

平均应力对 50 钢超高周疲劳性能的影响

闫桂玲¹, 王弘², 高庆²

(西南交通大学 1. 招生就业处; 2. 应用力学与工程系, 四川成都 610031)

摘要: 为了进一步拓宽超声疲劳试验的研究范围, 对 50 钢进行了含有平均应力的三点弯曲和非对称拉压疲劳性能试验, 得到相应的疲劳 S-N 曲线, 研究了平均应力对其超高周疲劳性能的影响。结果表明: 超声频率加载下平均应力对 50 钢疲劳性能有显著影响, 在应力幅相同的情况下, 随着平均应力的增大, 疲劳寿命降低; 常规疲劳用于描述平均应力影响的 Morrow 关系仍能描述超声频率加载下高周疲劳 ($<10^7$ 周次) 范围内拉伸平均应力对 50 钢疲劳性能的影响, 但是不能用来描述超高周范围内拉伸平均应力和弯曲平均应力对疲劳性能的影响; 常规疲劳用于描述平均应力影响的 Goodman 模型仍能很好地描述超声频率加载下一定寿命的应力幅值和平均应力的配合。

关键词: 平均应力; 50 钢; 超高周疲劳; Goodman 模型

中图分类号: O346.2

文献标识码: A

文章编号: 1000-3738(2006)12-0014-05

Influence of Mean Stress on Fatigue Strength of 50 Steel in Super High Cycle Regime

YAN Gui-ling, WANG Hong, GAO Qing

(Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract: In order to expand the research range of ultrasonic fatigue, the three-bending and non-symmetric tension-compression fatigue properties of 50 steel were tested and corresponding fatigue S-N curves were obtained. The effect of mean stress was studied. The mean stress should have remarkable effect on fatigue strength of 50 steel under ultrasonic frequency loading. With increasing of mean stress, fatigue life decreased under the condition with the same stress amplitude. The model of Goodman describing the effect of mean stress in conventional fatigue can still be used to describe perfectly the relation between stress amplitude and mean stress at ultrasonic frequency loading. The model of Morrow that describes the effect of mean stress in conventional fatigue can still be used to describe the effect of mean tensile stress on fatigue behavior in LCF and HCF regime, but it can not describe the effect in ULCF regime at ultrasonic frequency loading.

Key words: mean stress; 50 steel; very high cycle fatigue; goodman model

0 引言

1860 年, Wöhler 在解决火车车轴断裂问题时, 首先提出了疲劳曲线和疲劳极限的概念。这种无限寿命设计对于传统机械, 如蒸气机等是安全的; 然而对于高速列车 (其车轴在 250 万 km 行程内要经历

10^9 次循环)、高速涡轮发动机 (一台以 3 000 r/min 运行的高速涡轮发动机在 20 a 服役期内要经历 10^{10} 次应力循环^[1]) 等现代设备, 其实际使用寿命往往要达到 $10^8 \sim 10^{10}$ 次^[2]。超声疲劳试验表明, 许多工程材料直到 10^{10} 次应力循环后仍会发生疲劳断裂, 如 50 钢^[3]、40Cr 钢^[4] 等, 因此用 10^7 次的疲劳试验数据进行疲劳强度设计并不安全。1950 年, Masion 基于压电磁致伸缩原理并利用高能超声波谐振技术建立了超声疲劳试验方法, 其工作频率一般在 15~22 kHz 范围内, 目前该方法已经在许多大学和研究机构得到应用。西南交通大学用该方法已经对一些材料进行了缺口效应等的研究, 如 40Cr 钢^[5]。为了进一步拓宽超声疲劳试验的研究范围,

收稿日期: 2005-12-05; 修订日期: 2006-02-24

基金项目: 四川省应用基础研究基金资助项目 (02GY029-028); 铁道部科技研究开发计划资助项目 (2001J016); 西南交通大学科学研究基金资助项目 (2005A10)

作者简介: 闫桂玲 (1979-), 女, 河北高碑店人, 实习研究员, 硕士研究生。

导师: 高庆教授

作者利用三点弯曲超声和非对称拉压超声疲劳试验系统研究了平均应力对 50 钢超高周疲劳性能的影响。

1 试样制备与试验方法

1.1 试样制备

50 钢试样直接从按实际使用工况加工的车轴上截取,其主要化学成分(质量分数/%)为:0.47C, 0.78Mn, 0.26Si, 0.02Cr, 0.007S, 0.014P, 0.15Cu, 0.021Al, 0.028Ni。其热处理工艺为两次正火一次回火:860 °C 加热风冷+800 °C 加热风冷+570 °C 回火空冷。热处理后材料主要力学性能指标为: $E_d=206$ GPa, $\sigma_b=660$ MPa, $\sigma_s=365$ MPa, $\rho=7\ 820$ kg $\cdot$ m $^{-3}$, $\delta=24\%$, $\psi=44\%$ 。

加工出的非对称拉压超声疲劳试样的尺寸见图 1。试样中间为悬链线,为方便,试样中部加工为圆弧,由此带来的误差可以略去不计^[6]。其中: $R_0=30$ mm, $2R_1=3$ mm, $2R_2=10$ mm,由圆的几何方程得到 $L_1=\sqrt{R_0^2-(R_0-R_2+R_1)^2}$ 得到 $L_1=14.06$ mm;根据超声疲劳拉压试样谐振长度和应力位移系数公式^[7],得到试样的谐振长度 $L_2=17.44$ mm,应力位移系数 $C_s=27.02$ MPa/ μ m。

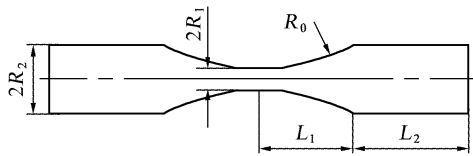


图 1 拉压超声疲劳试样

Fig. 1 Tensile-compress ultrasonic fatigue specimen

试样加工时,首先沿试样轴向铣出中间的圆弧段,再用砂轮打磨,最后用 800#、1000#、1200# 金相砂纸沿轴向打磨试样表面,使试样表面粗糙度达到 $R_a=0.4$ μ m。

加工出的三点弯曲超声疲劳试样尺寸见图 2。根据超声疲劳三点弯曲试样解析解得^[7]试样尺寸: $h=4$ mm, $b=10$ mm, $2L_0=18$ mm, $2L=32$ mm,试样的应力位移系数为 $M_s=11.08$ MPa/ μ m。

试样最后用 400#、800#、1000#、1200# 金相砂纸沿 L 方向打磨试样表面,使试样表面粗糙度达到 $R_a=0.4$ μ m。

1.2 试验方法

超声疲劳试验系统标准振动频率为 20 kHz,允许的频率误差为 ± 0.5 kHz。试验在室温下进行。

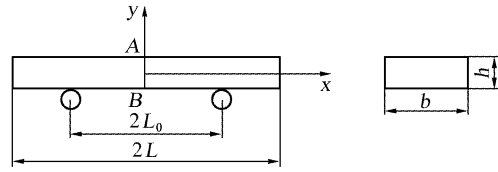


图 2 三点弯曲超声疲劳试样

Fig. 2 Three-point bending ultrasonic fatigue specimen

试样共振时,由于吸收超声振动能量和内部的摩擦,会产生升温现象,因此采用水冷使试样表面温度与室温相当。

用非对称拉压疲劳试验系统分别测定平均应力为 100, 150 MPa 的 50 钢非对称拉压疲劳 $S-N$ 曲线,疲劳循环周次在 $10^4 \sim 10^{10}$ 次内。

用三点弯曲疲劳试验系统分别测定平均应力为 250, 300, 350 MPa 的 50 钢三点弯曲疲劳 $S-N$ 曲线,试验周次在 $10^6 \sim 10^9$ 次内。

2 试验结果与分析

2.1 非对称拉压疲劳试验

图 3 中 $\sigma_m=0$ 曲线为 50 钢对称拉压超声疲劳 $S-N$ 曲线^[3,8]。可见,超声频率加载下平均应力对 50 钢疲劳性能有显著影响,在应力幅相同的情况下,随着平均应力的增大,疲劳寿命降低;非对称拉压超声疲劳 $S-N$ 曲线呈现与对称拉压超声疲劳 $S-N$ 曲线同样的“二次下降型”特征。

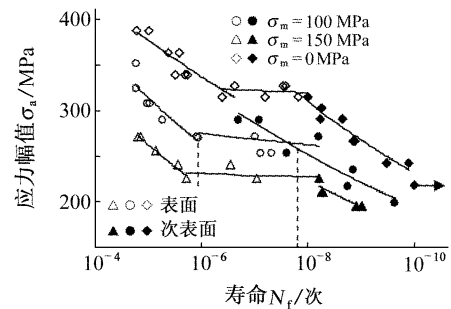


图 3 50 钢非对称拉压疲劳 $S-N$ 曲线

Fig. 3 $S-N$ curves of 50 steel in non-symmetry tensile-compress loading

由文献[3,7]可知,50 钢对称拉压超声疲劳 $S-N$ 曲线与常规疲劳 $S-N$ 曲线具有相同的趋势和规律。因此超声疲劳加载下可用 Basquin 方程^[1]来描述 50 钢非对称拉压疲劳 $S-N$ 曲线:

$$\sigma_a = \sigma'_f (2N_f)^b \quad (1)$$

式中: σ_a 为疲劳载荷应力幅; N_f 为该应力幅下发生疲劳破坏时载荷循环周次; σ'_f 、 b 分别为疲劳强度系数和疲劳强度指数。Morrow^[1]考虑了平均应力的

影响(对任何一个 σ_m),认为拉伸平均应力使得 σ'_f 降低,提出关系式:

$$\sigma_a = (\sigma'_f - \sigma_m)(2N_f)^b \quad (2)$$

将“二次下降型”S-N 曲线的两个拐点对应的循环周次分别定义为 N_0 和 N_1 。试验结果用幂函数式 1 拟合,再用式 2 修正平均应力对疲劳性能的影响,得到的参数见表 1。可见,在低周阶段($N \leq N_0$)疲劳强度系数 σ'_f 相差不大;而在超高周阶段($N \geq N_1$) σ'_f 相差较大。因此,在超声频率加载下的低周阶段,可用 Morrow 关系来修正拉伸平均应力对疲劳性能的影响;而在超高周范围内,不能用 Morrow 关系来修正拉伸平均应力对疲劳性能的影响。

表 1 非对称拉压 S-N 曲线 Basquin 方程参数

Tab. 1 Basquin parameters of non-symmetry fatigue loading

参数	平均应力/MPa			
	100	150		
循环周次 N	$\leq N_0$	$\geq N_1$	$\leq N_0$	$\geq N_1$
σ'_f	891.6	777.2	867.1	856.0
$\sigma'_f - \sigma_m$	791.6	677.2	717.1	706.0
b	-0.075 7	-0.052 4	-0.082 4	-0.060 2
相关系数	0.850 3	0.806 6	0.974 7	0.835 3

2.2 三点弯曲疲劳试验

图 4 为相应平均应力的 50 钢三点弯曲疲劳 S-N 曲线,其中虚线为对称拉压超声疲劳 S-N 曲线^[3,8]。可见,超声频率加载下平均应力同样对 50 钢三点弯曲超高周疲劳性能具有显著影响,在应力幅相同的情况下,随着平均应力 σ_m 的增大,疲劳寿命降低;含有平均应力的三点弯曲疲劳 S-N 曲线在长寿命阶段($N \geq N_0$)与对称拉压超声疲劳 S-N 曲线具有相同的趋势和规律,同样可用 Basquin 方程来描述。

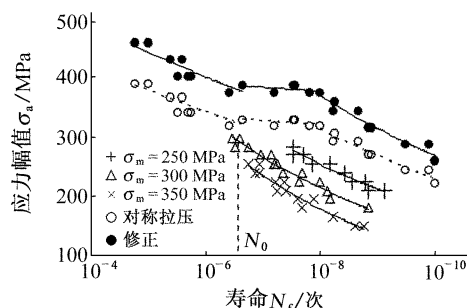


图 4 50 钢三点弯曲疲劳 S-N 曲线

Fig. 4 S-N curves of 50 steel in three-point bending loading

将图 4 的试验结果用 Basquin 方程拟合,并用 Morrow 关系来修正弯曲平均应力对 50 钢超高周疲劳性能的影响,其中各参数见表 2。可见,在超声

频率加载下的高周、超高周阶段,不同弯曲平均应力下,疲劳强度系数 σ'_f 相差较大。因此,在超声频率加载下的超高周范围内,不能用 Morrow 关系来修正弯曲平均应力对 50 钢超高周疲劳性能的影响。

表 2 50 钢三点弯曲 Basquin 方程参数

Tab. 2 Basquin parameters of three-point bending fatigue loading

参数	平均应力/MPa		
	250	300	350
σ'_f	1 401.1	1 607.8	2 122.6
$\sigma'_f - \sigma_m$	1 151.1	1 307.8	1 772.6
b	-0.079 4	-0.094 9	-0.120 4
相关系数	0.940 8	0.962 2	0.94 8

2.3 平均应力对 50 钢超高周疲劳性能的影响

常规疲劳试验通常用恒寿命图表示平均应力在疲劳损伤中的作用。恒寿命图理论认为,应力幅与平均应力之间的不同配合可得出一恒定的疲劳寿命, Gerber (1874) 模型、Goodman (1899) 模型、Soderberg (1939) 模型是其中最为重要的代表^[1]。

由图 3 及不同拉伸平均应力下 S-N 曲线 Basquin 方程求得不同寿命的非对称拉压条件疲劳强度,见表 3。

表 3 不同寿命非对称拉压条件疲劳强度 (MPa)

Tab. 3 Conditional fatigue limit of non-symmetry tensile-compress in different fatigue lifese (MPa)

平均应力/MPa	寿命/次				
	1×10^5	1×10^7	2×10^8	5×10^8	1×10^9
0	377.3	322.5	296.6	279.9	268.0
100	314.2	268.7	239.9	228.6	220.5
150	262.3	229.1	214.3	202.8	194.5

根据三点弯曲疲劳试验原理^[9],由于试验系统的限制,只能测得应力比 $R > 0$ 的三点弯曲疲劳 S-N 曲线,疲劳 S-N 曲线的循环周次也限制在 $10^6 \sim 10^9$ 次之间。为了在大平均应力范围内讨论平均应力对 50 钢超高周疲劳性能的影响,可将非对称拉压试验数据转化为三点弯曲试验数据。拉压试验结果用于旋转变曲疲劳试验结果,可用下式^[10]来修正:

$$\sigma_{-1拉} \approx 0.85\sigma_{-1弯} \quad (3)$$

对称拉压超声疲劳 S-N 曲线修正后得到近似弯曲超声疲劳 S-N 曲线(见图 4,标记为“修正”)。

将平均应力分别为 100, 150 MPa 的非对称拉压试验数据转化为三点弯曲试验数据,得到不同寿命的三点弯曲条件疲劳强度,见表 4。同时表 4 也列出了由图 4 及不同弯曲平均应力下 S-N 曲线方

程求得不同寿命的三点弯曲条件疲劳强度。

表 4 不同平均应力的三点弯曲条件疲劳强度 (MPa)

Tab. 4 Conditional fatigue limit of three-point bending in different mean stresses

平均应力/MPa		寿命/次		
		2×10^8	5×10^8	1×10^9
对称拉压	0	348.92	329.34	315.26
非对称拉压	100	282.20	268.96	259.38
	150	252.06	238.55	228.80
三点弯曲	250	238.83	222.07	210.18
	300	199.61	182.99	171.34
	350	163.28	146.22	134.52

利用表 4 中的三点弯曲条件疲劳强度并采用 Goodman 模型、Gerber 模型和 Soderberg 模型绘制出 2×10^8 、 5×10^8 和 1×10^9 次的三点弯曲恒寿命图,见图 5~7。可见,在超声频率加载下,在 $10^8 \sim 10^9$ 次范围内不同寿命下的平均应力 σ_m 与应力幅 σ_a 能很好地满足 Goodman 曲线,数据点分布在曲线的两边,说明在超高周范围内仍可用 Goodman 模型来描述平均应力对材料疲劳性能的影响。此时用 Gerber 模型估计一定寿命下应力幅值和平均应力的组合偏于危险,用 Soderberg 模型估计则偏于保守。此结论与常规疲劳试验的结论相同。

利用表 3 中非对称拉压的数据及 Goodman 模

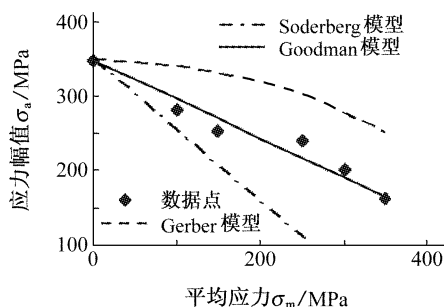


图 5 寿命为 2×10^8 次的三点弯曲恒寿命

Fig. 5 Constant life diagram of 2×10^8 cycles

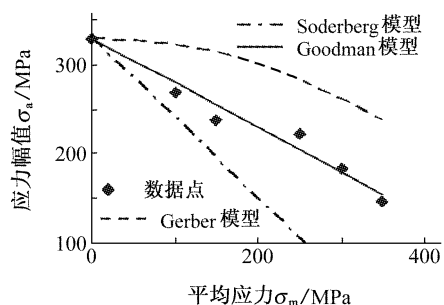


图 6 寿命为 5×10^8 次的三点弯曲恒寿命

Fig. 6 Constant life diagram of 5×10^8 cycles

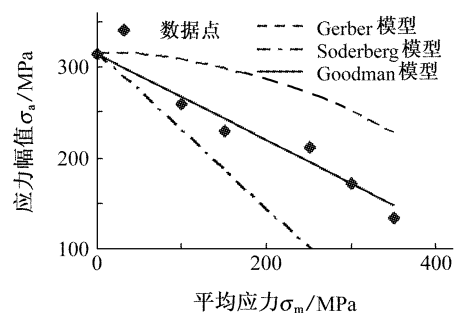


图 7 寿命为 1×10^9 次的三点弯曲恒寿命

Fig. 7 Constant life diagram of 1×10^9 cycles

型、Gerber 模型和 Soderberg 模型可绘制 1×10^5 、 1×10^7 次的恒寿命图,见图 8、图 9。可见,在超声频率加载下的低周和高周范围 ($< 10^8$ 次) 内,不同寿命下的拉伸平均应力 σ_m 与应力幅 σ_a 基本满足 Goodman 曲线,数据点略分布在 Goodman 曲线的下边,此时用 Gerber 模型估计一定寿命下应力幅值和平均应力的组合偏于危险,用 Soderberg 模型估计则偏于保守。

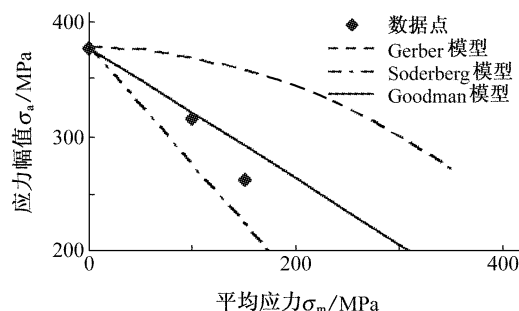


图 8 寿命为 1×10^5 次的拉压恒寿命

Fig. 8 Constant life diagram of 1×10^5 cycles

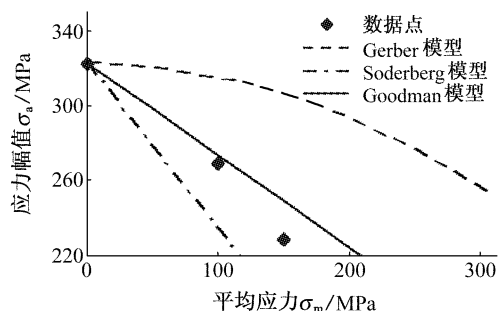


图 9 寿命为 1×10^7 次的拉压恒寿命

Fig. 9 Constant life diagram of 1×10^7 cycles

综合拉伸平均应力和弯曲平均应力对 50 钢疲劳性能的影响分析可见,常规疲劳用于描述平均应力影响的 Goodman 模型仍能很好地描述超声频率加载下一定寿命的应力幅值和平均应力的配合。

常规疲劳用于描述平均应力影响的 Morrow 关

系虽仍能描述超声频率加载下低周和高周($<10^7$ 次)范围内拉伸平均应力对 50 钢疲劳性能的影响,但是不能用来描述超声频率加载下超高周范围内拉伸和弯曲平均应力对 50 钢疲劳性能的影响。

3 结 论

(1) 超声频率加载下平均应力对 50 钢超高周疲劳性能有显著影响,在应力幅相同的情况下,随着平均应力的增大,疲劳寿命降低。

(2) 在长寿命(高周和超高周)阶段,含有平均应力的三点弯曲疲劳 $S-N$ 曲线及非对称拉压疲劳 $S-N$ 曲线与对称拉压超声疲劳 $S-N$ 曲线具有相同的趋势和规律,三者均可用 Basquin 方程来描述。

(3) 常规疲劳用于描述平均应力影响的 Morrow 关系仍能描述超声频率加载下高周疲劳($<10^7$ 次)范围内拉伸平均应力对 50 钢疲劳性能的影响,但是不能描述超声频率加载下超高周范围内拉伸平均应力和弯曲平均应力对 50 钢疲劳性能的影响。

(4) 常规疲劳用于描述平均应力影响的 Goodman 模型仍能很好地描述超声频率加载下一定寿命的应力幅值和平均应力的配合。此时用 Gerber 模型估计一定寿命下应力幅值和平均应力的配合偏于

危险,用 Soderberg 模型估计则偏于保守。

参考文献:

- [1] Suresh S. 材料的疲劳(Ⅱ)[M]. 北京:国防工业出版社,1999.152—243.
- [2] Wang Q Y, Berard J Y, Bathias C, *et al.* Gigacycle fatigue of ferrous alloys[J]. *Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures*,1999,22:667—672.
- [3] 闫桂玲,王 弘,高 庆. 超声频率加载下 50# 车轴钢超长寿命疲劳性能研究[J]. *中国铁道科学*,2004,25(2):78—81.
- [4] 王 弘,高 庆. 超声疲劳试验方法在 40Cr 钢疲劳性能研究中的应用[J]. *机械工程材料*,2003,27(12):29—31.
- [5] 王 弘,高 庆. 缺口应力集中对 40Cr 钢高周疲劳性能的影响[J]. *机械工程材料*,2004,28(8):12—14.
- [6] 王 弘,高 庆. 超声疲劳扭转试样谐振长度的解析法计算[J]. *西南交通大学学报*,2001,36(6):595—598.
- [7] 闫桂玲,王 弘,高 庆. 超声疲劳试验方法及其应用[J]. *力学与实践*,2004,26(6):25—29.
- [8] 王 弘. 40Cr、50 车轴钢超高周疲劳性能研究及疲劳断裂机理探讨[A]. 西南交通大学博士论文集[C]. 成都:西南交通大学,2004.
- [9] 闫桂玲. 非对称超高周疲劳试验研究[A]. 西南交通大学硕士学位论文[C]. 成都:西南交通大学,2005.
- [10] 束德林. 工程材料力学性能[M]. 北京:机械工业出版社,2003.112—138.

(上接第 13 页)

不同的冷却工艺下获得不同钢级的性能,因此通过进一步试验,最终以同一成分(含 0.06%~0.11% 碳的硅-锰-铌-钛系钢)、不同的卷取温度(600~200℃)和不同的冷却工艺(加速冷却、分段冷却和直接淬火)生产了低合金高强度 S550MC 和 S700MC 钢和马氏体 MP900 钢多钢级品种,改变了以往提高钢级性能主要依靠添加合金元素尤其是贵重金属(铜、镍、铬和钼等)的通用做法,有望实现以比较低的成本来满足高钢级品种的性能要求。

3 结 论

(1) 随着卷取温度的降低,试验钢的强度上升,伸长率下降;冷却工艺对试验钢的强度和塑性影响较大。

(2) 随着卷取温度的降低,试验钢的组织逐渐由高温卷取时的铁素体+珠光体向中温卷取时的贝氏体和低温卷取时的马氏体转变;部分卷取温度和工艺情况下可以获得三类组织中两类的混合组织;而采用直接淬火冷却工艺则钢的组织几乎全为低碳

板条马氏体。

(3) 同一成分 0.06%~0.11% 碳的硅-锰-铌-钛系钢通过加速冷却和分段冷却控冷工艺可以分别达到低合金高强度 S550MC 钢、S700MC 钢和马氏体 MP900 钢的性能要求,改变了以往提高钢级性能主要依靠添加合金元素的通用做法,有望实现以比较低的成本来满足高钢级品种的性能要求。

参考文献:

- [1] Jeanneau M, Pichant P. The trends of steel products in the european automotive industry[A]. The 55th Congress of ABM [C]. Brazil: La Revue de Métallurgie,2000.1399—1408.
- [2] Yukihiisa Kuriyama, Manabu Takahashi, Hiroshi Ohashi. Trend of car weight reduction using high-strength steel[J]. *Automotive Engineering*,2001,55(4):51—57.
- [3] Takehide SENUMA, Physical metallurgy of modern high strength steel sheets[J]. *ISIJ International*,2001,41(6):520—532.
- [4] 尚成嘉,杨善武,王学敏,等. RPC 对 800 MPa 级低合金高强度钢的影响[J]. *北京科技大学学报*,2002,24(2):129—132.