

热变形行为对 20MnCr5 齿轮钢热轧棒材 MnS 夹杂物的影响

王旭辉¹, 杨健^{1*}, 张庆松², 栗文浩¹, 尹青², 王维坤¹, 张梅¹

(1. 上海大学材料科学与工程学院, 省部共建高品质特殊钢冶金与制备国家重点实验室, 上海 200444; 2. 江阴兴澄特种钢铁有限公司特钢研究院, 江苏 江阴 214429)

摘要: MnS 夹杂物的控制是开发高品质齿轮钢的关键, 采用 Gleeble-3500 热模拟试验机对 20MnCr5 齿轮钢热轧棒材进行单道次热压缩试验, 研究了 MnS 夹杂物在应变速率 1.0 s^{-1} , 变形量 15%~50%, 变形温度 900~1100 °C 条件下热变形过程中的演变行为, 同时研究了不同变形量和变形温度对 MnS 及其复合夹杂物的尺寸、长宽比、相对塑性的影响。结果表明, MnS 夹杂物的碎化程度随变形量和变形温度发生周期性变化, 在 30% 变形量时, 随着温度升高, MnS 夹杂物的相对塑性先减小后增加, 由 2.31 减小到 2.01, 再增加到 3.55; 在 950 °C 时, 随着变形量的增加, MnS 夹杂物的相对塑性一直减小, 由 2.98 减小到 2.01, 再减小到 0.94。结合 MnS 夹杂物的长宽比、尺寸、相对塑性的变化, 在 30% 变形量时, 20MnCr5 齿轮钢的最佳变形温度为 900 °C, 在 950 °C 时, 20MnCr5 齿轮钢的最佳变形量为 50%。

关键词: 齿轮钢; 硫化锰夹杂物; 变形量; 变形温度; 相对塑性

中图分类号: TF76, TG142

文献标志码: A

文章编号: 1004-7638(2026)01-0157-08

DOI: 10.7513/j.issn.1004-7638.2026.01.018

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



听语音
与作者互动
聊科研

Effect of thermal deformation behavior on manganese sulfide inclusions in hot-rolled 20MnCr5 gear steel bars

WANG Xuhui¹, YANG Jian^{1*}, ZHANG Qingsong², LI Wenhao¹, YIN Qing²,
WANG Weikun¹, ZHANG Mei¹

(1. State Key Laboratory of Advanced Special Steel (Shanghai University), school of Materials Science and Engineering, Shanghai University, Shanghai 200444, China; 2. Special Steel Research Institute, Jiangyin Xingcheng Special Steel, Jiangyin 214429, Jiangsu, China)

Abstract: The control of MnS inclusions is the key to the development of high-quality gear steel. In this paper, a Gleeble-3500 thermomechanical simulator was used to carry out single-pass hot compression experiments to investigate the hot deformation behavior of MnS inclusions in 20MnCr5 gear steel hot-rolled bars with a strain rate of 1.0 s^{-1} , deformation strains of 15%~50%, and deformation temperatures of 900~1100 °C. At the same time, the effects of deformation ratio and deformation temperature on the size, aspect ratio morphology and relative plasticity of MnS and its composite inclusions were systematically studied. The results showed that the fragmentation degree of MnS inclusion changes periodically with deformation ratio and temperature. At 30% deformation ratio, with rising temperature, the relative

收稿日期: 2025-04-14; 修回日期: 2025-05-06; 接受日期: 2025-05-08

基金项目: 国家自然科学基金(52474361)。

作者简介: 王旭辉, 2000 年出生, 男, 江西吉安人, 硕士研究生, 研究方向: 齿轮钢夹杂物与组织控制技术, E-mail: wangxuhui@shu.edu.cn; *通信作者: 杨健, 1965 年出生, 男, 湖南株洲人, 博士研究生, 教授, 研究方向: 炼钢、连铸、夹杂物及氧化物冶金技术, E-mail: yang_jian@t.shu.edu.cn。

plasticity of MnS inclusion first decreases from 2.31 to 2.01 and then increases to 3.55. At 950 °C, with the increase in deformation, the relative plasticity continuously decreases from 2.98 to 2.01, and then to 0.94. Combined with the change in aspect ratio, size, and relative plasticity of MnS inclusions, the optimal deformation temperature of 20MnCr5 gear steel is 900 °C at 30% strain, and the optimal deformation ratio is 50% at 950 °C.

Key words: gear steel; manganese sulfide inclusions; deformation ratio; deformation temperature; relative plasticity

0 引言

钢中第二相粒子和非金属夹杂物对其物理化学性能影响显著,是材料加工领域的研究热点。纳米或亚微米第二相粒子常作为钢基体的增强相,分布在晶界或基体中^[1]。而非金属夹杂物,因其尺寸从几微米到几十微米不等、分布不均且形态各异,通常被视为钢中的有害相,夹杂物控制是洁净钢生产的关键^[2]。夹杂物可分为内生和外来两类,研究人员一直根据其来源改进工艺,并在精炼和凝固过程中加以控制。热加工中夹杂物的变化也至关重要,早在上世纪70年代,TAHASHI^[3]就发现加热过程不锈钢中的夹杂物会发生变化。KITAMURA^[4]总结了钢铁生产各工序中夹杂物的可能变化,指出在加热、轧制变形和冷却过程中夹杂物的演变会直接影响钢材质量和服役性能,因此,控制夹杂物不仅要关注精炼和凝固过程,还需研究其在热变形中的行为。

已有研究对钢中 MnS 夹杂物形貌控制的研究较多,主要集中在优化钢液中元素的化学成分,如调节氧活度、锰硫元素含量和锰硫比,以及添加不同合金元素^[5],可分为三类:一是添加强氧化合金元素 Al^[6]、Ti^[7-8]、Zr^[9],与氧结合形成氧化物,促进 MnS 非均匀形核;二是添加 Ce^[7]、Y^[9]、Te^[10] 元素,对 MnS 改性,形成不易变形的氧硫化物;三是添加 Ca^[11]、Mg^[12] 元素,与氧、硫结合并改性 MnS,形成复合夹杂物。

MnS 作为低温塑性夹杂物,在热变形中易发生显著形变和破碎,热变形是控制 MnS 的关键步骤。热变形主要通过轧制和锻造实现,变形温度、变形量和变形速率均会影响 MnS 的形貌、分布、数量和尺寸^[13-14]。邵肖静^[15]发现,随着变形温度增加,长度大于 5 μm 的 MnS 数量减少。QIU^[16]指出,在 950 °C 时 MnS 以破碎为主,长宽比从 3.16 降至 1.44,而在 1 050 °C 时以伸长为主,长宽比从 1.46 增至 2.49。杜青^[17]发现 950 ~ 1 150 °C 范围内 MnS 碎化现象显著。变形量对 MnS 形态演变影响显著,邵肖静观察到变形量从 10% 增至 50% 时, MnS 相对塑性从 2.26 降至 0.30。娄德春^[18]发现 MnS 碎化程度随变

形量呈周期性变化,与温度相关。刘帅^[19]研究表明,不同温度下, MnS 数量变化趋势不同。相较于变形温度和变形量,变形速率对 MnS 影响较小,邵肖静指出变形速率对其长度和相对塑性无明显影响,杜青证实 0.1 ~ 0.5 s⁻¹ 范围内 MnS 碎化行为主要由温度决定。MnS 形态直接影响材料性能。陈俊东^[20]指出,长宽比超 4 的长条状硫化物会破坏基体连续性,导致切屑粘连和工件表面质量降低。YANG^[21]发现变形量虽不影响 Ti-Zr 氧化物数量密度,但会改变其表面 MnS 形态。HUANG^[22]定量研究显示,10% ~ 70% 变形量使 MnS 平均尺寸从 7.76 μm 增至 7.98 ~ 11.43 μm,长宽比从 1.22 增至 1.22 ~ 2.39。

已有研究多针对易切削钢和非调质钢中的 MnS 夹杂物,而对 20MnCr5 齿轮钢中 MnS 夹杂物在热变形中的演变研究较少。为此,在 1.0 s⁻¹ 应变速率下,通过 Gleeble-3500 热模拟试验机对 20MnCr5 齿轮钢进行不同变形量和温度的单道次热压缩变形,统计分析夹杂物尺寸、形貌和长宽比,依据真应力-应变曲线分析夹杂物碎化,确定工业合适的轧制参数,为实际生产提供理论指导。

1 试验材料与方法

试验使用的研究材料为 20MnCr5 齿轮钢热轧棒材采用 100 t EAF 初炼—100 t LF 精炼—100 t VD 真空精炼—CCM 连铸-步进式加热炉—多机架连轧—步进冷床冷却—材料堆冷的工业生产工艺制备。以未经热压缩处理的原始棒材(S0)和经过热模拟机热变形的样品为研究对象。热压缩试验采用恒定应变速率 1.0 s⁻¹,变形量分别为 15%、30% 和 50%,变形温度设定为 900、950 °C 和 1 100 °C。样品分为两组:第一组在 30% 变形量下研究温度影响(T_1 :900 °C、 T_2 :950 °C、 T_3 :1 100 °C,分别命名为试样 T1、T2、T3),第二组在 950 °C 下研究变形量影响(D_1 :15%、 D_2 :30%、 D_3 :50%,分别命名为试样 D1、D2、D3),其中 T2 和 D2 为相同条件样品(950 °C/30% 变形量)。试验中具体的取样方案如图 1 所示。

使用 ThermoFisher 公司的电感耦合等离子体光学发射光谱仪(ICP-OES)和 LECO 公司的碳

硫/氧氮分析仪测定 20MnCr5 试验钢的化学成分, 如表 1 所示。采用线切割从热轧棒材上制备 $\text{O}45 \text{ mm} \times 12 \text{ mm}$ 的圆柱试样, 再从圆柱试样底面圆半径的 $1/2$ 处取样, 得到 $\text{O}8 \text{ mm} \times 12 \text{ mm}$ 的小圆柱体试样, 并对其进行磨削抛光除去氧化层以用于热模拟试验。将未进行热压缩的试样 S_0 沿着试样底面圆直径纵剖后热镶嵌成型得到一个 $8 \text{ mm} \times 12 \text{ mm}$ 矩形金相观察面; 对于进行热压缩处理的试样 (T1/T2/T3/D1/D3), 沿着底面长对称轴纵剖后得到的纵截面即为观察面, 观察面面积随着变形量的增加而减小, 压缩后不规则的观察面面积使用 Image J 软件进行分析, 以便后续计算 MnS 夹杂物的相对塑性, 具体取样方案如图 1 所示。采用 Carl Zeiss 公司的 EVO-18 扫描电子显微镜 (SEM)、Oxford Instrument 公司的能谱仪 (EDS)、夹杂物自动分析软件 (IAAS) 对制备的样品进行夹杂物分析。采用扫描电镜分析金相样品中夹杂物的检出下限为 $0.2 \mu\text{m}$, 因此试验选择大于 $0.2 \mu\text{m}$ 的夹杂物进行分析, 扫描区域总面积为 4.06 mm^2 。此外, 对于每个样品, 共分析 226 个视场, 每个视场面积为 $134 \mu\text{m} \times 134 \mu\text{m}$, 以保证 IAAS 获得的统计结果能够有效地表示样品中夹杂物的数量密度、尺寸、长

宽比和化学组成。

热模拟试验流程为: 以 $10 \text{ }^\circ\text{C/s}$ 升温至 $1200 \text{ }^\circ\text{C}$ 保温 300 s , 随后以 $5 \text{ }^\circ\text{C/s}$ 冷却至目标温度 (900 、 950 、 $1100 \text{ }^\circ\text{C}$) 保温 10 s , 进行单道次压缩 (应变速率 1.0 s^{-1}), 最终以 $2 \text{ }^\circ\text{C/s}$ 冷却至 $400 \text{ }^\circ\text{C}$ 后再以 $5 \text{ }^\circ\text{C/s}$ 冷却至室温。第一组固定 30% 变形量研究变形温度的影响, 第二组固定 $950 \text{ }^\circ\text{C}$ 变形温度研究变形量的影响。具体的热压缩试验方案如表 2 所示。

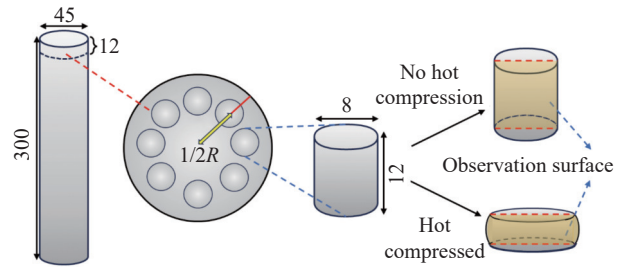


图 1 20MnCr5 热轧棒材取样示意 (单位:mm)

Fig. 1 Schematic diagram of sampling of 20MnCr5 hot-rolling steel bar

表 1 20MnCr5 试验钢的化学成分

Table 1 Chemical composition of 20MnCr5 experiment steel

											%		
C	Si	Mn	P	S	Al	Cr	Ti	N	O	Ca	Mg		
0.20	0.07	1.24	0.016	0.023	0.036	1.23	0.001	0.010	0.001	0.0006	0.003		

表 2 热压缩试验方案

Table 2 Scheme of hot compression experiments

Samples	Austenitizing temperature/ $^\circ\text{C}$	Austenitizing time/s	Hot compression temperature/ $^\circ\text{C}$	Deformation/%	Cooling rate to $400 \text{ }^\circ\text{C}/(^\circ\text{C} \cdot \text{s}^{-1})$	Cooling rate to room temperature/ $(^\circ\text{C} \cdot \text{s}^{-1})$
S0				0		
T1	1200	300	900	30	2	5
T2	1200	300	950	30	2	5
T3	1200	300	1100	30	2	5
D1	1200	300	950	15	2	5
D2	1200	300	950	30	2	5
D3	1200	300	950	50	2	5

2 试验结果与讨论

2.1 试验钢的真应力-应变曲线

图 2 中显示了两组样品的真应力-应变曲线, 第一组是 30% 变形量时不同变形温度的真应力-应变曲线, 第二组是 $950 \text{ }^\circ\text{C}$ 时不同变形量的真应力-应变曲线。一般的钢材在发生应变的情况下会发生复杂的加工硬化、动态回复和动态再结晶过程, 对 MnS 夹杂物形态产生复杂的影响。由图 2 可知, 当试样进行热压缩时, 随着真应变的增加, 真应力逐渐增加, 然而, 真应力的增加速度逐渐减慢, 达到稳定的状态。变形初期, 应变引起的位错密度增加, 此时应力快速增加, 随着变形的增加, 动态回复也逐渐增加, 使得位错相互抵消, 位错密度降低, 动态回复的

软化效果抵消了部分加工硬化, 使得应力上升的趋势放缓。由表 1 中试验钢的化学成分可知, 20MnCr5 属于低碳钢, 层错能较高, 以动态回复机制为主, 而在变形后期, 会发生动态再结晶, 使应力趋于稳定甚至减小。

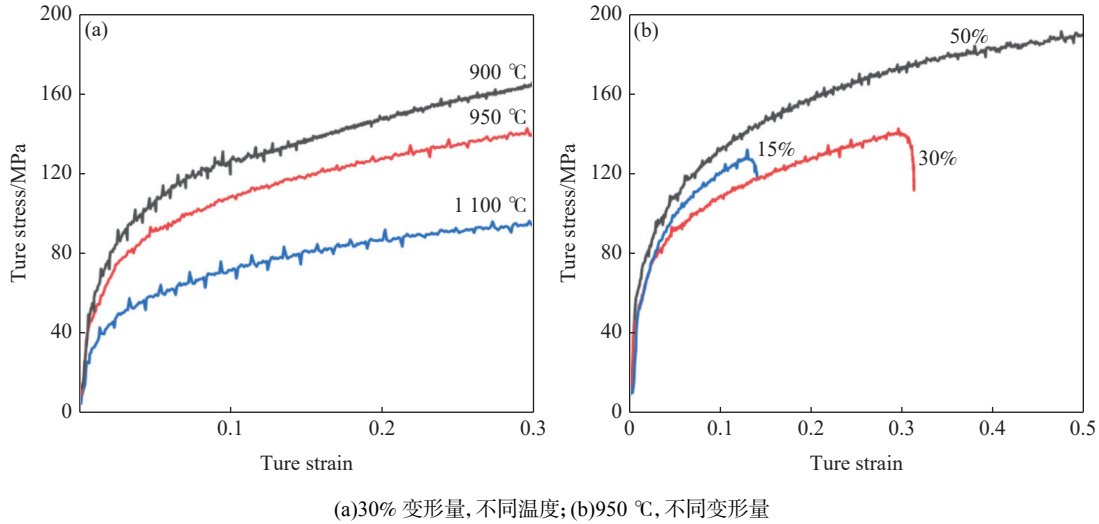
2.2 MnS 夹杂物的形态与分布

由于偏析, 部分 MnS 夹杂物在凝固过程中在奥氏体晶界处析出。已有的研究表明, 球形和纺锤形的 MnS 在晶界处析出时, 能够有效钉扎晶界^[23]。在热变形过程中, MnS 受到挤压而伸长, 动态再结晶过程会导致晶界移动, 从而导致伸长的 MnS 夹杂物断裂和破碎。图 3 展示了在 SEM 的二次电子 (SE) 模式下观察到的位于晶界处的 MnS 夹杂物。

使用体积分数 10% 的乙酰丙酮+ 5% 四甲基氯

化铵+85%无水甲醇作为电解液,电压为2.5 V,在冰浴环境下电解45 min,可以得到部分非金属夹杂物的三维形貌。硫化物根据形态大致可以分为三类,据此MnS夹杂物可分为I型、II型和III型^[24-26]。图4为试验钢中不同形态MnS夹杂物在SEM二

次电子(SE)模式下的三维形貌和面扫描分析结果,图4(a)是一种典型的球形MnS夹杂物,属于I型MnS;图4(b)中是细长条形MnS夹杂物,属于II型MnS;图4(c)中的是不规则的多面体形MnS夹杂物,属于III型MnS。



(a)30% 变形量,不同温度;(b)950 °C,不同变形量
图2 不同变形参数样品的真应力-应变曲线

Fig. 2 True stress-strain curves of samples with different deformation parameters

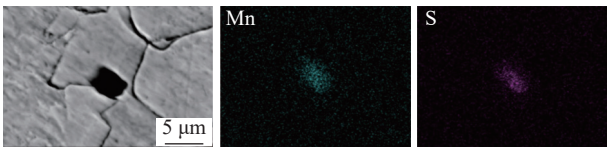
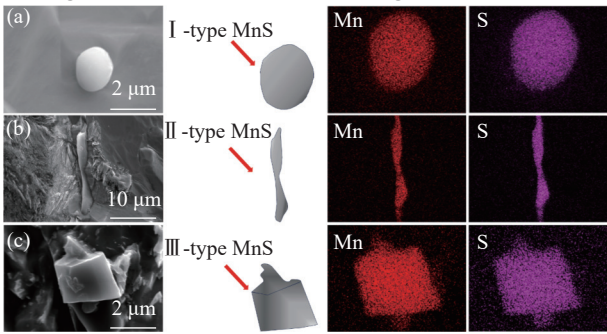


图3 位于晶界处的MnS夹杂物

Fig. 3 MnS inclusions located at grain boundaries



(a) I型;(b) II型;(c) III型

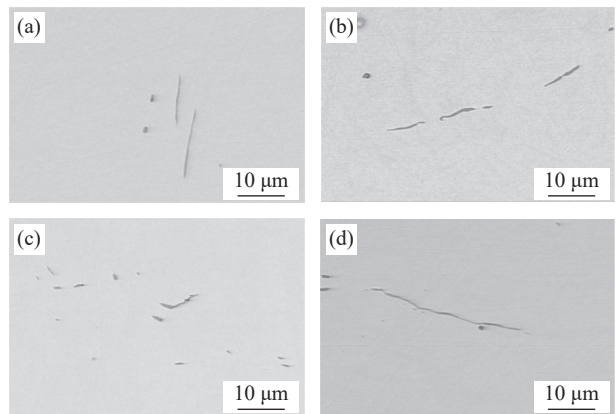
图4 20MnCr5 齿轮钢中不同形态MnS夹杂物的三维形貌和面扫描分析结果

Fig. 4 Results of 3D morphology and elemental mapping analysis of MnS inclusions with different morphologies in 20MnCr5 gear steel

2.3 30% 变形量不同温度下 MnS 夹杂物的形态、尺寸和长宽比

图5为原始棒材试样S0和经过热压缩的T1、T2、T3试样中MnS夹杂物的形貌。未经热压缩的试样S0经过夹杂物自动分析得到MnS夹杂物的平均长宽比和平均尺寸分别为5.68、2.56 μm。热压

缩以后,样品中的MnS夹杂物被拉长并发生破碎,随着变形温度的升高,MnS夹杂物的尺寸增加。在900 °C的变形温度下,MnS夹杂物发生部分碎裂,大多数呈现出细长条状;当变形温度为950 °C时,MnS夹杂物发生明显碎裂,尺寸增加;当变形温度达到1100 °C时,MnS夹杂物生长明显,夹杂物尺寸继续增加。在950 °C时,MnS夹杂物发生明显破碎,主要呈现出短棒状;在1100 °C时,MnS尺寸增大,碎化程度降低,呈现出明显的生长趋势。



(a)原始棒材S0;(b)900 °C-30%;(c)950 °C-30%;(d)1100 °C-30%
图5 原始棒材S0和30%变形量下不同温度试样中MnS夹杂物的形貌

Fig. 5 Morphology of MnS inclusions in original bar S0 and samples at different temperatures under 30% deformation

图 6 为 T1、T2、T3 中 MnS 夹杂物的平均长宽比和平均尺寸变化, 当变形温度从 900 °C 增加到 1 100 °C 时, MnS 夹杂物的平均尺寸从 1.76 μm 增加到 2.01 μm, 然后减小到 1.77 μm, 平均宽比由 2.51 增加到 2.94, 再增加到 3.19。对比试样 S0, 在 30% 变形量下的 T1、T2、T3 样品中的 MnS 夹杂物平均尺寸和平均长宽比均减小, 结合在扫描电镜中观察到的 MnS 夹杂物形貌可以得出, 在 900 °C 和 950 °C 时, MnS 夹杂物以碎化为主, 而在 1 100 °C 时, MnS 夹杂物以生长为主。

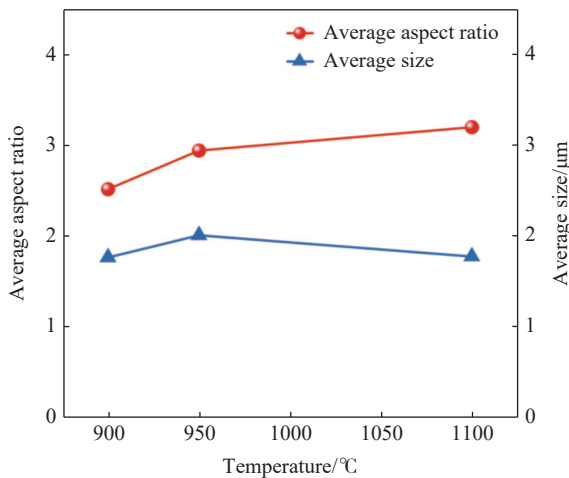


图 6 30% 变形量下不同变形温度 MnS 夹杂物的平均长宽比和平均尺寸

Fig. 6 Average aspect ratio and average size of MnS inclusions at different deformation temperatures with 30% deformation

图 7 为 T1、T2、T3 样品中 MnS 夹杂物长宽比的分布情况。随着温度从 900 °C 增加到 1 100 °C, 长宽比小于 2 的 MnS 夹杂物比例从 59.7% 减小到 41.7%, 再减小到 38.4%, 显示出碎化程度的降低。文献 [15] 指出, 长宽比大于 4 的 MnS 夹杂物会破坏钢基体的连续性, 对工件质量产生不利影响。随着温度从 900 °C 升高到 1 100 °C, 长宽比小于 4 的 MnS 夹杂物比例从 85.7% 减小到 78.7%, 再减小到 75.6%, 这表明 30% 变形量下, 在 900 °C 和 950 °C 下 MnS 夹杂物有更高的碎化程度。再结合图 6 中各温度下 MnS 夹杂物的平均尺寸来看, 30% 变形量下, T1 和 T2 中 MnS 夹杂物长宽比和平均尺寸较小。

图 8 为 950 °C 下不同变形量试样中 MnS 夹杂物的形貌, 结合图 5(c) 中 T2(D2) 试样的形貌, 随着变形量的增加, MnS 的形貌从 15% 变形量下的首尾断裂的细长条形 MnS 到 30% 变形量和 50% 变形量下的短棒状 MnS+球形 MnS。

2.4 950 °C 不同变形量下 MnS 夹杂物的形态、尺寸和长宽比

950 °C 下不同变形量的试样中 MnS 夹杂物的平均长宽比和平均尺寸如图 9 所示。变形量从 15% 增加到 50%, 试样中 MnS 夹杂物的平均长宽比先增加后减小, 由 2.20 增加到 2.94 再减小到 2.05, 平均尺寸由 1.64 μm 增加到 2.01 μm 再减小到 1.83 μm。平均尺寸和平均长宽比具有相似的变化趋势。

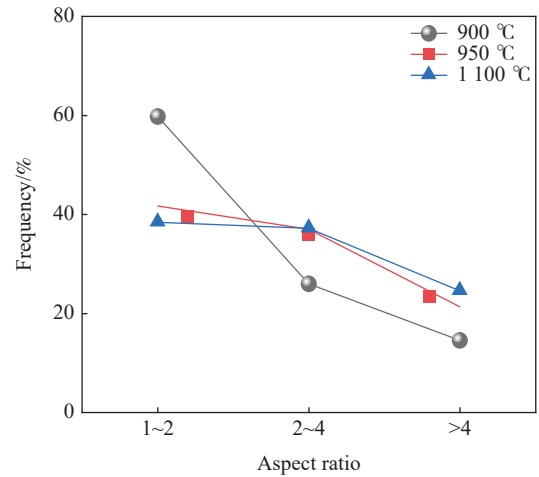
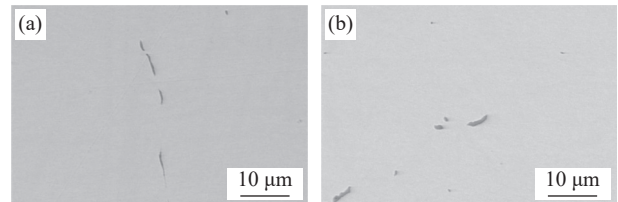


图 7 30% 变形量下不同变形温度试样中 MnS 夹杂物的平均长宽比百分比

Fig. 7 Percentages of average aspect ratios of MnS inclusions at different deformation temperatures with 30% deformation



(a) 950 °C-15%; (b) 950 °C-50%

图 8 950 °C 下不同变形量试样中 MnS 夹杂物的形貌
Fig. 8 Morphologies of MnS inclusions in the samples with different deformation at 950 °C

图 10 为 950 °C 时不同变形量下样品中 MnS 夹杂物长宽比的分布情况。随着变形量从 15% 增加到 50%, 长宽比小于 2 的 MnS 夹杂物比例从 70.8% 减小到 41.7%, 再增加到 67.6%, 这说明在该温度下随着变形量增加, 碎化程度先降低后增加。长宽比小于 4 的 MnS 夹杂物比例呈现出相同的变化趋势, 从 89.3% 减小到 78.7%, 再增加到 94.0%, 这表明 950 °C 时, 15% 变形量和 50% 变形量下 MnS 夹杂物有更高的碎化程度。再结合图 10 中 950 °C 时各变形量试样中 MnS 夹杂物的平均尺寸来看, 15% 变形量和 50% 变形量下, 试样中 MnS 夹杂物平均长宽比和平均尺寸较小。

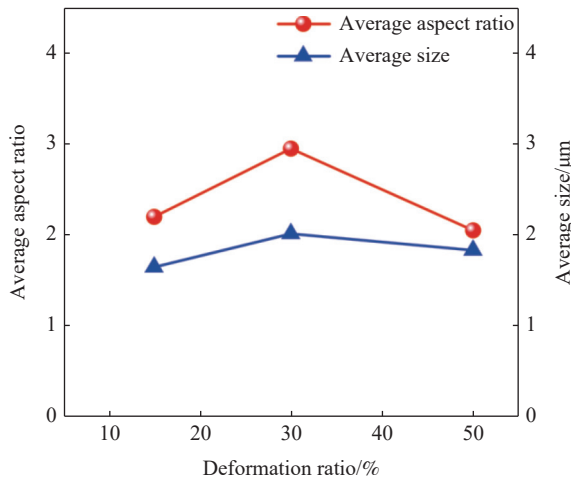


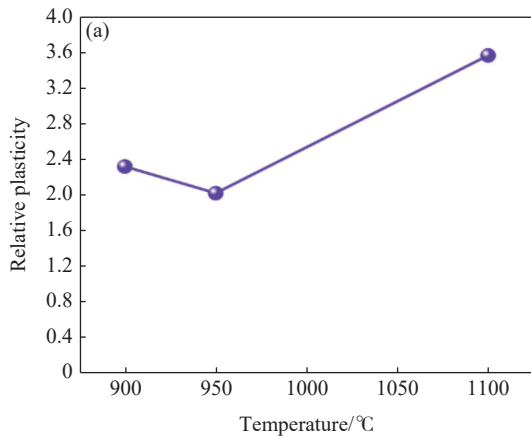
图9 950 °C 下不同变形量试样中 MnS 夹杂物的平均长宽比和平均尺寸

Fig. 9 Average aspect ratios and average sizes of MnS inclusions in the samples with different deformation at 950 °C

2.5 MnS 断裂和长大的机理分析

MnS 夹杂物的相对塑性指的是 MnS 夹杂物与钢基体相比的变形能力, 较小的相对塑性表明 MnS 夹杂物的变形能力较低, 使其在轧制后倾向于保持球形或纺锤形。热压缩过程中 MnS 夹杂物与钢基体的相对塑性计算使用 Malkiewicz 和 Rudnik 的定义公式, 即 MnS 的相对塑性 ν 的计算如式(1)所示。

$$\nu = \frac{\varepsilon_i}{\varepsilon_m} = \frac{2}{3} \frac{\ln \frac{b}{a}}{\ln \frac{F_0}{F_1}} \quad (1)$$



式中, ε_i 为 MnS 的真应变, ε_m 为试验钢基体的真应变, b 和 a 分别为钢材纵截面测得的夹杂物长轴长度和短轴长度, 其比值为夹杂物的长宽比, F_0 和 F_1 分别为试样轧制前后的纵截面面积。

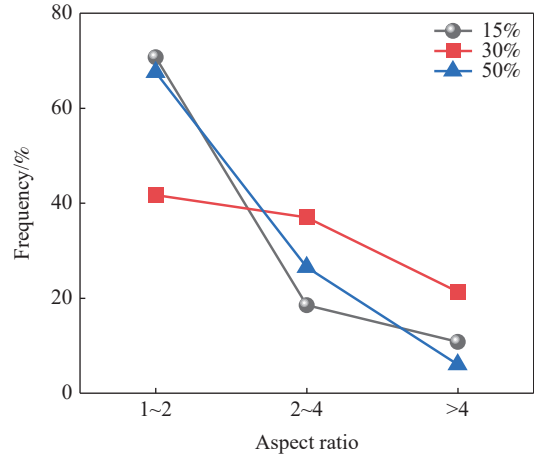
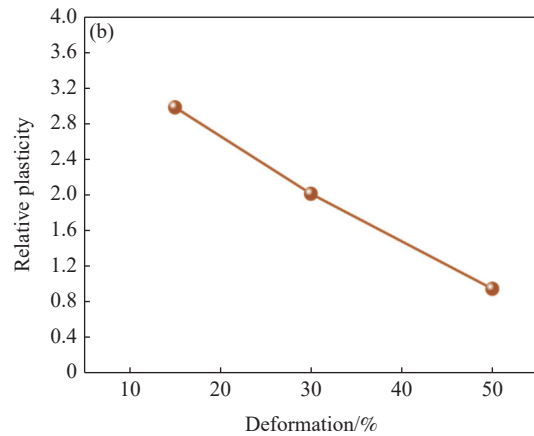


图10 950 °C 下不同变形量试样中 MnS 夹杂物的平均长宽比百分比

Fig. 10 Percentages of average aspect ratios of MnS inclusions in the samples with different deformation at 950 °C

由公式 (1) 进行计算, 可以得到 30% 变形量时不同温度和 950 °C 时不同变形量试样中 MnS 夹杂物的相对塑性 ν , 计算结果如图 11 所示。随着温度从 900 °C 升高到 1 100 °C, 试样中 MnS 夹杂物的相对塑性先减小后增加, 由 2.31 减小到 2.01, 再增加到 3.55。



(a) 30% 变形量时不同温度; (b) 950 °C 时不同变形量

图 11 不同变形参数样品中 MnS 夹杂物的相对塑性

Fig. 11 Relative plasticities of MnS inclusions in the samples with different deformation parameters

根据夹杂物相对塑性的定义, 当夹杂物的相对塑性大于 1 时, 表明夹杂物相对于钢基体更容易变形, 夹杂物在变形过程中长宽比会发生显著变化。

结合图 6 和图 7 中夹杂物平均长宽比、平均尺寸变化以及平均长宽比百分比分布情况, 可以得出在 30% 变形量下, 900 °C 是 MnS 夹杂物的最佳热变

形温度。当温度为 950 °C 时, 随着变形量从 15% 增加到 50%, 试样中 MnS 夹杂物的相对塑性一直减小, 由 2.98 减小到 2.01 再减小到 0.94。此时, MnS 夹杂物平均尺寸先增加后减小, YANG^[2] 指出, 相对塑性的降低意味着 MnS 夹杂物在钢中变得不易变形, 邱国兴研究发现 950 °C 时 MnS 以破碎为主, 当变形量由 15% 增加到 30% 时, 即便此时 MnS 变形能力有所降低, 但相对塑性仍大于 1, 结合图 5(c) 和图 8 中观察到的 MnS 夹杂物状态, 950 °C /30% 变形量的 MnS 夹杂物碎化程度不高, MnS 夹杂物被挤压而导致长宽比和尺寸略微增加。当变形量达到 50% 时, MnS 夹杂物相对塑性小于 1, 此时 MnS 夹杂物不易变形, 并且碎化程度高, 所以长宽比和尺寸都有所降低, 这也符合前言中 HUANG 等人的定量研究结果。结合图 9 和图 10 中夹杂物平均长宽比、平均尺寸变化以及平均长宽比百分比分

布情况, 可以得出在 950 °C 下, 50% 变形量是 MnS 夹杂物热变形过程中的最优选择。

3 结论

1) 热压缩显著细化 MnS 夹杂物, 其平均长宽比和尺寸均小于原始棒材 S0。温度升高使长宽比持续增大(2.51→2.94→3.19), 平均尺寸先增加后减小(1.76 μm→2.01 μm→1.77 μm); 变形量增加则使长宽比和尺寸均先增加后减小。

2) MnS 碎化程度在低温(900、950 °C)或高变形量(50%)时更高, 而在高温(1 100 °C)或中等变形量(30%)时降低。相对塑性随温度先减后增(2.31→2.01→3.55), 随变形量持续下降(2.98→2.01→0.94)。

3) 30% 变形量下最佳温度为 900 °C; 950 °C 下最佳变形量为 50%, 可兼顾 MnS 碎化与尺寸控制。

参考文献

- [1] DU Z L, LIU X G, GUI J T, *et al.* Influence of MnS inclusions on dynamic recrystallization and annealing twins formation during thermal deformation[J]. *Journal of Materials Research and Technology*, 2022, 16: 1371-1387.
- [2] YANG Y K, ZHAN D P, QIU G X, *et al.* Inclusion evolution in solid steel during rolling deformation: a review[J]. *Journal of Materials Research and Technology*, 2022, 18: 5103-5115.
- [3] TAKAHASHI I, SAKAE T, YOSHIDA T. Changes of the nonmetallic inclusion by heating[J]. *Tetsu-to-Hagané*, 1967, 53(3): 350.
- [4] KITAMURA S. Preface to the special issue on “fundamentals and applications of non-metallic inclusions in solid steel” [J]. *ISIJ International*, 2011, 51(12): 1943-1943.
- [5] QIU G X, DU Q, LU F, *et al.* Review on regulation of MnS in non-quenched and tempered steel[J]. *Journal of Iron and Steel Research International*, 2024, 31(4): 779-789.
- [6] LEI S L, JIANG M, YANG D, *et al.* Effect of oxides on MnS precipitation in aluminum-deoxidized steel[J]. *Chinese Journal of Engineering*, 2013, 35(11): 1443-1449.
(雷少龙, 姜敏, 杨叠, 等. Al 脱氧钢中氧化物对 MnS 析出的影响[J]. *工程科学学报*, 2013, 35(11): 1443-1449.)
- [7] LIU X J, YANG J C, CAI C K, *et al.* Effect of microalloyed elements M (M = Ce, Ti, V, and Nb) on mechanical properties and electronic structures of γ -Fe: insights from a first - principles study[J]. *Steel Research International*, 2021, 92(9): 2100053.
- [8] ZHENG W, WU Z Q, LI G Q, *et al.* Effects of Ti-Mg complex deoxidation and sulfur content on the characteristics of inclusions and the precipitation behavior of MnS[J]. *Chinese Journal of Engineering*, 2015, 37(3): 292-300.
(郑万, 吴振华, 李光强, 等. Ti-Mg 复合脱氧和硫含量对钢中夹杂物特征及 MnS 析出行为的影响[J]. *工程科学学报*, 2015, 37(3): 292-300.)
- [9] QIU G X, ZHANG H Z, LU F, *et al.* Effect of Y and Zr on MnS and microstructure and mechanical properties of non-quenched and tempered steel[J]. *China Metallurgy*, 2024, 34(8): 11-19.
(邱国兴, 张红钊, 路峰, 等. 钇、锆对非调质钢中 MnS 及组织力学性能的影响[J]. *中国冶金*, 2024, 34(8): 11-19.)
- [10] ZHOU Q L, YANG W, ZHANG L F. Review of Te treatment to control MnS inclusions in steel[J]. *China Metallurgy*, 2023, 33(10): 8-16.
(周全磊, 杨文, 张立峰. 碲处理控制钢中硫化锰夹杂物综述[J]. *中国冶金*, 2023, 33(10): 8-16.)
- [11] LI Y, CHENG G G, LU J L, *et al.* Characteristics and formation mechanism of duplex (Ca, Mn)S inclusions in commercial

- Ca-treated resulfurized steel[J]. *Metals and Materials International*, 2023, 29(4): 1019-1033.
- [12] ZHU W J, WANG D Y, SUN Q, *et al.* Mechanism investigation on inclusion evolution in Nb-Ti micro-alloyed steel with Mg treatment[J]. *Steelmaking*, 2024, 40(4): 40-51.
(朱吴杰, 王德永, 孙群, 等. Mg 处理 Nb-Ti 微合金钢中非金属夹杂物演变机理研究[J]. *炼钢*, 2024, 40(4): 40-51.)
- [13] YANG Z, ZHAO S, XUE Y Q, *et al.* Research progress on deformation behavior of inclusions during billet rolling[J]. *Journal of Iron and Steel Research*, 2022, 36(6): 707-716.
(杨振, 赵烁, 薛余强, 等. 铸坯轧制过程中夹杂物变形行为研究进展[J]. *钢铁研究学报*, 2024, 36(6): 707-716.)
- [14] JIANG X G, REN Y, YANG W, *et al.* Research progress on deformation of inclusions in steel during rolling[J]. *Journal of Iron and Steel Research*, 2022, 34(4): 297-308.
(蒋香归, 任英, 杨文, 等. 钢轧制过程中非金属夹杂物变形研究进展[J]. *钢铁研究学报*, 2022, 34(4): 297-308.)
- [15] SHAO X J, LÜ L G, DU Q, *et al.* Thermal deformation behavior of MnS inclusions in non-quenched and tempered steel[J]. *Heat Treatment of Metals*, 2018, 43(5): 144-147.
(邵肖静, 吕利鸽, 杜倩, 等. 非调质钢中 MnS 夹杂物的热变形行为[J]. *金属热处理*, 2018, 43(5): 144-147.)
- [16] QIU G X, ZHANG H Z, LU F, *et al.* Morphological evolution of MnS during hot deformation and isothermal homogenization in nonquenched and tempered F40MnVS grade steel[J]. *Steel Research International*, 2024, 95(12): 2400574.
- [17] DU Q. Microalloying and thermal deformation on MnS, microstructure and mechanical properties in F38MnVS non-quenched and tempered steel[D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2024.
(杜青. 微合金化和热变形对 F38MnVS 非调质钢中 MnS 及组织性能的影响[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2024.)
- [18] LOU D C, CUI K, WU X C, *et al.* Behaviour of MnS during hot deformation[J]. *Journal of Iron and Steel Research*, 1996, 8(6): 11-14.
(娄德春, 崔昆, 吴晓春, 等. 硫化锰夹杂物的热变形行为[J]. *钢铁研究学报*, 1996, 8(6): 11-14.)
- [19] LIU S, WANG F M, XU H L, *et al.* Effects of hot deformation behavior and dynamic recrystallization on MnS inclusions in low sulfur gear steel[J]. *Heat Treatment of Metals*, 2023, 48(5): 217-224.
(刘帅, 王福明, 徐海伦, 等. 热变形行为与动态再结晶对低硫齿轮钢硫化锰夹杂物的影响[J]. *金属热处理*, 2023, 48(5): 217-224.)
- [20] CHEN J D, GUAN X G, WANG Y H. Influence of thermal deformation process on morphology evolution of MnS inclusion in low-sulphur free-cutting steel[J]. *Heat Treatment of Metals*, 2019, 44(2): 125-130.
(陈俊东, 关晓光, 汪云辉. 热变形工艺对低硫易切削钢中硫化锰形态演变的影响[J]. *金属热处理*, 2019, 44(2): 125-130.)
- [21] YANG Y K, ZHU J Y, LI X M, *et al.* Evolution of inclusion and microstructure in Ti-Zr deoxidized steel during hot compression[J]. *Journal of Iron and Steel Research International*, 2023, 30(10): 1987-1999.
- [22] HUANG F Y, SU Y H F, KUO J C. High-temperature deformation behavior of MnS in 1215MS steel[J]. *Metals and Materials International*, 2018, 24(6): 1333-1345.
- [23] WU M, ZHAO F, YANG Y, *et al.* The effect of size and distribution of MnS inclusions on the austenite grain growth in a low cost hot forged steel[J]. *Steel Research International*, 2018, 89(2): 1700270.
- [24] SIMS C E, SALLER H A, BOULGER F W. Relative deoxidizing powers of some deoxidizers for steel[J]. *JOM*, 1949, 1(11): 814-825.
- [25] ITO Y, MASUMITSU N, MATSUBARA K. Formation of manganese sulfide in steel[J]. *Transactions of the Iron and Steel Institute of Japan*, 1981, 21(7): 477-484.
- [26] OIKAWA K, ISHIDA K, NISHIZAWA T. Effect of titanium addition on the formation and distribution of MnS inclusions in steel during solidification[J]. *ISIJ International*, 1997, 37(4): 332-338.