

## 开坯工艺对易切削奥氏体不锈钢坯表面开裂的影响

李 壮<sup>1,2</sup> 吴 迪<sup>1</sup> 齐瑞贵<sup>3</sup>

(1 东北大学轧制技术及连轧自动化国家重点实验室, 沈阳 110004; 2 沈阳航空工业学院材料工程系, 沈阳 110034;

3 沈阳航空工业学院机械与汽车学院, 沈阳 110034)

**摘 要** 易切削奥氏体不锈钢(% : 0.09 ~ 0.10C, 0.80 ~ 0.82Si, 0.40 ~ 0.43Mn, 0.08 ~ 0.09P, 0.10 ~ 0.11S, 9.14 ~ 9.20Ni, 18.12 ~ 18.30Cr, 0.73 ~ 0.78Ti) 由 30 kg 真空感应炉冶炼,  $\Phi$ 450 mm 轧机经 8 道次开坯成 75 mm × 75 mm 坯。当钢锭加热温度 1 200 °C, 1 ~ 4 道次(1 150 ~ 1 060 °C) 轧制未出现开裂, 5 ~ 8 道次(950 ~ 770 °C) 轧制钢坯出现严重表面裂纹。扫描电镜与能谱分析表明, 钢中夹杂物为硫化锰-硫化铁复合夹杂物。通过将 1 ~ 8 道次开坯温度控制在 1 150 ~ 1 060 °C 时, 有效地避免了钢坯表面开裂的发生。

**关键词** 硫 易切削 奥氏体不锈钢 开裂 热轧工艺

## Effect of Breakdown Process on Surface Cracking of Billet of Free Cutting Austenite Stainless Steel

Li Zhuang<sup>1,2</sup>, Wu Di<sup>1</sup> and Qi Ruigui<sup>3</sup>

(1 State Key Lab of Rolling and Automation, Northeastern University, Shenyang 110004;

2 Dept of Materials Engineering, Shenyang Institute of Aeronautical Engineering, Shenyang 110034;

3 Dept of Machine and Automobile, Shenyang Institute of Aeronautical Engineering, Shenyang 110034)

**Abstract** The free cutting austenite stainless steel (0.09 ~ 0.10C, 0.80 ~ 0.82Si, 0.40 ~ 0.43Mn, 0.08 ~ 0.09P, 0.10 ~ 0.11S, 9.14 ~ 9.20Ni, 18.12 ~ 18.30Cr, 0.73 ~ 0.78Ti) was melted by a 30 kg vacuum induction furnace and broken down to 75 mm × 75 mm billet with 8 pass by a  $\Phi$ 450 mm mill. As steel ingot was heated to 1 200 °C and rolled at 1 150 ~ 1 060 °C in 1 ~ 4 pass there was not cracking on billet surface but continuously rolled at 950 ~ 770 °C in 5 ~ 8 pass the serious surface cracking of billet occurred. The SEM analysis results indicated that inclusion in steel was mainly manganese sulphide - iron sulphide compounded inclusions. The steel billet cracking has been effectively avoided by controlling breakdown with 1 ~ 8 pass at 1 150 ~ 1 060 °C.

**Material Index** Sulphur, Free Cutting, Austenite Stainless Steel, Cracking, Hot Rolling Process

硫系易切削不锈钢因硫在钢中以硫化锰夹杂物存在, 能破坏基体金属的连续性, 切削时易于断屑, 并能起内部润滑减摩作用, 减少刀具磨损, 能够极大地改善钢的被切削性<sup>[1]</sup>。

为开发与研制易切削奥氏体不锈钢, 冶炼出含有较高 S、P 元素的易切削不锈钢; 但在试验过程中, 钢锭在开坯时发生了严重的开裂现象。为此, 通过对钢坯的宏观与微观组织观察, 试验研究了工艺对含硫不锈钢钢锭开裂的影响。

### 1 试验材料及方法

采用 30 kg 真空感应炉冶炼易切削奥氏体不锈钢, 钢锭两端分别为 125 mm × 125 mm 和 130 mm × 130 mm, 长 270 mm, 用  $\Phi$ 450 mm 轧机对该钢锭进行开坯处理。对钢锭进行成分分析以及 5 种低熔点元素光谱分析。在开裂钢坯中部的横断面和纵断面取样, 试样经过磨抛和硫酸铜 + 盐酸乙醇溶液腐蚀后, 通过 Leica DMIRM 显微镜对其进行组织与夹杂物

观察。对钢锭的断口部位, 借助于 QUANTA 600 型扫描电子显微镜进行断口形貌与能谱分析。

### 2 试验结果

#### 2.1 钢锭化学成分分析

由表 1 中炉号 1 可见, 冶炼钢锭的化学成分符合所设计奥氏体不锈钢的要求。对钢锭进行光谱分析, 未检测出 Pb、Sn、Bi、Sb 和 As 低熔点元素。

表 1 试验易切削奥氏体不锈钢的化学成分/%

Table 1 Chemical compositions of test free cutting austenite stainless steel / %

炉号	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Ti
1	0.09	0.80	0.40	0.08	0.10	9.20	18.30	0.78
2	0.10	0.82	0.43	0.09	0.11	9.14	18.12	0.73

#### 2.2 开裂现象与断口宏观观察

钢锭经 1 200 °C 加热保温 90 min 后, 采用 4 种变形量, 共 8 道次开坯轧制试验。每一道次轧完后,

表 2 炉号 1 钢锭热轧工艺参数

Table 2 Hot rolling parameters for ingot of heat 1

道次	轧制温度/℃	厚度/mm	变形量/%
1~2	1 120~1 150	120	7.7
3~4	1 020~1 060	100	16.7
5~6	900~950	85	15.0
7~8	770~830	75	11.8

在设定辊缝不变的情况下,翻转 90°重新轧一遍,其具体工艺见表 2。

钢锭经第 4 道次轧制后,在冒口端隐约出现类似氧化皮剥落状的裂纹;经第 6 道次轧制后,冒口端沿轧制方向演变成鳄鱼口状的裂纹;经第 8 道次轧制后,在整个钢锭各个部位均有严重裂纹出现,钢锭彻底开裂报废(图 1)。

取开裂试样宏观观察,断面无金属光泽,无结晶颗粒,呈暗灰色。断口并不具备明显的脆性断裂特征。

### 2.3 坯料金相检验

开坯后坯料的奥氏体晶粒度为 7 级,能够排除加热中的过热甚至过烧现象发生。其纵断面经抛光后 100 倍下的夹杂物(根据 GB/T10561-1989 标准)小于 2 级<sup>[2]</sup>,夹杂物虽然较多但颗粒并不粗大;在 500 倍下观察,灰色的纺锤状夹杂物颗粒为硫化锰。

### 2.4 断口扫描电镜观察

扫描电镜下观察,试样断口处具有塑性断口特

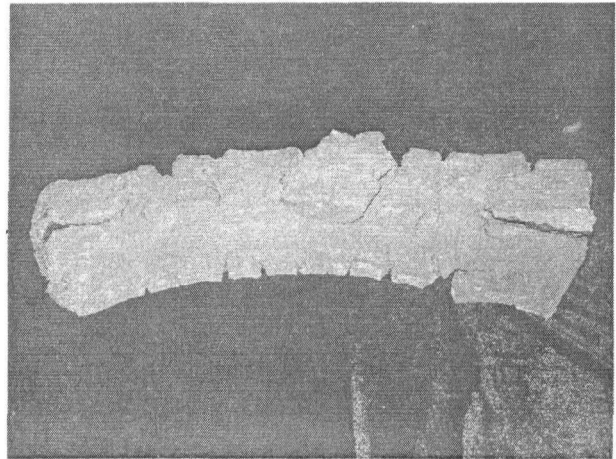


图 1 开裂的易切削奥氏体不锈钢钢坯形貌

Fig.1 Morphology of cracking billet of free cutting austenite stainless steel

征的大量韧窝,且每一韧窝中都有夹杂物颗粒存在,反映出典型的易切钢的特征。夹杂物大多以纺锤状形式存在,对其中的一个纺锤状夹杂物进行能谱分析,其结果见图 2(a)、(b)。能谱图表明,钢中夹杂物除含有 Ti、Cr 等元素外,主要为 S、Mn 和 Fe,说明该夹杂物是以硫化锰和硫化铁为主的复合夹杂物。而图 3(a)、(b)中,圆粒状夹杂物的能谱分析表明,该夹杂物除含有上述的 Ti、Cr 及 S 等元素以外,还有 Co 元素存在。

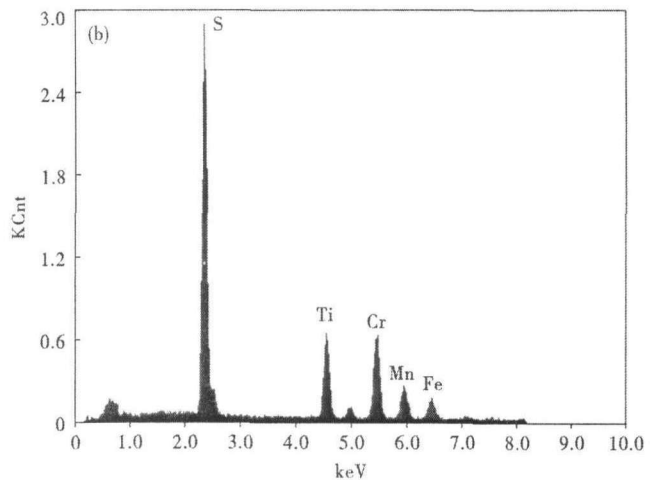
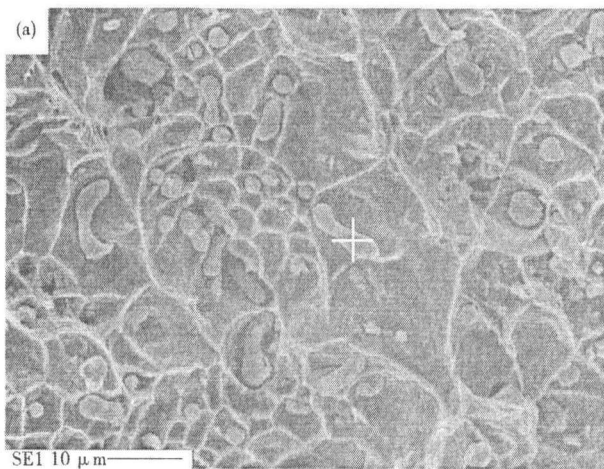


图 2 纺锤状夹杂物形貌(a)和 X-射线能谱分析(b)

Fig.2 Morphology of spindle shape inclusion (a) and analysis with energy dispersive X-ray spectrometer (b)

## 3 结果分析与改进措施

光谱分析结果表明,试验炉号 1 钢锭开坯开裂,不是因含有 5 种低熔点元素 Pb、Sn、Bi、Sb 和 As 所造成的。钢中含有 0.10% 的硫(表 1),一般情况下,硫在钢中是以 FeS 形式存在,FeS 熔点为 1 193 ℃,它又与  $\gamma$  铁形成熔点更低(989 ℃)的共晶

体<sup>[3]</sup>,钢水在冷却凝固过程中由于偏析,Fe-FeS 以低熔点的共晶体呈网状分布于晶界处,轧制工艺不当,易造成钢的“热脆”发生。但是,由于硫在易切钢中以硫化锰夹杂物存在,能显著的改善钢的切削性能,因此在试验钢中硫作为合金元素加入。钢中的锰可以减弱硫的有害作用,因为锰和硫的亲合力

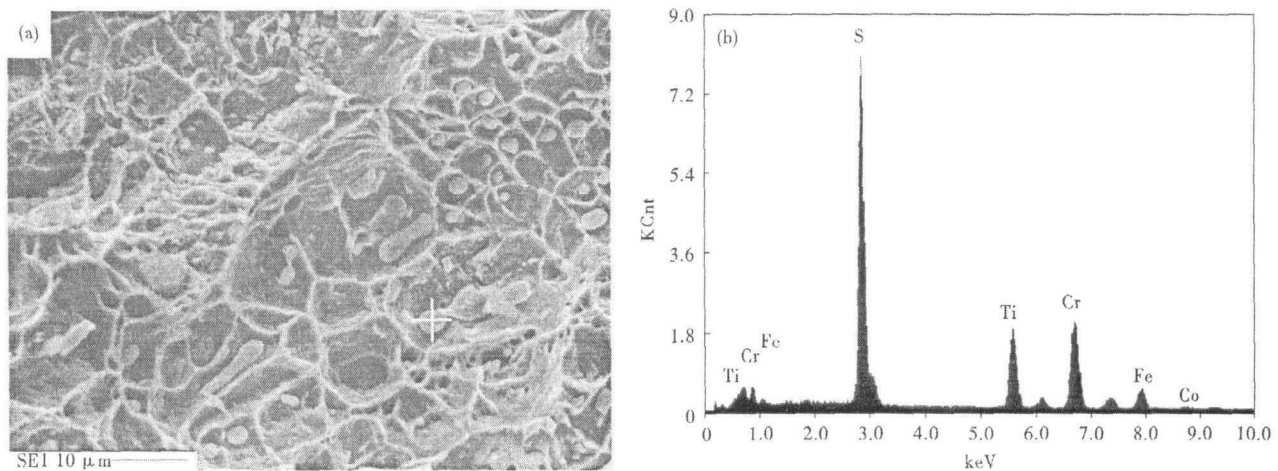


图3 圆形夹杂物形貌(a)和X-射线能谱分析(b)

Fig.3 Morphology of spheroidal inclusion (a) and analysis with energy dispersive X-ray spectrometer (b)

大于铁和硫的亲合力,优先形成硫化锰(MnS)。MnS熔点较高(1600℃),并在高温下具有一定的塑性,不会使钢发生热脆<sup>[3]</sup>。文献[1]指出:硫易切削钢的Mn/S比一般控制在2.5~4.5之间。本试验易切削奥氏体不锈钢中加入0.40%的锰,应能消除硫的有害作用。因此,在开坯过程中,4道次轧制之前,试验钢锭并无裂纹出现。

钢中硫含量过高时,如果热加工温度高于1038℃,FeS将在铁中重溶,只有在816~1038℃区间,含硫钢才进入热脆区<sup>[4]</sup>。低碳高硫易切削不锈钢最好的塑性区在1200℃左右<sup>[5]</sup>。对含0.08%~0.20% S碳素易切削钢,为防止开坯时轧裂,采用1180℃开坯快速轧制<sup>[6]</sup>。针对本试验结果,将易切削奥氏体不锈钢轧制温度区间,设定在较窄的1060~1200℃范围内较为合理。

由于炉号1钢锭开坯开裂报废,为此,又重新冶炼了易切削奥氏体不锈钢钢锭(表1炉号2)。

在炉号2钢锭中部取样,压断后对其断口进行金相与扫描电镜分析。在光学显微镜下,试样中同样存在一些纺锤状夹杂物,夹杂物级别仍小于国标

2级<sup>[2]</sup>;扫描电镜和能谱分析表明,夹杂物中仍含有S、Mn、Ti、Cr和Fe等元素,但找不到Co元素。说明经过了第1次的洗炉,钢锭已相对纯净。同第1炉一样,第2炉钢锭组织同样具有典型的易切钢特征。该钢锭经1200℃加热保温90min后,进行开坯热轧。具体轧制工艺参数见表3。

热轧后坯料中部表面温度为1060℃。这次热轧有效地避免了钢锭热轧时热开裂现象的发生,成功轧制出75mm×75mm的易切削奥氏体不锈钢坯料。

#### 4 结束语

(1)易切削奥氏体不锈钢钢锭开坯时开裂,主要是由于硫在钢中形成FeS造成钢的“热脆”所致。

(2)本试验将易切削奥氏体不锈钢的轧制温度严格控制在较窄的1060~1200℃温度区间,能有效避免钢锭开坯开裂现象的发生。

国家自然科学基金资助项目(50334010)

#### 参考文献

- 1 章守华.合金钢.北京:冶金工业出版社,1981
- 2 李炯辉,施友方,高汉文.钢铁材料金相图谱.上海:上海科学技术出版社,1981
- 3 胡庆祥,钱苗根.金属学.上海:上海科学技术出版社,1980
- 4 洗爱平,张 后,王仪康.钢中残余元素及其对钢性能的影响.钢铁,1999,34(10):64
- 5 刘永铨.易切钢.沈阳:东北工学院出版社,1990
- 6 殷瑞钰.钢的质量现代进展(下篇).特殊钢.北京:冶金工业出版社,1995

李 壮(1964-),男,副教授,1986年吉林工业大学毕业,钢铁材料的组织与性能研究。

表3 炉号2钢锭热轧工艺参数

Table 3 Hot rolling parameters for ingot of heat 2

道次	轧制温度/℃	厚度/mm	变形量/%
1	1150	120	7.7
2	1120(翻转90°)	120	7.7
3	1150	100	16.7
4	1120(翻转90°)	100	16.7
5	1150	85	15.0
6	1110(翻转90°)	85	15.0
7	1150	75	11.8
8	1110(翻转90°)	75	11.8

注:每轧2道次,钢坯重新加热30min至1200℃。

收稿日期:2007-07-16