

文章编号: 1000-4750(2007)04-0173-05

中碳贝氏体钢的室温单轴循环变形行为研究

*康国政¹, 李友国²

(1. 西南交通大学应用力学与工程系, 成都 610031; 2. 清华大学材料科学与工程系, 北京 100084)

摘 要: 为了了解中碳贝氏体钢支承辊的接触疲劳失效机制, 对中碳贝氏体钢材料在室温单轴循环加载下的应变循环特性和棘轮行为进行了实验研究。讨论了材料的循环软/硬化特性及其对单轴棘轮行为的影响, 同时揭示了该材料棘轮行为的平均应力、应力幅值及其加载历史的依赖性。实验研究表明: 材料的循环软/硬化特性具有明显的应变幅值依赖性, 进而导致材料在不同的应力水平下出现不同的棘轮行为。研究得到了一些有助于该类材料循环变形行为本构描述的结论。

关键词: 贝氏体钢; 棘轮行为; 循环塑性; 单轴加载; 室温

中图分类号: O344.1; TG146.1 **文献标识码:** A

UNIAXIAL CYCLIC DEFORMATION OF MEDIUM CARBON BAINITIC STEEL AT ROOM TEMPERATURE

*KANG Guo-zheng¹, LI You-guo²

(1. Department of Applied Mechanics and Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu, Sichan 610031, China;

2. Department of Materials Science and Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: In order to investigate the failure mechanism of medium bainitic steel backup roller under rolling contact fatigue, the uniaxial-strain cyclic characteristics and ratcheting behaviors of the material were studied by experiments at room temperature. The cyclic softening/hardening feature of the material and its effect on the uniaxial ratcheting were discussed. Simultaneously, the dependence of the ratcheting on mean stress, stress amplitude and loading history was also revealed. It is shown that: the cyclic softening/hardening feature of the material presented remarkable strain-amplitude dependence, and different ratcheting behaviors were caused in the uniaxial cyclic stressing with different stress levels. Some significant conclusions are obtained, which are useful to construct a constitutive model to describe the uniaxial cyclic deformation of bainitic steel.

Key words: bainitic steel; ratcheting; cyclic plasticity; uniaxial loading; room temperature

对于热轧轧机的工作辊和支承辊来说, 在轧制过程中辊间(特别是支承辊)的滚动接触疲劳失效是一种普遍的失效形式。目前采用的防治措施是在一定的工作周期后进行轧辊表面打磨工艺, 然而, 由于对支承辊的滚动接触疲劳失效机理的认识不够

充分, 在实际磨削工艺中采用的磨削量过大, 使得轧辊的换辊周期过于保守, 造成了巨大浪费。因此, 为了优化热轧轧辊的磨削量和换辊周期, 延长轧辊的使用时间, 必须对轧辊的接触疲劳失效机理得到清楚而深入的认识。已有的研究表明^[1~5], 在滚动

收稿日期: 2005-09-11; 修改日期: 2005-11-08

基金项目: 国家自然科学基金项目(NSFC10402037)

作者简介: *康国政(1969), 男, 贵州遵义人, 教授, 博士, 博导, 四川省力学学会秘书长, 从事复杂条件下材料本构关系和复合材料细观力学研究(E-mail: guozhengkang@126.com);

李友国(1946), 男, 湖南永兴人, 教授, 硕士, 从事金属材料及热处理和接触疲劳失效机理研究。

接触疲劳中,接触表面及其亚表层材料的棘轮变形是引起材料失效的主要原因之一。棘轮效应(ratcheting)是材料在非对称应力循环载荷作用下产生的一种塑性变形循环累积现象,其对承受非对称应力循环加载的工程结构的安全性和寿命评价是非常重要的,目前已引起人们的广泛重视,并已在室温和高温下对不同材料(如不锈钢和普通碳钢以及轨道钢等)进行了单轴和非比例多轴棘轮行为的实验研究^[6~13],同时在实验研究的基础上发展和建立了一些能够较为合理地描述某些材料棘轮行为的本构模型^[14~20]。然而,已有的研究表明,不同材料具有不同的棘轮行为,很难用同一理论模型对不同材料的棘轮行为进行合理的本构描述。因此,在试图对某种材料的棘轮行为进行理论描述之前,必须对该材料的棘轮行为进行详细和系统的实验研究。

鉴于上述原因,为了讨论中碳贝氏体钢支承辊的接触疲劳失效机制以及突出棘轮效应的重要影响,本文将对中碳贝氏体钢的室温单轴应变循环特性和棘轮行为进行系统的实验研究,重点讨论单轴循环棘轮行为与循环软/硬化特性、加载水平和加载历史之间的关系,揭示该材料的循环棘轮行为特征,为建立其循环本构模型提供实验基础。

1 实验方法

试验材料为中碳贝氏体钢,其化学成分为: C, 0.43%; Cr, 3.43%; Mo, 0.60%; Mn, 0.52%; Si, 0.42%; Ni, 0.15%; V, 0.12%; P, 0.023%; S, 0.026%; Fe, 余量(重量百分比)。试验材料为现场支承辊直接取样,将进行图 1 所示的热处理后的材料加工成中心标距段直径为 6mm、工作段长度为 12mm 的实心圆棒试样。试验在 MTS809-250kN 电液伺服控制试验机上进行,通过 Teststar 试验控制系统对整个试验过程进行闭环控制数据采集,应变由标距为 6mm 的拉伸引伸仪进行测量。本文中,以 ε_r 代表棘轮应变,并将其定义为:
$$\varepsilon_r = (\varepsilon_{\max} + \varepsilon_{\min})/2$$
。其中, $\varepsilon_{\max}$ 和 $\varepsilon_{\min}$ 分别为一个循环周次中最大和最小的轴向应变。棘轮应变率定义为每一个加载循环周次下棘轮应变的增量, N 表示循环周次。

本文对热处理后的中碳贝氏体钢(下贝氏体+马氏体组织+少量未溶碳化物)进行了单调拉伸、对称应变循环和非对称应力循环。在单拉和应变循环试

验中,应变加载速率为 $\dot{\varepsilon} = 2 \times 10^{-3}/s$;而在非对称应力循环中,应力加载速率为 $\dot{\sigma} = 140 \text{ MPa/s}$ 。

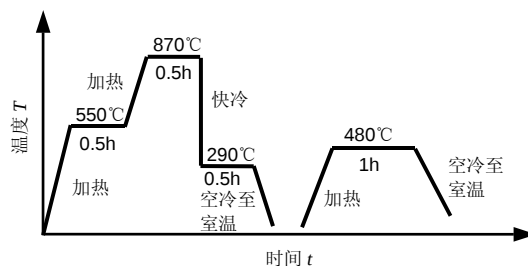


图 1 中碳贝氏体钢的热处理工艺曲线

Fig.1 Schematic diagrams of temperature vs. time for the heat treatment of medium carbon bainitic steel

2 实验结果与讨论

图 2 给出了中碳贝氏体钢在室温下($\dot{\varepsilon} = 2 \times 10^{-3}/s$)的单调拉伸应力-应变曲线。

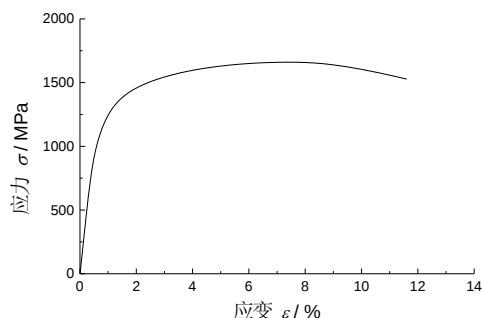


图 2 单调拉伸应力-应变曲线

Fig.2 Stress-strain curve for monotonic tension

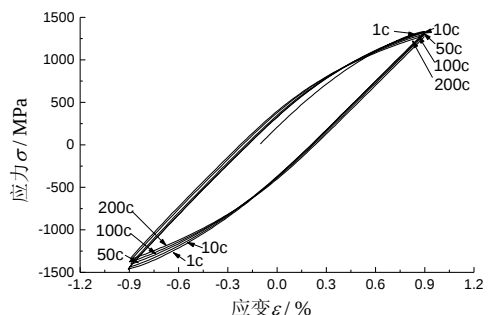
可见,该材料的拉伸应力-应变曲线上没有明显的屈服点,一些基本力学性能为:名义屈服强度 $\sigma_{P0.2} = 1105 \text{ MPa}$,抗拉强度 $\sigma_b = 1660 \text{ MPa}$,弹性模量 $E = 206.9 \text{ GPa}$,延伸率 $\delta \approx 15\%$ 。

2.1 单轴应变循环特性

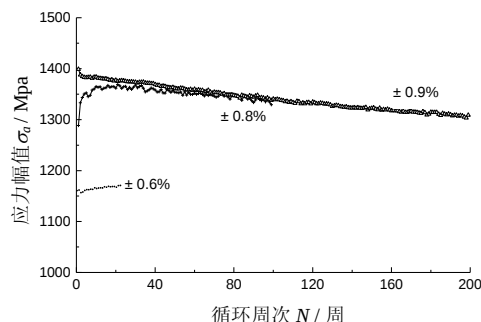
为了研究材料的循环软/硬化特性,首先对中碳贝氏体钢进行了不同应变幅值下的、单级对称应变循环试验,应变幅值分别为 0.6%(24周), 0.8%(100周)和 0.9%(472周),实验结果分别如图 3 所示。为了便于比较,应变幅值为 0.9%的结果只给出了前 200 周的结果。

由图可见,材料的循环软/硬化特性与应变幅值具有一定的依赖性:(1)当应变幅值较大(如 $\pm 0.9\%$)时,材料表现出显著的循环软化特性,并且无饱和状态出现,响应应力幅值随循环周次的增加一直下降,直至材料发生断裂;(2)当应变幅值为 0.8%时,在循环的开始几周材料体现出一定循环硬化特性,

但随着循环周次的增加,材料最终将表现为明显的循环软化特性;(3)当应变幅值较小(如 0.6%)时,响应应力幅值在试验的循环周次(24周)内基本上保持不变,即材料在循环的初期表现为一定的循环稳定特性,但可以预见,随着循环周次的增加,即使在较小的应变幅值循环下,材料仍将体现出一定循环软化效应。



(a) 应变幅值为 0.9% 的应力-应变曲线



(b) 三种应变幅值下的应力响应曲线

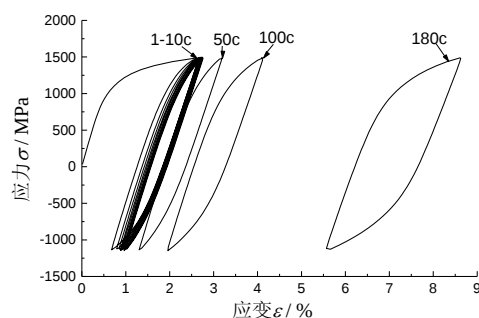
图3 单级对称应变循环结果

Fig.3 Results of symmetrical cyclic straining

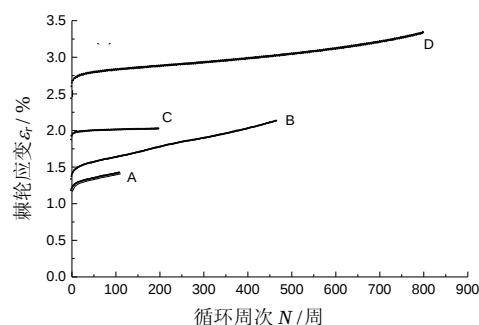
2.2 单轴棘轮行为

本文重点对该材料的单轴棘轮行为进行了详细的研究。首先对材料进行了不同应力水平下的单级循环棘轮试验,其加载工况分别为:A, 177 ± 1238 MPa(110周);B, 248 ± 1238 MPa(470周,试样断裂);C, 424 ± 1061 MPa(200周);D, 424 ± 1150 MPa(802周,试样断裂);E, 106 ± 1326 MPa(144周);F, 177 ± 1326 MPa(180周,试样断裂);G, 248 ± 1326 MPa(110周,试样断裂);H, -177 ± 1326 MPa(166周,试样失稳断裂)。实验结果分别见图4所示。

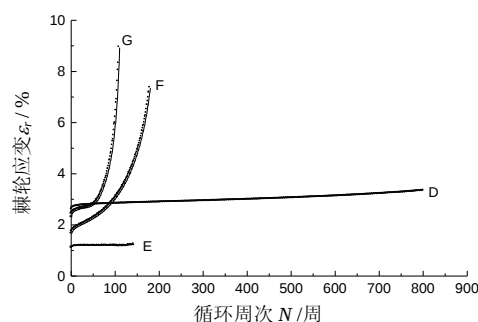
由图4可见,材料在不同的应力水平下体现出不同棘轮特征:(1)当平均应力恒定时,应力幅值的增加将导致棘轮应变的增加,如比较图4(b)中的C、D两种工况;(2)当应力幅值恒定时,平均应力的增加同样将导致棘轮应变的增加,如比较图4(b)中的A、B两种工况和图4(c)中的E、F、G三种工



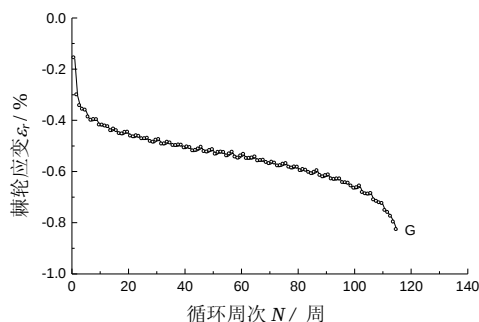
(a) 加载情形 F 的应力-应变曲线



(b) 加载情形 A、B、C 和 D 的棘轮应变-循环周次曲线



(c) 加载情形 D、E、F 和 G 的棘轮应变-循环周次曲线



(d) 加载情形 H 的棘轮应变-循环周次曲线

图4 单级加载下的棘轮行为

Fig.4 Ratcheting under single-step loading

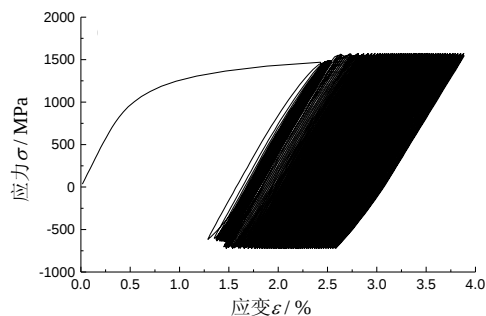
况;(3)当峰值应力恒定,平均应力和应力幅值发生改变时,材料的棘轮行为也将发生显著变化,如比较图4(b)中的B、C两种工况和图4(c)中的D、G两种工况;(4)当平均应力为负时(如图4(d)中所示的工况H),棘轮应变将在压缩方向产生;(5)比较图中所示8种情况可见,当应力幅值增加到

1326MPa 时,在实验研究的四种平均应力下,材料的棘轮行为具有明显不同于其它工况的情形。此时,材料的棘轮应变~循环周次曲线可以分成三个部分:第一部分为棘轮应变率随循环周次增加而下降的阶段;第二部分为一个基本常值的棘轮应变率阶段;第三部分为棘轮应变率随循环周次增加而迅速增加的阶段,即加速阶段。这是由两方面的原因造成的:一是材料此时响应的应变幅值较大,循环过程中由于循环软化效应的影响(如图 4(a)所示,循环滞后环在循环的后期将明显变大)从而使在一定的循环周次后棘轮应变率增加;另一方面,响应的应变幅值较大时,在一定的循环周次后材料将会产生明显的疲劳损伤,损伤的出现也将是材料抵抗变形的能力下降,从而使棘轮应变率显著增加,并导致材料很快发生破坏。

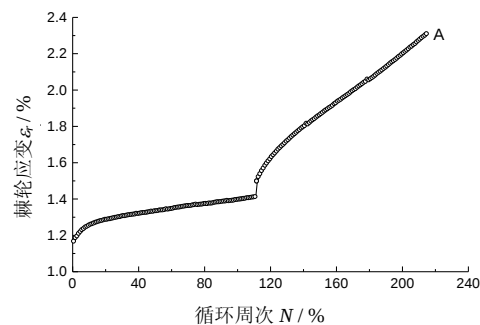
其次,进行了不同应力水平下的多级循环棘轮试验,其加载工况分别为: A, $177 \pm 1238\text{MPa}$ (110 周) $\rightarrow 248 \pm 1238\text{MPa}$ (100 周); B, $424 \pm 1061\text{MPa}$ (200 周) $\rightarrow 424 \pm 1150\text{MPa}$ (200 周); C, $177 \pm 1326\text{MPa}$ (100 周) $\rightarrow 248 \pm 1326\text{MPa}$ (45 周,试样 53 周后断裂)。实验结果如图 5 所示。

由图可见:(1) 随着平均应力或应力幅值的增加,棘轮应变和棘轮应变率均明显增加。这与已有的 SS304 等不锈钢以及轨道钢的棘轮演化规律一致^[10~13]。(2) 然而,分别将多级加载中第二级加载工况产生的棘轮应变值及其演化规律与图 4 中对应的单级加载工况的结果进行比较可见,先前的较低应力水平下的应力循环将加速后续较大应力水平下的棘轮效应的产生。这与 SS304 等不锈钢以及轨道钢的棘轮演化规律有着明显的不同:对 SS304 等不锈钢以及轨道钢材料,先前的较低应力水平下的应力循环对后续较大应力水平下的棘轮效应几乎没有影响^[10~13]。

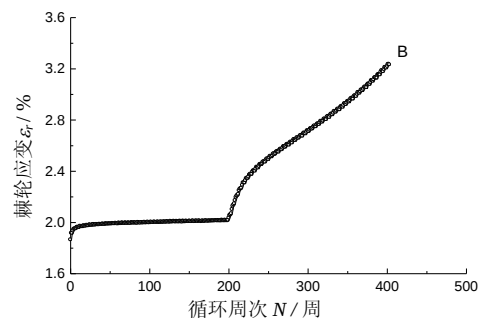
另外,我们还研究了先前应变循环对后续棘轮行为的影响,其加载历史为: $\pm 0.8\%$ (100 周) $\rightarrow 424 \pm 1150\text{MPa}$ (322 周,试样断裂)。结果如图 6 所示。与图 4 中所示工况 D 的结果进行比较可见,先前的应变循环也将加速后续应力循环下的棘轮效应的产生。这也与 SS304 等不锈钢以及轨道钢材料的棘轮演化规律有着明显的不同:对 SS304 等不锈钢以及轨道钢材料,先前的应变循环将抑制后续应力循环下的棘轮效应的产生^[10~13]。



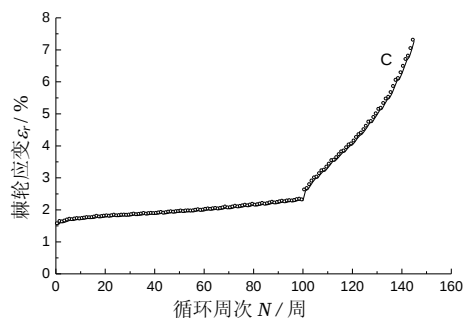
(a) 加载情形 B 的应力-应变曲线



(b) 加载情形 A 的棘轮应变-循环周次曲线



(c) 加载情形 B 的棘轮应变-循环周次曲线



(d) 加载情形 C 的棘轮应变-循环周次曲线

图 5 多级加载下的棘轮行为

Fig.5 Ratcheting under multi-step loading

经过先前的应力或应变循环后,即使在较小的应力幅值(1150MPa)下,材料的棘轮应变~循环周次曲线也具有在单级加载下较大应力幅值时表现出的特征,及棘轮应变的演化可分成明显的三个阶段:棘轮应变率随循环周次增加而下降的阶段;基本常值的棘轮应变率演化阶段;棘轮应变率加速演化阶段。究其原因,这是由于材料表现出的循环软

化特性决定的。先前的应力或应变循环都将使材料发生一定的循环软化，从而降低材料抵抗变形的能力，使得后续应力循环中棘轮行为能以更快的速率发生。

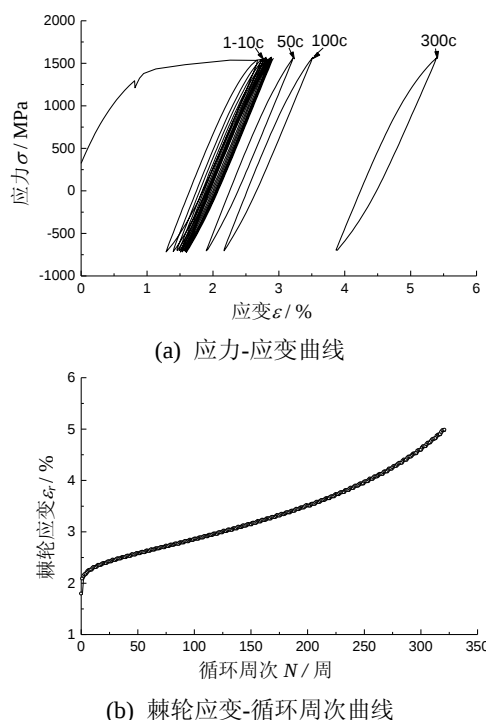


图6 具有先前应变循环下的棘轮行为

Fig.6 Ratcheting with previous cyclic straining

3 结论

通过本文的实验研究，可以得到如下结论：

(1) 经过选定的热处理工艺处理后，中碳贝氏体钢的应变循环特性具有一定的应变幅值依赖性：当应变幅值较小时，材料开始将表现出一定的循环硬化或循环稳定特性，但随循环周次的增加最终表现为明显的循环软化特性；而当应变幅值较大时，材料一直表现为明显的循环软化特性。

(2) 该材料在非对称应力循环下体现出明显的棘轮效应，其棘轮演变规律具有明显的应力水平依赖性：平均应力或应力幅值的增加将导致棘轮应变的增加；当峰值应力恒定，平均应力和应力幅值的改变也将引起棘轮行为的显著变化；当平均应力为负时，棘轮应变将在压缩方向产生；在较大应力幅值下，材料的棘轮演变具有明显的三个阶段，即棘轮应变率下降阶段、常棘轮应变率阶段和棘轮应变率加速阶段。

(3) 先前较低应力水平的应力循环或应变循环由于在材料内部造成一定的循环软化，从而将加速

后续应力循环下的棘轮效应的发生，并使棘轮演化出现上述明显的三个阶段。

上述结论将有助于该类材料棘轮本构模型的建立，进而对热轧支承辊的滚动接触疲劳失效机理进行理论和数值分析。

参考文献：

- [1] Bower A F, Johnson K L. The influence of strain hardening on cumulative plastic deformation in rolling and sliding line contact [J]. J Mech Phys Solids, 1989, 37(4): 471~493.
- [2] Wong S K, Kapoor A, Williams J A. Shakedown limits on coated and engineered surfaces [J]. Wear, 1997, 203/204: 162~170.
- [3] Jiang Y, Sehitoglu H. A model for rolling contact failure [J]. Wear, 1999, 224(1): 38~49.
- [4] Franklin F J, Widiyarta I, Kapoor A. Computer simulation of wear and rolling contact fatigue [J]. Wear, 2001, 251: 949~955.
- [5] 梅冰, 李友国, 汪长安, 窦鹏. 中碳贝氏体钢滚动接触疲劳的裂纹萌生[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2002, 42(12): 1569~1571.
- Mei Bing, Li Youguo, Wang Chang'an, Dou Peng. Crack initiation of rolling contact fatigue for medium carbon bainitic steel [J]. Journal of Tsinghua University (Natural Science), 2002, 42(12): 1569~1571. (in Chinese)
- [6] Ruggles M D, Krempf E. The interaction of cyclic hardening and ratcheting for AISI type 304 stainless steel at room temperature: I, Experiments [J]. J. Mech. Phys. Solids, 1990, 38(4): 575~585.
- [7] Delobelle P, Robinet P, Bocher L. Experimental study and phenomenological modelization of ratcheting under uniaxial and biaxial loading on an austenitic stainless steel [J]. Int. J. Plasticity, 1995, 11(4): 295~330.
- [8] McDowell D L. Stress state dependence of cyclic ratcheting behavior of two rail steels [J]. Int. J. Plasticity, 1995, 11(4): 397~421.
- [9] Mizuno M, Mima Y, Abdel-Karim M, Ohno N. Uniaxial ratcheting of 316FR steel at room temperature: I. Experiments [J]. ASME J. Eng. Mater Technol, 2000, 122(1): 29~34.
- [10] 康国政, 高庆, 蔡力勋, 杨显杰, 孙亚芳. 304 不锈钢非比例循环棘轮行为的实验研究[J]. 金属学报, 2000, 35(6): 497~501.
- Kang Guozheng, Gao Qing, Cai Lixun, Yang Xianjie, Sun Yafang. Experimental study on non-proportional multiaxial ratcheting of 304 stainless steel [J]. Acta Metallurgica Sinica, 2000, 35(6): 497~501. (in Chinese)

(参考文献[11]~[20]转第 167 页)