

# Y12Cr18Ni9 易切削钢铸态组织 及力学性能研究

王英虎<sup>1,2</sup>, 郑淮北<sup>1,2</sup>, 方轶<sup>3</sup>, 刘庭耀<sup>1,2</sup>, 王利伟<sup>3</sup>, 姚斌<sup>3</sup>

(1. 成都先进金属材料产业技术研究院股份有限公司, 四川 成都 610300; 2. 海洋装备用金属材料及其应用国家重点实验室, 辽宁 鞍山 114009; 3. 攀钢集团江油长城特殊钢有限公司, 四川 江油 621704)

**摘要:**以 Y12Cr18Ni9 易切削钢为研究对象, 借助 Factsage 热力学计算软件、扫描电镜、Phenom Partical X 扫描电镜-能谱仪对其铸态组织及力学性能进行研究。结果表明: Y12Cr18Ni9 易切削钢中的平衡相主要有 Liquid、MnS、 $\delta$ Ferrite、Austenite、 $M_{23}C_6$ 、Ferrite 与 Sigma。平衡凝固和冷却相变路径为: Liquid $\rightarrow$ Liquid+ $\delta$ Ferrite $\rightarrow$ Liquid+ $\delta$ Ferrite+Austenite $\rightarrow$ Liquid+ $\delta$ Ferrite+MnS+Austenite $\rightarrow$  $\delta$ Ferrite+MnS+Austenite $\rightarrow$ MnS+Austenite $\rightarrow$ MnS+ $M_{23}C_6$ +Austenite $\rightarrow$ MnS+ $M_{23}C_6$ +Austenite+Ferrite $\rightarrow$ MnS+ $M_{23}C_6$ +Sigma+Austenite+Ferrite。试验钢中的硫化物呈球形、椭球形、纺锤形或短棒状并以簇状沿晶界分布, 属于第 II 类硫化物, 长宽比 $\leq 3$  的硫化物占比达到了 94.75%, 尺寸 $\leq 3 \mu\text{m}$  的硫化物所占比例为 80.22%, 最大弦长 $\leq 3 \mu\text{m}$  的硫化物所占比例为 76.02%。簇状硫化物会影响 Y12Cr18Ni9 易切削钢的力学性能, 沿晶界分布的簇状硫化物是形成准解理面的主要原因。经室温拉伸及冲击试验测试, 其抗拉强度、屈服强度、断后伸长率、断面收缩率和冲击功分别为 597 MPa、233 MPa、17.7%、19.5% 和 21.8 J。

**关键词:** Y12Cr18Ni9 易切削钢; FactSage 软件; 硫化物; 力学性能; 显微组织

中图分类号: TF76, TG142.71

文献标志码: A

文章编号: 1004-7638(2022)06-0166-07

DOI: 10.7513/j.issn.1004-7638.2022.06.025

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



听语音  
与作者互动  
聊科研

## As-cast microstructure and mechanical properties of Y12Cr18Ni9 free-cutting steel

Wang Yinghu<sup>1,2</sup>, Zheng Huaibei<sup>1,2</sup>, Fang Yi<sup>3</sup>, Liu Tingyao<sup>1,2</sup>, Wang Liwei<sup>3</sup>, Yao Bin<sup>3</sup>

(1. Chengdu Advanced Metal Material Industry Technology Research Institute Co., Ltd., Chengdu 610300, Sichuan, China; 2. State Key Laboratory of Metal Material for Marine Equipment and Application, Anshan 114009, Liaoning, China; 3. Pangang Group Jiangyou Changcheng Special Steel Co., Ltd., Jiangyou 621704, Sichuan, China)

**Abstract:** The as-cast structure and mechanical properties of Y12Cr18Ni9 free-cutting steel were studied by means of thermodynamic calculation software FactSage, SEM and Phenom Partical X SEM-EDS. The results show that the main equilibrium phases in Y12Cr18Ni9 free-cutting steel are Liquid, MnS,  $\delta$ Ferrite, Austenite,  $M_{23}C_6$ , Ferrite and Sigma. The equilibrium phase transition path is as follows: Liquid $\rightarrow$ Liquid+ $\delta$ Ferrite $\rightarrow$ Liquid+ $\delta$ Ferrite+Austenite $\rightarrow$ Liquid+ $\delta$ Ferrite+MnS+Austenite $\rightarrow$  $\delta$ Ferrite+MnS+Austenite $\rightarrow$ MnS+Austenite $\rightarrow$ MnS+ $M_{23}C_6$ +Austenite $\rightarrow$ MnS+ $M_{23}C_6$ +Austenite+Ferrite $\rightarrow$ MnS+ $M_{23}C_6$ +Sigma+Austenite+Ferrite. The sulfides in the test steel are spherical, ellipsoidal, spindle shape or short-bar-like, and distributed in clusters along the grain boundary, belonging to a type II sulfide. The proportion of sulfides with length-width ratio $\leq 3$  reaches 94.75%, the proportion of sulfides with size  $\leq$

收稿日期: 2022-03-09

作者简介: 王英虎, 1992 年出生, 男, 河北衡水人, 硕士, 工程师, 主要研究方向为先进金属材料及加工技术, E-mail: [hihi-howareyou@163.com](mailto:hihi-howareyou@163.com)。

3  $\mu\text{m}$  is 80.22%, and the proportion of sulfides with maximum chord length  $\leq 3 \mu\text{m}$  is 76.02%. The cluster sulfides affect the mechanical properties of Y12Cr18Ni9 free cutting steel. The cluster sulfides distributed along the grain boundary is the main reason for the formation of quasi cleavage surface. The tensile strength, yield strength, elongation after fracture, reduction of area and impact toughness of the steel are 597 MPa, 233 MPa, 17.7%, 19.5% and 21.8 J, respectively.

**Key words:** Y12Cr18Ni9 free-cutting steel, FactSage software, sulfide, mechanical property, micro-structure

## 0 引言

易切削钢是指通过在钢中添加一定数量的一种或一种以上的 S、P、Pb、Ca、Se、Te、Ti 及 Ce 元素, 以提高切削性能的合金钢<sup>[1]</sup>。根据所添加的易切削元素不同进行分类, 可以将易切削钢分为含硫易切削钢、含铅易切削钢、含碲易切削钢、含钛易切削钢及复合易切削钢等<sup>[2]</sup>。含硫易切削钢是问世时间最早, 迄今为止用量最大并且用途最广的一种易切削钢, 占世界和我国易切削钢总产量的比例达到了 70% 和 90%<sup>[3]</sup>。Y12Cr18Ni9 是一种高 S 奥氏体易切削钢, 具有良好的塑性、韧性、抗腐蚀性及切削性能, 在航空航天、石油、化工等领域得到广泛应用<sup>[4-5]</sup>。钢中硫化物的形态呈纺锤形时, 对切削性能最为有利, 长宽比超过 4 : 1 的细长条状硫化锰不但破坏基体的连续性, 还会造成切削屑粘结, 降低工件的表面质量, 如何有效调控硫化物的形貌及分布状态成为提高易切削钢质量的关键技术<sup>[6-11]</sup>。目前, 通过试验对易切削钢的组织及性能研究的国内外文献较多<sup>[12-13]</sup>, 但借助热力学软件来辅助研究的文献较少。现如今以相变热力学为基础的热力学模拟软件 (如 FactSage、Thermo-Calc、Pandat、JMatPro 等) 逐渐得到冶金与材料领域学者的认可与重视<sup>[14-15]</sup>。FactSage 软件是一款根据“平衡相各组元化学势相等”和“Gibbs 最小值”原则计算相图、相变和相平衡的功能强大的软件, 可以对材料的成分、热加工参数等进行设计并预测组织的形成规律。笔者利用 FactSage 软件对 Y12Cr18Ni9 易切削钢的多元相图进行计算和分析, 以明确该体系的组织演变规律, 并通过试验对 FactSage 软件计算结果进行了验证,

分析了 Y12Cr18Ni9 易切削钢的铸态组织及力学性能, 为其生产提供了试验数据支持。

## 1 试验材料及方法

试验钢采用 VIM-150 真空感应炉冶炼, 容量为 150 kg, 装料前将所需的合金料在 200  $^{\circ}\text{C}$  烘烤 3 h, 并用砂轮打磨去掉表面氧化皮, 每炉配料 125 kg。将高纯铁、铬铁、镍板随炉装填, 装料尽量紧密, 避免搭桥, 将石墨、金属硅、金属锰、磷铁、硫铁、钼铁置于真空感应炉的单独料仓中。当熔炼室的真空度  $\leq 1 \text{ Pa}$  时, 启动真空感应炉开始加热合金料, 加热升温的工艺步骤如下: 30% 功率, 持续 20 min; 50% 功率, 持续 20 min; 70% 功率, 持续 20 min; 90% 功率, 直到随炉料全部熔清。待炉料熔清后, 继续升温到 1 600  $^{\circ}\text{C}$  后将送电功率适当降低, 使钢液的温度保持在 1 500 ~ 1 550  $^{\circ}\text{C}$  并持续 25 min 进行精炼。在精炼期, 始终保持熔炼室的真空度  $\leq 1 \text{ Pa}$ 。精炼结束后充氩气到 20 000 Pa, 然后依次加入石墨、硅铁、锰铁、磷铁、钼铁及硫铁。合金加入后进行大功率电磁搅拌, 电磁搅拌持续时间为 2 min, 然后静置 2 min。出钢浇注温度为 1 540  $^{\circ}\text{C}$ , 浇铸时间为 3 min, 浇注到  $\text{O}200 \text{ mm} \times 400 \text{ mm}$  金属模中, 钢液在炉内凝固并冷却至室温后得到  $\text{O}200 \text{ mm}$  的 Y12Cr18Ni9 易切削钢铸锭。使用 EL-TRACS800 型红外碳硫仪测定其 C 和 S 元素的质量分数, 使用 ONH-2000 型氧氮氢分析仪测定其 O、N 和 H 元素的质量分数, 使用 IRIS Intrepid II XSP 型 ICP 光谱仪测得 Al 元素的质量分数, 使用 OBLF QSN750 型光谱仪测得其他元素的质量分数, 得到化学成分如表 1 所示。

表 1 Y12Cr18Ni9 易切削钢的化学成分  
Table 1 Chemical composition of the Y12Cr18Ni9 free-cutting steel

C	Mn	Si	Ni	Cr	Mo	Al	P	H	O	N	S	Sn	Ca	Mg	Fe
0.035	1.83	0.273	7.79	16.24	0.198	0.001 1	0.012	0.000 47	0.007 1	0.011	0.175	0.003 6	<0.000 5	<0.000 5	Bal.

采用 FactSage 8.0 热力学软件对试验钢的相变过程及析出行为进行计算, 计算过程使用了 FactSage 8.0 软件中的 Equilib 与 Phase Diagram 模块<sup>[16]</sup>, 采用专门用于计算钢铁材料相图的 FSstel 数据库, 成分以单位克(g)进行输入, 压力设置为 1 个标准大气压(101.325 kPa), 在平衡条件下对数据库中存在的相不加任何条件限制, 通过对计算结果的分析得到了 Y12Cr18Ni9 易切削钢的平衡相变路径。按照标准 GB/T228.1-2010《金属材料拉伸试验第 1 部分: 室温拉伸试验方法》, 采用直径为 $\varnothing 5$  mm 的棒状试样在 MTS Landmark 370 电液伺服万能试验机上进行室温拉伸试验, 拉伸速率为 0.016 mm/s。采用 MTS 落锤式冲击试验机进行室温夏比冲击试验, 采用标准夏比 V 型缺口试样, 试样规格为 10 mm $\times$ 10 mm $\times$ 50 mm, 中部加工有 45 $^\circ$ 深为 2 mm 的 V 型缺口, 冲击试样的缺口背朝摆锤方向, 摆锤能量为 300 J, 采用 3 个平行试样, 取其平均值作为最终结果。使用 Phenom Partical X 台式扫描电镜对硫化物形貌进行观察并用电镜附带的能谱仪分析硫化物的元素组成, 使用扫描电镜的夹杂物自动分析系统对夹杂物的长宽比、尺寸及最大弦长进行统计分析, 扫描面积为 8.99 mm<sup>2</sup>。

## 2 试验结果与讨论

### 2.1 FactSage 热力学计算结果

通过 FactSage8.0 热力学软件计算 Y12Cr18Ni9 易切削钢 Fe-16.24Cr-1.83Mn-7.79Ni-0.198Mo-0.035C-0.175S-0.273Si 多元系由 1 500  $^\circ$ C 高温液相冷却至 500  $^\circ$ C 的平衡相图, 计算结果如图 1 所示。由图 1(a) 可以看出, 在 500 ~1 500  $^\circ$ C 范围内, Y12Cr18Ni9 易切削钢中的平衡相主要有 Liquid、MnS、 $\delta$ Ferrite、Austenite、M<sub>23</sub>C<sub>6</sub>、Ferrite 与 Sigma。由图 1(b) 可以看出, Y12Cr18Ni9 易切削钢在 1 点 1 451  $^\circ$ C 发生液固相变: Liquid $\rightarrow$  $\delta$ Ferrite, 生成了高温  $\delta$  铁素体, 1 451  $^\circ$ C 也是 Y12Cr18Ni9 易切削钢的液相线温度。在 2 点 1 424  $^\circ$ C 发生同素异构转变:  $\delta$ Ferrite $\rightarrow$ Austenite。在 3 点 1 417  $^\circ$ C 有 MnS 开始析出。在 4 点 1 400  $^\circ$ C 液相完全消失, 1 400  $^\circ$ C 也是 Y12Cr18Ni9 易切削钢的固相线温度。在 5 点 1 277  $^\circ$ C 时, 高温  $\delta$  铁素体完全转变为奥氏体。在 6 点 904  $^\circ$ C 时, M<sub>23</sub>C<sub>6</sub> 相开始析出。在 7 点 751  $^\circ$ C 时, Ferrite 相开始析出。在 8 点 550  $^\circ$ C 时, 有 Sigma 相生成。 $\delta$ Ferrite、Austenite、M<sub>23</sub>C<sub>6</sub>、Ferrite 与 Sigma 相的生成温度几乎不受 S 含量的影响。

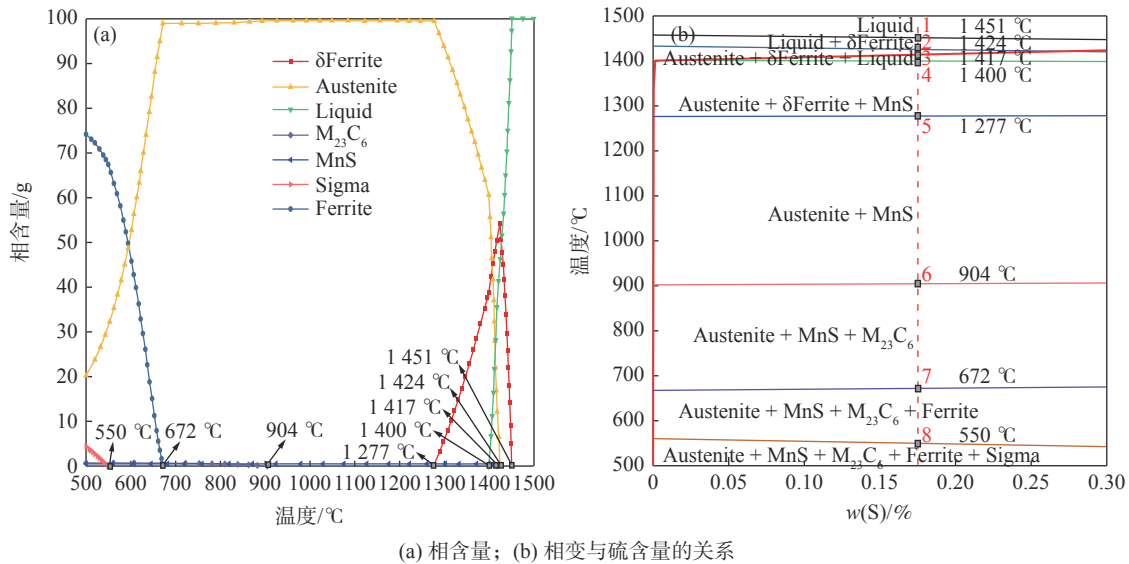


图 1 Y12Cr18Ni9 易切削钢 FactSage 软件模拟平衡相图

Fig. 1 Equilibrium phase diagram of Y12Cr18Ni9 free-cutting steel predicted by FactSage software

凝固相变与析出路径是研究钢铁合金组织转变和分析凝固组织的重要依据<sup>[17]</sup>。由图 2 可以看出, Y12Cr18Ni9 易切削钢的平衡凝固和冷却相变路径为: Liquid $\rightarrow$ Liquid+ $\delta$ Ferrite $\rightarrow$ Liquid+ $\delta$ Ferrite+Austenite $\rightarrow$ Liquid+ $\delta$ Ferrite+MnS+Austenite $\rightarrow$  $\delta$ Ferrite+

MnS+Austenite $\rightarrow$ MnS+Austenite $\rightarrow$ MnS+M<sub>23</sub>C<sub>6</sub>+Austenite $\rightarrow$ MnS+M<sub>23</sub>C<sub>6</sub>+Austenite+Ferrite $\rightarrow$ MnS+M<sub>23</sub>C<sub>6</sub>+Sigma+Austenite+Ferrite。Y12Cr18Ni9 易切削钢的平衡凝固和冷却相变路径图是确定其冶金、锻造、轧制及热处理等工艺参数的重要参考依据。

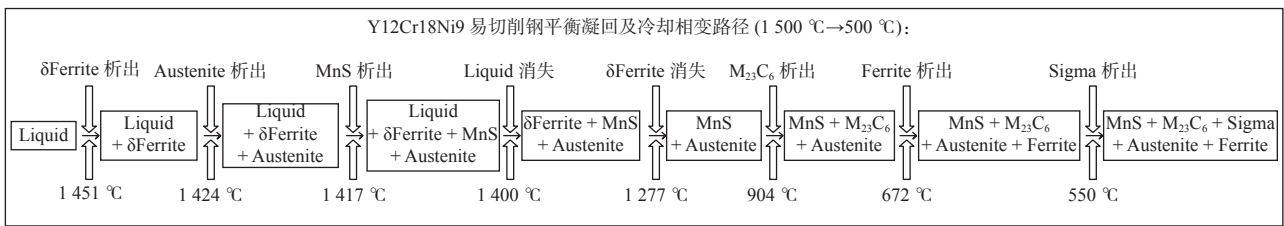


图 2 Y12Cr18Ni9 易切削钢的平衡凝固及冷却相变路径

Fig. 2 Phase transition path of the Y12Cr18Ni9 free-cutting steel during equilibrium solidification and cooling

2.2 Y12Cr18Ni9 易切削钢组织及力学性能分析

图 3 为 Y12Cr18Ni9 易切削钢中部横截面经过热酸腐蚀后的低倍组织, 由表面细晶区、柱状晶区和中心等轴晶区组成。铸锭表面细晶区是由细小的等轴晶粒组成的, 它的厚度与钢液的浇铸温度有关, 浇铸温度越高, 表面细晶区越薄, Y12Cr18Ni9 易切削钢的浇铸温度为 1 540 °C, 表面细晶区的厚度大约为 10 mm, 表面细晶区所占面积为 21.9%。柱状晶区的形成是因为在表面细晶区形成的同时, 金属模型壁温度迅速升高, 冷却速度变慢, 固液界面上的过冷度减小, 新晶粒的形成变得困难, 只有一次轴垂直于金属模型壁的晶粒才得以优先长大, 这便形成了柱状晶, 试验钢柱状晶区所占面积为 65.9%。中心等轴晶粒的形成是因为随着柱状晶的向前生长, 液相中的成分过冷区越来越大, 当成分过冷区增大到液相能够不均匀形核时, 便在剩余液相中形成许多新晶核, 并沿着各个方向均匀地生长而形成等轴晶<sup>[18]</sup>, 试验钢中心等轴晶区所占面积为 12.2%。根据 GB/T 1979-2001 结构钢低倍组织缺陷评级图对 Y12Cr18Ni9 易切削钢铸锭芯部缩孔、缩松进行评级, 试验钢的中心缩松等级为 0.5 级, 残余缩孔等级为 1 级, 缩孔及缩松程度很小, 表明材料的致密度很好, 冶金质量较高。

图 4 为 Y12Cr18Ni9 易切削钢中典型硫化物电镜形貌及 Fe、S 与 Mn 元素分布。由图 4 可以看出, Y12Cr18Ni9 易切削钢中的硫化物主要呈球形、椭

球形、纺锤形或短棒状并以簇状沿晶界分布, 该类形态的硫化物一般被认为是共晶反应生成的。在冶炼过程中液相向固相发生凝固反应时, 晶粒间残余液相中硫元素偏析会导致硫元素富集, 使得硫化物与高温铁素体互相搭桥析出, 形成了这种硫化物簇状分布的形态<sup>[19]</sup>。在 20 世纪 80 年代, Ito 等<sup>[20-21]</sup>对低碳钢中的硫化物形貌进行了分类: 第 I 类: 球形复合夹杂物, 无规则分布, 由亚稳态偏晶反应生成; 第 II 类: 呈长棒状或扇形, 沿晶界呈链状或网状分布, 由稳定的共晶反应生成; 第 III 类: 多面体形, 无规则分布, 由非稳态共晶(伪共晶)反应生成。其中第 II 与第 III 类硫化物可通过热加工的方式改善其形貌、尺寸与分布状态<sup>[22-23]</sup>。Y12Cr18Ni9 易切削钢中的硫化物符合第 II 类硫化物的形貌与分布特征。

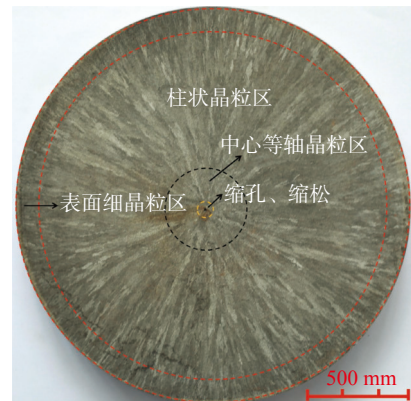
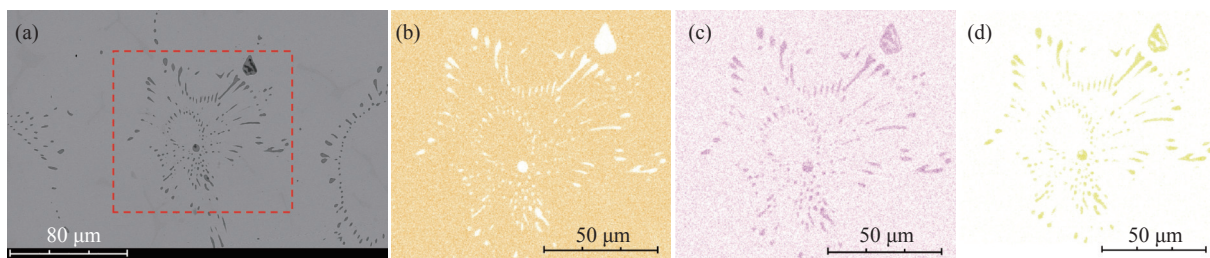


图 3 规格为 Ø230 mm 的 Y12Cr18Ni9 易切削钢横截面低倍组织

Fig. 3 Macrostructure of Ø230 mm Y12Cr18Ni9 free-cutting steel on cross-section



(a) 典型硫化物 SEM 形貌; (b) Fe 元素分布; (c) S 元素分布; (d) Mn 元素分布

图 4 Y12Cr18Ni9 易切削钢中典型硫化物 SEM 形貌及元素分布

Fig. 4 The SEM micrograph(a) and element mapping(b-d) typical sulfides in the Y12Cr18Ni9 free-cutting steel

图5为Y12Cr18Ni9易切削钢中夹杂物长宽比(其中,长宽比为Phenom Partical X台式扫描电镜-能谱仪统计出的穿过硫化物质心的16条弦线中的最长弦线的长度 $L$ 与垂直于最长弦线的弦线长度 $W$ 的比值,当硫化物长宽比 $\leq 3$ 时可以将其称为纺锤形)分布。由图5可以看出Y12Cr18Ni9易切削钢中 $L/W \leq 3$ 的硫化物所占比例最高,达到了94.75%,说明冶炼过程中有效控制了硫化物的形貌。

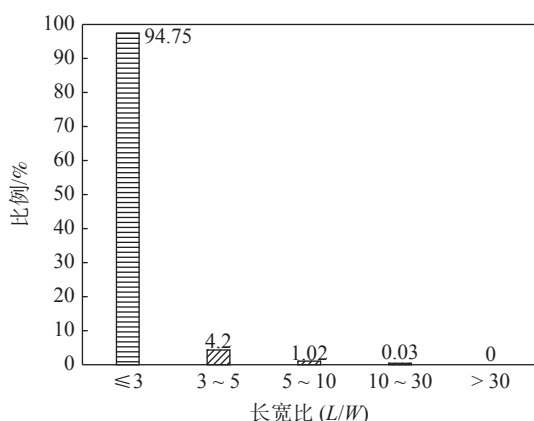


图5 Y12Cr18Ni9易切削钢中硫化物长宽比分布

Fig. 5 Distribution of length-width ratio of sulfides in the Y12Cr18Ni9 free-cutting steel

图6为Y12Cr18Ni9易切削钢中硫化物尺寸与最大弦长(其中,硫化物尺寸为统计出的穿过硫化物质心的16条弦线的平均长度;最大弦长为统计出的穿过硫化物质心的16条弦线中最长弦线的长度)分布。由图6可以看出,尺寸 $\leq 3 \mu\text{m}$ 的硫化物所占比例最高为80.22%,随着尺寸增大,硫化物所占比例逐渐减小。最大弦长 $\leq 3 \mu\text{m}$ 的硫化物所占比例最高为76.02%,随着最大弦长增大,硫化物所占比例也逐渐减小。由此可知,Y12Cr18Ni9易切削钢中的硫化物主要以球形、椭圆形及纺锤形为主,硫化物的形貌有助于材料切削性能的提升。

图7为Y12Cr18Ni9易切削钢铸态工程应力-应变曲线。应力-应变曲线最典型的特点是没有明显的屈服平台,在拉伸的过程中呈连续屈服变形,材料的抗拉强度为597 MPa,屈服强度为233 MPa,断后伸长率为17.7%,断面收缩率为19.5%。

断口是试样在试验过程中断裂后所形成的相匹配的表面,记录了材料在载荷与环境作用下断裂前的不可逆变形,以及裂纹萌生和扩展直至断裂的全过程<sup>[24]</sup>。图8为Y12Cr18Ni9易切削钢拉伸试样扫描断口形貌。由图8(a)可以看出,拉伸试样宏观断

口只有很小的颈缩,断口比较整齐平坦并垂直于拉伸载荷方向。由图8(b)可以看出,拉伸试样微观断口呈明显的解理形貌,裂纹从簇状硫化物处萌生并在足够载荷的作用下快速失稳扩展,最终导致材料的断裂。由此可知,簇状硫化物会促进裂纹的产生并严重降低材料的力学性能。

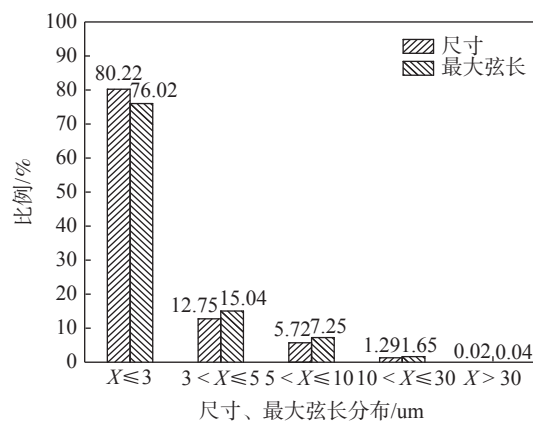


图6 Y12Cr18Ni9易切削钢中夹杂物尺寸与最大弦长分布

Fig. 6 Distribution of size and maximum chord length of sulfides in the Y12Cr18Ni9 free-cutting steel

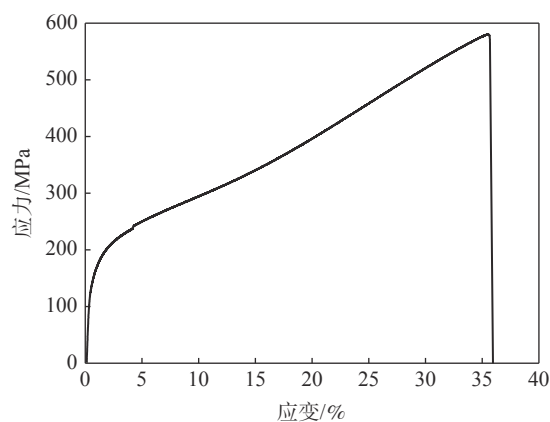
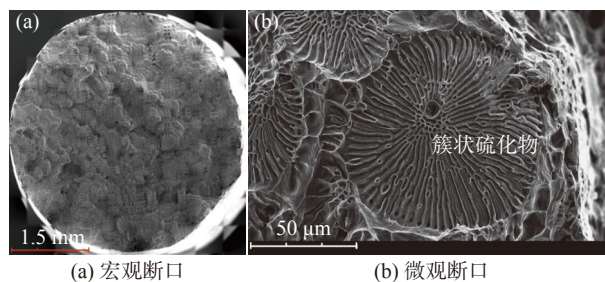


图7 Y12Cr18Ni9易切削钢铸态工程应力-应变曲线

Fig. 7 Engineering stress-strain curves of the as-cast Y12Cr18Ni9 free-cutting steel



(a) 宏观断口

(b) 微观断口

图8 Y12Cr18Ni9易切削钢拉伸试样扫描断口形貌

Fig. 8 Scanning fracture morphology of tensile specimen of the Y12Cr18Ni9 free-cutting steel

图9为Y12Cr18Ni9易切削钢冲击试样扫描断口形貌。由图9(a)可以看出,宏观断口主要为放射区,整个断口比较平坦,为典型的脆性断口。由图9(b)可以看出,裂纹在簇状硫化物处生核,并从该处呈圆形向四周扩展并覆盖到整个晶粒,形成一个小解理面,这些小解理面一般被称为准解理面,簇状硫化物是形成准解理面的主要原因<sup>[25]</sup>。Y12Cr18Ni9易切削钢铸态试样的冲击功为21.8 J,冲击韧性较差,沿晶界呈簇状分布的硫化物是造成其塑性较差的一个重要因素。Y12Cr18Ni9易切削钢的力学性能还有较大的提升空间,可以通过锻造、轧制及热处理等手段改变硫化物的分布状态,以提升材料的力学性能。

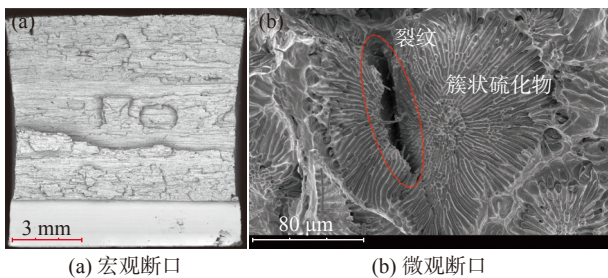


图9 Y12Cr18Ni9易切削钢冲击试样扫描断口形貌

Fig. 9 Scanning fracture morphology of impact specimen of the Y12Cr18Ni9 free-cutting steel

### 3 结论

1) 在500~1500℃范围内,使用FactSage热力学软件计算出的Y12Cr18Ni9易切削钢中的平衡相主要有Liquid、MnS、 $\delta$ Ferrite、Austenite、 $M_{23}C_6$ 、Ferrite与Sigma。平衡凝固和冷却相变路径为: Liquid $\rightarrow$ Liquid+ $\delta$ Ferrite $\rightarrow$ Liquid+ $\delta$ Ferrite+Austenite $\rightarrow$ Liquid+ $\delta$ Ferrite+MnS+Austenite $\rightarrow$  $\delta$ Ferrite+MnS+Austenite $\rightarrow$ MnS+Austenite $\rightarrow$ MnS+ $M_{23}C_6$ +Austenite $\rightarrow$ MnS+ $M_{23}C_6$ +Austenite+Ferrite $\rightarrow$ MnS+ $M_{23}C_6$ +Sigma+Austenite+Ferrite。

2) Y12Cr18Ni9易切削钢中的硫化物呈球形、椭球形、纺锤形或短棒状并以簇状沿晶界分布,属于第II类硫化物,长宽比 $\leq 3$ 的硫化物占比达到了94.75%,尺寸 $\leq 3$ 的硫化物所占比例为80.22%,最大弦长 $\leq 3$ 的硫化物所占比例为76.02%,硫化物的形态在冶炼过程中得到了较好的控制。

3) 簇状硫化物会影响Y12Cr18Ni9易切削钢的力学性能,簇状硫化物会促进裂纹的萌生,由拉伸及冲击断口可以看出,裂纹主要在硫化物处生核,并从该处呈圆形向四周扩展并覆盖到整个晶粒,形成一个小解理面,簇状硫化物是形成准解理面的主要原因。

### 参考文献

- [1] Zhao Maiqun, Wang Weike, Zhang Hao, *et al.* Analysis on sulphide inclusions in free-cutting 42CrMoS steel modified by rare earth elements[J]. *Heat Treatment of Metals*, 2004, 29(11): 20–23.  
(赵麦群, 王伟科, 张颢, 等. 稀土改性42CrMoS易切削钢中的硫化物夹杂分析[J]. *金属热处理*, 2004, 29(11): 20–23.)
- [2] Wang Jinlong, Qiao Aiyun, Zhang Xinggang. Summary on mechanical of machinability and control of sulfide for sulphur free-cutting steel[J]. *Science and Technology of Baotou Steel*, 2015, 41(1): 30–32.  
(王金龙, 乔爱云, 张行刚. 含硫易切削钢切削性机理与硫化物控制简述[J]. *包钢科技*, 2015, 41(1): 30–32.)
- [3] Wang Xiaohong, Xie Bing, Feng Zhongyu. Present status and development of research on free cutting steel at home and abroad[J]. *Special Steel*, 2005, 26(4): 26–28.  
(王小红, 谢兵, 冯仲渝. 国内外易切削钢的现状和研究进展[J]. *特殊钢*, 2005, 26(4): 26–28.)
- [4] Lo K H, Shek C H, Lai J K L. Recent development in stainless steels[J]. *Materials Science and Engineering Reports*, 2009, 65(4-6): 39–104.
- [5] Liu Zhenbao, Liang Jianxiong, Su Jie, *et al.* Research and application progress in ultra-high strength stainless steel[J]. *Acta Metallurgica Sinica*, 2020, 56(4): 549–557.  
(刘振宝, 梁剑雄, 苏杰, 等. 高强度不锈钢的研究及发展现状[J]. *金属学报*, 2020, 56(4): 549–557.)
- [6] Luo Gang, Wang Huimian. Test and study on relative hot plasticity of MnS inclusion in a new free-cutting stainless steel TBPS[J]. *Special Steel*, 2016, 37(2): 5–7.  
(罗刚, 王辉绵. 新型易切削不锈钢TBPS中MnS夹杂相对热塑性的试验研究[J]. *特殊钢*, 2016, 37(2): 5–7.)
- [7] Ramalingam S, Basu K, Malkin S. Deformation index of MnS inclusions in resulphurized and leaded steels[J]. *Material Science and Engineering*, 1977, 29(2): 117–121.

- [ 8 ] Zhang Yongjun, Zhu Chen, Wang Lifeng, *et al.* Role of tin for enhancing cutting characteristic of the free cutting steel[J]. *Heat Treatment of Metals*, 2006, 31(1): 27–29.  
(张永军, 朱辰, 王立峰, 等. 锡对提高材料切削性能作用的研究[J]. *金属热处理*, 2006, 31(1): 27–29.)
- [ 9 ] Matsui N, Hasegawa T, Fujiwara J. Effect of sulfide inclusion morphology on machinability and tool wear mechanism in low carbon free cutting steel[J]. *Journal of the Japan Society for Precision Engineering*, 2011, 77: 322–326.
- [ 10 ] Li Hongsheng, Gao Hui. Form of manganese sulphide contained in steel and influences upon steel property[J]. *CFHI 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.)
- [ 11 ] Ding Yi, Qian Fa, Chen Gang. Failure analysis on fatigue of electric motor shaft[J]. *Heat Treatment of Metals*, 2001, (12): 52–53.  
(丁毅, 钱发, 陈刚. 电机轴疲劳断裂失效分析[J]. *金属热处理*, 2001, (12): 52–53.)
- [ 12 ] Zhang Shuo, Yang Shufeng, Li Jingshe, *et al.* Morphology of MnS inclusions in Y15 high sulfur free-cutting steel by tellurium treatment[J]. *Iron and Steel*, 2017, (9): 28–33.  
(张硕, 杨树峰, 李京社, 等. 碲处理控制Y15易切削钢中MnS夹杂物形貌[J]. *钢铁*, 2017, (9): 28–33.)
- [ 13 ] Katayama S. Effect of tool materials on surface machined roughness and cutting force of low-carbon resulfurized free-machining steels[J]. *ISIJ International*, 2007, 30(4): 331–337.
- [ 14 ] Lang Yuping, Chen Haitao, Weng Yuqing, *et al.* Applications of thermo-calc in research of high nitrogen austenitic stainless steels[J]. *Journal of Materials Engineering*, 2013, (5): 16–22.  
(郎宇平, 陈海涛, 翁宇庆, 等. 热力学计算在高氮奥氏体不锈钢研究中的应用[J]. *材料工程*, 2013, (5): 16–22.)
- [ 15 ] Liu Feng, Wang Tianle. Precipitation modeling via the synergy of thermodynamics and kinetics[J]. *Acta Metallurgica Sinica*, 2021, 57(1): 55–70.  
(刘峰, 王天乐. 基于热力学和动力学协同的析出相模拟[J]. *金属学报*, 2021, 57(1): 55–70.)
- [ 16 ] Bale C W, Belisle E, Chartrand P, *et al.* FactSage thermochemical software and databases[J]. *Calphad*, 2002, 26(2): 189–220.
- [ 17 ] Deng Zhenqiang, Liu Jianhua, He Yang, *et al.* Phase transformations and precipitation behavior in FeCrAl stainless steel during equilibrium solidification[J]. *Chinese Journal of Engineering*, 2017, 39(5): 71–81.  
(邓振强, 刘建华, 何杨, 等. FeCrAl不锈钢的平衡凝固相变与析出行为[J]. *工程科学学报*, 2017, 39(5): 71–81.)
- [ 18 ] Cui Zhongqi, Qin Yaochun. Metallographic and thermal treatment[M]. Beijing: China Machine Press, 2007.  
(崔忠圻, 覃耀春. *金属学与热处理*[M]. 北京: 机械工业出版社, 2007.)
- [ 19 ] Zhu Qiangbin, Li Jie, Deng Xiangyang, *et al.* Inclusion analysis in magnesium free-cutting steel[J]. *Iron Steel Vanadium Titanium*, 2021, 42(2): 179–192.  
(朱强斌, 李杰, 邓向阳, 等. 镁系易切削钢中夹杂物分析[J]. *钢铁钒钛*, 2021, 42(2): 179–192.)
- [ 20 ] Ito Y, Matsubara N, Matsubara K. Formation of manganese sulfide in steel[J]. *Trans ISIJ*, 1981, 21(7): 477–484.
- [ 21 ] Ito Y, Yonezawa N, Matsubara K. Formation of manganese sulfide in low carbon steel[J]. *Tetsu-to Hagane*, 1982, 68(10): 1569–1577.
- [ 22 ] Liu H, Chen W. Effect of total oxygen content on the machinability of low carbon resulfurized free cutting steel[J]. *Steel Research International*, 2012, 83(12): 1172–1179.
- [ 23 ] Shao X, Wang X, Jiang M. Effect of heat treatment conditions on shape control of large-sized elongated MnS inclusions in resulfurized free-cutting steels[J]. *ISIJ International*, 2011, 51(12): 1995–2001.
- [ 24 ] Zhong Qunpeng, Zhao Zihua. Fractography[M]. Beijing: High Education Press, 2006: 1-10.  
(钟群鹏, 赵子华. *断口学*[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006: 1-10.)
- [ 25 ] Chen Nanping, Gu Shouren, Shen Wanci. Brittle fracture failure analysis[M]. Beijing: China Machine Press, 1993: 151-152.  
(陈南平, 顾守仁, 沈万慈. *脆断失效分析*[M]. 北京: 机械工业出版社, 1993: 151-152.)