thick plate of steel structures[J]. Progress in Steel Building Structures, 2010, 12(5): 26-34.
- [5] KUWAMURA H, IYAMA J, MATSUI K. Effects of material toughness and plate thickness on brittle fracture of steel members [J]. Journal of Structural Engineering, 2003, 129(11): 1475-1483.
- [6] 杨凌川, 陈山林, 胡英奎. 高层建筑钢结构在低温条件下的焊接施工[J]. 重庆建筑大学学报, 2004, 26(3): 51-54.
YANG LING-CHUAN, CHEN SHAN-LIN, HU YING-KUI. The welding work in steel frame structures of high-rise building at low temperature[J]. Journal of Chongqing Jianzhu University, 2004, 26(3): 51-54.
- [7] WU Y M, WANG Y Q, SHI Y J, et al. Effects of low temperature on properties of structural steels [J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2004, 11(5): 442-448.
- [8] 戴国欣, 李继华, 夏正中. 厚板材性参数分析研究[J]. 重庆建筑工程学院学报, 1993, 15(2): 1-7.
DAI GUO-XIN, LI JI-HUA, XIA ZHENG-ZHONG. Research and analysis for strength behavior parameters of heavy plates [J]. Journal of Chongqing Institute of Architecture & Engineering, 1993, 15(2): 1-7.
- [9] WANG Y Q, ZHOU H, SHI Y J, et al. Study on fracture toughness indices of Chinese structural steel and weld metal [C]//20th International Offshore and Polar Engineering Conference, Beijing, China, June 20-25, 2010:129-134.

(编辑 王秀玲)