

# Y1Cr13 不锈钢轧材劈头开裂原因分析

吴良平, 孙 晗, 谢剑波, 吴翔宇, 付建勋\*

(先进凝固技术中心, 上海大学材料科学与工程学院, 上海 200072)

**摘 要:** 针对某厂生产的 Y1Cr13 不锈钢在轧制过程产生劈头开裂的问题, 采用金相显微镜、扫描电子显微镜、小样电解等分析检测方法, 从夹杂物微观形貌角度对钢劈头开裂样中硫化物的微观形貌特征进行了表征分析, 并探究了 Y1Cr13 不锈钢轧制时劈头开裂形成的原因。结果表明: 该不锈钢轧材存在大量长条状硫化物, 硫化物长宽比较大, 长宽比分布在 3 以内的夹杂物占比为 65.4%, 长宽比大于 3 的夹杂物占比为 34.6%, 硫化物的国标评级为: 粗系 4.5 级, 细系 5.5 级, 德标评级为 3-3 级; 钢中过多的热脆细长条状硫化锰和锰铁硫化物是劈头开裂的主要原因。采用镁、碲等新工艺可对硫化物形态进行改质, 将其控制为球形或纺锤形, 并提高硫化物硬度, 轧制时不易变形; 通过适当减少钢中的 [S] 含量以及提高钢中 Mn/S 等措施可减少钢中的 (Mn, Fe) 硫化物。

**关键词:** Y1Cr13 不锈钢; 劈头; 开裂; 硫化锰; 锰铁硫化物

中图分类号: TF76 文献标志码: A 文章编号: 1004-7638(2021)01-0176-08

DOI: 10.7513/j.issn.1004-7638.2021.01.029

开放科学 (资源服务) 标识码 (OSID):



听  
语  
音  
与  
作  
者  
互  
动  
聊  
科  
研

## Analysis on split-head cracking of Y1Cr13 stainless rolled bar

Wu Liangping, Sun Han, Xie Jianbo, Wu Xiangyu, Fu Jianxun\*

(Center for Advanced Solidification Technology, School of Materials Science and Engineering, Shanghai University, Shanghai 200072, China)

**Abstract:** In order to find out the causes of split-head cracking of Y1Cr13 stainless steel in the rolling process, the splitting samples of steel were analyzed and characterized from the view of inclusions microstructure with a metallographic microscope, a scanning electron microscope and the method of electrolytic etching. Also, the causes of split-head cracking of Y1Cr13 stainless steel during the rolling process were explored. The results show that there exist a lot of long strip sulfides in rolled steel, and the ratio of length/width of sulfides is large. The proportion of the inclusions with length/width ratio below 3 is 65.4%. The proportion of the inclusions with length/width ratio above 3 is 34.6%. The standard ratings of sulfides are 4.5 for coarse series, 5.5 for fine series, and 3-3 for German standard. A large number of long strip hot shortness manganese sulfides and ferromanganese sulfides are the main causes of split-head cracking of Y1Cr13 rolled bar. Such as magnesium and tellurium can be used to modify the form of sulfide into a spherical or spindle shape, and increase the hardness of the sulfide, making it difficult to deform during rolling. The (Mn, Fe) sulfide in steel can be reduced by properly reducing [S] content and increasing Mn/S in steel.

**Key words:** Y1Cr13 stainless steel, split-head, cracking, manganese sulfide, ferromanganese sulfide

收稿日期: 2020-05-22

基金项目: 国家自然科学基金(51874195&5167112)。

作者简介: 吴良平(1994—), 男, 硕士, 安徽广德人, 研究方向: 汽车用易切削钢研究开发, E-mail: WLPwlp@shu.edu.cn;

\* 通讯作者: 付建勋(1969—), 男, 教授, 主要研究方向为高品质特殊钢的开发、钢铁冶炼与连铸技术, E-mail: fujianxun@shu.edu.cn。

## 0 引言

Y1Cr13 不锈钢属马氏体不锈钢, 是在马氏体不锈钢 1Cr13 成分基础上增加硫形成, 含碳量低, 耐腐蚀性能好, 主要用于电磁阀、微特电机和电气等元件的生产<sup>[1-2]</sup>。然而, 国内部分钢厂在热轧生产 Y1Cr13 钢的过程中会发生劈头开裂, 严重时裂纹始自轴心部位, 并延伸至边缘致使钢坯开裂, 断口平整, 同时还存在自边缘向内部扩展的贯穿裂纹, 成坯和成材率均较低。通常地, 有效控制钢中硫化物形态是防止钢头部开裂或劈头的有效手段。因此, 对钢中硫化物形态研究尤为重要。

马宝国等人<sup>[3]</sup>对 BT303CuS 易切削不锈钢轧件劈头进行了研究, 发现轧件劈头与钢中硫化物的形态有关。王维宁<sup>[4]</sup>的研究表明, Y1Cr13 钢轧制温度在 1 000 ~ 1 200 °C 范围时, 显著的硫热脆性影响和大量脆性硅酸盐夹杂的存在是造成钢坯开裂的主要诱因。张宇<sup>[1]</sup>分析了 Y1Cr13 钢轧制开裂产生的原因, 认为高硫使钢的热加工塑性降低是造成轧制开裂的原因。郝世风等人<sup>[5]</sup>的研究表明, M7 钢轧制劈头开裂的主要原因是碳化物组织分解破碎不充分。然而目前较少文献对 Y1Cr13 不锈钢劈头开裂从硫化物夹杂微观形貌(二维、三维形貌)角度进行研究, 以及对比不同显微夹杂物的形貌特征。

因此, 笔者对某厂 Y1Cr13 不锈钢劈头开裂样进行分析, 通过金相显微镜、扫描电子显微镜、小样电解等分析检测方法从夹杂物微观形貌角度对钢劈头开裂样中硫化物的微观形貌特征进行了表征分析, 探究了 Y1Cr13 不锈钢轧制时劈头开裂形成的原因, 并提出了解决劈头开裂问题的建议。

## 1 试验材料与方法

### 1.1 试验材料

某厂(A 厂)生产 Y1Cr13 不锈钢采用的生产工艺为: 40 t EAF→40 t AOD→模铸→热轧→退火。为了对比该厂硫化物的控制水平, 将它与国内两家企业(B 厂和 C 厂)生产相同工艺的 Y1Cr13 轧材作对比研究。试验钢主要化学成分如表 1 所示。从表 1 可以看出, Y1Cr13 不锈钢中硫含量较高, 属于高硫不锈钢。三种钢中锰和铬含量大致相同。

### 1.2 试样制备

首先, 由于劈头开裂试样表面有油污和部分铁

锈, 同时为了保证试样表面裂纹不被破坏, 将试样放入 10% 的柠檬酸溶液中, 然后一起放入超声波清洗机内清洗掉裂纹表面的铁锈和油污; 接着用酒精清洗柠檬酸浸泡过的试样, 除去表面的柠檬酸, 之后烘干。经清理后的试样按图 1 中的实线标记区域位置用线切割的方法进行取样, 标记为 1 号样, 此处为劈头开裂处, 存在表面裂纹, 并对 1 号样进行镶嵌; 2 号样依照 GBT 10516—2005 取轧材样四分之一中心位置, 便于分析钢样内部夹杂物的形态控制情况。1 号样和 2 号样都以沿轧制方向的轧材面为观察面。对 1 号和 2 号试样分别进行磨抛处理后, 利用蔡司光学显微镜(Zeiss AVxo)和扫描电子显微镜(Phe-nom Pro)分别对试样中的显微组织和硫化物形态进行观察。B 厂和 C 厂试样取样方式为取轧材四分之一中心处沿轧制方向的轧材面为观察面。试样大小约为: 10 mm×10 mm×10 mm。

表 1 试验钢的主要化学成分

Table 1 Main chemical compositions of experimental steels

| 厂家 | C     | Si    | Mn    | P     | S     | Cr     | Mo   | Ni    |
|----|-------|-------|-------|-------|-------|--------|------|-------|
| A  | 0.13  | 0.54  | 1.15  | 0.027 | 0.31  | 12.89  | 0.04 |       |
| B  | 0.122 | 0.229 | 0.957 | 0.026 | 0.350 | 12.300 |      | 0.105 |
| C  | 0.120 | 0.430 | 1.160 | 0.018 | 0.270 | 12.790 |      | 0.260 |

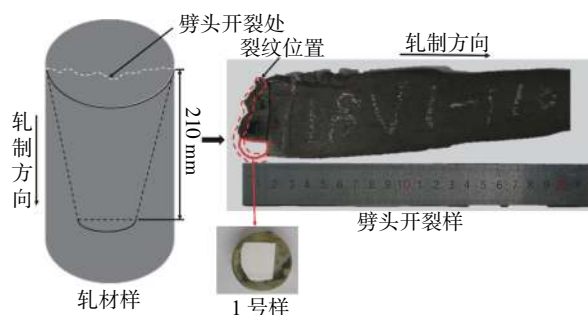


图 1 劈头开裂样及取样示意

Fig. 1 Physical model of split-head cracking of steel sample and sampling positions

## 2 试验结果与分析

### 2.1 裂纹处显微分析

将清理制备的 1 号样放入扫描电镜下观察, 如图 2 所示。从图 2 可以看出, 在裂纹内部发现一层灰黑色填充物, 出现与钢基体不一致的组织。对该组织进行能谱分析可知, 主要为 FeO, 无明显其他异常物质。原因可能为试样在轧制时表面形成氧化铁

皮,由拉拔过程导致裂纹扩展,氧化铁皮掉入裂纹缝隙处进而形成覆盖层。在裂纹边部和延展部发现细

长条状硫化物,对其进行能谱分析,结果显示为 MnS 和 (Mn,Fe)S,如图3所示。

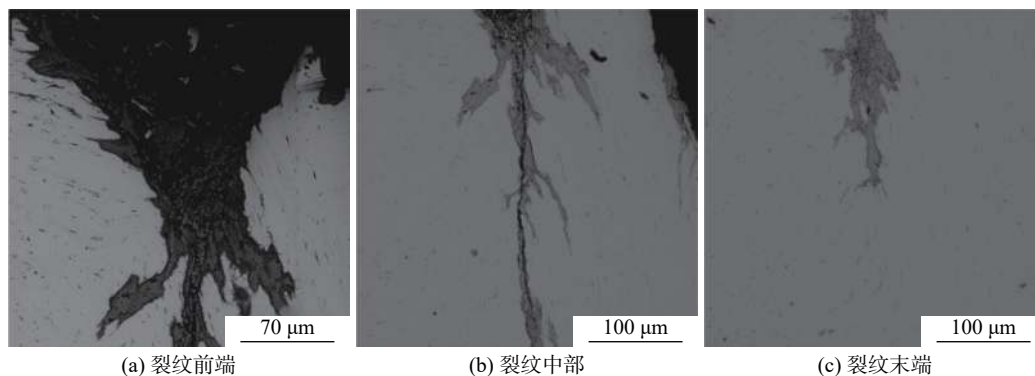


图2 劈头裂纹扫描

Fig. 2 Scanning photos showing appearances of split-head crack

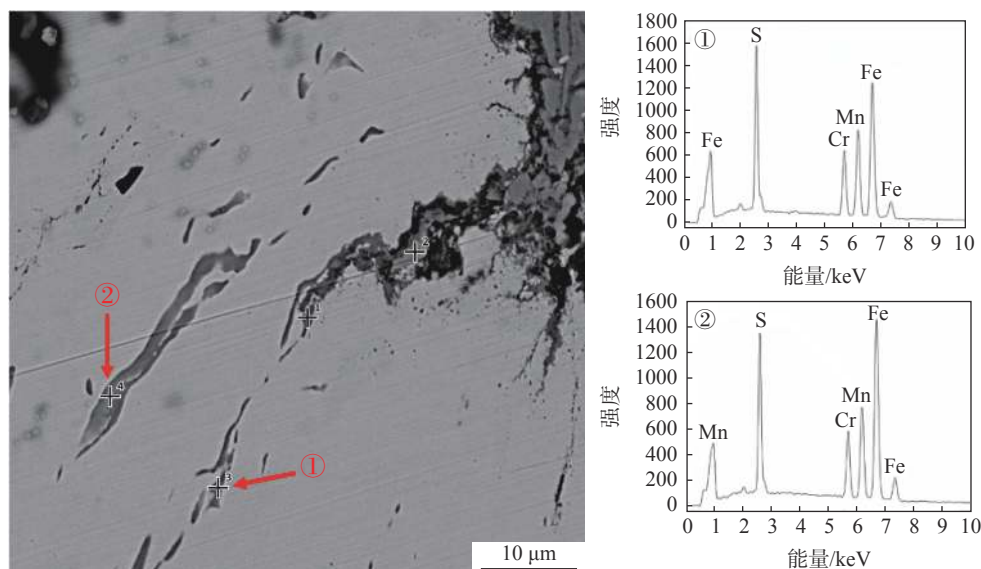


图3 裂纹边端和延展部的夹杂物及能谱

Fig. 3 Inclusions at the edge and extension of cracks and its energy spectrometry

为了观察裂纹内壁的真实形貌,对1号样进行电解腐蚀。将试样作为电解阳极,不锈钢钢片作为电解阴极,在无水电解液(1% 四甲基氯化铵-10% 三乙醇胺-甲醇)中进行恒电流、低温电解腐蚀,获得裂纹内壁的形貌,并在扫描电镜下观察<sup>[6]</sup>。电解腐蚀后的扫描照片如图4所示。从图4可以看出:在电解腐蚀后裂纹中的 FeO 夹杂已基本消除,裂纹内壁的真实形貌得以裸露出来;裂纹内壁为凹凸不平的平面,有许多与轧制方向平行的细长条状夹杂物,尺寸约为 20~60 μm,相对于基体夹杂物尺寸偏大,对图4中的细长条状夹杂物进行能谱分析,结果如图5所示,从能谱图中可以看出细长条状夹杂物为

MnS 和 (Mn,Fe)S 夹杂物。推测该厂 Y1Cr13 轧材劈头裂纹产生的原因是:硫化物形态控制较差,存在大量细长条状的 MnS 和 (Mn,Fe)S 夹杂物。

## 2.2 金相形貌分析

为了判断该厂 Y1Cr13 不锈钢中硫化物形态的控制水平,将制备的2号样在光学显微镜下(×100 倍)选取多个典型视场进行观察,如图6所示。

由图6可以看出,该厂的轧材中夹杂物主要为硫化物,且分布不均匀。大部分硫化物呈细长条状,少量为纺锤状、球状,硫化物形态控制较差。依据 GBT 10516—2005 附录,采用最恶劣视场法对该厂的 A 类夹杂物(硫化物)进行评级。评级结果为粗

系 4.5 级, 细系 5.5 级, 粗系评级较高, 说明存在大量长条状硫化物。然而与国内 B 厂和 C 厂轧材作相同评级对比发现, B 厂和 C 厂的硫化物形态控制水平较好。B 厂评级为: 粗系 3.0 级, 细系 5.5 级; C 厂

评级为: 粗系 1.5 级, 细系 5.5 级; 按照德国高硫易切削钢 SEP1572 评级图谱, 各钢厂的评级分别为: A 厂 3-3 级, B 厂 2-3 级, C 厂 2-2 级, 结果如表 2 所示。三厂试样中典型视场如图 7 所示。

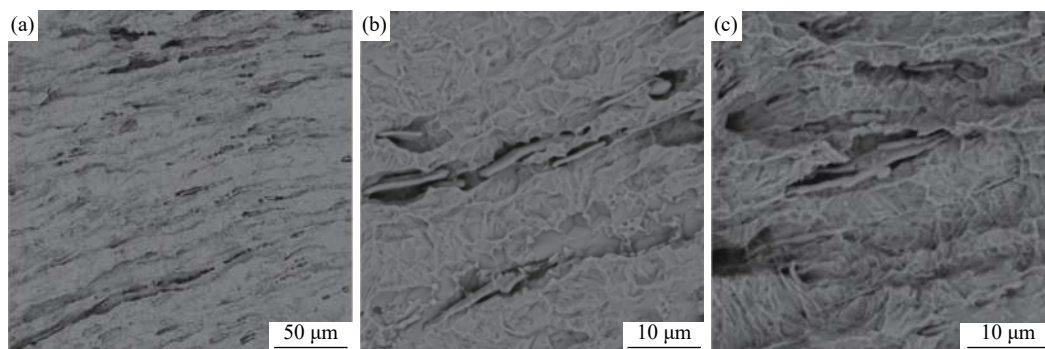


图 4 电解腐蚀后的裂纹内部三维形貌

Fig. 4 The inner three-dimensional morphologies of the cracks after electrolytic corrosion

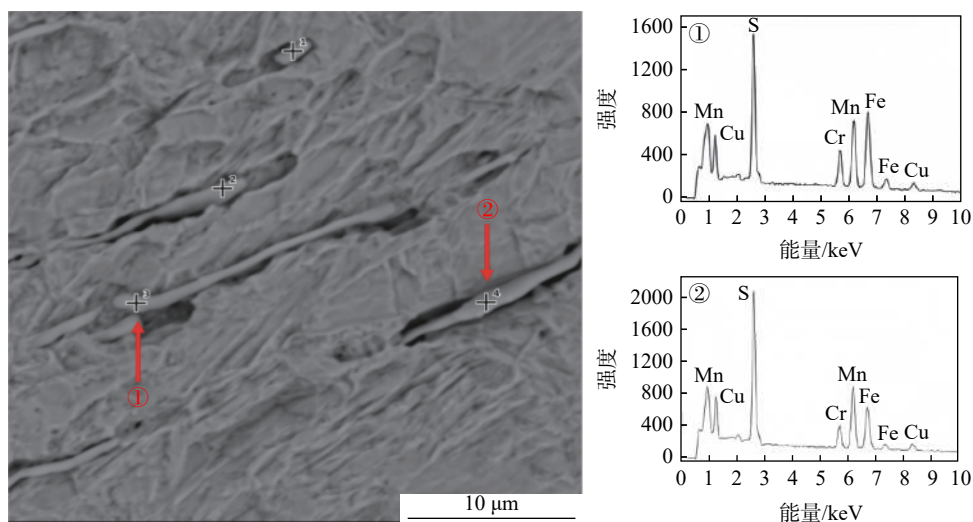


图 5 裂纹内部的细长条状夹杂物及能谱

Fig. 5 Slender long-strip inclusions inside the crack and its energy spectrometry

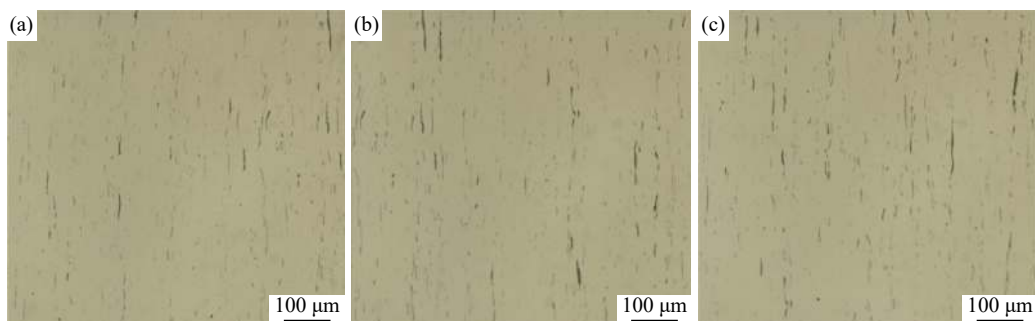


图 6 A 厂 Y1Cr13 钢的硫化物形貌

Fig. 6 The morphologies of the sulfides in Y1Cr13 steel produced by factory A

从表 2 看出, A 厂的硫化物夹杂控制水平较低, 粗系硫化物劣于 B 厂和 C 厂, 且其钢样中夹杂物的

数量和分布都不如另外两厂理想, 大型长条状硫化物夹杂较多, 故硫化物形态控制相对较差, 可能最终

导致了劈头裂纹的产生。

由于金相评级是在 100 倍照片下进行的,不能比较以上三厂硫化物的大小和数量,故进一步对以上三厂的硫化物在 200 倍金相照片下进行了统计。在光学显微镜下各选取 10 个视场对三厂的硫化物长宽比作对比,结果如图 8 所示。

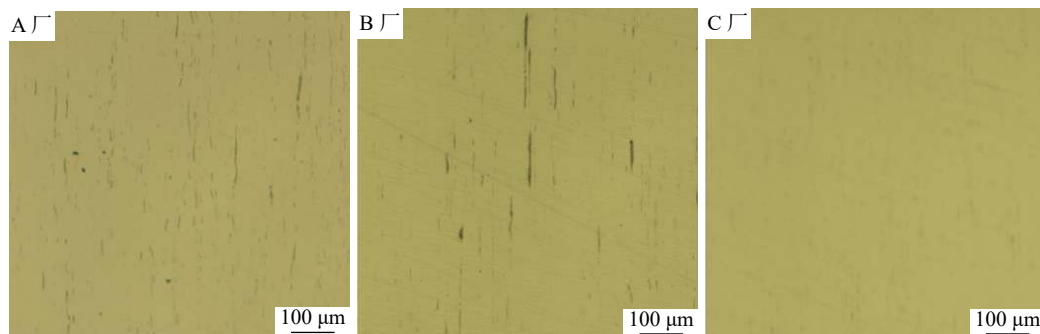


图 7 三厂试样中典型视场

Fig. 7 Typical optical morphologies of specimens provided by three plants

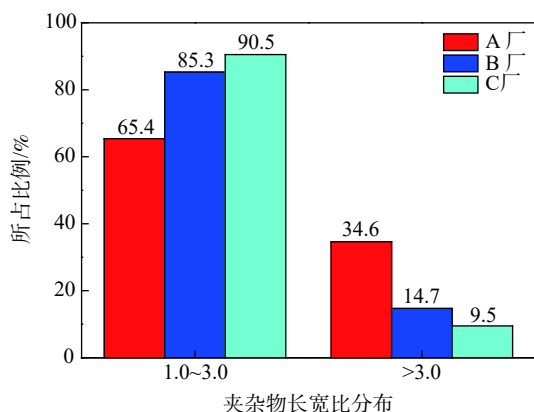


图 8 三厂 Y1Cr13 钢中硫化物长宽比对比

Fig. 8 Comparison of the ratio of sulfides in Y1Cr13 steels provided by three plants

从图 8 可以看出 B 厂和 C 厂钢样中硫化物长宽比主要分布在 3 以内, B 厂和 C 厂长宽比小于 3 的夹杂物所占比例分别为 85.3% 和 90.5%, 形态趋于短粗条状; 相比而言, 国内 A 厂钢材中硫化物长

表 2 三个厂硫化物评级对比

Table 2 Comparison of inclusions rating of samples provided by three plants

| 厂家 | 国标评级(GBT 10516—2005) | 德标评级 |
|----|----------------------|------|
| A  | 粗系4.5级, 细系5.5级       | 3-3级 |
| B  | 粗系3.0级, 细系5.5级       | 2-3级 |
| C  | 粗系1.5级, 细系5.5级       | 2-2级 |

宽比较大, 其钢样中硫化物长宽比分布在 3 以内的夹杂物占比为 65.4%, 长宽比大于 3 的夹杂物占比为 34.6%, 较另外两厂多, 可见该厂 Y1Cr13 钢中细长条状硫化物较多, 硫化物形态控制较差。

### 2.3 夹杂物形貌与成分分析

为了确定 2 号样中硫化物的成分, 将清理制备的 2 号样放入扫描电镜下观察, 如图 9 所示。从图 9 可以看出, 劈头钢样内部存在大量浅灰色夹杂物, 且夹杂物大都成细长条状分布, 尺寸可达约 60  $\mu\text{m}$ , 少量为纺锤状、球状, 分布不均, 此外, 其中也存在一些特征夹杂物。对其进行能谱分析, 结果如表 3 所示, 可知: 该浅灰色夹杂物为 MnS 和 (Mn, Fe)S 夹杂, 这些特征夹杂物为  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , 而此类夹杂并不会直接导致轧材劈头开裂; 另外也可以看出劈头钢样内部除部分 MnS 和 (Mn, Fe)S 夹杂物内部含有  $\text{Al}_2\text{O}_3$  夹杂外, 绝大多数夹杂物为热脆性的纯 MnS 和 (Mn, Fe)S, 不存在异常形态或分布的夹杂物。

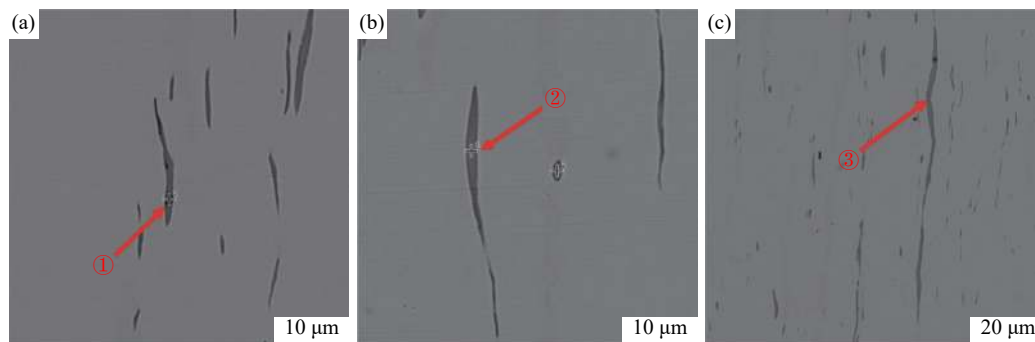


图 9 劈头样中心处的夹杂物扫描

Fig. 9 Scanning photos of inclusions at the center of the split head sample

表 3 图 9 中夹杂物原子百分比

Table 3 Atomic percentages of elements in inclusions in figure 9 %

| No. | Mn    | S     | Fe    | N     | Cr   | O     | Al    |
|-----|-------|-------|-------|-------|------|-------|-------|
| ①   | 4.07  | 4.63  | 9.01  |       | 2.28 | 42.15 | 37.86 |
| ②   | 38.83 | 34.49 | 7.99  | 11.20 | 7.49 |       |       |
| ③   | 36.58 | 28.08 | 17.13 | 11.19 | 7.01 |       |       |

为了进一步观察硫化物的三维形貌, 对 2 号样进行了电解腐蚀。电解腐蚀后的扫描照片如图 10

所示。从图 10 可以看出: 硫化物多为细长条状, 尺寸可达约 60  $\mu\text{m}$ ; 对其进行能谱分析, 结果如图 11 所示。从能谱图中可以看出细长条状硫化物为 MnS 和 (Mn,Fe)S。大量的热脆性长条状硫化物在轧制过程中随钢基体滑移形成的, 长条状硫化物周围聚集着大量应力, 一旦应力集中, 高温轧制就会形成高温轧制裂纹。

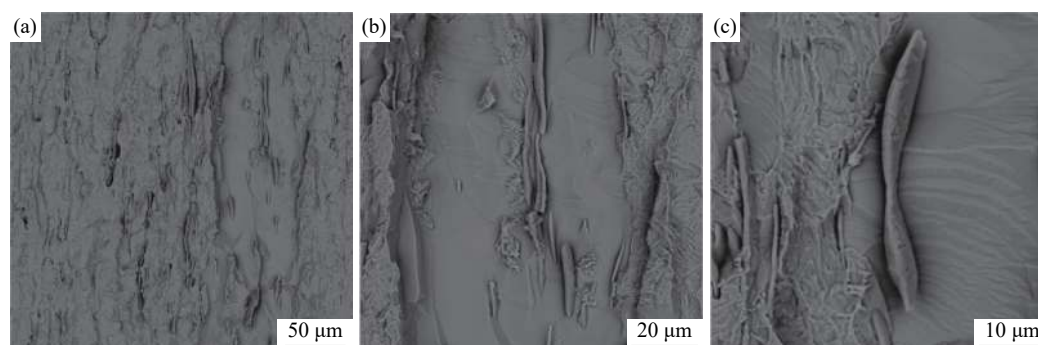


图 10 腐蚀后夹杂物三维形貌

Fig. 10 Three dimensional morphologies of the inclusions after electrolytic corrosion

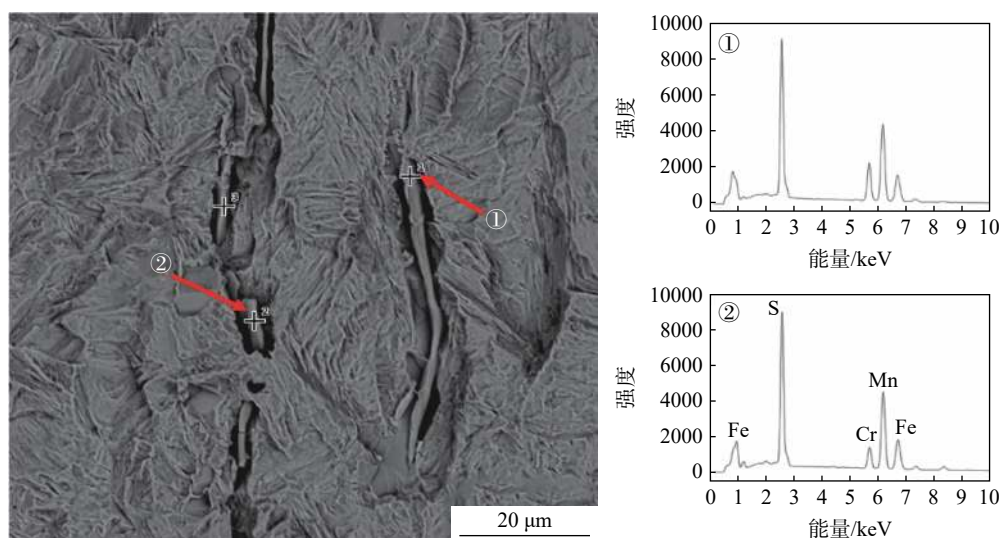


图 11 劈头样中心处的细长条状夹杂物及能谱

Fig. 11 Slender long-stripe inclusions at the center of split-head sample and its energy spectrometry

## 2.4 结果讨论

由上述试验结果及分析可知, 国内 A 厂 Y1Cr13 易切削不锈钢的劈头裂纹是由硫化物形态控制较差, 细长条状硫化锰及锰铁硫化物所导致的。易切削不锈钢中细长的硫化物会显著降低钢的横向韧性和伸长性, 而短粗状硫化物对钢的横向力学性能降低较少, 一般来说, 尺寸较大、形态为球形或纺锤形(即长宽比 $\leq 3$ )的硫化物夹杂, 在热加工时变形较小, 钢的横向力学性能降低得也少<sup>[7]</sup>, 因此, 细长条状硫化物易

导致轧制时产生劈头开裂现象。钢中 MnS 为软质相, 在轧制过程容易沿轧制方向被拉长, 变成长条状, 而后期的热处理工艺也很难使之溶解<sup>[8]</sup>。长条状 MnS 夹杂对材料性能的危害最大<sup>[9]</sup>。由于夹杂物与金属基体的弹性模量和膨胀系数不同, 在受力过程中容易在夹杂物的尖角处产生应力集中, 甚至产生微裂纹<sup>[10-11]</sup>。当夹杂物大到一定的尺寸时, 夹杂物与基体为非共格关系, 与基体的结合力较低, 容易成为裂纹扩展的通道<sup>[12]</sup>。(Mn,Fe)S 也是钢中最常见的非金属

夹杂物,纯 MnS 的熔点为 1 610 ℃,当硫化锰含硫化亚铁时,熔点就相对降低,FeS 和 MnS 二元共晶温度为 1 110 ℃<sup>[13]</sup>。A 厂 Y1Cr13 不锈钢中 Mn/S 较低(<4),钢中存在大量 (Mn,Fe)S 夹杂物,其为低熔点(1 110 ℃)的固溶物,当在较高温度下轧制时,会有部分液化,液相沿着长条状硫化物分布,在受到轧制冲击力时会诱导开裂。因此,适当减少钢中的 [S] 含量并提高锰/硫比,有利于减少 (Mn,Fe)S。

钢中的夹杂物的尺寸、成分、形状和自身的各种属性(如硬度、熔点等)的差异会对钢的成品组织和性能产生各种或好或坏的影响<sup>[14-15]</sup>,针对该厂硫化物形态控制较差的问题,建议采用镁、铈等新工艺对硫化物形态进行改质<sup>[16-17]</sup>。改质剂在钢中的作用机理是:当镁添加入钢液后会优先与 [Al]、[O] 反应生成细小弥散的 MgO·Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 和 MgO;凝固末期诱导硫化物的包裹,形成“外软内硬”的复合夹杂物,故在后续轧制过程中硫化物不易变形。当铈添加到钢液后,一部分固溶到硫化锰中,另一部分在硫化锰

周围析出,形成 MnTe;固溶到硫化锰中的铈会使硫化锰硬度增加,以致轧制时硫化锰不易变形,在硫化锰周围析出的 MnTe,会包裹住硫化锰,轧制时吸收轧制应力,导致轧制时硫化锰不易变形。

### 3 结论

1)通过对 Y1Cr13 易切削不锈钢轧材劈头开裂样进行分析,发现裂纹边缘和延展部存在细长条状硫化锰和锰铁硫化物,硫化物的国标评级情况为:粗系 4.5 级,细系 5.5 级,德标评级为 3-3 级,且硫化物长宽比较大。

2)根据样品的分析检测结果推测:试样中硫化物形态控制相对较差,裂纹是由细长条状硫化锰和锰铁硫化物导致。

3)针对该厂硫化物形态控制较差问题,建议采用镁、铈等新工艺对硫化物形态进行改质;并可通过适当减少钢中的 [S] 含量以及提高钢中锰硫比等措施来减少钢中的 (Mn,Fe) 硫化物。

### 参考文献

- [1] Zhang Yu. Analysis on the causes of rolling cracking of Y1Cr13[J]. *Special Steel Technology*, 2013, (3): 17-19.  
(张宇. Y1Cr13 轧制开裂原因浅析[J]. *特钢技术*, 2013, (3): 17-19.)
- [2] Fan Zhijin, Cheng Xiufeng. Crack analysis and process optimization of high sulfur stainless steel SUSY1Cr13 in hot working[J]. *Special Steel*, 1996, (5): 42-44.  
(范植金, 程秀峰. 高硫不锈钢 SUSY1Cr13 热加工裂纹分析及其工艺优化[J]. *特殊钢*, 1996, (5): 42-44.)
- [3] Ma Baoguo, Xu Songqian, Zhao Suwu, et al. Research on splitting head of BT303CuS free-cutting stainless steel rolling stock[J]. *Journal of Northeastern University (Natural Science)*, 2010, 31(3): 381-384.  
(马宝国, 徐松乾, 赵肃武, 等. BT303CuS 易切削不锈钢轧件劈头的研究[J]. *东北大学学报 (自然科学版)*, 2010, 31(3): 381-384.)
- [4] Wang Weining. Analysis of cracking causes of Y1Cr13 steel[J]. *Special Steel Technology*, 2010, 16(4): 23-26.  
(王维宁. Y1Cr13 钢开裂原因浅析[J]. *特钢技术*, 2010, 16(4): 23-26.)
- [5] Hao Shifeng, You Xiaodong, He Ning. Analysis and process improvement of M7 steel rolling split[J]. *Hebei Metallurgy*, 2015, (8): 61-63.  
(郝世风, 尤晓东, 何宁. M7 钢轧制劈头分析及工艺改进[J]. *河北冶金*, 2015, (8): 61-63.)
- [6] Zhang D, Shen P, Xie J B, et al. A method for observing tridimensional morphology of sulfides by non-aqueous solution electrolytic etching[J]. *Journal of Iron and Steel Research International*, 2019, 26(3): 275-284.
- [7] Deng Xiangyang, Li Jian, Xie Jianbo, et al. Comparative analysis of steel quality for C70S6 expanding connecting rod at home and abroad[J]. *Iron Steel Vanadium Titanium*, 2018, 39(1): 148-154.  
(邓向阳, 李健, 谢剑波, 等. 国内外 C70S6 胀断连杆用钢质量对比分析[J]. *钢铁钒钛*, 2018, 39(1): 148-154.)
- [8] Chen Yu, Liu Hongliang, Zheng Zhong, et al. Development of QStE series automotive structural steel products of bengang[J]. *Science and Technology and Enterprise*, 2014, 10: 299.  
(陈宇, 刘宏亮, 郑中, 等. 本钢 QStE 系列汽车结构用钢产品的开发[J]. *科技与企业*, 2014, 10: 299.)
- [9] Yang Wen, Yang Xiaogang, Zhang Lifeng, et al. Review of MnS inclusion control in steel[J]. *Steelmaking*, 2013, 29(6): 71-78.  
(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.)

- [10] Zou Changfei, Yang Jieming, Wei Xianyi, *et al.* Microstructure characteristics of point segregation zone in 25CrMo ingot Steel[J]. *Iron and Steel*, 2017, 52(3): 21–26.  
(邹长飞, 杨接明, 韦贤毅, 等. 25CrMo钢锭点状偏析区微观组织特点[J]. *钢铁*, 2017, 52(3): 21–26.)
- [11] Ma Yue, Pan Tao, Jiang Bo, *et al.* Study on the effect of S content on fracture toughness of high speed wheel steel[J]. *Acta Metallurgica Sinica*, 2011, 47(8): 978–983.  
(马跃, 潘涛, 江波, 等. S含量对高速车轮钢断裂韧性影响的研究[J]. *金属学报*, 2011, 47(8): 978–983.)
- [12] Liu Yangbo, Tong Qian, Sun Qisong, *et al.* Effect of notch, short crack and inclusion on fatigue strength of high strength steel[J]. *Shanghai Metal*, 2017, 39(4): 69–74.  
(柳洋波, 佟倩, 孙齐松, 等. 缺口、短裂纹以及夹杂物对高强度钢疲劳强度的影响[J]. *上海金属*, 2017, 39(4): 69–74.)
- [13] Li Hongsheng, Gao Hui. The form of manganese sulfide in steel and its effect on steel properties[J]. *Yizhong Technology*, 2004, (4): 26–28.  
(李洪生, 高辉. 钢中硫化锰的形态及对钢性能的影响[J]. *一重技术*, 2004, (4): 26–28.)
- [14] Koseki T. Inclusion assisted microstructure control in C-Mn and low alloy steel welds[J]. *Metals Science Technology*, 2005, 21(8): 867–879.
- [15] Liu Z. Nucleation of acicular ferrite on sulfide inclusion during rapid solidification of low carbon steel[J]. *CAMP-ISIJ*, 2006, 19(4): 743.
- [16] Ai Kenan, Xie Jianbo, Zeng Zhiqi, *et al.* Effect of magnesium on microstructure and sulfide in non-quenched and tempered steel[J]. *Journal of Iron and Steel Research*, 2019, 31(4): 361–367.  
(艾克南, 谢剑波, 曾志崎, 等. 镁对非调质钢中组织及硫化物的影响[J]. *钢铁研究学报*, 2019, 31(4): 361–367.)
- [17] Shen P, Yang QK, Zhang D, *et al.* The effect of tellurium on the formation of MnTe-MnS composite inclusions in non-quenched and tempered steel[J]. *Metals*, 2018, 8(8): 639–652.

编辑 杨冬梅

(上接第 105 页)

- [8] Qiu Fuguo, Wang Juanli, Fu Kunming, *et al.* Preparation of ecological permeable brick with adsorbable pollutants from water plant sludge[J]. *Science and Technology and Engineering*, 2018, 18(32): 253–259.  
(仇付国, 王娟丽, 付昆明, 等. 水厂污泥制备可吸附污染物的生态透水砖[J]. *科学技术与工程*, 2018, 18(32): 253–259.)
- [9] Zu Bin, Wang Tianrui, Wang Chaojie, *et al.* Preparation of aeolian sand based sintered permeable materials[J]. *New Building Materials*, 2019, 46(2): 150–152.  
(祖彬, 王天瑞, 王超杰, 等. 风积沙基烧结透水材料的制备[J]. *新型建筑材料*, 2019, 46(2): 150–152.)
- [10] Dealrp, Bernardez L A. Remarks on the short-term chemical stability of primary lead smelting slag[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2017, 76(2): 89.
- [11] Choi N C, Kim B J, Cho K H, *et al.* Enhancement of gold recovery during lead fire assay by salt-roasting[J]. *Geosystem Engineering*, 2014, 17(4): 226–234.
- [12] Wu Jianfeng, Zhang Minglei, Xu Xiaohong, *et al.* Study on the preparation of porous ceramic filter balls from sintered red mud[J]. *Journal of Ceramics*, 2007, 28(4): 276–281.  
(吴建锋, 张明雷, 徐晓虹, 等. 用烧结法赤泥制备多孔陶瓷滤球的研究[J]. *陶瓷学报*, 2007, 28(4): 276–281.)
- [13] Chen Shibing, Wang Shifeng, Xin Xuliang, *et al.* Research progress of porous ceramic filter materials[J]. *Journal of Shandong Institute of Light Industry*, 2009, 23(2): 17–20.  
(陈士冰, 王世峰, 辛旭亮, 等. 多孔陶瓷过滤材料的研究进展[J]. *山东轻工业学院学报*, 2009, 23(2): 17–20.)
- [14] Bunzl K, Trautmannsheimer M, Schramel P, *et al.* Availability of arsenic, copper, lead, thallium, and zinc to various vegetables grown in slag-contaminated soils[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2001, 30(3): 934–939.

编辑 杨冬梅