

表面失效及防护

转向架用 SMA490BW 钢对接接头应力集中
系数有限元分析

何柏林, 魏康

(华东交通大学 机电工程学院, 南昌 330013)

摘要: **目的** 分析转向架用 SMA490BW 钢对接接头的应力集中系数, 提高转向架焊接接头的超高周疲劳性能, 保障高速列车的安全可靠运行。 **方法** 对转向架用 SMA490BW 钢对接接头的超高周疲劳试样进行有限元建模, 应用有限元软件 ABAQUS 计算不同焊趾过渡圆弧半径、焊趾倾角下接头的应力集中系数, 并通过 Origin 软件分析建立应力集中系数(K_t)与焊趾过渡圆弧半径(r)、焊趾倾角(θ)的关系。 **结果** 当 $r=0.2\text{ mm}$, θ 分别为 $10^\circ, 20^\circ, 30^\circ, 40^\circ, 50^\circ, 60^\circ$ 时, K_t 分别为 $1.391, 1.747, 1.976, 2.263, 2.425, 2.525$; 当 $\theta=30^\circ$, r 分别为 $0.2, 0.5, 1, 1.5, 2, 2.5, 3, 4\text{ mm}$ 时, K_t 分别为 $1.976, 1.763, 1.535, 1.419, 1.345, 1.306, 1.257, 1.201$ 。 **结论** 应力集中在对接接头焊趾处较大, r 和 θ 对 K_t 有显著影响。 r 相同时, K_t 随 θ 的增大而增大; θ 相同时, K_t 随 r 的增大而减小。应力集中系数关系方程对于焊趾处应力集中的改善以及转向架对接接头的超声疲劳试样设计具有指导意义。

关键词: 对接接头; 应力集中系数; 焊趾; 有限元

中图分类号: TG404

文献标识码: A

文章编号: 1001-3660(2015)10-0074-05

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2015.10.013

FEM Analysis of Stress Concentration Coefficient of
SMA490BW Steel Welded Butt Joint for Bogie

HE Bo-lin, WEI Kang

(College of Mechanical and Electrical Engineering, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China)

ABSTRACT: **Objective** To analyze the stress concentration coefficient of SMA490BW steel butt joint for bogie, which has an important significance for improving VHCF properties of bogie welded structure and ensuring the safe, reliable operation of high-speed train. **Methods** Finite element model of very high cycle fatigue sample of SMA490BW steel butt joint for bogie was built. The influences of joint geometric parameters (weld edge transition arc radius r , weld toe inclination angle θ) on stress concentration coefficient K_t of weld toe were studied based on the finite element software ABAQUS, and the relationship between the stress concentra-

收稿日期: 2015-05-27; 修订日期: 2015-07-23

Received: 2015-05-27; Revised: 2015-07-23

基金项目: 国家自然科学基金(51365014)

Fund: Supported by the National Natural Science Foundation of China (51365014)

作者简介: 何柏林(1962—),男,河南人,博士,教授,主要研究方向为材料表面改性及疲劳失效分析。

Biography: HE Bo-lin(1962—), Male, from Henan, Ph. D., Professor, Research focus: material surface modification and fatigue failure analysis.

tion coefficient and the geometric parameters was analyzed and established based on regression analysis of Origin software. **Results** When the weld edge transition arc radius r was 0.2 mm, the stress concentration coefficient K_t was 1.391, 1.747, 1.976, 2.263, 2.425, 2.525 respectively at weld toe inclination angle θ of 10° , 20° , 30° , 40° , 50° , 60° ; when the weld toe inclination angle θ was 30° , the stress concentration coefficient K_t was 1.976, 1.763, 1.535, 1.419, 1.345, 1.306, 1.257, 1.201 respectively at weld edge transition arc radius r of 0.2, 0.5, 1, 1.5, 2, 2.5, 3, 4 mm. **Conclusion** Stress concentration at weld toe of butt welded joint was relatively large, and weld edge transition arc radius r and weld toe inclination angle θ played important roles in stress concentration coefficient K_t . For the same weld edge transition arc radius r , the stress concentration coefficient K_t at weld toe increased with increasing inclination angle θ . While in the case of the same weld toe inclination angle θ , the stress concentration coefficient K_t at weld toe decreased with increasing transition arc radius r . The stress concentration coefficient equation has a guiding significance to the improvement of stress concentration at weld toe and the design of ultrasonic fatigue sample of butt joint for bogie.

KEY WORDS: butt joint; stress concentration coefficient; weld toe; finite element

进入21世纪以来,随着我国铁路运输朝客运高速、货运重载及大运量方向的发展,对高速列车运行安全性、可靠性、舒适性的要求也在不断提高。疲劳失效是焊接结构失效的主要形式,90%的焊接构件失效事故是由于焊接接头的疲劳断裂导致的^[1-3]。转向架作为铁路机车车辆的重要组成部分,其主要作用是承载和传递来自车体与轮对间的载荷以及制动力和牵引力,同时降低线路对车体的冲击,确保列车运行平稳与安全。国内外转向架大都采用焊接构架,由于焊接结构在接头处大都存在焊接缺陷、应力集中以及焊后残余应力,导致转向架焊接构件易发生疲劳破坏^[4-5]。为保证列车在高速重载的工作环境下安全运行,其核心构件(如转向架焊接接头)所要求设计的疲劳寿命已超过 10^8 周次,有必要研究焊接接头在 $10^8 \sim 10^{10}$ 周次的疲劳行为和失效机理,该区间的疲劳通常称为超高周疲劳(Very High Cycle Fatigue, VHCF)^[6-7]。由于高能超声波谐振技术省时省力的优点,超声疲劳试验方法已成为国内外学者研究材料超高周疲劳性能的有效手段^[8]。

焊接结构容易产生局部应力集中现象,使得一些焊接构件的疲劳寿命远低于根据设计标准预测的寿命。应力集中系数可以反映焊接接头的应力集中程度,系数越大则接头的疲劳强度越低,而疲劳裂纹最先在焊接接头应力集中现象较严重的焊趾或焊根处萌生。为满足我国铁路朝高速重载方向的发展需求,对转向架材质及焊接构架的疲劳性能提出了更高的要求^[9-10]。因此,研究如何提高转向架焊接接头的超高周疲劳性能,对保障高速列车的安全可靠运行具有重要的意义。考虑到焊趾处应力集中系数对转向架焊接接头疲劳寿命的显著影响,本文应用有限元软件 ABAQUS,对转向架用 SMA490BW 钢对接接头的超高

周疲劳试样进行应力集中系数的计算。计算时,焊趾过渡圆弧半径从 0.2 mm 增加到 4 mm,焊趾倾角从 10° 增加到 60° ,并通过 Origin 软件分析建立应力集中系数与几何参数(焊趾过渡圆弧半径、焊趾倾角)的关系。

1 有限元模型的建立

对接接头形式是转向架焊接构架生产中应用较广泛的一种。不同形式的焊接接头在外加载荷作用下应力分布不同。影响对接接头应力集中系数的因素主要包括焊缝余高、焊缝宽度、板厚、焊趾倾角、焊趾过渡圆弧半径等^[2]。由于超声疲劳试验要求试样必须满足超声频谐振条件,试样的尺寸需要通过严密的解析计算得到^[11]。针对转向架用 SMA490BW 钢超声疲劳对接接头建立模型,诸如焊接残余应力及工艺缺陷不作考虑,如图1所示,板厚为 12 mm,焊缝宽度为 6 mm, θ 为焊趾倾角, r 为焊趾过渡圆弧半径。由于该模型的边界较复杂,本文采用有限元软件 ABAQUS 里的六面体单元进行网格划分。为了提高分析的收敛速度和计算精度,采用二次单元 C3D20。

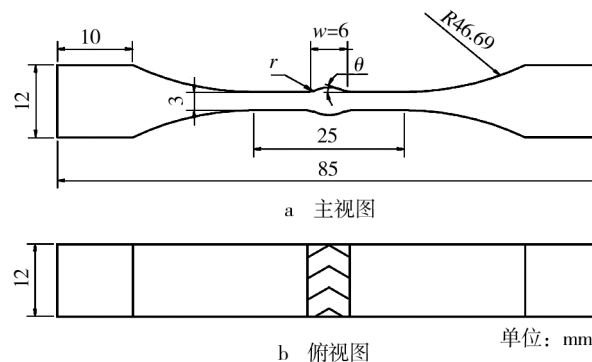


图1 对接接头的几何形状和尺寸

Fig. 1 Geometric shapes and dimensions of butt joint

同时在应力集中的焊趾区域细化网格,在远离该区域的网格可以适当大些,用以减小控制模型的规模。有限元网格划分见图2,最小单元尺寸为0.05 mm,材料的弹性模量 $E=206$ GPa,泊松比 $\mu=0.3$ 。建立模型边界条件,试样左端完全固定,右端施加50 MPa的均匀拉伸载荷。



图2 对接接头模型的有限元网格

Fig.2 Finite element mesh of butt joint model

2 对接接头应力计算结果与分析

为了较全面地考察焊趾倾角 θ 和焊趾过渡圆弧半径 r 对焊趾处应力集中系数 K_t 的影响,有限元计算时,采用的焊趾倾角 θ 为 $10^\circ, 20^\circ, 30^\circ, 40^\circ, 50^\circ, 60^\circ$, 圆弧半径 r 为 $0.2, 0.5, 1, 1.5, 2, 2.5, 3, 4$ mm, 两个参数自由组合。焊趾处的应力集中系数 K_t 为焊趾处最大应力与所在截面的平均应力之比。图3是焊趾过渡圆弧半径 $r=1.5$, 焊趾倾角 $\theta=30^\circ$ 的对接接头主应力云图,得到的应力集中系数 K_t 为1.419。

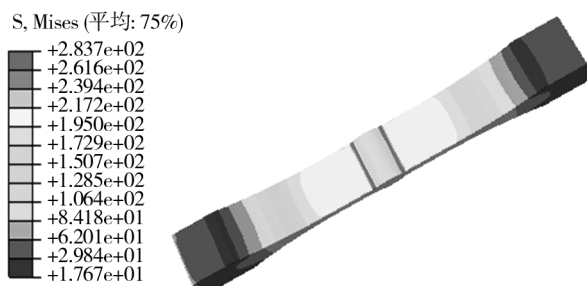


图3 对接接头主应力云图($r=1.5$ mm, $\theta=30^\circ$)

Fig.3 Principal stress contours of butt joint

采用相同的网格单元及同样的加载情况下,得到其他参数对应的对接接头应力分布图,应力集中系数 K_t 计算结果如图4所示。

从图4可以看出,应力集中在对接接头焊趾处比较大,焊趾倾角 θ 对接头应力集中系数的大小有显著的影响。相同焊趾过渡圆弧半径 r 的情况下,应力集中系数 K_t 随着焊趾倾角 θ 的增大而增大。取圆弧半径 $r=0.2$ mm 为例,应用 Origin 软件对数据进行一阶

指数曲线的拟合, θ 与 K_t 之间的拟合曲线如图5所示。拟合曲线的方程为:

$$K_t = 2.966 - 2.04e^{(-\theta/39.129)} \quad (\theta = 10^\circ \sim 60^\circ)$$

当焊趾倾角 θ 从 10° 增加到 60° , 应力集中系数 K_t 从1.391增加到2.525,增幅为81.52%。同时,当 r 分别为0.5, 1, 1.5, 2, 2.5, 3, 4 mm 时,对应的应力集中系数 K_t 的增幅依次为52.49%, 27.02%, 18.61%, 13.66%, 10.13%, 7.47%, 5.3%。这说明:随着焊趾过渡圆弧半径 r 的不断增大,倾角 θ 对应力集中的影响在不断减小。

从图4还可以看出,焊趾过渡圆弧半径 r 对接头应力集中系数的大小也有很大的影响。对于相同的焊趾倾角 θ , 应力集中系数 K_t 随着焊趾过渡圆弧半径 r 的增大而逐渐减小。取焊趾倾角 $\theta=30^\circ$ 为例,应用 Origin 软件对数据进行三阶指数曲线的拟合,拟合的曲线如图6所示,得到该情况下的应力集中系数 K_t 与焊趾过渡圆弧半径 r 之间的关系表达式,如下:

$$K_t = 1.112e^{-r/37.37} + 1.075e^{-r/0.686} - 0.769 \quad (r = 0.2 \sim 4 \text{ mm})$$

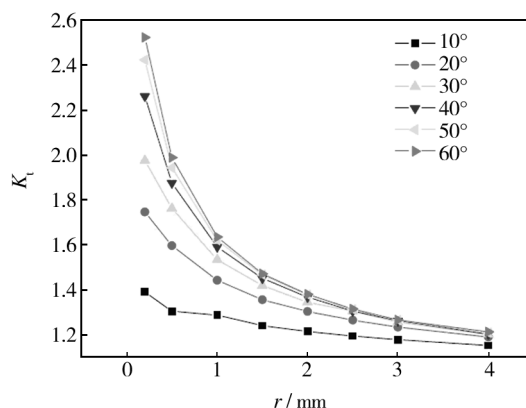


图4 r 和 θ 对应力集中系数 K_t 的影响

Fig.4 Effects of r and θ on the stress concentration coefficient K_t

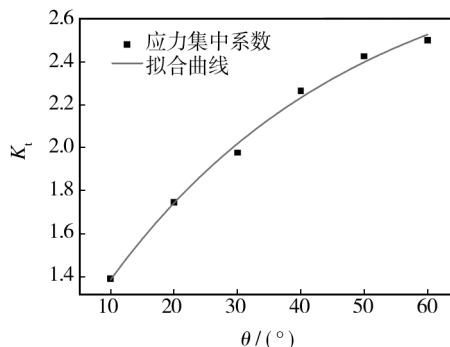
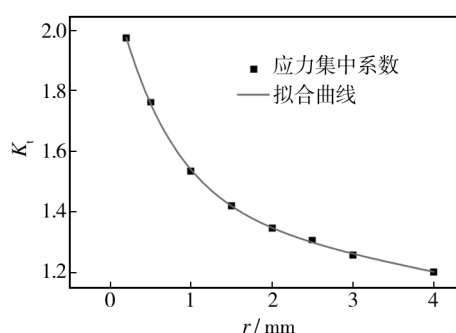


图5 $r=0.2$ mm 时 θ 对 K_t 的影响

Fig.5 Effect of θ on K_t ($r=0.2$ mm)

图6 r 对 K_t 的影响 ($\theta=30^\circ$)Fig. 6 Effect of r on K_t ($\theta=30^\circ$)

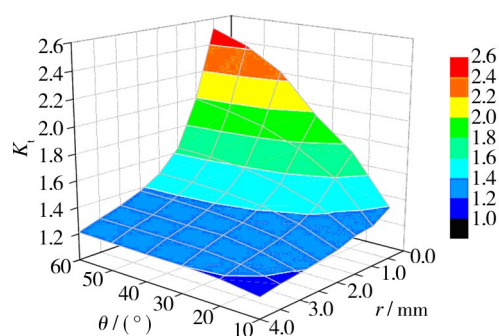
从曲线可以看出,当焊趾过渡圆弧半径 r 在 0.2 ~ 2 mm 变化时,曲线下降较快,改变 r 对于应力集中的减小是非常有效的。当 r 在 2 ~ 4 mm 变化时,虽然也可以降低应力集中,但曲线下降较为平缓。焊趾过渡圆弧半径 r 从 0.2 mm 增加到 2 mm,应力集中系数 K_t 从 1.976 下降到 1.345,降幅为 31.93%;圆弧半径 r 从 2 mm 增加到 4 mm 时,应力集中系数 K_t 从 1.345 下降到 1.201,降幅为 10.70%。

当焊趾倾角为 30° 时,焊趾过渡圆弧半径 r 从 0.2 mm 增加到 4 mm,应力集中系数 K_t 从 1.976 下降到 1.201,降幅为 39.22%;焊趾倾角为 $10^\circ, 20^\circ, 40^\circ, 50^\circ, 60^\circ$ 的情况下,对应的应力集中系数 K_t 的降幅依次为 17.18%, 31.88%, 46.84%, 50.19%, 51.96%, 这说明:随着焊趾倾角的增大,焊趾处过渡圆弧半径 r 对应力集中的影响在不断增大。

增大焊趾过渡圆弧半径能有效降低焊趾处应力集中,从而提高焊接接头的疲劳性能。许多学者通过采用超声冲击、TIG 熔修、高能喷丸等工艺方法对焊接接头进行了表面改性处理,验证了上述论点。何柏林等^[12]研究了超声冲击对转向架常用 16MnR 钢十字接头疲劳性能的影响。结果表明:经超声冲击处理后,焊接接头焊趾部位变成平滑过渡,有效降低了焊接接头承载时的应力集中程度,冲击态十字接头的条件疲劳极限比焊态试样提高了 49% 左右,接头的疲劳寿命延长了 45 ~ 52 倍。姚鹏等^[13]研究了焊趾 TIG 熔修跟随超声冲击处理对焊接接头疲劳强度的影响,发现焊趾熔修区经超声冲击处理后,其应力集中程度下降了 22%,接头疲劳强度提高了 70%。赵小辉等^[14]对承载超声冲击提高 TC4 钛合金十字接头的疲劳性能开展了研究,结果表明:经超声冲击处理后,接头焊趾过渡半径由 0.12 ~ 0.96 mm 变为 1.3 ~ 3.3 mm,应力集中系数较原始焊态减小了 47%,疲劳寿命

延长了 23 ~ 26 倍。Pedersen 等^[15]采用 TIG 熔修和超声冲击方法对高强度钢焊接接头焊趾部位进行了处理,由于 TIG 熔修后焊缝与母材之间的圆弧变得光滑,圆弧半径的增大降低了应力集中。疲劳试验结果表明,在 2×10^6 下,熔修后接头的疲劳强度为 368 MPa,远远高于焊态试样的 217 MPa,同时疲劳寿命也有明显提高。因此,通过增大焊趾过渡圆弧半径来降低应力集中,能为超声冲击、TIG 熔修、喷丸等技术工艺在改善焊接结构抗疲劳性能方面提供理论依据。

综合分析焊趾过渡圆弧半径 r ,以及焊趾倾角 θ 对应力集中系数 K_t 的影响,如图 7 所示。可知,焊趾几何外形的不同会导致接头的应力集中系数差异很大,从而影响接头的疲劳性能。焊接过程中,为了保证焊接结构在服役期间的可靠性,接头实际的过渡半径应大于 2 mm,焊趾倾角应小于 30° 。

图7 应力集中系数 K_t 与 r, θ 的关系三维图Fig. 7 3D graph for the relationship of stress concentration coefficient K_t with r and θ

通过 Origin 软件拟合数据,得到相应的应力集中系数 K_t 与焊趾倾角 θ ,焊趾过渡圆弧半径 r 的关系方程。当 $r=0.2$ mm 时, $K_t = 2.966 - 2.04e^{(-\theta/39.129)}$; 当 $\theta = 30^\circ$ 时, $K_t = 1.112e^{-r/37.37} + 1.075e^{-r/0.686} - 0.769$ 。根据关系方程,可以推算出某一对接接头形状下的焊趾处应力集中系数。反之,可以得到某一具体应力集中系数对应的对接接头几何参数,应力集中系数关系方程对于转向架超声疲劳对接接头的设计具有指导意义。

3 结论

1) 应力集中在转向架超声疲劳对接接头焊趾处比较大,焊趾倾角 θ 对应力集中系数 K_t 有显著影响。在相同焊趾过渡圆弧半径 r 的条件下, K_t 随着焊趾倾角 θ 的增大而增大。随着过渡圆弧半径 r 的不断增大,倾角 θ 对应力集中系数 K_t 的影响在不断减小。

2) 过渡圆弧半径 r 对接头应力集中系数 K_t 也有较大的影响。当焊趾倾角为 30° 时, 焊趾过渡圆弧半径 r 从 0.2 mm 增加到 2 mm, 应力集中系数 K_t 从 1.976 下降到 1.345, 降幅为 31.93%; 圆弧半径 r 从 2 mm 增加到 4 mm 时, 应力集中系数 K_t 从 1.345 下降到 1.201, 降幅仅为 10.70%。

3) 焊趾倾角为 $10^\circ, 20^\circ, 30^\circ, 40^\circ, 50^\circ, 60^\circ$ 的情况下, 当过渡圆弧半径 r 从 0.2 mm 增至 4 mm 时, 应力集中系数 K_t 降幅依次为 17.18%, 31.88%, 39.22%, 46.84%, 50.19%, 51.96%。随着焊趾倾角的增大, 焊趾处过渡圆弧半径 r 对应力集中系数 K_t 的影响也在不断增大。

4) 应力集中系数 K_t 与焊趾倾角 θ , 焊趾过渡圆弧半径 r 的关系方程, 对于转向架焊接接头的超声疲劳试样设计, 以及改善转向架焊接接头的应力集中具有现实指导意义。

参考文献

- [1] 霍立兴. 焊接结构的断裂性能及评定[M]. 北京: 机械工业出版社, 2000.
HUO Li-xing. Fracture Properties and Evaluation of Welded Structures[M]. Beijing: China Machine Press, 2000.
- [2] 王伯铭. 高速动车组总体及转向架[M]. 成都: 西南交通大学出版社, 2009.
WANG Bo-ming. High Speed EMU and Bogie[M]. Chengdu: Southwest Jiaotong University Publishing House, 2009.
- [3] 腾诚信, 左松, 赵琨, 等. 焊接接头表面改性的研究进展[J]. 表面技术, 2014, 43(4): 149—157.
TENG Cheng-xin, ZUO Song, ZHAO Kun, et al. Progress in Surface Modification of Welded Joints[J]. Surface Technology, 2014, 43(4): 149—157.
- [4] ZHANG Wei-hua, WU Ping-bo, WU Xue-jie, et al. An Investigation into Structural Failures of Chinese High-speed Trains[J]. Engineering Failures Analysis, 2006, 13(1): 427—441.
- [5] KIM J S. Fatigue Assessment of Tilting Bogie Frame for Korean Tilting Train: Analysis and Test[J]. Engineering Failures Analysis, 2006, 13(8): 1326—1337.
- [6] 王清远. 超高强度钢十亿周疲劳研究[J]. 机械强度, 2002, 24(1): 81—83.
WANG Qing-yuan. Gigacycle Fatigue of Ultra-high Strength Steels[J]. Journal of Mechanical Strength, 2002, 24(1): 81—83.
- [7] STANZL-TSCHEGG S E, MAYER H, STICH A. Variable Amplitude Loading in the Very High-cycle Fatigue Regime[J]. Fatigue Fracture Engineering Material Structure, 2002, 25: 887—896.
- [8] FURUYA Y, MATSUOKA S, ABE T. A Novel Inclusion Inspection Method Employing 20 kHz Fatigue Testing[J]. Metallurgical and Materials Transaction, 2003, 34A: 2517—2526.
- [9] 何柏林, 于影霞, 史建平, 等. 超声冲击对转向架用 16MnR 钢焊接接头疲劳性能的影响[J]. 中国铁道科学, 2011, 32(5): 96—99.
HE Bo-lin, YU Ying-xia, SHI Jian-ping, et al. The Effect of Ultrasonic Impact on the Fatigue Properties of 16MnR Steel Welded Joints for Bogie[J]. China Railway Science, 2011, 32(5): 96—99.
- [10] 何柏林, 于影霞, 史建平, 等. 应力集中系数对转向架用 16MnR 钢对接头疲劳寿命的影响[J]. 中国铁道科学, 2013, 34(6): 89—92.
HE Bo-lin, YU Ying-xia, SHI Jian-ping, et al. Effect of Stress Concentration Coefficient on Fatigue Life of 16MnR Steel Butt Joint of Bogie[J]. China Railway Science, 2013, 34(6): 89—92.
- [11] MATIKAS T E. Specimen Design for Fatigue Testing at very High Frequencies[J]. Journal of Sound and Vibration, 2001, 247: 673—681.
- [12] 何柏林, 于影霞, 余皇皇, 等. 超声冲击对转向架焊接十字接头表层组织及疲劳性能的影响[J]. 焊接学报, 2013, 34(8): 51—54.
HE Bo-lin, YU Ying-xia, YU Huang-huang, et al. Effect of Ultrasonic Impact on the Surface Microstructure and Fatigue Properties of Welded Cross Joint for Train Bogie[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2013, 34(8): 51—54.
- [13] 姚鹏, 张志毅, 吴向阳, 等. 焊趾 TIG 熔修跟随超声冲击处理对焊接接头残余应力及疲劳强度的影响[J]. 兵器材料科学与工程, 2014, 37(5): 94—97.
YAO Peng, ZHANG Zhi-yi, WU Xiang-yang, et al. Influence of Ultrasonic Impact Following TIG Remelting at Weld Toe on Residual Stress and Fatigue Strength of Welding Joints[J]. Ordnance Material Science and Engineering, 2014, 37(5): 94—97.
- [14] 赵小辉, 王东坡, 王惜宝, 等. 承载超声冲击提高 TC4 钛合金焊接接头的疲劳性能[J]. 焊接学报, 2010, 31(11): 57—60.
ZHAO Xiao-hui, WANG Dong-po, WANG Xi-bao, et al. Improvement of Fatigue Performance of TC4 Ti-alloy Welded Joints by Loading Ultrasonic Peening[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2010, 31(11): 57—60.
- [15] PEDERSEN M M, MOURITSEN O, HANSEN M R, et al. Comparison of Post Weld Treatment of High Strength Steel Welded Joints in Medium Cycle Fatigue[J]. Welding in the World, 2010, 54(7/8): 208—217.