

硫易切削钢 SUM23HS 中硫化物形态控制

王从道, 李东晖

(南京钢铁股份有限公司 研究院, 南京 210035)

摘要: 通过加热对比试验, 研究加热工艺对硫易切削钢 SUM23HS 中硫化物形态的影响, 借助光学显微镜(OM)、扫描电子显微镜(SEM)以及电子微探针分析仪(EPMA)对加热方坯硫化物形貌、分布状况进行分析, 通过 ANSYS 仿真软件对方坯厚度方向的温度场进行模拟计算, 获取方坯厚度方向温度场分布。结果表明, 2种加热工艺试验中, 采用工艺二(均热温度 1 230 ℃, 均热时间 80 min, 在炉总时间 3 h)条件加热的 SUM23HS 钢硫化物形态更接近“纺锤状”。采用 2种加热工艺生产 SUM23HS 钢盘条, 盘条金相组织和客户使用状况显示, 工艺二的易切削钢切削性能更优。

关键词: 硫易切削钢; 硫化物形态; 切削性能

中图分类号: TG 142.1 **文献标志码:** A **doi:** 10.3969/j.issn.1671-7872.2016.04.003

Control of Sulfide Morphology of Sulfur Free Cutting Steel SUM23HS

WANG Congdao, LI Donghui

(Research Institute, Nanjing Iron & Steel Co. Ltd., Nanjing 210035, China)

Abstract: The effect of heating process (process 1, 2) on sulfide morphology in sulfur free cutting steel SUM23HS was studied by means of heating contrast test. The morphology and distribution of the inclusions in heated square billet were analyzed with optical microscope(ON), scanning electronic microscopy(SEM) and electron probe micro-analyzer (EPMA). The temperature field of thick ness direction of square billet was simulated with ANSYS software, and the temperature field distribution in the thickness direction of the billet was obtained. Results show that for the two kinds of heating process employer in the test, sulfide morphology is closer to the spindle by using process two (heating temperature is 1 230℃, soaking time is 80 min, total time is 3 h). SUM23HS steel wire rod was produced with the two kinds of heating process, and the rod microstructure and customer status show that the cutting performance of sulfur free cutting steel of the process two is better.

Key words: sulfur free cutting steel; sulfide morphology; cutting performance

易切削钢优良的切削加工性能主要通过往钢中单独或复合加入易切削元素(S、P、Pb、Se、Te、Bi、Zr、Re等)来实现。根据钢中所含易切削元素, 可分为硫易切削钢、铅易切削钢以及复合易切削钢^[1-2]。其中硫易切削钢生产量占 80%以上, 生产硫易切削钢的主要技术难点在于控制 MnS 在钢中的分布形态及 C、Si、Mn、P、S 的成分比例, 而是 Mn、S 比例和加热温度对提高硫易切削钢的加工切削性能非常重要^[3]。

南钢生产的 SUM23HS 钢是一种低碳高硫类易切削钢, 具有良好的切削性和断屑性, 广泛应用于精密轴类零件中。由于 SUM23HS 钢硫含量高, 易与基体 Fe 结合产生低熔点 FeS, 而 FeS 与 Fe 易形成一种共晶体, 熔点在 990 ℃左右, 此钢出炉轧制时若温度控制不当, 就会产生 FeS-Fe 型共晶体, 该共晶体易引发钢出现热脆现象^[4]。文献[5]认为, 加热温度升高, 可促使硫易切削钢中 FeS 向 MnS 转变, 对硫化物形态有一定影响。文献[6]指出“纺锤状”的硫化物形态有利于提高硫易切削钢 SUM23HS 的切削性能。文献[7-8]通过优化设计加热工艺参数, 研究了高硫易切削钢的硫化物形态转变状况, 结果发现随着加热温度的提高, 硫化物长宽

收稿日期: 2016-04-14

作者简介: 王从道(1982-), 男, 安徽和县人, 工程师, 主要研究方向为钢铁热处理。

比减小,更趋近于纺锤状,后续切削性能也更优良。

基于上述文献报道可以看出,加热工艺尤其是加热温度对硫易切削钢的硫化物形态影响较大,从而影响最终切削性能。所以笔者针对SUM23HS钢设计对比加热试验,采用多种电镜手段对SUM23HS钢夹杂物组织形态进行观察,分析加热工艺参数对钢中硫化物形态的影响。通过优化加热工艺参数促使钢中FeS转变充分,同时使MnS向纺锤状形态转变,以期提高产品可切削性能。

1 试验材料与试验方案

1.1 试验材料

试验用钢SUM23HS为连铸小方坯(150 mm×150 mm),主要化学成分: $w(\text{C}) \leq 0.10\%$, $w(\text{Si}) \leq 0.10\%$, $w(\text{S}) = 0.20 \sim 0.50$, $w(\text{Mn}) = 0.70 \sim 2.00$, $w(\text{P}) \leq 0.1$, $w(\text{O}) = 0.005 \sim 0.015$,其余为Fe。由此可看出,Mn与S的质量分数之比大于3.0。

1.2 试验方案

利用步进式加热炉对方坯进行加热试验,加热过程分两个阶段,分别为加热I区和加热II区,具体加热工艺参数如表1。待方坯加热温度达到目标值出炉,在除鳞处切割取样,方坯长度为200 mm,切割时间5~6 min,再回炉升温,正常轧制。

表1 易切削钢加热工艺参数

Tab. 1 Heating process parameters of free cutting steel

加热工艺	加热 I 区温度/℃	加热 II 区温度/℃	均热温度/℃	均热时间/min	在炉时间/h
工艺一	950	1 100	1 180	≥40	2
工艺二	950	1 130	1 230	≥80	3

沿方坯切割平面的对角线方向取样,位置分别标记为表面、1/4及中心,如图1。采用光学显微镜(Optical Microscope, OM)、扫描电子显微镜(Scanning Electronic Microscopy, SEM)以及电子微探针分析仪(Electron Probe Micro-Analyzer, EPMA)进行组织观察,另外观察最终盘条样组织。

采用软件ANSYS对方坯厚度方向温度场进行计算,模拟加热过程中整个厚度方向的温度分布状况,得出方坯实际温度与设定温度的偏差程度。

2 试验结果与分析

2.1 OM组织分析

图2为铸态方坯未加热组织,夹杂物中黑色物质为氧化物(由后面SEM与EPMA确定为MnO)。由文献[9-10]可知,高温相MnO在浇注过程中形成弥散的质点,这些质点作为低温硫化物生长的核心。MnO的含量与分布对MnS的形态与数量有影响,这也是SUM23HS钢氧含量过高的机理所在。

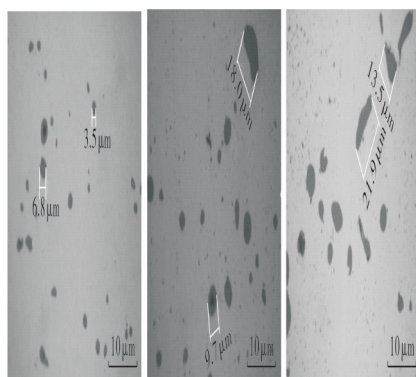


图1 取样示意图

Fig. 1 Schematic diagram of sampling

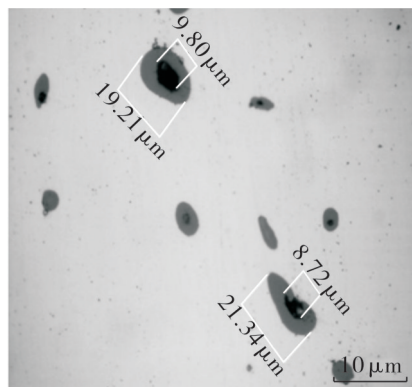


图2 铸态未加热组织

Fig. 2 Microstructure of as-cast without heating

图3,4为2种加热工艺条件下沿方坯对角线所取试样的硫化物状态。由图3,4可知:2种工艺下硫化物的形态、分布相似;工艺二的硫化物生长核心MnO略少于工艺一,说明工艺二硫化物转变更充分。由文献[11]可知,硫易切削钢中,氧化物及硫化物高温析出时,主要是Mn、Fe原子的扩散,Mn会向核心扩散并逐渐长大,Fe向外扩散。温度升高,MnS较FeS更易形成,所以高温有利于硫易切削钢硫化物中硫化锰的转变。

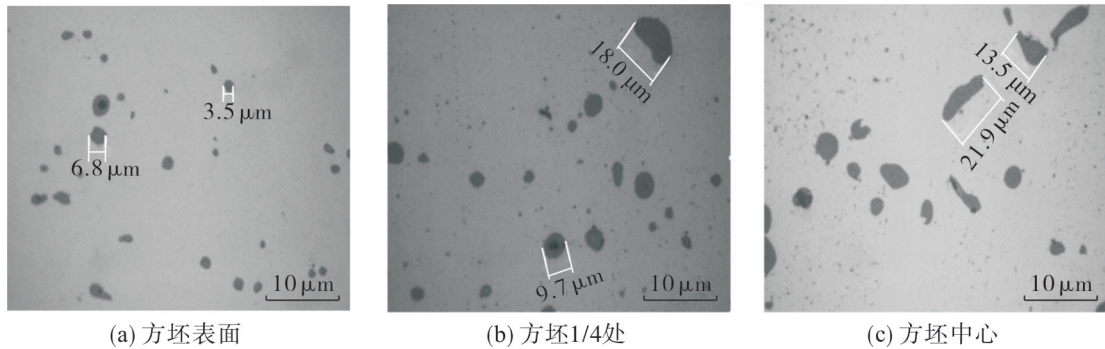


图3 工艺一条件下加热的方坯夹杂物

Fig. 3 Billet inclusion of process 1 with heating

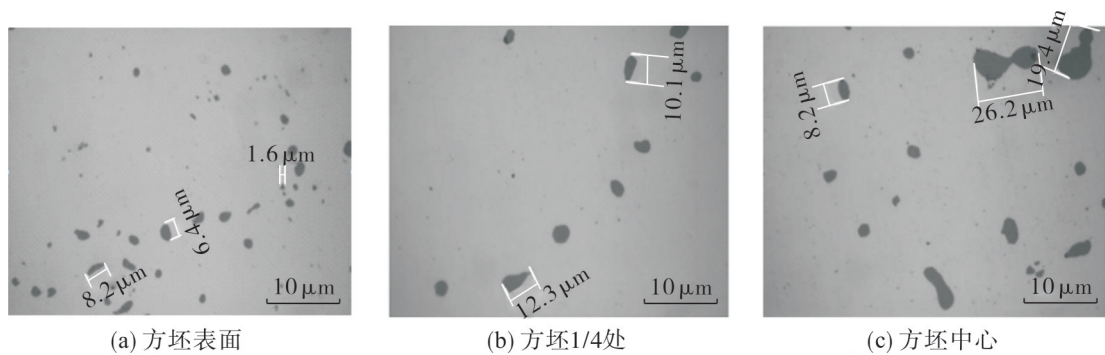


图4 工艺二条件下加热的方坯夹杂物

Fig. 4 Billet inclusion of process 2 with heating

2.2 SEM组织观察

为了解硫化物形貌以及主要元素S、Mn、O、Fe的相对含量,选择铸态未加热、工艺一与工艺二条件下的3种坯料,利用金相试样继续进行扫描电镜与成分能谱分析,结果如图5。

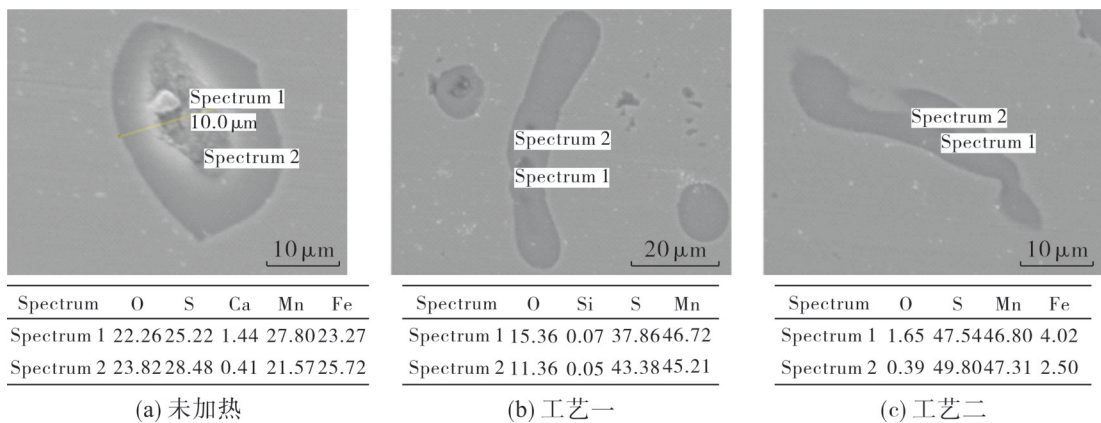


图5 SEM形貌及能谱分析(原子数分数/%)

Fig. 5 Morphology and energy spectrum analysis by SEM (atomic number fraction/%)

由图5的SEM形貌可知,未加热条件下,黑色物质明显大于加热态的,经能谱分析黑色物质主要为MnO或其复杂锰铁氧化物,而加热态黑色氧化物明显降低。由此可知,加热会促使硫化物的形成。由能谱分析可知高温加热的Mn、S含量要高于低温加热的,且温度越高,硫化物转变越充分。

2.3 EPMA 组织观察

为进一步观察坯料夹杂物相形貌、主要元素的分布状况。利用电子探针(EPMA)对铸坯进行观察与分析, 主要进行面扫描、夹杂物形貌观察以及物相形貌鉴别。图6为夹杂物形貌以及元素分布, 图7为FeS与MnO的形貌。

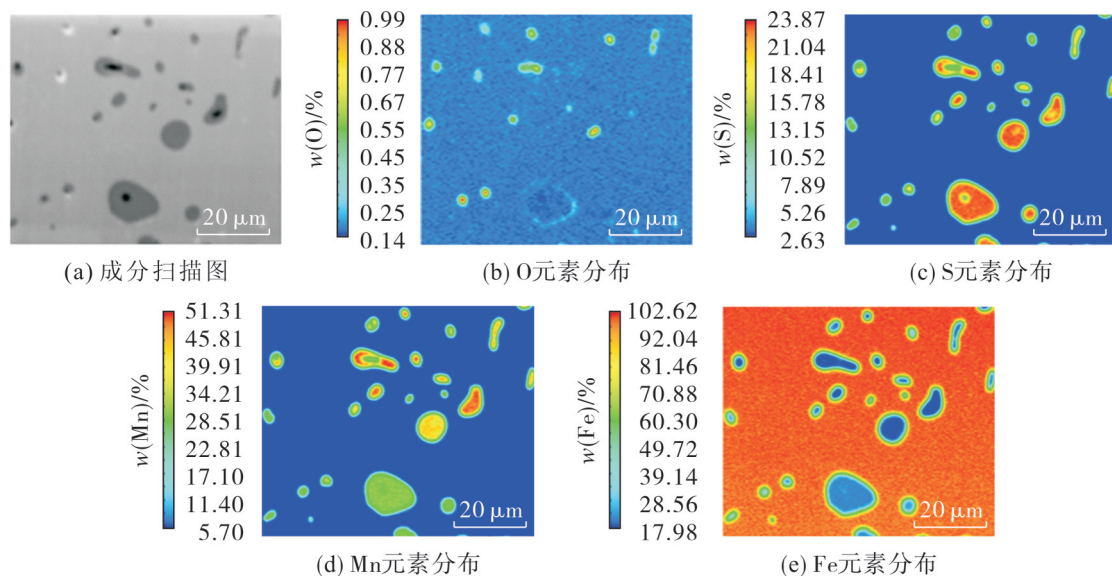


图6 EPMA面扫描

Fig. 6 Mapping of EPMA

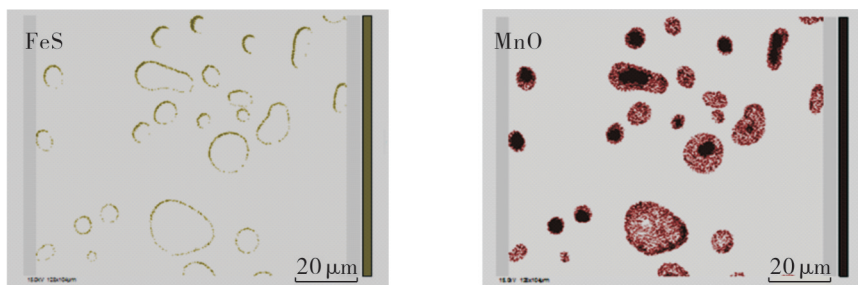


图7 EPMA形貌相

Fig. 7 Morphology of EPMA

由图6可知Mn、O元素分布在夹杂物的中心处, Mn、S主要围绕夹杂物中心分布, 最外延的为S、Fe元素。由图7可以进一步了解FeS、MnO两相的分布状态, MnO为黑色质点, 包裹MnO的为外延生长的FeS, 由此推断这种复合夹杂物形成的模式是硫化物以氧化物为核心而外延形成的。由文献[11]可知: 硫化物的转变是以高温氧化物为核心, S与氧化物中的O发生置换而生成硫化物; 且Mn向内扩散, Fe向外扩散, 在夹杂物内外分别生成MnS与FeS, 且MnS的生长较FeS具有优先性。

2.4 仿真计算

依据工艺一与工艺二设定的加热工艺参数, 利用仿真软件ANSYS对方坯加热过程进行模拟计算。参考文献[12]中加热炉加热模拟计算模型的建立方法, 确定本次模拟计算条件为: 将加热炉视为一个三维空间, 钢板模型为三维体, 且为对称体; 换热方式主要为辐射传热, 并考虑对流换热; 钢坯与辊道接触传热不计; 忽略钢坯表面氧化对传热的影响; 钢板入炉初始温度为30℃, 初始时间为0s, 炉内运行速度视为匀速。图8, 9为2种加热工艺条件下方坯出炉前厚度方向的温度场分布和加热曲线。

由图8, 9可知: 工艺一条件下均热段温差在10℃以内, 最高温度值低于设定温度约25℃; 工艺二条件下均热段温差在10℃以内, 最高温度值低于设定温度约10℃。这是因为加热炉整体上可视作三维空间, 炉子通过烧嘴供热, 形成不同等势面温度场, 炉子热电偶靠近热源供给处, 测得的温度要高于方坯实际加热温度。由此可知: 通过仿真计算可了解方坯实际温度以及厚度方向温度场, 为加热工艺参数分析提供依据; 工

艺二条件下方坯实际温度较工艺一的更接近设定温度,较长的保温时间设定既有利于温度达标,同时转变动力学条件充分;工艺二条件下方坯厚度方向温差小,其硫化物形态转变相对均匀,有利于改善硫易切削钢的加工切削性能。

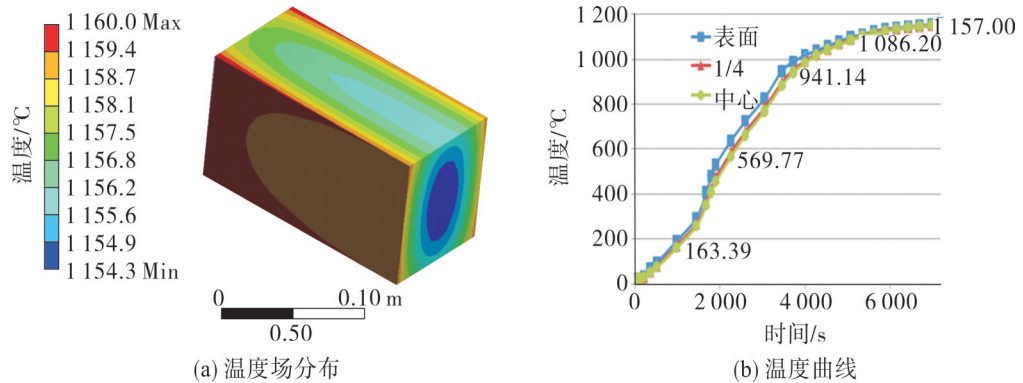


图8 工艺一条件下方坯温度场模拟计算结果

Fig. 8 Simulation calculation results of temperature field of square billet under process 1

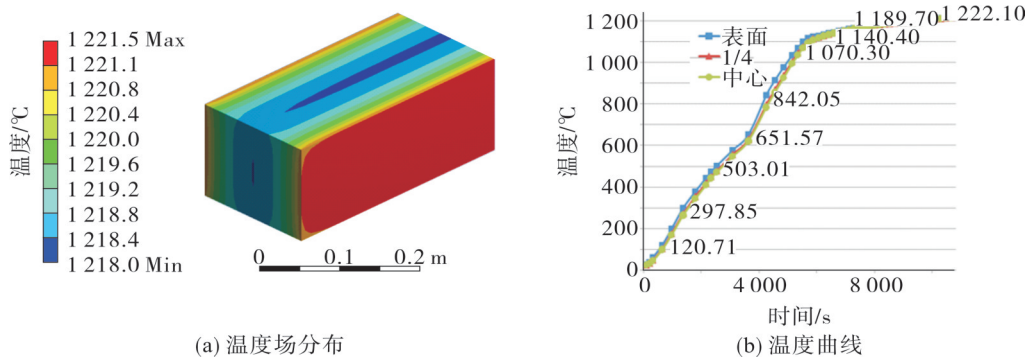


图9 工艺二条件下方坯温度场模拟计算结果

Fig. 9 Simulation calculation results of temperature field of square billet under process 2

综上所述认为, SUM23HS 钢中硫和氧含量较高, 实际生产中钢中全氧质量分数控制在 150×10^{-6} , 钢中存在大量纺锤状(多与氧化物结合)和条状的硫化锰夹杂物。这类夹杂物在切削时起润滑作用, 可降低切削阻力, 从而提高切削性能及车刀寿命。SUM23HS 钢中夹杂物的特点是纯硫化锰夹杂物为条状, 长径比较大; 而氧化物复合的夹杂物为纺锤状, 长径比较小。硫化锰包裹脆性的 Si/Mn/O 复合夹杂物限制了 MnS 的伸长, 致使 MnS 更易变为纺锤形, 降低了 MnS 的长径比, 改善了钢的切削性能^[13-14]。

3 实施效果

采取上述 2 种加热工艺, 批量生产硫易切削钢 SUM23HS 盘条各 10 只。观察最终盘条金相组织, 并进行硬度检测, 结果分别如图 10 及表 2。

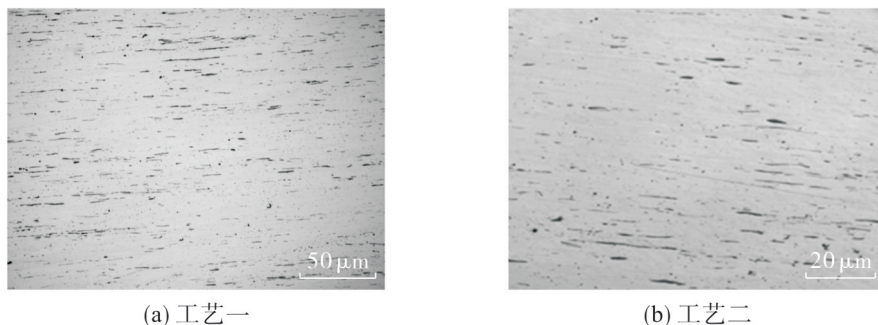


图10 2种工艺下盘条的夹杂物形貌

Fig. 10 Inclusions morphology of wire rod under two kinds of process

图10中,工艺一条件下的夹杂物细长,而工艺二条件下的夹杂物相对短而粗。在整个视场中,工艺一中夹杂物长宽比大于工艺二的,说明工艺二的夹杂物形态更接近“纺锤状”,这有利于改善SUM23HS钢的切削性。也进一步证明加热温度适当提高可形成有利的硫化物形态,有益于改善SUM23HS盘条的后续加工切削性。

由表2可知,工艺一条件下盘条硬度从表面到中心呈下降趋势,工艺二条件下整体硬度较均匀,两者平均硬度相差不大。硬度差波动小更有利于改善SUM23HS钢的切削性能,表明在改善SUM23HS钢的切削性能方面,工艺二的参数设定优于工艺一。跟踪客户使用情况,SUM23HS钢的切削性能部分参数如表3。由表3可看出,工艺二条件下SUM23HS钢的切削性优于工艺一。由此进一步表明,工艺二条件下的盘条夹杂物形态更接近“纺锤状”,SUM23HS钢的切削性能更优。

表2 盘条硬度测量值/HV

Tab. 2 Hardness measurements of wire rod/HV

工艺	表面	1/4处	中心	平均
工艺一	141	135	123	133
工艺二	133	130	129	131

表3 切削性能参数

Tab. 3 Cutting performance parameters

工艺	切削30 min后 刀具磨损/mm	加工表面 粗糙度/ μm	备注10只 平均值
工艺一	0.096	0.78	平均值
工艺二	0.120	0.88	

4 结 论

1) SUM23HS硫易切削钢夹杂物中黑色物质为MnO, MnO质点作为低温硫化物生长的核心,其含量与分布对MnS的形态与数量有影响。

2) 由SEM、EPMA分析可知,SUM23HS硫易切削钢中FeS是在夹杂物外延生长的,而MnO是硫化物转变的核心。

3) 由模拟可知:相比较工艺一,工艺二的方坯实际温度更接近设定温度;方坯的厚度方向温差小,硫化物形态转变相对均匀。

4) 现场实施以及客户使用情况表明,相比较工艺一,工艺二条件下的SUM23HS钢盘条夹杂物形态更接近“纺锤状”,有利于改善SUM23HS钢的切削性能,也即工艺二条件下SUM23HS钢的切削性优于工艺一。

参考文献:

- [1] 蒋光辉,古隆建,施哲,等. 易切削钢现状与发展趋势[J]. 四川冶金, 2006, 28(5):10-14.
- [2] 袁武华,王峰. 国内外易切削钢的研究现状和前景[J]. 钢铁研究, 2008, 36(5):56-62.
- [3] 田树生,周小丽,徐瑞军. 硫系易切削钢的研发[J]. 金属材料与冶金工程, 2008, 36(6):17-21.
- [4] 杨伟宁,徐萝明,常红英,等. 低碳高硫易切削钢裂纹成因分析[J]. 物理测试, 2007, 25(4):36-40.
- [5] 梁皖伦,方金凤. 易切削钢热加工工艺参数的确定[J]. 钢铁, 2003, 38(10):39-41.
- [6] 王宏斌,林腾昌,段飞虎,等. 低碳高硫易切削钢的切削性能研究[J]. 钢铁, 2011, 46(11):82-85.
- [7] 王妮燕,蒋仕军,罗军,等. Y45S20易切削钢的工艺优化[J]. 钢铁, 2002(10):48-51.
- [8] 蒲玉梅. 易切削线材的开发研究[J]. 金属制品, 2004, 30(2):19-22.
- [9] 刘克俭,王祖宽,杨桂荣. 钢中硫化物夹杂的产生及其形态控制[J]. 河北理工学院学报, 2001, 23(1):21-23.
- [10] 夏云进,王福明,王金龙,等. 氧含量对易切削钢中硫化物生成行为的影响[J]. 北京科技大学学报, 2010, 32(10):1271-1276.
- [11] 段飞虎,朱荣,林腾昌. 硫系易切钢中氧含量对硫化物形成的影响[J]. 钢铁研究学报, 2012, 12(2):36-43.
- [12] 钱海伦,李朝祥,吴承勇. 连续加热炉通用在线数学模型[J]. 安徽工业大学学报(自然科学版), 2009, 26(2):131-134.
- [13] 秦春节,夏明哲,屠立群. 夹杂物对易切削钢性能的影响机理研究[J]. 浙江工业大学学报, 2015, 43(4):412-415.
- [14] 滕梅,宋凤立,李吉夫,等. 硫对Y40CrCaS易切削钢性能的影响[J]. 钢铁研究学报, 1995, 7(1):16-23.

责任编辑:何莉