

· 工艺技术 ·

MnS 形态和轧制参数对高硫易切削不锈钢 430F 成材率的影响

吴翔宇^{1,2} 王高峰^{1,2} 李杰^{1,2} 王建强³ 沈平^{1,2} 付建勋^{1,2}

(1 上海大学材料科学与工程学院先进凝固技术中心, 上海 200444; 2 上海大学高品质特殊钢国家重点实验室, 上海 200444; 3 攀钢集团四川长城特殊钢有限责任公司, 江油 621000)

摘要 采用了扫描电镜、超高温激光共聚焦显微镜、Gleeble-3500 等试验设备结合专业图像处理软件分析了 430F 钢轧材的开裂原因, 各元素的改质效果及机理以及高温力学性能。结果表明, 430F 钢中 MnS 形态控制较差, 长条状 MnS 所引起的细小裂纹是造成轧材开裂的主要原因; 镁改质形成的细小 $\text{MnS} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{MgO}$ 以及碲改质形成的粗大 $\text{MnS} \cdot (\text{Te})$ 都使 MnS 的形貌得到了明显改善, 未发现轧材裂纹; 430F 钢材的断面收缩率在高温段变化较为明显, 而抗拉强度在低温段的变化较为显著, 因此, 将未改质钢开轧温度由 1 180 °C 提高至 1 200 ~ 1 210 °C, 终轧温度由 1 000 °C 降低至 970 ~ 980 °C, 成材率由 85% 提高至 95%。

关键词 430F 高硫易切削不锈钢 MnS 改质 轧制参数 成材率

Effect of MnS Morphology and Rolling Parameters on Yield of high Sulfur Free Cutting Stainless Steel 430F

Wu Xiangyu^{1,2}, Wang Gaofeng^{1,2}, Li Jie^{1,2}, Wang Jianqiang³, Shen Ping^{1,2} and Fu Jianxun^{1,2}

(1 Center for Advanced Solidification Technology, School of Materials Science and Engineering, Shanghai University, Shanghai 200444; 2 State Key Laboratory of Advanced Special Steel, Shanghai University, Shanghai 200444; 3 Pangang Group Sichuan Great Wall Special Steel Co Ltd, Jiangyou 621000)

Abstract The cracking formation factors of steel 430F rolled bar are analyzed by scanning electron microscope, ultra-high temperature laser confocal microscope, Gleeble-3500 and other experimental equipment combined with professional image processing software, the modification effect and mechanism of each element and the high temperature mechanical properties. The results show that the control of MnS morphology in 430F steel is poor, and the tiny crack caused by long strip MnS is the main reason for cracking. Fine $\text{MnS} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{MgO}$ is formed by magnesium modification and coarse $\text{MnS} \cdot (\text{Te})$ is formed by tellurium modification to obviously improve the morphology of MnS, no cracks were found in the rolled products. The reduction of area of steel 430F changes obviously at high temperature, while the tensile strength changes significantly at low temperature, therefore, with increasing the starting rolling temperature of unmodified steel from 1 180 °C to 1 200 ~ 1 210 °C and reducing the final rolling temperature from 1 000 °C to 970 ~ 980 °C, the yield of products can increase from 85% to 95%.

Material Index 430F High Sulfur Free Cutting Stainless Steel, Modification of MnS, Rolling Parameter, Yield

430F 钢是在传统不锈钢 430 的基础上添加了 S 元素后研发出的一种高硫易切削不锈钢, 主要用于制造各种自动机床零件, 该钢种具有优良的切削性能, 可以极大降低其机械加工难度, 有利于提高生产效率并减少刀具的磨损^[1-2]。但也正因为其硫含量过高, 形成的大量硫化物导致了该钢种在轧制过程中极易发生轧材劈头的开裂情况, 严重降低了产品的成材率^[3-5]。

针对易切削不锈钢存在的轧材开裂问题, 目前的解决方法主要有两种, 分别为硫化物改质处理以及轧制温度调控处理。其中硫化物改质处理是通过向钢中添加 Mg ^[6]、 Bi ^[7]、 Te ^[8] 等元素对硫化物的形

貌进行调控, 从而缓解硫化物引发的轧材开裂问题; 而轧制温度调控处理则是通过调整轧材的热轧温度以避开材料的高温脆性区, 保证轧材拥有良好的力学性能, 从而提高其抗裂纹能力^[9-11]。

本文采用超高温激光共聚焦光学显微镜、扫描电镜以及 Gleeble-3500 等实验设备配合专业的图像分析及处理软件对高硫易切削不锈钢 430F 进行了表征分析, 系统研究了 430F 钢轧材的开裂原因以及不同元素改质后的硫化物对成材率的影响机理及其在高温下的力学性能。

1 生产工艺及试验材料

试验材料为钢厂生产的 3 炉 430F 高硫易切削

通讯作者: 付建勋, 博士, 教授, 上海大学高品质特殊钢国家重点实验室, 上海 200444

E-mail: fujianxun@shu.edu.cn

表1 试验430F钢的化学成分/%

Table 1 Chemical compositions of test steel 430F / %

炉次	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mg	Te
A	0.13	0.45	1.15	0.030	0.34	17.25	0.04	-	-
B	0.12	0.43	1.18	0.030	0.35	17.18	0.04	0.001	-
C	0.12	0.44	1.17	0.030	0.35	17.14	0.04	-	0.012

不锈钢,对其编号为A、B、C,该钢种的生产流程为:40 t EAF→AOD→LF→连铸→连轧,其中B、C为LF精炼末期分别向钢包中喂入含Mg和含Te包芯线的对比炉,采用ICP-AES对其进行元素检测得到的结果如表1所示。3炉试样的铸坯断面均为200 mm×200 mm,在1 180 ℃的开轧温度以及1 000 ℃的终轧温度下,分别试轧了5支,最终产品规格为Φ8.5 mm,但A炉次中有1支在粗轧至Φ100 mm时发生了开裂现象。

2 轧材开裂原因分析

2.1 裂纹分析

图1为A炉次轧制过程中的开裂试样,先采用线切割机沿试样裂纹对其进行切割后,随后使用超声波震荡器对表面的油污进行清洗,最后在扫描电镜下沿着裂纹边部对其进行观察,不同放大倍数下裂纹周围的形貌如图2所示。从图2中可以看出,宏观裂纹的边部还存在着更为细小的微裂纹,严重破坏了钢基体的连续性,轧制过程中在轧机的压力作用下,这些细微裂纹开始不断扩大,最终造成轧材表面的开裂。而通过进一步的分析可以发现,这些细微裂纹还延伸出大量的长条状硫化物,能谱分析显示,硫化物为MnS,也正是由于这些MnS呈长条状,加剧了钢材的各向异性,诱发了细微裂纹的形成^[12],从而造成了轧制过程中轧材的开裂现象。

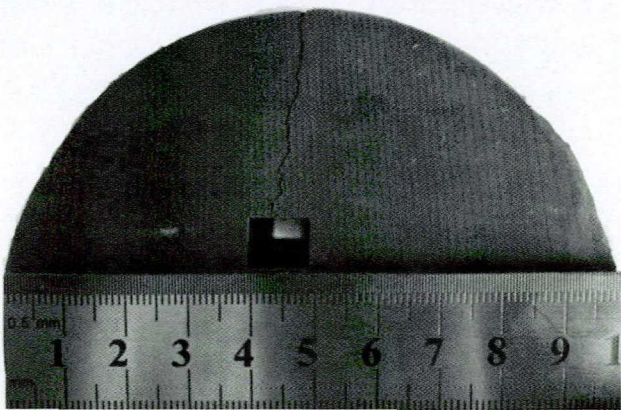


图1 430F钢Φ100 mm轧材开裂形貌

Fig. 1 Cracking morphology of Φ100 mm rolled bar of steel 430F

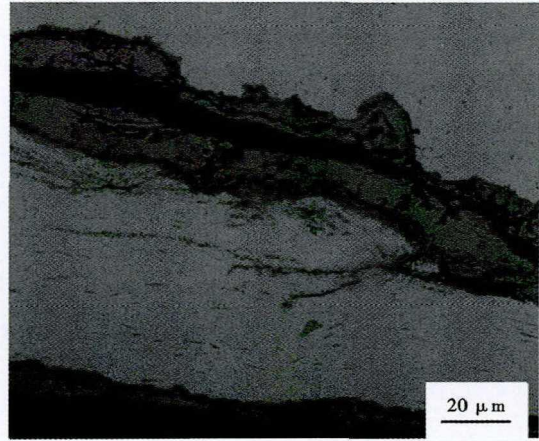


图2 430F钢Φ100 mm轧材裂纹周围形貌,SEM

Fig. 2 Morphology around crack of Φ100 mm rolled bar of steel 430F, SEM

2.2 硫化物高温原位动态观察

由于430F钢是高硫易切削钢,S含量超过0.33%,S不仅会与Mn形成MnS夹杂物,也有可能与Fe形成FeS,其熔点为1 190 ℃,而Fe与FeS形成的共晶物熔点则更低只有985 ℃,因此如果有FeS以及Fe与FeS形成的共晶物存在的话,1200 ℃左右的轧制温度下会导致其发生熔化形成液相,造成晶界的破坏,同样会引发轧材的开裂。因此为了确定在轧制温度下是否有液相产生,采用高温激光共聚焦显微镜对A炉次Φ100 mm轧材中的硫化物进行高温原位动态观察。为了防止样品的氧化,整个实验在Ar气保护气氛下进行,在加热至1 190 ℃后进行保温,整个观察结果如图3所示。从图3中可以看出,整个加热及保温过程中,硫化物边缘轮廓未出现明显变动,也未出现液相,因此轧材的开裂现象不是由低熔点Fe与FeS形成共晶物所造成的,所以长条状MnS是引发轧材开裂的主要原因。

3 硫化物改质对比分析

3.1 改质效果对比

由上述分析可知,430F钢轧材开裂的主要原因是MnS形态控制较差,而且MnS评级可以定性地反映出轧材中MnS形态与分布状况,因此,为研究430F钢中硫化物的整体控制情况以及Mg、Te的改质效果,分别对3炉轧材进行了MnS的评级,由于430F钢属于高硫易切削不锈钢,传统的国标评级方法已经不再适用,所以采用德国标准DIN 50602-1985评级方式更为准确。按GB/T10561-2005《钢中非金属夹杂物的测定》进行制样,在光学显微镜100X的放大倍数下拍照20张,选取最恶劣的一张

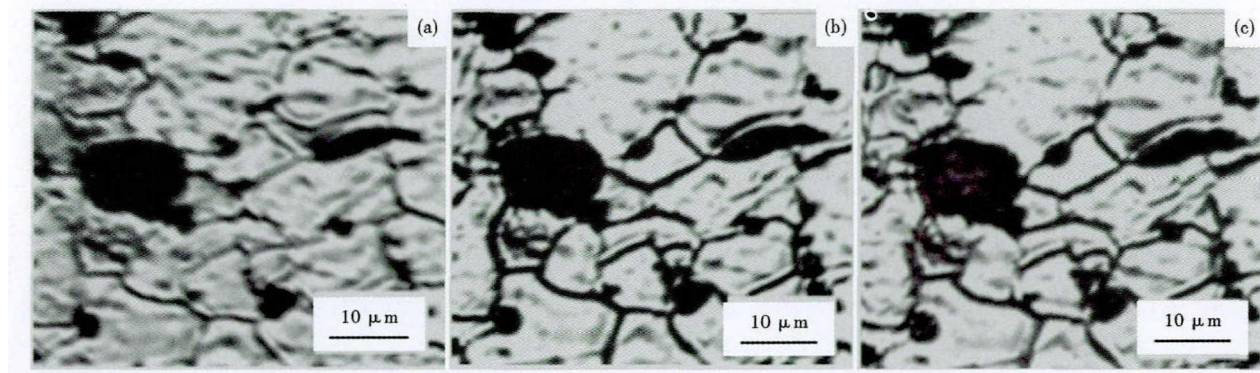


图 3 430F 钢硫化物高温原位动态观察,1 190 °C,1 min(a),3 min(b)和 5 min(c)

Fig. 3 In situ dynamic observation of sulfide in steel 430F at high temperature 1 190 °C for 1 min (a), 3 min (b) and 5 min (c)

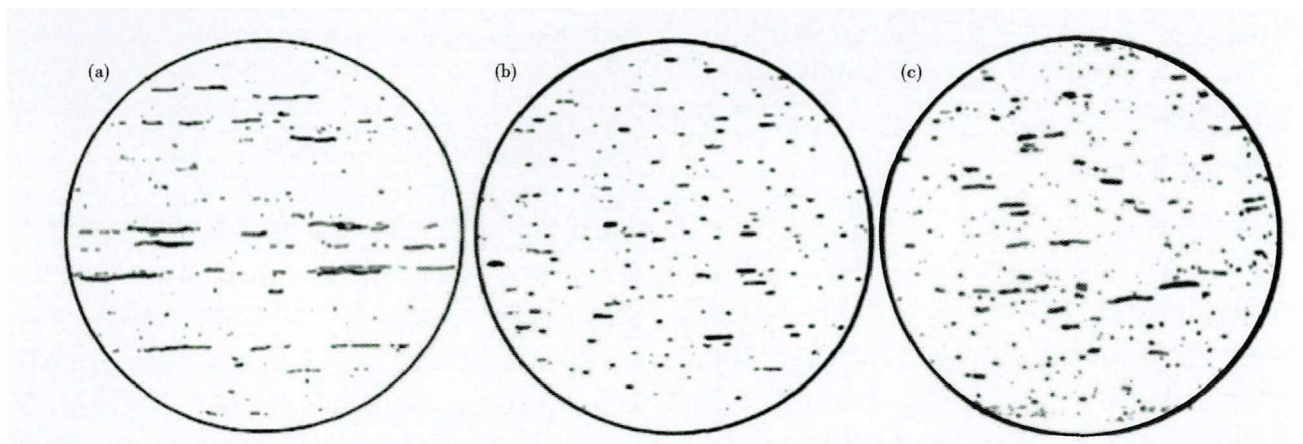


图 4 430F 钢 Φ100 mm 轧材 MnS 形貌:炉次 A(a);B,0.001% Mg(b)和 C,0.012% Te(c)

Fig. 4 Metallographic photos of MnS in Φ100 mm rolled bar of steel 430F: heat A (a); B, 0.001% Mg (b) and C, 0.012% Te (c)

金相照片与图谱进行比对,为了更好的与黑白图谱标准比较,采用 Imagej 图像处理软件对金相照片进行了黑白翻转,得到的各炉次的评级结果如图 4 所示。

从图 4 中可以看出,未采用任何改质处理的 A 炉次轧材中的 MnS 形态控制是最差的,只达到了长-宽比 3-1,基本都呈长条状,表明在轧制过程中 MnS 发生了较大的形变,极大增加了轧材开裂的几率。而 B、C 炉次中 MnS 形态控制得较好,分别达到了 1-2 以及 2-1, MnS 均被改质为短棒状且分布均匀。但值得注意的是, B 炉次中经 Mg 改质后的 MnS 过于细小且弥散分布,会对切削性能造成一定的影响^[13]。

由于德标评级处理只能起定性分析的作用,因此为进一步探究元素改质对 MnS 形貌及分布的影响,采用 Image-Propuls 图像处理软件分别对各炉次的 20 张金相照片进行了处理和统计,考虑到软件分辨精度的关系,本试验中统计的硫化物尺寸 > 1 μm,计算得到的硫化物尺寸及密度如表 2 所示。从

图 4 中可以看出,统计结果与评级结果较为相似, Mg 改质的 B 炉次中 MnS 变得更为细小,因此 B 炉次中长-宽比在 1-2 的 MnS 占比最多,达到了 56%,其密度也最高,为 1 293 个/mm²,表明在轧制过程中 MnS 只发生了较小的形变,依然保持良好的形状,其对轧材开裂的影响程度也最小。但其平均等效直径也最小,仅为 1.7 μm,一定程度上会影响轧材的切削性能^[13]。而 Te 改质的 C 炉次中 MnS 的平均等效直径达到了最高的 3.8 μm,长-宽比在 1-2 的 MnS 所占比例与未改质的 A 炉次相比也有了较大的提高,达到了 40%,这表明 Te 可以在保持轧材良好切削性能的前提下进一步提高其成材率。

表 2 各炉次 430F 钢轧材中 MnS 数量及尺寸
Table 2 Quantity and size of MnS in rolled bar of steel 430F for each heat

炉次	不同长-宽比夹杂物所占比例/%			夹杂物平均等效直径 / μm	单位面积夹杂物数量 / (个·mm ⁻²)
	1-2	2-3	>3		
A	22	48	30	3.2	968
B	56	27	13	1.7	1 293
C	40	41	19	3.8	854

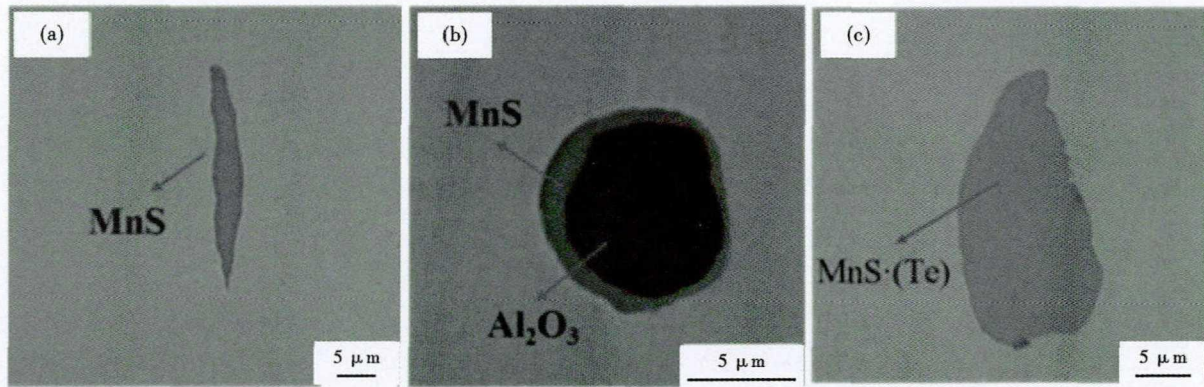


图5 430F 钢 $\Phi 100$ mm 轧材: 炉次 A(a); B, 0.001% Mg(b) 和 C, 0.012% Te(c) 典型 MnS 形貌, SEM

Fig. 5 Typical MnS morphology in $\Phi 100$ mm rolled bar of steel 430F: heat A (a); B, 0.001% Mg (b) and C, 0.012% Te, SEM

3.2 改质机理研究

通过金相分析可知, Mg 和 Te 都具有改质 MnS 的效果, 都可以提升轧材的成材率, 为了进一步探究其改质机理, 采用扫描电镜对 3 炉轧材中的典型硫化物进行成分解析, 得到的结果如图 5 所示。A 炉次中典型硫化物主要是长条状 MnS, B 炉次中典型硫化物为 $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{MgO} \cdot \text{MnS}$ 复合夹杂, 由于 Mg 具有异质形核的作用^[14], 其与 Al_2O_3 形成细小的 $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{MgO}$ 在 1 600 °C 时析出, 而 MnS 一般是在钢液凝固末期析出, 在析出时会以 $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{MgO}$ 为核心, 将其包裹在内, 因此其形成的复合硫化物尺寸更为细小, 形状更接近于球形, 并且由于 $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{MgO}$ 硬度较大, 因此在轧制过程中不易变形, 依然能够保持球状, 所以其改质效果最好。C 炉次中典型硫化物为椭圆球状 $\text{MnS} \cdot (\text{Te})$, 即 Te 固溶在 MnS 中, 由于固溶的 Te 具有抑制 MnS 析出并粗化其尺寸的作用^[15], 这也就是金相分析中, C 炉次中 MnS 数量最少, 但平均等效直径最大的原因, 因此相对于未改质的 A 炉次, C 炉次中 MnS 的形变更小, MnS 在轧材中可以保持形状较好的椭圆球状。

4 高温力学性能分析

虽然 Mg 和 Te 都具有良好的改质效果, 均具有提高 430F 钢成材率的作用, 但 Mg 会影响产品的切削性能, 而添加 Te 的生产成本又较高, 两种改质方法都存在一定的局限性, 虽然影响 430F 钢成材率的主要原因是 MnS 形态, 但也可以通过控制热轧温度以提高轧材在高温下的力学性能, 从而增强其抗裂纹能力, 也有利于提高产品的成材率。

因此为了得到 430F 钢在轧制温度下的力学性能, 采用 Gleeble-3500 热模拟机对 A 炉次中的铸坯进行高温拉伸。本次试验中共加工出 13 支样品,

表3 A 炉次铸坯模拟高温拉伸试验的断面收缩率和抗拉强度

Table 3 Reduction of area and tensile strength of A heat cast bloom simulated high temperature tensile test

温度 / °C	断面收缩率 / %	抗拉强度 / MPa
750	21.2	155
800	20.3	114
850	19.3	96
900	19.7	73
950	20.8	62
1 000	21.4	52
1 050	38.6	33
1 100	23.0	37
1 150	24.7	29
1 180	45.3	19
1 210	27.2	32
1 230	34.3	19
1 250	46.8	13

在加热过程中试样分别以 10 °C/s 的升温速度加热到 1 280 °C, 保温 3 min 后, 然后以 3 °C/s 的冷却速度分别将试样冷却到 750、800、850、900、950、1 000、1 050、1 100、1 150、1 180、1 210、1 230、1 250 °C, 在对其保温 60 s 后, 再以 $\dot{\epsilon} = 5 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ 的应变速率拉伸至断裂, 并即刻进行水淬。计算出试样在不同温度下的断面收缩率和抗拉强度如表 3 所示。

材料的断面收缩率反映了其在高温下发生塑性变形的能力, 而抗拉强度则表示其在发生断裂时所能承受的最大拉力, 采用 origin 软件对表 3 中的数据点进行拟合, 得到的 430F 钢高温下力学性能随温度的变化趋势如图 6 所示。从图 6 中可见, 430F 高硫易切削不锈钢的断面收缩率随温度的升高整体呈上升趋势, 而抗拉强度随温度的变化趋势则与之相反。当温度超过 1 150 °C 后, 430F 钢的抗拉强度不再发生明显变化, 但断面收缩率则开始迅速提高, 其抗裂纹能力得到极大的提升, 目前 430F 钢的开轧温度控制在 1 180 °C, 因此可以适当提高到 1 200 ~ 1 210 °C,

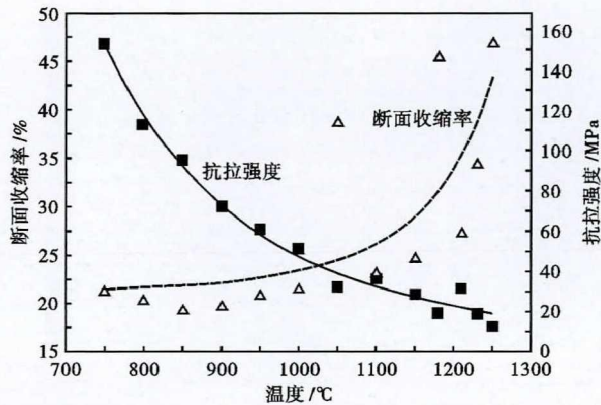


图 6 未加 Mg 和 Te 的 430F 钢铸坯力学性能随温度的变化趋势

Fig. 6 Change trend of mechanical properties of without adding Mg and Te steel 430F cast bloom with temperature

在这个温度下断面收缩率较高,且抗拉强度也有所上升,轧材具有良好的抗裂纹能力。对于终轧温度,从图 6 中可以看出,在 1 000 °C 以下,430F 钢的断面收缩率受温度影响变化较小,而抗拉强度随温度的降低得到了较大的提升,因此可以将终轧温度降低至 970 ~ 980 °C,这个温度下材料具有更高的抗拉强度,可防止变形能力的下降,减少热锻裂纹的出现。

因此将 430F 钢的开轧温度设定为 1 205 °C,终轧温度设定为 975 °C,对 3 炉铸坯再次进行轧制。

参考文献

- [1] Dong-Kuk, Kim and Dong-Geon, et al. Correlation of Microstructure and Surface Roughness of Disc Drums Fabricated by Hot Forging of an AISI 430F Stainless steel[J]. Metallurgical & Materials Transactions A, 2001, 32(5): 1111-1118.
- [2] 林企曾, 李成. 迅速发展的中国不锈钢工业[J]. 钢铁, 2006, 41(12): 1-2.
- [3] 余音宏, 潘涛, 尹建成, 等. S 含量对高速车轮钢性能和夹杂物的影响[J]. 钢铁, 2013, 48(10): 57-62.
- [4] 杨文, 杨小刚, 张立峰, 等. 钢中 MnS 夹杂物控制综述[J]. 炼钢, 2013, 29(6): 71-78.
- [5] Sui Hui, Wang Lijun and Wang Qi, et al. The Formation and Growth of Sulfides in Free - Cutting Stainless Steel[J]. Steel Research International, 2018, 89(10): 125-133.
- [6] 刘威, 杨树峰, 李京社, 等. 钙镁复合处理 20CrMnTi 钢中硫化物夹杂[J]. 钢铁, 2017, 52(12): 21-27.
- [7] Xie Jianbo, Fan Tian and Zeng Zhiqi, et al. Bi-Sulfide Existence in 0Cr18Ni9 Steel: Correlation with Machinability and Mechanical Properties[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2020, 9(4): 9142-9152.
- [8] 白旭旭, 杨树峰, 刘威, 等. 碲处理对 20CrMnTi 齿轮钢中 MnS 夹杂物改性效果[J]. 钢铁, 2019, 54(12): 35-41.
- [9] 顾佳卿, 朱朝明, 余海峰, 等. 终轧温度对 SUS444 铁素体不锈钢抗起皱性能的影响[J]. 钢铁, 2009, 44(11): 71-74.
- [10] 刘沿东, 杨一偲, 毕洪运, 等. 热轧温度对 436 不锈钢热轧织构的影响[J]. 钢铁研究学报, 2011, 23(3): 35-38.
- [11] Patra S and Singhal L K. Influence of Hot Band Annealing and Cold Rolling on Texture and Ridging of 430 Stainless Steel Containing Aluminum[J]. Materials Encees & Applications, 2013, 4(1): 70-76.
- [12] Domizzi G, Anteri G and Ovejero-Garcia J. Influence of Sulphur Content and Inclusion Distribution on the Hydrogen Induced Blister Cracking in Pressure Vessel and Pipeline Steels[J]. Corrosion Science, 2001, 43(2): 325-339.
- [13] Jiang Zhouhua, Zhuang Ying and Li Yang, et al. Effect of Modification Treatment on Inclusions in 430 Stainless Steel by Mg-Al Alloys[J]. Journal of Iron and Steel Research International, 2013, 20(5): 6-10.
- [14] Tian Xiangshen, Zhu Longfei and Cai Zhengyu, et al. The Relationship Between MnS Precipitation and Induced Nucleation Effect of Mg-Bearing Inclusion[J]. High Temperature Materials and Processes, 2018, 37(8): 711-716.
- [15] Shen Ping, Yang Qiankun and Zhang Dong, et al. The Effect of Tellurium on the Formation of MnTe-MnS Composite Inclusions in Non-Quenched and Tempered Steel[J]. Metals-Open Access Metallurgy Journal, 2018, 8(8): 639-648.

在此轧制温度下,每炉均轧制了 20 根, Mg 改质和 Te 改质的炉次均未发生开裂,并且产品表面质量得到明显提高。而未改质的 A 炉次中仅有 1 根发生开裂,产品成材率由原来的 80% 提升至 95%,改善效果十分显著。

5 结论

(1) 引发 430F 高硫易切削不锈钢轧材开裂的主要原因是长条状 MnS, 使用 Mg 和 Te 改质后,产品的成材率得到明显提高, MnS 德标评级由未改质前的长-宽比 3-1 降低到 Mg 改质后的 1-2 以及 Te 改质后的 2-1, 改质效果良好。

(2) Mg 改质的机理是形成细小且坚硬的 $Al_2O_3 \cdot MgO \cdot MnS$ 复合夹杂, Te 改质机理是固溶在钢中的 Te 与 MnS 形成尺寸更为粗大的椭圆球状 $MnS \cdot (Te)$, 两种改质方法都可以降低硫化物在轧制过程中的变形程度, 都有利于提高轧材的成材率。

(3) 430F 钢高温力学性能分析表明, 在 1 150 °C 以上材料的断面收缩率受温度影响较大, 而在 1 000 °C 以下则是材料的抗拉强度受温度的影响较大, 因此将开轧温度提高至 1 200 ~ 1 210 °C, 终轧温度降低至 970 ~ 980 °C, 可进一步提升轧材的抗裂纹能力。

国家自然科学基金资助项目(51874195, 51671124)

吴翔宇(1992-), 男, 博士生(上海大学), 2014 年江西理工大学(本科)毕业, 特殊钢工艺试验研究。

E-mail: 1003198443@qq.com

收稿日期: 2021-02-10