

DOI: 10.13228/j.boyuan.issn0449-749x.20180226

20CrMn 钢双辊振动铸轧薄带性能的试验

魏洁平, 许志强, 孙明翰, 朱志旺, 王海军, 杜凤山
(燕山大学国家冷轧板带装备及工艺工程技术研究中心, 河北 秦皇岛 066004)

摘 要: 为了探究双辊薄带铸轧技术中施加的机械振动对铸轧带坯微观组织及力学性能的影响, 设计并制造了 $\phi 500\text{ mm} \times 350\text{ mm}$ 微振幅双辊薄带铸轧机。以该铸轧机为试验平台进行了多次工艺探索试验, 最终确定了能够实现振动铸轧稳定生产的合理工艺参数。分别对振动与无振动两种工艺条件下所得 20CrMn 合金钢铸轧带坯的显微组织和力学性能进行了检测与分析, 结果表明, 与传统铸轧带坯相比, 振动铸轧带坯法向面的平均晶粒尺寸由 70 减小至 35 μm , 带坯纵截面振动侧和非振动侧晶粒也得到不同程度的细化; 振动铸轧较传统铸轧所得带坯沿垂直轧制方向屈服强度、抗拉强度和伸长率分别提高了 21.36%、27.35% 和 42.86%。以上研究结果证明, 机械振动能有效改善带坯微观组织, 细化晶粒, 并提高其力学性能。

关键词: 20CrMn 合金钢; 双辊铸轧; 机械振动; 晶粒度; 力学性能

文献标志码: A **文章编号:** 0449-749X(2018)12-0118-06

Experimental research of vibratory cast-rolling strips for 20CrMn alloy steel

WEI Jie-ping, XU Zhi-qiang, SUN Ming-han, ZHU Zhi-wang,
WANG Hai-jun, DU Feng-shan

(National Engineering Research Center for Equipment and Technology of Cold Strip Rolling, Yanshan University,
Qinhuangdao 066004, Hebei, China)

Abstract: In order to investigate the influence of the mechanical vibration applied in the technology of twin-roll strip cast-rolling on the microstructure and mechanical properties of the cast-rolling strip, a $\phi 500\text{ mm} \times 350\text{ mm}$ micro-amplitude twin-roll strip cast-rolling mill was designed and manufactured. The casting mill was used as an experimental platform for a number of process exploration experiments, and the reasonable process parameters that could achieve stable production of twin-roll vibratory cast-rolling strips were finally determined. Then the microstructure and mechanical properties of the 20CrMn alloy steel cast-rolling strip obtained under vibratory and vibrationless conditions were tested and analyzed. The microstructure observation result shown that the average grain size of the normal surface of the vibratory cast-rolling strip reduced from 70 to 35 μm compared with the vibrationless one, and the grains on the vibratory and the vibrationless side of the longitudinal section of the vibratory cast-rolling strip were also refined to different degrees. The tensile test result shown that the yield strength, tensile strength and elongation of the vibratory cast-rolling strip in the vertical-rolling direction were respectively 21.36%, 27.35%, 42.86% higher than those of the conventional vibrationless cast-rolling strip. The above research results prove that mechanical vibration can effectively improve the microstructure, refine the grains, and improve the mechanical properties of the strip.

Key words: 20CrMn alloy steel; twin-roll casting; mechanical vibration; grain size; mechanical property

双辊薄带铸轧属于近终形薄带材生产工艺之一, 其特点是在较短时间内完成从铸造到轧制的冷却—凝固—成型全过程, 与传统工艺相比具有流程短、设备简单、生产成本低等优点, 具有很大的发展潜力^[1-3]。但由于铸轧过程的工艺稳定性

不易控制, 难以重复, 导致生产出的带坯容易出现诸多缺陷^[4]。

为了改善双辊薄带铸轧过程中出现的带坯微观组织粗大、力学性能较差等问题, 大量学者对此进行了相关研究。毛大恒等^[5]通过在铸轧区关键部

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(U1604251); 河北省自然科学基金资助项目(E201720304)

作者简介: 魏洁平(1994—), 男, 硕士生; **E-mail:** 1833969100@qq.com; **收稿日期:** 2018-05-31

通讯作者: 许志强(1964—), 男, 博士, 教授; **E-mail:** xzq@ysu.edu.cn

位引入电磁能场,有效细化了晶粒组织并提高了带坯力学性能;夏晨希^[9]研究了超声振动对 3003 铝合金铸轧过程的作用机理,结果显示带坯的微观形貌得到有效改善,中心偏析也得到一定抑制;Conrad H 等^[7]通过试验证明,脉冲电流可以使带坯疲劳寿命提高 2~3 倍,并且能减少沿晶开裂的数量。但以上几种振动形式由于存在诸多局限性,其在钢铁材料的铸轧方面应用并不广泛,例如由于钢铁材料磁通量较小,电磁能场的施加对其效果十分有限;超声振动由于需要超声发生器浸入金属液,故只适宜应用在温度较低的工作环境中;电脉冲工作频率较低,实际效果尚不理想。

现阶段研究表明,机械振动可以有效抑制凝固组织枝晶生长,提升形核率,从而细化晶粒,改善组织并且提高性能^[8-10]。往复搓轧带来的异步轧制效果,能够强化轧制变形过程的动态再结晶,降低轧制力,提升板坯力学性能^[11-13]。上述两种特定的工艺只能在凝固或者轧制的某个阶段起到相应的改善作用,本试验针对双辊铸轧工艺特点,提出了双辊薄带振动铸轧新技术^[14],通过在一侧轧辊施加上下等幅的机械振动,探究机械振动对带坯微观组织的改善效果和对力学性能的影响规律,最终达到在凝固和轧制两个阶段同时起到改善组织的目的。

1 试验材料及方法

1.1 试验设备介绍

20CrMn 钢双辊薄带振动铸轧试验机为本团队在国家自然科学基金资助下自主设计研发,如图 1 所示。该铸轧机主要由冶炼系统、主传动系统、浇铸系统、结晶辊系、液压控制系统、振动平台,电控操作台及冷却水循环系统等几部分组成。该铸轧机采用 $\phi 500$ mm 结晶辊和上注式浇铸工艺,水平布置双结晶辊的方案。上注式带钢铸轧机具有结构简单,易于控制,双面对称结晶,内部质量好等特点。铸轧机总质量约为 25 t,高为 3.7 m,最大铸轧力为 400 kN,可铸轧碳钢、硅钢等合金钢种、铝合金及复合板带等产品。该铸轧机的主要特点有:(1)采用浮动辊缝控制,便于根据铸轧力反馈调节辊缝以保证铸轧工艺稳定;(2)采用振动凝固和耦合搓轧技术,有效改善带坯芯部的凝固组织;(3)采用振幅振频调控系统,可精确调节振幅 0~1 mm、频率 0~50 Hz,适于不同振动铸轧工艺的要求;(4)采用侧封板和水口整体预热装置。铸轧机的主要技术参数见表 1。



1—IGBT 电源; 2—电机及传动系统; 3—中频炉; 4—中间包;
5—冷却水箱; 6—液压泵站; 7—人工操作台; 8—电控操作
台; 9—梯具平台; 10—铸轧机主体。

图 1 双辊薄带铸轧机

Fig. 1 Twin roll strip casting mill

表 1 双辊薄带铸轧机工艺参数

Table 1 Technological parameters of twin roll strip casting

参数	参考值	参数	参考值
辊身直径/mm	500	激振振幅/mm	0~1
辊身长度/mm	350	激振频率/Hz	0~50
铸轧速度/(m·min ⁻¹)	0~90	最大轧制力/kN	400
铸坯厚度/mm	1~5	最大扭矩/(kN·m)	12

侧封板选用熔融石英材料,通过液压系统压紧。合金钢熔炼通过 IGBT 电磁感应加热炉实现,一次性可熔炼合金钢 200 kg。试验机装有压力传感器以测定铸轧力,以及位移传感器以测定试验过程中的辊缝波动。

1.2 双辊薄带钢振动铸轧工艺介绍

双辊薄带钢振动铸轧是将熔融的钢水通过浸入式水口注入铸轧熔池区内,两个通有冷却循环水的铸轧辊反向旋转,其中一侧轧辊在振动系统的激励下做简谐式往复运动,促使钢液在快速凝固的同时发生塑性变形直接生产出薄带钢,其原理如图 2 所示。

铸轧过程中工艺参数的设定是至关重要的环节,其直接决定能否稳定产出质量合格的带坯。当浇铸温度过高时,熔融的钢液难以及时凝固,容易造成凝固终了点过低,进而无法经过轧制阶段充分的塑性变形,轻则导致带坯出现夹层、缩孔等缺陷,严重可导致漏钢、轧辊过烧等事故;当铸速过快时,金属液在熔池内部的对流换热时间变短,钢液凝固释放的潜热和显热得不到完全释放,最终造成坯壳生长速度减缓并且凝固终了点的位置降低,也会造成类似浇铸温度过高导致的后果。

浇铸温度为 1 580 ℃, 铸速为 22 m/min 时得到的带坯如图 3 所示, 可见其芯部夹层明显, 孔洞较多, 显然未经过充分的轧制变形, 且带坯表面多处有过烧的现象。当浇铸温度过低时, 钢液凝固过快, 容易造成凝固终了点升高, 进而导致“轧卡”等事故, 当铸速过低时同理。浇铸温度为 1 520 ℃, 铸速为 18 m/min 时由于“轧卡”形成的熔池如图 4 所示。经

过数十次的试验探索, 最终得出较合理的铸轧工艺参数: 辊缝 1.9 mm, 铸轧速度 20 m/min, 冷却水压力 0.6 MPa, 浇铸温度 1 530 ℃, 熔池液位高度 160 mm。在该工艺下基本可实现稳定生产, 所得带坯板型精整, 质量稳定。合理铸轧参数下所得带坯的纵截面如图 5 所示, 可见带坯纵截面无夹层和孔洞, 质量较好。

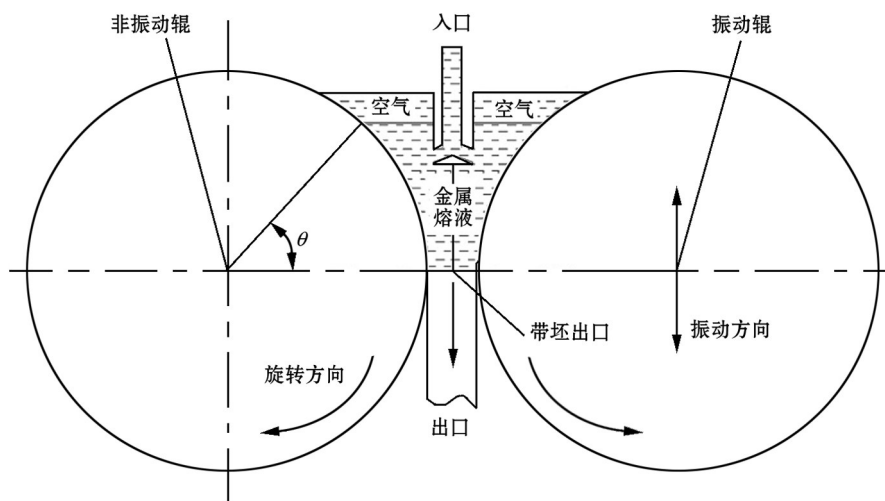


图 2 双辊薄带钢振动铸轧原理

Fig. 2 Principle of vibration casting and rolling of two-roll strip

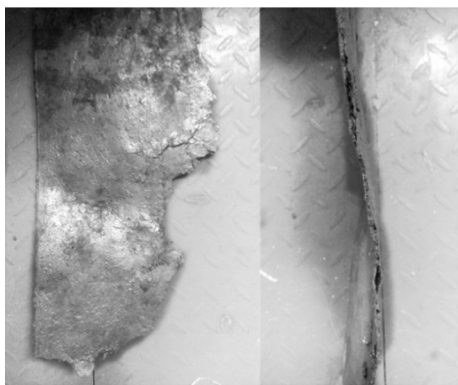


图 3 浇铸温度为 1 580 ℃、铸速为 22 m/min 所得带坯

Fig. 3 Casting strip obtained at 1 580 ℃ casting temperature and 22 m/min casting speed

1.3 试验材料及方案

试验原材料为 20CrMn 合金钢, 其化学成分见表 2。

表 2 20CrMn 的化学成分(质量分数)

Table 2 Chemical composition of 20CrMn %

C	Si	Mn	S	P	Cr	Ni	Cu	Fe
0.21	0.28	1.1	0.021	0.027	1.0	0.023	0.019	其余

试验前将中间包及浸入式水口预热至 1 200 ℃



图 4 “轧卡”形成的熔池

Fig. 4 Molten pool formed by broken rolling

以上, 将侧封板预热至 700 ℃ 左右(熔融石英材料吸热能力较差, 难以预热至较高温度)。在中频炉中将 20CrMn 钢加热至 1 680 ℃ 的熔融状态, 加入除渣剂扒去浮渣, 倾倒入中间包中, 静置至开浇温度(由手持式钨铼热电偶进行测温), 拉开塞棒通过浸入式水口将中间包内钢液注入铸轧熔池区内进行铸轧。铸轧工艺参数为辊缝 1.9 mm, 铸轧速度

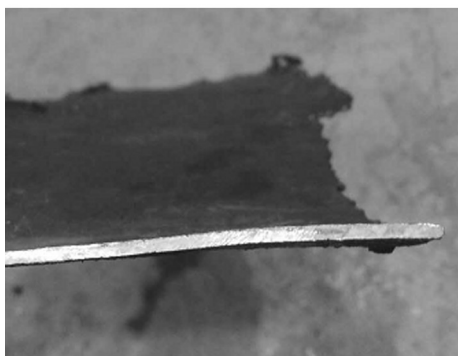


图5 合理铸轧参数下所得带坯纵截面

Fig. 5 Longitudinal section of strip obtained with reasonable parameters

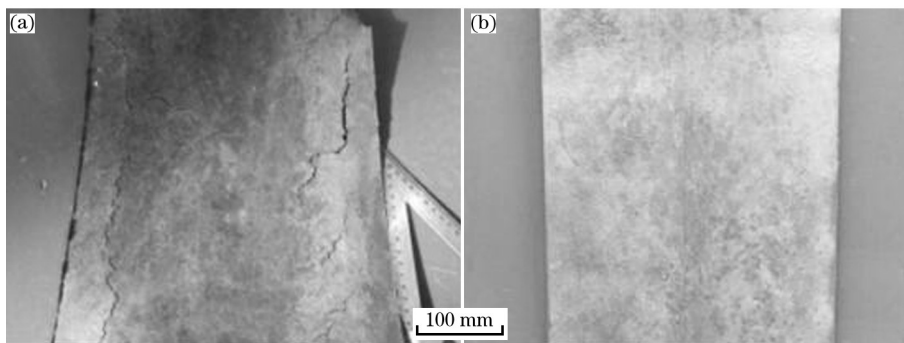
为 20 m/min, 冷却水压力为 0.6 MPa, 浇铸温度为 1 530 ℃, 熔池液位高度为 160 mm。为了探究振动铸轧的细晶机理, 分别进行了振动及非振动两组对比试验, 振动组参数为振频 25 Hz, 振幅 0.38 mm, 在该条件下可实现振动铸轧的稳定生产, 所得铸轧带坯如图 6 所示。振动铸轧与传统铸轧带坯表面的对

比如图 7 所示, 可以看出, 振动铸轧带坯质量良好, 无孔洞、横裂纹及纵裂纹等明显缺陷。



图6 铸轧带坯整体视图

Fig. 6 Overall view of strip



(a) 非振动铸轧带坯表面; (b) 振动铸轧带坯表面。

图7 非振动铸轧与振动铸轧带坯表面对比

Fig. 7 Surface comparison between non-vibrating cast strip and vibrating cast strip

2 试验结果与分析

2.1 微观组织对比分析

分别从 2 次对比试验产品带坯的中心部位取样, 将取得的试样粗磨、精磨、抛光和腐蚀, 腐蚀试剂为饱和苦味酸溶液, 采用 Leica DMI 5000M 金相显微镜观察试样微观组织, 采用线性相交方法测量晶粒尺寸。

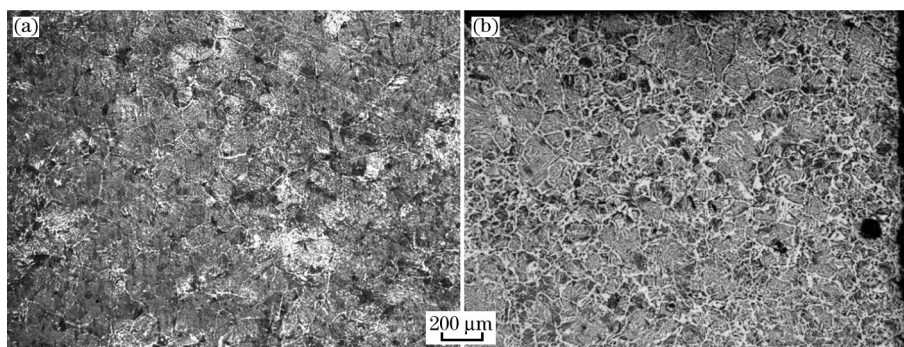
两种工况下铸轧试验产品带坯的法向面金相组织对比如图 8 所示, 由图可见, 法向面视角下的带坯晶粒均为近圆形等轴晶, 这是法向面上各方向间无明显的温度梯度差异造成的。图 8(a) 中无振动条件下铸轧板坯的平均晶粒尺寸为 70 μm

左右, 不同晶粒之间尺寸差别较大。图 8(b) 中振动条件下铸轧板坯的平均晶粒尺寸为 35 μm 左右, 晶粒尺寸较为均匀, 无粗大晶粒存在, 且板坯发生了动态再结晶现象, 晶界处存在新生的等轴晶晶粒。这是由于振动在凝固过程中会强化枝晶生长尖端高温熔液的流动, 对枝晶尖端造成热冲击, 从而诱发枝晶尖端熔断, 抑制枝晶生长, 而熔断的枝晶尖端进入熔池区, 则会成为游离晶核, 与振动对熔池区造成的“搅拌”效果共同作用, 显著提升了熔池内钢液的形核率, 在塑性变形阶段双向剪切力的施加使得动态再结晶的效果显著增强, 以上两个阶段的共同作用使得晶粒细化的效果得以显现。

2.2 力学性能对比分析

力学拉伸测量采用 CSS-44100 电子试验机,按照 GB/T 228—2002 试验标准进行拉伸测量,在 2 组试验方案所得板坯上沿垂直轧制方向截取 3 个试样,取平均值为最终结果。拉伸测试结果见表 3。由表 3 可知,振动铸轧板坯较传统铸轧板坯屈服强度、抗拉强度和伸长率分别提高了 21.36%、27.35%和 42.86%。力学性能的提高主要有以下两

方面原因^[15],一是由于振动产生的细晶粒受到外力发生塑性变形时,其塑性变形可分散在更多的晶粒内进行,塑性变形较均匀,并且晶粒越细,晶界越曲折面积越大,越不利于裂纹的扩展;二是振动会在熔池钢液中产生一定的搅拌和冲刷效果,使凝固前沿的溶质堆积层变轻或消失,有助于第二相的析出,对基体起到了弥散强化的作用,使基体的力学性能得到了增强。



(a) 非振动铸轧带坯法向面金相组织; (b) 振动铸轧带坯法向面金相组织。

图 8 铸轧带坯法向面金相组织对比

Fig. 8 Metallographic comparison of normal surface of strip

表 3 拉伸测试结果

Table 3 Result of extension test

铸轧试样	屈服强度/MPa	抗拉强度/MPa	伸长率/%
传统铸轧	323	351	28
振动铸轧	392	447	40

3 结论

(1) 通过大量的工艺探索试验,得出了可实现双辊铸轧稳定生产的工艺条件,其参数为:辊缝为 1.9 mm,辊速为 20 m/min,浇铸温度为 1 530 ℃。

(2) 振动铸轧相较传统铸轧,带坯法向面的芯部平均晶粒尺寸由 70 减小至 35 μm,带坯纵截面振动侧由粗大柱状晶转变为细小等轴晶,非振动侧无明显差异,表明机械振动可有效细化晶粒,改善组织。

(3) 沿垂直轧制方向拉伸试件,振动铸轧板坯较传统铸轧板坯屈服强度、抗拉强度和伸长率分别提高了 21.36%、27.35%和 42.86%,表明机械振动可有效提高带坯力学性能。

参考文献:

- [1] 曹光明,李成刚,刘振宇,等.双辊铸轧工艺温度场和流场耦合的数值模拟[J].钢铁研究学报,2008,20(9):23.(CAO Guang-ming, LI Cheng-gang, LIU Zhen-yu, et al. Numerical

simulation of temperature field coupled with flow field during twin-roll strip casting process[J]. Journal of Iron and Steel Research, 2008, 20(9): 23.)

- [2] 王三众,黄兆猛,于辉,等.双辊铸轧工艺参数对熔池场变量的影响[J].钢铁研究学报,2017,29(8):643.(WANG San-zhong, HUANG Zhao-meng, YU Hui, et al. Influence of parameters on molten pool field during twin-roll casting process[J]. Journal of Iron and Steel Research, 2017, 29(8): 643.)
- [3] DING P D, JIANG B, YANG C M, et al. Development and thought of thin strip continuous casting[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2004, 14(S1): 192.
- [4] 季晨曦,张炯明,王新华,等.双辊连铸不锈钢薄带凝固组织特点[J].钢铁研究学报,2008,20(2):40.(JI Chen-xi, ZHANG Jiong-ming, WANG Xin-hua, et al. Solidification microstructure of austenitic steel strip cast by twin-roll method[J]. Journal of Iron and Steel Research, 2008, 20(2): 40.)
- [5] 李婷,毛大恒,李建平,等.AZ31B 镁合金电磁铸轧实验研究[J].热加工工艺,2010,39(15):18.(LI Ting, MAO Da-heng, LI Jian-ping, et al. Experiment of electromagnetic roll-casting for AZ31B magnesium alloy[J]. Hot Working Technology, 2010, 39(15): 18.)
- [6] 夏晨希.3003 铝合金超声连续铸轧工业实验及机理研究[D].长沙:中南大学,2011.(XIA Chen-xi. Experimental and Mechanism Study on Ultrasonic Continuous Casting and Rolling for 3003 Aluminum Alloy[D]. Changsha: Central and South University, 2011.)
- [7] Conrad H, Jr A F S, Cao W D, et al. Electroplasticity—the effect of electricity on the mechanical properties of metals[J].

- JOM, 1990, 42(9): 28.
- [8] 陶红标, 张慧, 王玫, 等. 振动激发金属液形核对锌凝固组织的影响[J]. 中国冶金, 2007, 17(11): 45. (TAO Hong-biao, ZHANG Hui, WANG Mei, et al. Effect of liquid metal nucleation stirred by vibration on solidification structure of zinc[J]. China Metallurgy, 2007, 17(11): 45.)
- [9] 谭群燕. 机械振动对 ZL201 铝合金凝固组织的影响[J]. 热加工工艺, 2010, 39(13): 64. (TAN Qun-yan. Effect of mechanical vibration on solidification structure for ZL201 aluminum alloy[J]. Hot Working Technology, 2010, 39(13): 64.)
- [10] 曾礼. 机械振动对 A356 铝合金充型及凝固的影响研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2012. (ZENG Li. Effect of Mechanical Vibration on Filling and Solidification for A356 Aluminum Alloy [D]. Chongqing: Chongqing University, 2012.)
- [11] Farshid T, Hasan S, Yousef H K K. Study on the effect of prolonged mechanical vibration on the grain refinement and density of A356aluminum alloy[J]. Materials and Design, 2009, 30(5): 1604.
- [12] 刘刚, 莫成刚, 李超, 等. 异步轧制硅钢薄带的固体渗硅[J]. 钢铁, 2016, 51(3): 68. (LIU Gang, MO Cheng-gang, LI Chao, et al. Solid powder siliconizing of silicon steel shin strip produced by asymmetric rolling[J]. Iron and Steel, 2016, 51(3): 68.)
- [13] 李秋鹤, 王刚, 陈礼清. 轧制方式对 SUS430 铁素体不锈钢组织和性能的影响[J]. 钢铁, 2016, 51(10): 41. (LI Qiu-he, WANG Gang, CHEN Li-qing. Effects of rolling schedules on microstructures and mechanical properties of SUS430 ferritic stainless steel[J]. Iron and Steel, 2016, 51(10): 41.)
- [14] ZHANG S H, ZHAO D W, GAO C R, et al. Analysis of asymmetrical sheet rolling by slab method[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2012, 65(10): 168.
- [15] 杜凤山, 许志强, 路鹏程, 等. 振动式双辊薄带铸轧机: 中国, CN101181719[P]. 2008-05-21. (DU Feng-shan, XU Zhi-qiang, LU Peng-cheng, et al. Vibrating Twin-Roll Strip Casting and Rolling Mill: China, CN101181719[P]. 2008-05-21.)

《钢铁》杂志征稿启事

《钢铁》杂志创刊于 1954 年, 由中国科学技术协会主管, 中国金属学会、钢铁研究总院和北京钢研柏苑出版有限责任公司主办, 是中国冶金界历史较长的综合性科技期刊, 也是反映钢铁工业科技成就的主要刊物之一。《钢铁》设有由 53 名国内知名学者、企业家等组成的编委会, 编委会顾问徐匡迪、殷瑞钰、张寿荣、翁宇庆和编委会主任委员干勇、编委会委员毛新平、谢建新等 7 位均为中国工程院院士。《钢铁》办刊宗旨是面向生产、结合实际; 坚持为中国钢铁工业生产建设服务, 报道钢铁工业的科技成就、生产工艺的技术进步、品种质量的改善提高、新技术新产品的开发应用、企业经营管理经验和专业理论应用研究等, 以提高钢铁行业科技工作者和管理人员的科技水平, 促进钢铁工业的发展。

2001 年 10 月《钢铁》入选由国家新闻出版总署创建的中国《期刊方阵》; 名列双百第 74 名。2009 年以前为 EI 收录期刊, 自 1992 年开始, 《钢铁》连续 8 次入编北大图书馆核心期刊(中文核心期刊); 为中信所“中国科技核心期刊”; 被国际著名检索机构 Scopus 收录。

《钢铁》主要栏目有: 综合论述、原料与炼铁、炼钢、压力加工、钢铁材料、环保与能源、装备技术、技术交流等。《钢铁》现为月刊; 大 16 开; 页码为 88 页; 期刊为自办发行。

1 征稿对象

从事钢铁冶金生产、管理、设计、科研、教学和钢材使用部门的科技人员、专家学者和管理人员等。

2 征稿范围

钢铁冶金领域具有创新性、高水平、有重要意义的原始性研究学术论文以及反映学科最新发展状况的文献综述和技术类文章。《钢铁》在继续报道和推广钢铁工业关键共性技术的基础上, 特向作者征集涉及钢铁工业关键技术的原创文章和综合论述文章。

特别欢迎作者针对钢铁企业资源优化配置和节能减排、资源综合利用等方面撰写技术文章。

3 投稿和联系方式

请登录“钢铁期刊网”网站(<http://www.chinamet.cn>)。点击“钢铁”的图标或刊名导航条, 进入期刊的首页了解详情。

联系人: 尚海霞, 党玉华, 何 祺;

邮 箱: IS@chinamet.cn;

电 话: 010-62182345;

传 真: 010-62185134;

通讯地址: 北京市海淀区学院南路 76 号;

邮 编: 100081。