

doi: 10.11918/j.issn.0367-6234.2015.12.012

输电线铁塔钢材的低温力学和冲击韧性试验

王元清¹, 廖小伟¹, 张子富², 刘希月¹, 邢海军²

(1. 土木工程安全与耐久教育部重点实验室(清华大学), 100084 北京; 2. 中国电力科学研究院, 100192 北京)

摘要: 为选择合适的输电线铁塔钢材, 防止杆塔因构件发生低温脆性断裂引起的破坏, 通过系列室温和低温条件下的单轴拉伸和冲击试验, 研究了输电线铁塔用 Q345B、Q420B、Q460C 钢管和 Q345B、Q420B 角钢钢材的力学性能和冲击韧性; 通过对比分析, 评价了钢管和角钢钢材的塑性指标; 利用 Boltzmann 函数曲线拟合, 得到了钢管和角钢钢材的韧-脆转变温度. 结果表明: 钢材的屈服强度和抗拉强度随温度的降低而增大, 其塑性指标均能满足规范要求; 钢材夏比冲击功值随温度降低而减小, Q345B 钢管和角钢钢材的韧脆转变温度较高, 抗低温冷脆性能较差, 结合拉伸和冲击试验结果, 建议在寒冷地区优先采用 Q420B 钢管, 不宜采用 Q345B 角钢.

关键词: 输电线铁塔; 钢材; 低温; 力学性能; 冲击韧性; 选材原则

中图分类号: TU391

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2015)12-0070-05

Experimental study on mechanical properties and impact toughness of steel for transmission line towers at low temperatures

WANG Yuanqing¹, LIAO Xiaowei¹, ZHANG Zifu², LIU Xiyue¹, XING Haijun²

(1. Key Laboratory of Civil Engineering Safety and Durability (Tsinghua University), Ministry of Education, 100084 Beijing, China; 2. China Electric Power Research Institute, 100192 Beijing, China)

Abstract: In cold region, it is of great significance to select suitable steel material in order to prevent the failure or collapse of transmission line tower, which results from the brittle fracture of construction member at low temperatures. A series of uniaxial tensile tests and Charpy impact tests were performed to investigate the mechanical properties and impact toughness of materials of steel tube (Q345B, Q420B, Q460C) and angle iron (Q345B, Q420B). The plastic indices of steel tube and angle iron materials were evaluated through comparison and analysis. The Boltzmann function was employed to conduct curve fitting for impact energy versus temperature, obtaining the ductile-brittle transition temperatures. Results indicate that the yield strength and ultimate tensile strength increase with the decrease of temperature, and all the plastic indices can meet the prescribed requirement. Charpy impact energy increases as the temperature reduces. Besides, the ductile-brittle transition temperatures of Q345B steel tube and Q345B angle iron are relatively high, indicating the poor resistance ability of cold brittleness failure. Based on the results of tensile tests and impact tests, it is suggested that priority should be given to the adoption of Q420B steel tube, and Q345B angle iron is inadvisable.

Keywords: transmission line tower; steel; low temperature; mechanical properties; impact toughness; principle of steel selection

随着中国经济和工业的迅猛发展, 促进了电力工业的长足发展, 而电网建设的快速发展需要更高电压等级的输电技术, 如 ± 1 100 kV 输电线路. 目前,

中国直流线路运行的最高电压等级为 ± 800 kV, 其输电线路的杆塔设计、荷载组合已有相应的设计规程, 并有相对丰富的工程设计经验. 尽管如此, 当电压等级由 ± 800 kV 升到 ± 1 100 kV 后, 线路杆塔的尺寸和荷载都发生了很大变化, 现有设计理念是否合适尚有待进一步研究^[1-2].

在输电线杆塔材料方面, 已有研究表明, 在极端冰雪灾害天气下和冬季寒冷地区, 铁塔结构很容易

收稿日期: 2014-09-17.

基金项目: 国家自然科学基金(51378289); 高等学校博士学科点专项科研基金(20130002110085); 国家电网公司科技项目(GCB17201300166).

作者简介: 王元清(1963—), 男, 教授, 博士生导师.

通信作者: 王元清, wang-yq@mail.tsinghua.edu.cn.

引起低于屈服应力的低温冷脆破坏^[3-5]。因此, 研究输电线路杆塔材料的低温力学和韧性性能, 防止铁塔结构发生低温脆断, 尤其是对高电压等级重载输电线路的建设, 提出杆塔材料的选材原则在工程和经济上具有重要意义。

清华大学王元清老师课题组针对 Q345、Q460、Q960 以及铁路钢轨等钢材展开了系列的低温拉伸、冲击和断裂韧性的试验研究^[6-12], 结果表明钢材的断后伸长率、断面收缩率、冲击韧性和断裂韧性等指标均随温度的降低而减少, 并提出了相应钢材的抗脆断选材和设计方法^[13-14]。常建伟等^[15]通过试验研究了 Q460 角钢的断裂韧性, 指出随着温度的降低 Q460 角钢的断裂韧性下降。杨富尧等^[16]进行了 Q235、Q345、Q420 角钢钢材的室温拉伸和低温冲击韧性的性能测试试验。尽管如此, 以往研究大多集中在结构用钢厚板或钢轨材料, 而对钢管和角钢材料的研究较少, 针对输电线铁塔常用钢管和角钢钢材仍然缺乏系统的低温力学和冲击韧性试验对比和分析。

本文主要针对输电线铁塔常用的 Q345B、Q420B 和 Q460C 钢管和 Q345B、Q420B 角钢钢材, 进行系列温度下的单轴拉伸试验和冲击韧性试验, 研究钢管和角钢钢材的低温力学性能, 评价其低温塑性性能储备; 利用曲线拟合得到了钢管和角钢钢材的韧-脆转变温度, 通过对比分析提出寒冷地区输电线铁塔的选材建议, 从而为发展 ±1100 kV 高压输电线铁塔的选材原则提供参考, 另一方面也为钢管和角钢钢材积累了低温力学和冲击韧性数据。

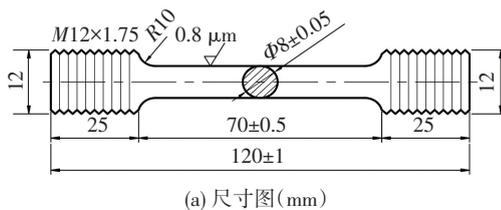
1 试验概述

根据 GB/T 228—2002^[17] 和 GB/T 1329—2006^[18] 的规定对 Q345B、Q420B、Q460C 钢管和 Q345B、Q420B 角钢钢材分别在 20、-10、-30 和 -50 °C 的条件下, 进行单轴静力拉伸试验, 测得了钢材的屈服强度 f_y 、极限抗拉强度 f_u 、断后伸长率 A 和断面收缩率 Z 等力学性能指标。然后, 根据 GB/T 229—2007^[19] 的规定在 20、0、-10、-20、-30 和 -50 °C 的温度条件下, 进行了 Q345B、Q420B、Q460C 钢管和 Q345B、Q420B 角钢钢材的夏比 V 型缺口冲击韧性试验, 测得每个试验点下的冲击功值 A_{kv} 。其中, 拉伸和冲击试验的每个试验点进行 3 个相同试样的试验。

1.1 试验材料与试样

试验用输电线塔架钢管和角钢材料由中国电力科学研究院提供, 钢管钢材分 Q345B、Q420B 和 Q460C 3 种, 规格为 $\Phi 610 \times 20$ mm; 角钢钢材分 Q345B 和 Q420B 两种, 规格为 $\angle 300 \times 20$ mm。为了保证试验结果的普适性, 又由于试验成本的限制, 选择

钢管和角钢钢材时, 对比了 4 家主要的输电线塔架钢材的钢材供应厂商, 选取了一家具有代表性的钢材供应厂商提供的钢材作为本次试验的对象。拉伸试样为标准圆棒试验, 形状和尺寸按照 GB/T228—2002 和 GB/T 13239—2006 加工制作, 见图 1。标准的夏比 V 型缺口冲击试样, 根据 GB/T 229—2007 加工制作, 见图 2, 其中拉伸和冲击试样都沿钢材的轧制方向取样。



(a) 尺寸图(mm)



(b) 实物图

图 1 标准圆棒拉伸试样



图 2 标准夏比 V 型缺口冲击试样

1.2 试验设备

拉伸和冲击试验都在清华大学航空航天学院力学实验室进行, 单轴静力拉伸试验在 CSS-2220 电子万能试验机上进行, 见图 3。拉伸试样的冷却方式采用空气和液氮的混合气体, 并由保温箱、伺服阀和控制器保持温度的稳定, 该温度控制设备调节温度的精度为 ±1 °C。冲击试验在 SANS 摆锤式冲击试验机上进行, 试验机标准打击能量为 300 J, 见图 4, 其中冲击试样的冷却采用酒精和液氮的混合液体, 然后将试样浸泡在混合液体中恒温不少于 5 min。



图 3 电子万能试验机及配套低温试验设备

2 单轴拉伸试验结果与分析

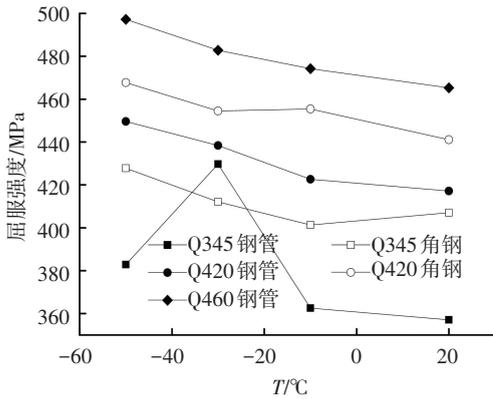
2.1 屈服强度和抗拉强度随温度变化规律

对 Q345B、Q420B、Q460C 钢管和 Q345B、

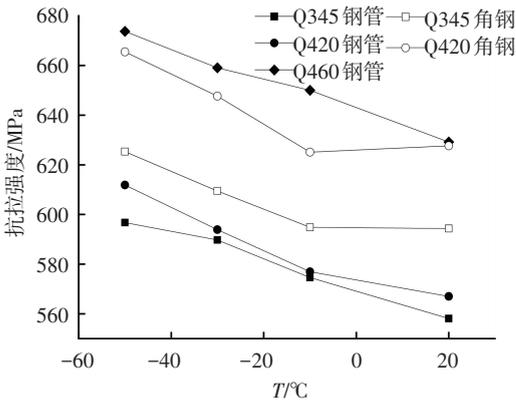
Q420B 角钢钢材在温度点 20、-10、-30 和 -50 °C 下的单轴拉伸试验结果平均值见图 5、6。可以看出随着温度的降低,钢管和角钢钢材的屈服强度和抗拉强度均逐渐增大。同强度等级的钢管和角钢钢材相比,角钢钢材的屈服强度和抗拉强度均要高于钢管钢材。



图 4 摆锤式冲击试验机



(a) 屈服强度



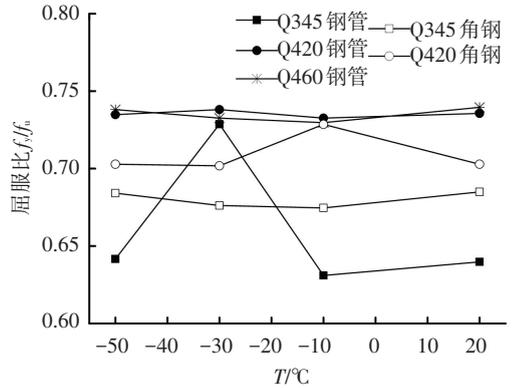
(b) 抗拉强度

图 5 屈服强度和抗拉强度随温度变化规律

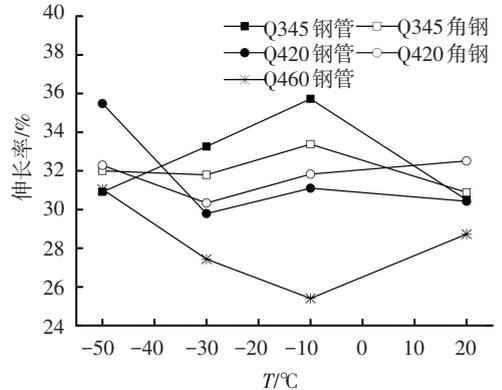
2.2 不同钢材塑性指标的对比分析

图 6 给出了 Q345B、Q420B、Q460C 钢管钢材母材和 Q345B、Q420B 角钢钢材母材低温拉伸力学性能指标(平均值)的对比分析。由图 6(a)可知,对钢管钢材而言,Q345B 钢管母材的屈服比最小,Q460C 钢管钢材的屈服比与 Q420B 钢管钢材相当;对角钢而言,Q345B 钢材的屈服比小于 Q420B 钢材。总体来看,Q345B 钢管钢材的屈服比要低于 Q345B 角钢钢材,

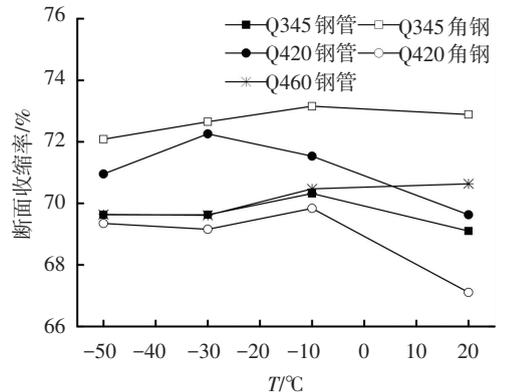
而 Q420B 角钢钢材的屈服比要低于 Q420B 钢管。



(a) 屈服比



(b) 伸长率



(c) 断面收缩率

图 6 钢管和角钢钢材力学性能指标对比分析

由图 6(b)可知,对钢管钢材而言,Q345B 钢管钢材的断后伸长率最大,其次是 Q420B 钢材,Q460C 钢材的伸长率最低;对角钢钢材而言,Q345B 钢材的断后伸长率大于 Q420B 钢材。同等级钢管与角钢钢材对比来看,Q345B 钢管钢材的伸长率大于 Q345B 角钢钢材,而 Q420B 角钢钢材的伸长率要略大于 Q420B 钢管,这一结论与屈服比的结果吻合。

由图 6(c)可知,Q460C 钢管钢材与 Q345B 钢管断面收缩率很接近,Q420B 钢管钢材的断面收缩率最大,Q345B 角钢钢材的断面收缩率要大于 Q420B 角钢。整体来看,Q345B 角钢的断面收缩率要高于 Q345B 钢管,Q420B 钢管断面收缩率要高于

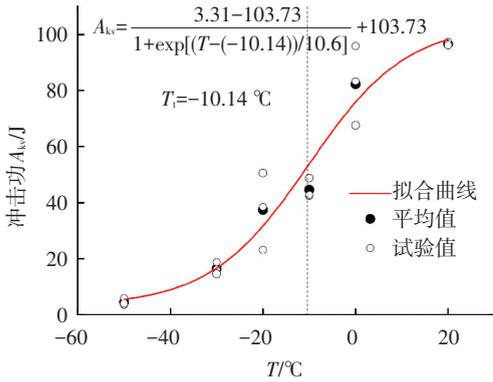
Q420B 角钢.

另外, 本次试验的钢管和角钢钢材的屈强比、伸长率和断面收缩率 3 个指标对温度的敏感性并不明显, 这与钢厚板的低温试验结果不太一样^[6]. 尽管如此, 在不同温度点下, 3 个指标均能满足 GB/T 19879—2005《建筑结构用钢板》的要求. 从屈强比、伸长率和断面收缩率的角度讲, Q460C 钢管钢材的低温塑性性能要低于 Q420B 钢管.

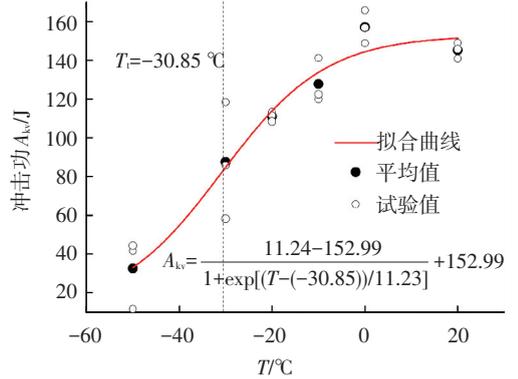
3 冲击韧性试验结果与分析

3.1 冲击功随温度的变化规律

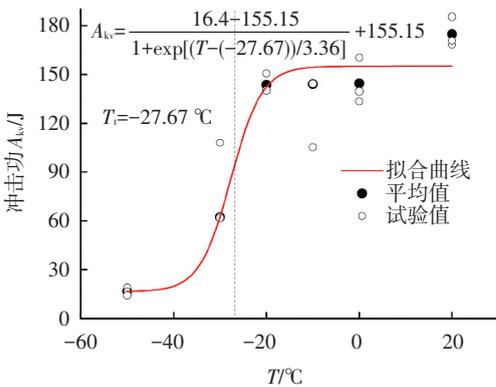
图 7 给出了 Q345B、Q420B、Q460C 钢管和 Q345B、Q420B 角钢钢材在温度点 20、0、-10、-20、-30 和 -50 °C 下的冲击韧性试验结果, 可以看出, 5 种钢材的冲击功值均随温度的降低而降低, 且在经历某个温度点后, 钢材冲击功值迅速下降.



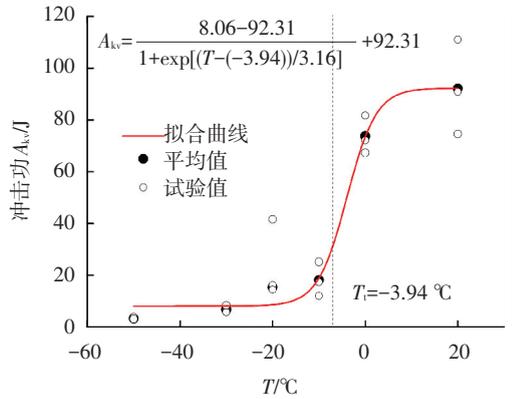
(a) Q345B 钢管



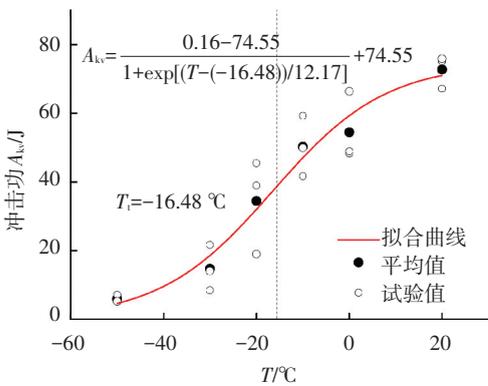
(b) Q420B 钢管



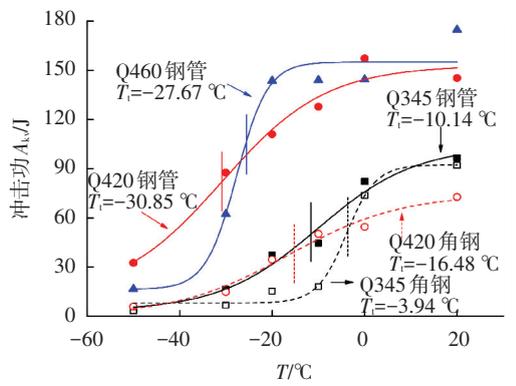
(c) Q460C 钢管



(d) Q345B 角钢



(e) Q420B 角钢



(f) 钢管和角钢钢材冲击功对比分析

图 7 钢管和角钢钢材冲击功随温度的变化规律

3.2 韧-脆转变温度

脆韧转变温度是衡量材料低温脆性的一个重要指标, 其值越大, 表明越容易发生脆韧转变, 钢材抵抗低温脆性越差. 工程中, 常将其作为防低温断裂的重要判据. 冲击功和温度的关系曲线总体上呈 S 形,

分为上平台区、转变区和下平台区 3 个部分. 大量试验与实践经验表明, 采用式 (1) 所示的 Boltzmann 函数对冲击功和温度的关系曲线进行回归分析, 具有较好相关性和较小残差, 且函数各参数物理意义明确, 能很好地描述冲击功与温度之间的关系^[20].

$$A_{kv} = \frac{A_1 - A_2}{1 + \exp[(T - T_i)/T_r]} + A_2. \quad (1)$$

式中: A_{kv} 为冲击功(J); A_1 、 A_2 分别为下平台能、上平台能(J); T 为温度变量; T_i 为韧脆转变温度; T_r 为转变温度区范围, T_i 越小, 转变温度区的范围越窄, 材料越容易由韧性向脆性转变。

如图 7 所示, 给出了 5 种钢材的冲击功随温度变化的 Boltzmann 函数拟合曲线, Q345B、Q420B、Q460C 钢管和 Q345B、Q420B 角钢钢材的韧脆转变温度分别为 -10.14、-30.85、-27.67、-3.94 和 -16.48 °C。可以看出 Q345B 钢管和角钢钢材的韧脆转变温度较高, 表现出了较低的抵抗低温冷脆破坏能力; Q420B 钢管和角钢、Q460C 钢管钢材的韧脆转变温度较低, 意味着较高的抵抗低温冷脆破坏性能。

3.3 不同钢材冲击韧性的对比分析

由图 7(f) 可以看出, Q420B 钢管和 Q460C 钢管材料表现出了较高的冲击功值, 而 Q345B 钢管和角钢钢材、Q420B 角钢钢材的冲击功值较低, 意味着较差的冲击韧性。钢管和角钢钢材均能满足 GB/T 1591—2008《低合金高强度结构钢》中 20 °C 和 0 °C 时冲击功 ≥ 34 J 要求的规定; 而 DL/T5154—2002《架空送电线路杆塔结构设计技术规范》对钢材还提出了 -40 °C 时冲击功 ≥ 34 J 的要求, 基本只有 Q420B 钢管钢材能满足要求。

另外, 在韧脆温度转变点以后, Q460C 钢管表现出的冲击功要小于 Q420B 钢管, Q345B 角钢的冲击功最低, Q420B 钢管钢材仍然表现出较高的夏比冲击功值。

4 结 论

1) 钢管和角钢钢材的屈服强度和抗拉强度都随着温度的降低而逐渐增加, 且同强度等级的角钢钢材的屈服强度和抗拉强度均高于钢管钢材。

2) 对钢管钢材而言, Q345B 钢管的屈强比、断后伸长率等塑性指标最优, Q460C 钢管的塑性指标最差; 对角钢钢材而言, Q345B 角钢屈强比、断后伸长率和断面收缩率等塑性指标要优于 Q420B 角钢; 就同强度等级的钢管和角钢钢材而言, Q345B 钢管塑性指标要优于 Q345B 角钢, Q420B 角钢塑性指标要优于 Q420B 钢管。

3) 随着温度的降低, 5 种钢材的夏比冲击功均减小, 且钢管钢材的冲击功值要高于角钢钢材; Q345B、Q420B、Q460C 钢管和 Q345B、Q420B 角钢钢材的韧脆转变温度分别为 -10.14、-30.85、-27.67、-3.94 和 -16.48 °C。

4) 结合拉伸试验和冲击试验结果, 在寒冷地区宜优先采用 Q420B 钢管, Q345B 角钢的韧脆转变温

度最高, 且试验冲击功值较低, 不推荐采用。

参考文献

- [1] 李正良, 刘红军, 张东英, 等. Q460 高强钢在 1000kV 杆塔的应用[J]. 电网技术, 2008, 32(24): 1-5.
- [2] 施菁华, 秦庆芝, 帅群, 等. Q460 特高压双回路钢管塔真型试验分析[J]. 电力建设, 2011, 32(4): 29-33.
- [3] 刘立国, 钟谦, 徐勇. 500kV 柳桂线铁塔覆冰破坏事故分析及建议[J]. 武汉大学学报(工学版), 2008, 41(sup): 242-246.
- [4] 聂建波, 潘峰, 应建国. 低温环境下 ± 800 kV 直流输电铁塔的强度设计[J]. 电力建设, 2012, 33(11): 41-45.
- [5] 熊铁华, 梁枢果, 吴海洋. 某输电线路铁塔覆冰条件下的失效模式分析[J]. 计算力学学报, 2011, 28(3): 468-478.
- [6] WANG Yuanqing, LIU Xiyue, HU Zongwen, et al. Experimental study on mechanical properties and fracture toughness of structural thick plate and its butt weld along thickness and at low temperatures[J]. Fatigue & Fracture of Engineering Materials and Structures, 2013, 36: 1258-1273.
- [7] 王元清, 胡宗文, 石永久, 等. 结构钢厚板低温冲击韧性试验研究[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2010, 31(9): 1179-1184.
- [8] 王元清, 胡宗文, 石永久, 等. 钢结构厚板对接焊缝低温冲击韧性试验研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2010, 7(5): 1-5.
- [9] 王元清, 林云, 张延年, 等. 高强度钢材 Q460C 低温力学性能试验[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2011, 27(4): 646-652.
- [10] 王元清, 林云, 张延年, 等. 高强度钢材 Q460C 低温冲击韧性试验研究[J]. 工业建筑, 2012, 42(1): 8-12.
- [11] 王元清, 刘希月, 石永久. 960 MPa 高强度钢材对接焊缝的低温断裂韧性[J]. 材料研究学报, 2013, 27(3): 237-246.
- [12] WANG Yuanqing, ZHOU Hui, SHI Yongjiu, et al. Mechanical properties and fracture toughness of rail steels and thermite welds at low temperature[J]. International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials, 2012, 19(5): 409-419.
- [13] 王元清, 周晖, 石永久, 等. 基于冲击韧性的钢结构厚板防止脆性断裂的选材方法[J]. 钢结构, 2011, 26(7): 10-16.
- [14] 冯宝锐, 王元清, 石永久. 低温下铁路钢轨抗脆断设计方法分析[J]. 铁道工程学报, 2009, (3): 15-19.
- [15] 常建伟, 徐德录, 张磊, 等. 输电铁塔用 Q460 角钢低温断裂韧性研究[J]. 热加工工艺, 2012, 41(12): 38-40.
- [16] 杨富尧, 李现兵, 陈新, 等. 输电铁塔用角钢的应用及低温服役性能研究[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(1): 117-122.
- [17] GB/T 228—2002 金属材料室温拉伸试验方法[S]. 北京: 中国标准出版社, 2002.
- [18] GB/T 1329—2006 金属材料低温拉伸试验方法[S]. 北京: 中国标准出版社, 2007.
- [19] GB/T 229—2007 金属材料夏比摆锤冲击试验方法[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
- [20] 赵建平, 张秀敏, 沈士明. 材料韧脆转变温度数据处理方法探讨[J]. 石油化工设备, 2004, 33(4): 29-32.

(编辑 赵丽莹)