

## 烧结矿抗压及跌落强度试验研究

潘利生<sup>1</sup>, 魏小林<sup>1</sup>, 彭岩<sup>2</sup>, 程波<sup>2</sup>, 李腾<sup>1</sup>, 李建强<sup>2</sup>

(1. 中国科学院力学研究所高温气体动力学国家重点实验室, 北京 100190;

2. 中信重工机械股份有限公司, 河南 洛阳 471039)

**摘要:** 烧结矿制备及冷却是钢铁行业的重要工艺过程, 烧结矿抗压和高位跌落强度是影响烧结矿成品率的重要参数。以烧结矿为试验样品, 获取了烧结矿抗压和跌落强度。研究结果表明, 对于试验样品烧结矿来说, 20~30 mm 粒度烧结矿平均抗压强度为 5.02 MPa; 500~700 °C 高温烧结矿 2 m 高位跌落产生的 10 mm 以下粒度的烧结矿最高增加 2.70%, 5 mm 以下粒度的烧结矿最高增加 1.11%。

**关键词:** 烧结矿; 抗压强度; 跌落强度; 试验研究

**文献标志码:** A **文章编号:** 1001-0963(2014)03-0005-05

## Experimental Study on Compression and Drop Strength of Sinter

PAN Li-sheng<sup>1</sup>, WEI Xiao-lin<sup>1</sup>, PENG Yan<sup>2</sup>, CHENG Bo<sup>2</sup>, LI Teng<sup>1</sup>, LI Jian-qiang<sup>2</sup>

(1. State Key Laboratory of High-Temperature Gas Dynamics, Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China; 2. Citic Heavy Industries Co., Ltd., Luoyang 471039, Henan, China)

**Abstract:** Sintering and cooling of sinter are important processes in steel industry. Compression strength and drop strength of sinter are important parameters that influence the rate of finished products of sinter. With sinter of a steel plant as experimental sample, the compression strength and drop strength of sinter was obtained. The results show that, for sinter sample with granularity between 20 mm and 30 mm, average compression strength is 5.02 MPa; when sinter with temperature between 500 °C and 700 °C drops from 2 m height to ground, sinter whose granularity is lower than 10 mm increases by 2.70%, while sinter whose granularity is lower than 5 mm increases by 1.11%.

**Key words:** sinter; compression strength; drop strength; experimental study

烧结矿是高炉炼铁的基本原料之一, 其烧制、运输和冷却是钢铁行业必不可少的工艺过程。烧结矿在装卸、运输、堆存、装炉及炉内布料和下降过程中, 会经历相互磨损、自重承压和高位跌落等过程, 均会出现部分烧结矿破碎现象, 产生一定数量的粉末(粒度小于 5 mm), 影响高炉内料柱的透气性和煤气的利用效率, 还会增加炉尘的数量。烧结矿强度是烧结矿的主要质量指标, 它的高低受烧结矿原料组成<sup>[1]</sup>、烧结矿溶剂<sup>[2]</sup>、烧结矿组织结构<sup>[3]</sup>、烧结矿冷却方式<sup>[4]</sup>、烧结矿碱度<sup>[5-7]</sup>等多种因素的影响。蒋大军<sup>[8]</sup>采用多元非线性回归方法建立了钒钛烧结矿强度随多个影响因素变化的预报模型。高强度的烧结

矿在运输和冷却过程中不易破碎, 成品率高, 而且能够保证高炉中炉料具有较好的透气性, 有利于高炉冶炼性能的改善; 低强度烧结矿在运输和冷却过程中易破碎, 返矿率高, 而且会造成高炉中碎料较多, 影响炉料的透气性, 降低高炉冶炼性能。

转鼓强度表征试样的耐磨性能, 用转鼓指数来表示, 定义为经过转鼓测定后粒度大于规定标准的烧结矿试样质量占试样总质量的百分比。目前钢铁行业广泛采用转鼓强度来表征烧结矿的强度, 但是烧结矿运输过程中磨损破碎仅为烧结矿破碎方式之一, 仅采用转鼓强度并不能全面反映烧结矿抗破碎强度特性。烧结矿层自重承压和高位跌落 2 个过程

基金项目: 国家高技术研究发展计划(863 计划)资助项目(2006AA05Z253); 中国科学院知识创新工程重要方向项目资助(KGCX2-YW-321)

作者简介: 潘利生(1982—), 男, 博士, 助理研究员; E-mail: panlisheng@imech.ac.cn; 收稿日期: 2013-01-30

均会造成烧结矿的破碎,增加烧结矿的返矿率,因此烧结矿承压抗碎强度和跌落抗碎强度也是影响烧结矿成品率的重要参数,有必要建立自重承压性能和高位跌落抗碎性能指标,并设计相应测定试验,为烧结矿工艺设计及改造提供依据。

本文设计了 2 种烧结矿强度试验,分别用于考察烧结矿样品抗压强度和跌落强度,并以一种烧结矿为试验样品,检验烧结矿样品的承压和跌落抗碎性能。

## 1 试验方法

### 1.1 烧结矿承压抗碎强度试验

试验装置和设备:加工如图 1 所示的烧结矿抗压强度试验装置(铁质材料),试验装置分为上下 2 部分(盖板和底托),盖板和底托之间用于放置烧结矿试样;准备伺服材料试验机,本文采用的伺服材料试验机型号及参数如表 1 所示。

试验步骤:选取 10 组粒度为 20~30 mm 单颗粒烧结矿作为抗压强度试验样品;将烧结矿试样放置于盖板和底托之间;采用伺服材料试验机上下 2 个三爪卡盘固定试验装置盖板和底托的手柄;调节伺服材料试验机上下卡盘相对位置,直至盖板和底托均与烧结矿接触;开始记录盖板和底托的相对位置和应力(伺服材料试验机传动机构中存在应变

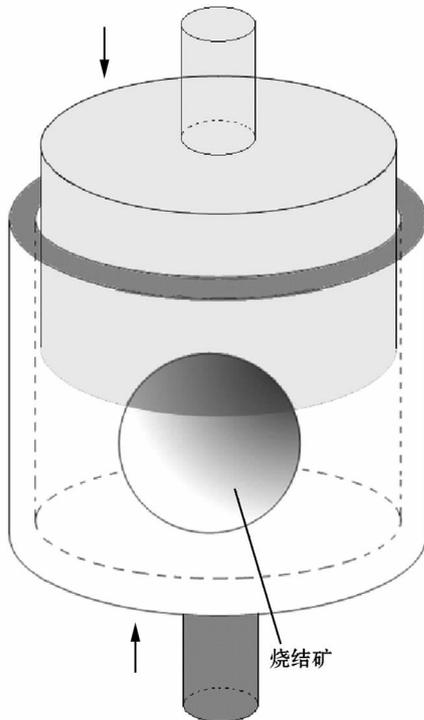


图 1 烧结矿抗压强度试验装置

Fig 1 Experimental device for sinter compression strength

表 1 液压伺服材料试验机详细参数

Table 1 Parameters of hydraulic servo material testing machine

项 目	内 容
名称	液压伺服材料试验机
型号	MTS810QUESTAR-III
最大载荷/kN	100
最大位移/mm	180
功能	材料的拉伸、压缩、弯曲断裂力学性能,疲劳性能

片和应力片,试验时采集的应变及应力通过数据线进入计算机),用来表示烧结矿的压缩量和应力;设定盖板和底托的相对运动步进量并通过伺服材料试验机调动盖板和底托;当烧结矿出现根本性碎裂时(烧结矿应力迅速大幅度降低)停止材料试验机,并清理试验装置准备下组试验;根据试验过程记录的烧结矿承压负荷与盖板位移的变化规律确定烧结矿承压极值。

### 1.2 跌落抗碎强度试验

试验装置和设备:加工如图 2 所示的烧结矿高位跌落抗碎试验装置(铁质材料),烧结矿跌落高度为 2 m,试验装置包括烧结矿转移工具,跌落保护桶及挡板;准备马弗炉用于烧结矿加热。

试验步骤:选取 10 组粒度为 30~60 mm 的烧结矿作为试验烧结矿样品;采用马弗炉分别将烧结矿样品加热至高温(500、600、700 °C);采用烧结矿转

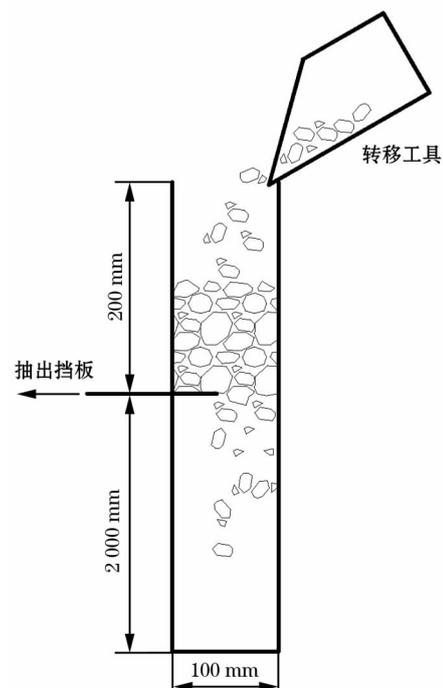


图 2 烧结矿跌落强度试验装置

Fig 2 Experimental device for sinter drop strength

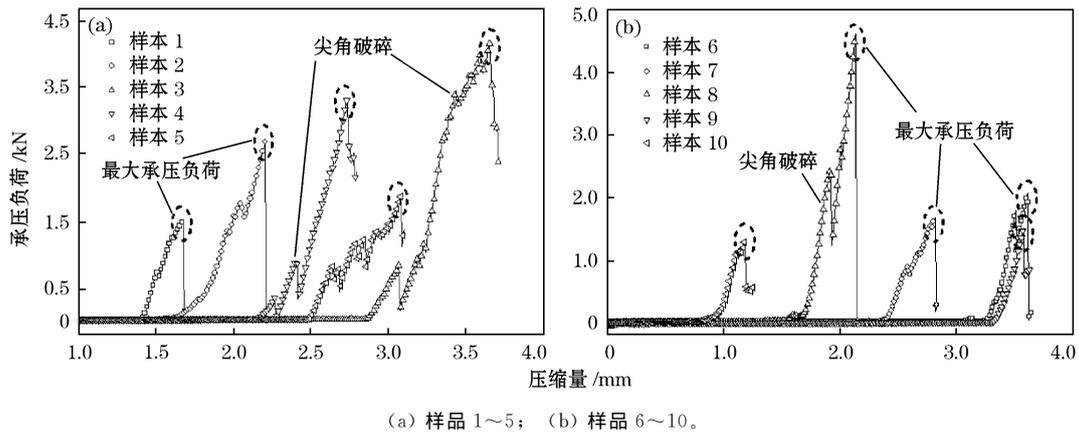
移簸箕将烧结矿转矿转移工具、跌落保护桶及挡板;准备马弗炉用于烧结矿加热。移至试验装置上方的储存桶内;然后通过抽出烧结矿底部挡板使烧结矿从 2 m 高度自由跌落;待烧结矿冷却后,筛分跌落的烧结矿,分析烧结矿跌落造成低于 10 mm 粒度和低于 5 mm 粒度烧结矿的增加程度;清理试验装置准备下组试验。

## 2 试验结果及讨论

### 2.1 单颗粒烧结矿抗压强度试验

单颗粒烧结矿承压负荷随压缩量的变化如图 3 所示。从图中可以发现,当采用液压伺服材料试验机对烧结矿颗粒进行压缩时,对于每粒烧结矿,其承受负荷随烧结矿压缩量的变化趋势均相似:当压缩量很小时,烧结矿开始承受压力的起点不尽相同;随着承受载荷的增加,烧结矿承压负荷随压缩量的增

加而迅速上升;在上升过程中承压负荷曲线出现个别小的尖角;随着承压负荷的进一步加大,烧结矿承压负荷出现一个尖峰极值后迅速降低为零或一个较小值。产生上升现象的原因是,当压缩量很小时,每组试验中的烧结矿颗粒和加压面初始相对位置存在差别,即每组试验中初始状态时烧结矿颗粒与加压面间的相对距离不尽相同,从而造成烧结矿开始承受压力的起点不同,如样品 10 和加压面初始相距较近时,烧结矿承压较早,而样品 3 和加压面初始相距较远时,烧结矿承压较晚。当烧结矿上下加压面都与烧结矿充分接触后,压缩量将反映烧结矿的压缩形变程度,烧结矿的承压负荷随烧结矿压缩形变的增大迅速增大,在烧结矿承压曲线上升过程中存在小的波动主要是由于与加压面接触的烧结矿小尖角破碎造成的。当烧结矿承压负荷达到一个较大的值后出现的尖峰极值是由烧结矿颗粒出现了整体性的



(a) 样品 1~5; (b) 样品 6~10。  
图 3 单颗粒烧结矿承压负荷随压缩量的变化

Fig 3 Variation of single sinter compression load with compression amount

破碎,承压负荷迅速下降造成的,这个极值反映了单颗粒烧结矿的承压负荷的极限。

根据单颗粒烧结矿承压负荷随压缩量的变化规律确定单颗粒烧结矿承压负荷极值,如图 4 所示,在试验烧结矿样品中,单颗粒烧结矿样品 8 承压极值最大为 4.59 kN,单颗粒烧结矿样品 10 承压极值最小为 1.31 kN,多数烧结矿承压极值处于 1.5~2.0 kN 左右。烧结矿宏观孔隙和微气孔对烧结矿的强度有重要影响,微气孔直接控制着烧结矿裂纹的产生和扩展<sup>[9]</sup>。微气孔越少烧结矿强度越优,如烧结矿样品 8 的形状较为平整且气孔较少;微气孔越多烧结矿强度越差,如烧结矿样品 10 的形状不规则,气孔较大较多。根据烧结矿样品的极限负荷值和近似球形的烧结矿最大截面积可以得到烧结矿样

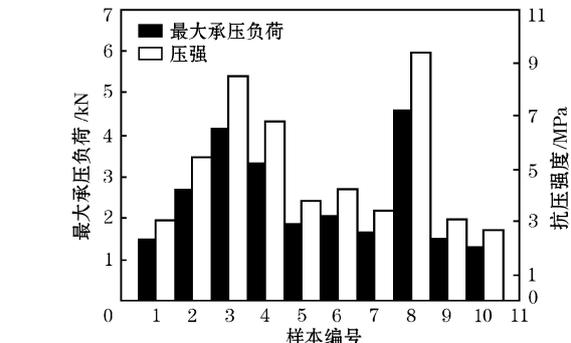


图 4 单颗粒烧结矿承压极值和抗压强度  
Fig 4 Maximum compression load and compression strength of single sinter

品的抗压强度,如图 4 所示,烧结矿样品抗压强度为 2.67~9.35MPa,平均抗压强度为 5.02 MPa,与文

献[10]中试验得到的烧结矿平均抗压强度 13.68 MPa 相比较小,这主要是由于文献中试验样品烧结矿均打磨成规则的长方体形状,而本文中的试验样品为近似球形的烧结矿,处理数据采用的是球体的最大截面积,故本文得到的烧结矿抗压强度更低一些。本文烧结矿试验样品保持原本形状,得到数据在分析实际问题时更有意义。

烧结矿承压负荷变化曲线中,平滑陡升直至承压极限之前的阶段为烧结矿弹性压缩变形阶段。杨氏模量是反映固体材料抵抗形变能力的物理量,其定义如式(1)所示。为分析烧结矿在压缩过程中,烧结矿抵抗形变能力的变化,本文定义参数瞬时模量,其定义如式(2)所示。截取每粒试验样品弹性压缩变形阶段(烧结矿样品 5 存在尖端较多,完整的弹性形变段较短,故去除样品 5 的试验数据),分析烧结矿抵抗压缩形变能力。根据式(1)和式(2)分别计算烧结矿在弹性变形阶段不同压缩程度的杨氏模量和瞬时模量。

$$\frac{F_n}{S} = Y \frac{\Delta l}{l_0} \tag{1}$$

$$\frac{\Delta F_n}{S} = Y' \frac{(\Delta l)'}{l_0} \tag{2}$$

式中,  $F_n$  为烧结矿所受压力负荷;  $S$  为烧结矿截面积; 由于烧结矿形状不规则, 烧结矿截面积不明确, 本文数据分析时取烧结矿粒度最大横截面积(假定烧结矿呈球形);  $\Delta l$  为烧结矿被压缩量总量;  $l_0$  为烧结矿原始高度;  $Y$  为杨氏模量;  $(\Delta l)'$  为伺服材料试验机动作一次烧结矿被压缩的增量;  $\Delta F_n$  为伺服材料试验机动作一次烧结矿所受压力负荷的增量;  $Y'$  为本文定义的参数, 反映抗压缩变形能力随压缩程度的变化, 称为瞬时模量。

图 5 为烧结矿试验样品的杨氏模量和瞬时模量随压缩过程的变化。图 5(a) 为弹性变形阶段烧结矿试验样品杨氏模量在整个压缩过程的变化, 可以看出, 每粒烧结矿样品杨氏模量的变化规律各异, 烧结矿样品形状不规则且不尽相同, 每粒烧结矿样品的微气孔数量和结构也各不相同, 从而造成了烧结矿个体抗压缩变形的能力也各不相同, 将试验数据进行拟合可以发现烧结矿弹性模量从压缩之初的 0.33 GPa 到压缩终了的 0.38 GPa。图 5(b) 为弹性变形阶段烧结矿试验样品瞬时模量在整个压缩过程的变化, 可以看出对于烧结矿试验样品, 瞬时模量存在负值, 这是由于烧结矿存在细小尖角, 尖角破碎造成压缩量继续增大, 而承受压缩负荷却迅速减小。根据试验

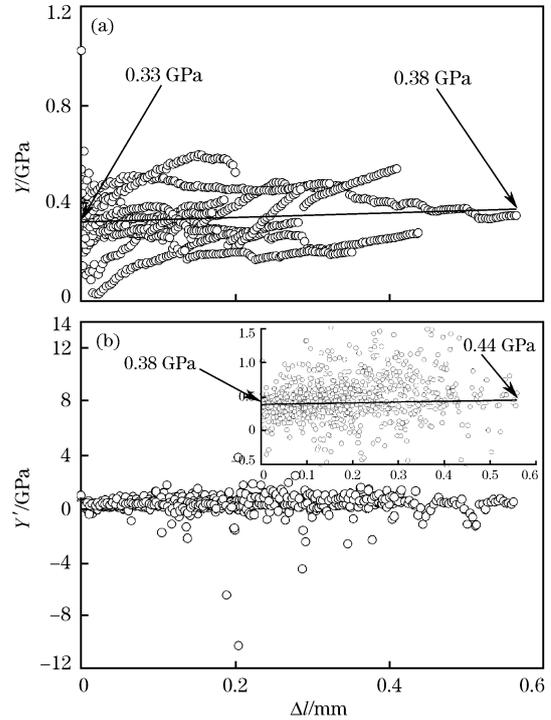


图 5 单颗粒烧结矿弹性模量随压缩量的变化  
Fig 5 Variation of single sinter modulus of elasticity with compression amount

数据得到的烧结矿瞬时模量为 0.38~0.44 GPa。

### 2.2 烧结矿高位跌落抗碎性能试验

模拟高温状态下, 烧结矿 2 m 跌落抗碎试验结果如图 6 所示。在试验中分别将烧结矿样品加热至 700、600 和 500 °C, 跌落破碎产生粒度小于 10 mm 的烧结矿碎料比例为 0.99%~2.70%, 粒度小于 5 mm 的烧结矿碎料比例为 0.50%~1.11%。从图 6 中还可以看出, 在考察温度范围和粒度范围内, 烧结矿温度和烧结矿粒度对烧结矿跌落抗碎性能均略有影响, 烧结矿温度越高粒度越大, 跌落破碎形成的

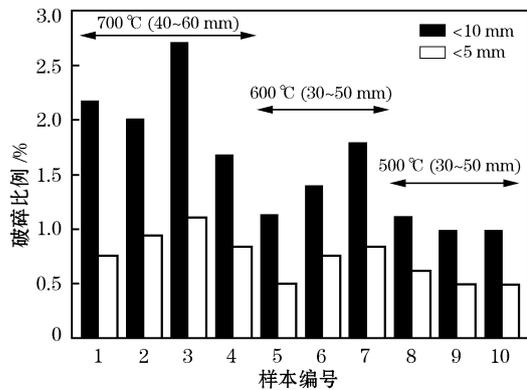


图 6 烧结矿跌落强度试验结果  
Fig 6 Experimental results of sinter drop strength

碎矿比例越高。温度越高,烧结矿强度越低,跌落撞击时易碎,烧结矿粒度越大,跌落时的撞击力就越大,同时跌落破裂断面也越大,产生的小粒度碎矿就越多。整体来看,烧结冷却及转移过程中,2 m 高位跌落过程使得返矿率增加在 3.0% 以内。

### 3 结论

烧结矿抗压强度和跌落强度对烧结矿成品率具有重要影响。以新建的烧结矿强度试验方法对烧结矿试验样品的抗压强度和跌落强度进行考察,分析了其承压和跌落抗碎能力。研究结果表明,烧结矿承压能力取决于烧结矿的品质,微气孔较少烧结矿承压能力强,微气孔较多烧结矿承压能力差,对于试验样品烧结矿来说,20~30 mm 粒度烧结矿试验样品最高可承压 1.3~4.2 kN,平均抗压强度为 5.02 MPa;500~700 °C 高温烧结矿 2 m 高跌落产生的 10 mm 以下粒度的烧结矿最高增加 2.70%,5 mm 以下粒度的烧结矿最高增加 1.11%。

(上接第 4 页) 凭借其优异的综合力学性能,马氏体时效钢业已成为当前最为重要的超高强度结构材料,为人类的生产生活作出了重要贡献,但结合其合金化特点和提高抗氢脆性能,在无钴马氏体时效钢、马氏体时效不锈钢等领域还有很大的发展空间有待于人们开发,希望上述的总结和展望能给科研工作者们对继续开发该材料以一定的启示。

#### 参考文献:

- [1] Decker R F, Eash J T, Goldman A J. 18% Nickel Maraging Steels [J]. Trans ASM, 1962, 55(1): 58.
- [2] Decker R F, Loreen S. Maraging Steels—the First 30 Years [C]// Maraging Steels—Recent Development and Applications. Warrendale, PA: TMS-AIME, 1988: 1.
- [3] Hamaker J C, Bayer A M. Applications of Maraging Steels [J]. Cobalt, 1968(3): 3.
- [4] 魏振宇. 马氏体时效钢的强度[J]. 国外金属材料, 1985(1): 1.
- [5] Tsuguaki Oki, Masatoshi Sudo, Tsutumi Hiromori, et al. Process for Producing Maraging Steel Cylinder for Uranium Enriching Centrifugal Separator and Cylinders Produced Thereby; U. S. ,

#### 参考文献:

- [1] 杨光亮, 杨碧能, 张金柱, 等. 原料组成和能耗对烧结矿强度影响的试验研究[J]. 贵州工业大学学报, 2006, 35(1): 10.
- [2] 张金柱, 张士举. 溶剂对阳春粉熔化性及烧结质量的影响[J]. 钢铁研究学报, 2010, 22(12): 7.
- [3] 黄建平, 张斌, 杨碧能, 等. 组织结构对烧结矿强度影响[J]. 过程工程学报, 2009, 9(增 1): 258.
- [4] 王文山, 吕庆, 胡宾生, 等. 冷却方式对钒钛磁铁矿烧结过程和烧结矿强度的影响[J]. 河北理工学院学报, 2007, 29(1): 12.
- [5] 范晓慧, 李文琦, 甘敏, 等. MgO 对高碱度烧结矿强度的影响及机理[J]. 中南大学学报, 2012, 43(9): 3325.
- [6] 王文山, 吕庆, 李福民, 等. 碱度对钒钛烧结矿强度和烧结过程的影响[J]. 烧结球团, 2006, 31(5): 11.
- [7] 朱亚东, 罗果萍, 王永斌, 等. 提高包钢低硅烧结矿强度的试验研究[J]. 钢铁研究学报, 2010, 22(10): 16.
- [8] 蒋大军. 采用多元非线性回归预测钒钛烧结矿强度[J]. 烧结球团, 2006, 31(2): 5.
- [9] 乔瑞庆, 杜鹤桂. 低氟烧结矿微气孔的形成机理及对烧结矿强度的影响[J]. 钢铁研究学报, 1999, 11(6): 1.
- [10] 李光森. 粘结相对烧结矿强度的影响机理[D]. 沈阳: 东北大学, 2008.

3989553[P]. 1976-11-26.

- [6] 魏振宇. 日本生产浓缩轴的离心机用材—马氏体时效钢[J]. 国外金属材料, 1981(1): 19.
- [7] Floreen S. Cobalt Free Maraging Steel; U. S. , 4443254[P]. 1984-07-22.
- [8] 浅山行昭, 川濑嘉孝, 冈田真树. 含钢的机械的性质[J]. 日本金属学会志, 1987, 51(1): 76.
- [9] Asayama Yupiteru, Higuchi Kazuaki. High Strength Cobalt-Free Maraging Steel; U. S. , 4579590[P]. 1986-01-21.
- [10] Kim Y G, Kim G S, Lee C S, et al. Microstructure and Mechanical Properties of a Cobalt-Free Tungsten-Bearing Maraging Steel [J]. Mater Sci Eng, 1986, 79(1): 133.
- [11] Tharian K T, Sivakumar D, Ganesan R, et al. Development of New Nickel, Cobalt Free Maraging Steel [J]. Mater Sci Tech, 1991, 7(12): 1082.
- [12] 姜越, 尹钟大, 朱景川, 等. 马氏体时效不锈钢的发展现状[J]. 特殊钢, 2003, 24(3): 1.
- [13] 姜越, 尹钟大, 朱景川, 等. 超高强度马氏体时效钢的发展[J]. 特殊钢, 2004, 25(2): 1.
- [14] 梁冬梅, 朱远志, 刘光辉. 马氏体时效钢的研究进展[J]. 金属热处理, 2010, 35(12): 35.