

钢中微米夹杂物分布特征及其对力学性能的影响

王正慈¹, 刘琰¹, 田力男^{1*}, 刘哲², 孙伟², 刘永超², 温培建², 张青²

(1. 齐鲁工业大学(山东省科学院) 山东省分析测试中心, 山东 济南 250014; 2. 金雷科技股份公司, 山东 济南 271104)

摘要: 受炼钢工艺和环境条件的影响, 钢材中通常有夹杂物的存在。为了研究微米夹杂物尺寸和分布对金属材料力学性能的影响规律, 实验采用真空电弧熔炼方法控制微米 Al_2O_3 粉末的添加量(质量分数)分别为 0%、0.2%、0.6%、1%、2%, 制备不同微米夹杂物含量的样品。利用计算机层析成像和扫描电镜的方法对熔炼样品中微米夹杂物尺寸进行统计分析, 结果表明大部分夹杂物尺寸在 $5\ \mu m$ 以下, 且夹杂物数量随 Al_2O_3 粉末的添加量逐渐增多。采用压痕法对熔炼样品的力学性能进行测试, 结果表明添加一定量的微米夹杂物能提高材料力学性能, 当 Al_2O_3 粉末的添加量超过 1% 时, 抗拉强度的增速减缓, 屈服强度的增速下降。对熔炼样品进行扫描电镜观察发现, 随着 Al_2O_3 粉末添加量的增多, 夹杂物倾向于发生团聚成大尺寸夹杂物, 或聚集成夹杂物团簇区域。大尺寸夹杂物和夹杂物团簇会产生局部应力集中, 进而导致微米夹杂物对材料力学性能的强化作用产生了不利影响。

关键词: 微米夹杂物; 夹杂物统计; 扫描电镜; 压痕实验; 力学性能

中图分类号: TB302 文献标志码: A 文章编号: 1002-4026(2025)06-0077-09

开放科学(资源服务)标志码(OSID):



Distribution of micron inclusions in steel and their impact on its mechanical properties

WANG Zhengci¹, LIU Long¹, TIAN Linan^{1*}, LIU Zhe², SUN Wei²,
LIU Yongchao², WEN Peijian², ZHANG Qing²

(1. Shandong Analysis and Test Center, Qilu University of Technology (Shandong Academy of Sciences),
Jinan 250014, China; 2. Jinlei Technology Co., Ltd., Jinan 271104, China)

Abstract: Under the current technological conditions, inclusions have become inevitable in steel. To investigate the impact of micron inclusions on the mechanical properties of metals, vacuum arc melting was used to control the mass fractions (contents) of micron Al_2O_3 powder at 0%, 0.2%, 0.6%, 1%, and 2%, thereby preparing samples with different contents of micron inclusions. Statistical analysis of inclusion sizes via computed tomography imaging and scanning electron microscopy (SEM) revealed that most inclusions had a size of $< 5\ \mu m$. Moreover, the quantity of inclusions

收稿日期: 2025-01-17 修回日期: 2025-02-19

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(12075127); 济南市科技计划“揭榜挂帅”项目(202428073)

作者简介: 王正慈(2000—), 男, 硕士研究生, 研究方向为材料失效分析与安全评估。E-mail: w15689617189@163.com

* 通信作者, 田力男, 男, 高级工程师, 研究方向为工业装备应急失效诊断与安全评估。E-mail: tianln1206@qlu.edu.cn

proportionally increased with increasing Al_2O_3 content. Mechanical properties were tested using the indentation method; the test results indicated that the addition of a certain amount of micron inclusions can enhance the mechanical performance of a metal. However, when the Al_2O_3 content exceeded 1%, the tensile strength increase slowed down and the yield strength decreased. SEM observations revealed that at high Al_2O_3 content, inclusions tended to agglomerate into large inclusions or clusters, which caused local stress concentration. This phenomenon in turn negatively affected the strengthening effect of the micron inclusions on the mechanical properties of the investigated metal.

Key words : micron inclusions; inclusion statistics; scanning electron microscopy; indentation method; mechanical properties

钢铁材料在冶炼过程或凝固过程中,由于受炼钢工艺条件的影响,凝固后的铸坯中存在氧化物、硫化物、氮化物等非金属夹杂物^[1]。通常将夹杂物的来源分为内生夹杂物和外来夹杂物两类^[2]。内生夹杂物主要为脱氧、脱硫过程中形成的化学产物,特别是一些颗粒小或密度大的夹杂物没有及时去除,随着钢液温度降低,硫、氧、氮等元素溶解度下降形成非金属夹杂物。外来夹杂物是由于钢液所接触的外部环境影响而产生的各种化合物组分,包括冶炼或浇铸过程中卷入的渣滴、耐火材料侵蚀脱落的颗粒、钢液二次氧化的产物及脱氧剂、脱硫剂等夹带的各种杂质。大多数的夹杂物与钢基体之间缺乏相容性,钢材在服役过程中受到外力作用,夹杂物与钢基体会分开,破坏了钢基体的连续性^[3-5]。

夹杂物按照变形能力分为脆性夹杂物和塑性夹杂物,脆性夹杂物主要是氧化物和氮化物,如 Al_2O_3 、尖晶石、TiN 等,脆性夹杂物在热加工时保持原有的形状,几乎不发生变形^[6]。其中, Al_2O_3 作为高熔点夹杂物,在冶炼环境中难以变形,会导致产品形成缺陷^[7-8]。此外,大量研究证明脆性夹杂物在受力条件下会发生应力集中,诱导裂纹的产生,对钢的性能危害很大^[9]。塑性夹杂物主要是硫化物,如 MnS、FeS 等^[10]。塑性夹杂物在热加工时沿加工方向延伸呈条带状分布,会破坏钢材基体的连续性,造成钢材拉伸、弯曲、冲击和疲劳等性能的降低^[11-13]。此外,细长的 MnS 夹杂物是造成金属基体拉伸延展性和冲击韧性各向异性的主要因素^[14-15]。然而,夹杂物对于钢材的影响并不全是负面的,如夹杂物对于热加工过程中的组织晶粒长大起到钉扎阻碍的作用^[16-17]。王国承^[18]通过向钢材中添加纳米 Al_2O_3 和 TiN,钢材的强度和塑形都有较大提高。有学者发现在合金中加入 Al_2O_3 ,同时诱导了间隙强化、晶界强化和弥散强化^[19]。因此,如何控制钢材中缺陷的成分、形态、数量、尺寸及分布等,以减轻其危害,利用缺陷的特性调控钢材的组织 and 性能,是冶金和材料工作者密切关注和亟待解决的问题。

为了研究微米夹杂物对金属材料力学性能的影响规律研究,本论文采用真空电弧熔炼的方法制备不同微米夹杂物含量的样品,利用计算机层析成像(CT)和扫描电镜的方法评定熔炼样品中夹杂物的尺寸和数量分布规律,并利用压痕法测定熔炼样品的力学性能,得到微米夹杂物对金属材料力学性能的影响规律。本工作对钢中夹杂物尺寸和数量的控制理论研究提供一定的研究基础和技术支撑。

1 实验材料及研究方法

1.1 真空电弧熔炼制备

真空电弧熔炼技术是一种重要的金属材料制备方法,具有熔炼速度快、成本低和操作简单的优势^[20]。通过在真空低压的环境下加热使金属融化再冷却凝固可保证试验样品的纯度。本论文中,通过定量添加高纯度 Al_2O_3 粉末,研究夹杂物数量对力学性能的影响规律。夹杂物尺寸采用激光粒度仪进行分析。由结果可知, Al_2O_3 粉尺寸主要分布在 1~12 μm 之间,体积平均粒径 $D_v(50) = 5.86 \mu\text{m}$,累积体积分布达到 85% 的粒径 $D_v(85) = 12.1 \mu\text{m}$ 。采用真空电弧熔炼炉(SP-MSM20-7 型)来制备实验用样品。首先向 15 g 合金钢粉末添加质量分数 0%、0.2%、0.6%、1% 和 2% Al_2O_3 粉末,充分混合,然后将混合粉末压制直径 20 mm 试块,防止粉末在抽真空过程中发生粉末飘扬,导致样品比例出现误差,最后将试块放入熔炼炉中,在抽完真空后通入氩气,熔

炼的电压不超过 100 V。为保证样品熔炼均匀,需反复熔炼 3 次,每次 5 min,熔炼完成后会得到纽扣状样品。

1.2 夹杂物的识别方法

将熔炼样品通过线切割沿径向切开,依次进行镶嵌、研磨、抛光。采用扫描电镜法评定和统计钢中微米夹杂物^[21]。实验设备采用热场发射扫描电子显微镜(Zeiss Supra 55,配置 Oxford INCAx-act 能谱仪),在放大 1 000 倍下对样品进行拍照,图像中夹杂物采用 Avizo 软件识别并统计数量。利用夹杂物与基体材料相衬度的差异,通过阈值分割识别基体中的夹杂物,夹杂物识别结果示意图如图 1 所示,通过识别夹杂物被标注为蓝色。统计分析采用 Avizo 软件中的 Labe Analysis 功能,对夹杂物的 Feret 直径、面积等信息进行统计。

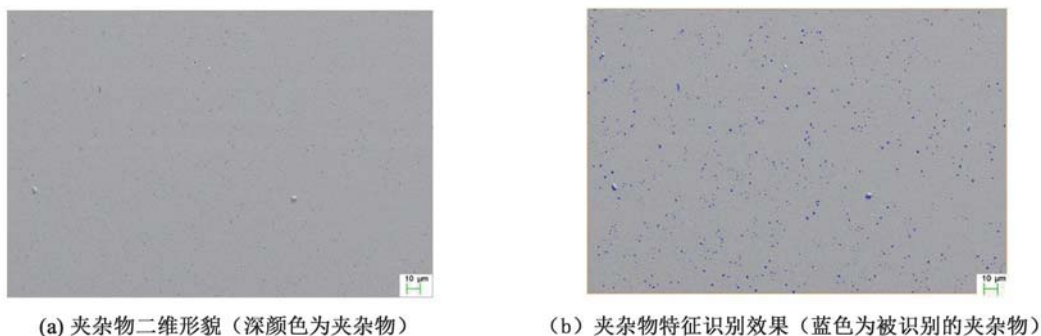


图 1 采用扫描电镜识别真空电弧熔炼样品中夹杂物的方法

Fig.1 Identification of inclusions in vacuum arc melting samples via scanning electron microscopy (SEM)

计算机层析成像(CT)技术作为一种无损检测技术,能精确地表征材料内部夹杂物、孔洞等缺陷特征^[22]。为了评估统计结果的准确性,采用显微 CT 对 Al_2O_3 添加量 0.2% 的样品进行分析,评估扫描电镜识别弥散微米夹杂物方法的准确性。本研究从真空熔炼样品中取下直径 800 μm ,高度 2 000 μm 的试样,表面粘贴 ZrO_2 球形颗粒,采用高分辨率显微 CT(Bruker SkyScan2211),加速电压为 100 kV,电流为 100 μA 。为了获得稳定清晰的图像,对样品进行 360° 全扫描,增量为 0.3°,每步扫描 4 次,曝光时间为 2 356 ms/帧。利用 SkyScan2211 的 NRecon 分层重构软件对投影图像进行重构。在旋转扫描时由于振动或旋转误差等原因,可能造成样品轻微的中心偏移或错位,重构图像边缘会产生伪像。所以在截面图像重构前根据 ZrO_2 颗粒将序列投影图像进行对齐,消除环伪影和射线硬化造成的影响,然后调整对齐补偿参数进行精细对齐。

1.3 压痕法测定力学性能方法

压痕法测定力学性能方法是基于 Oliver-Pharr 模型发展而来,通过记录金属材料压痕试验过程中试验力-深度曲线,建立材料真实应力-应变曲线,进而获得材料的屈服强度、抗拉强度等性能参数^[23],如图 2 所示。压痕法具有操作简单、微损伤检测的特点,适用于微小试样和无法加工成标准试样的情况。

本研究通过 8 次加卸载循环试验力达到 300 N,得到增量循环压入后的力-深度曲线。根据每个卸载段的最大载荷(F_{\max})、压入深度(h_{\max})和卸载初始阶段的斜率(S),通过式(1)计算对应试验力时弹性变形产生的接触深度(h_c^*),式中 w 为压头的比例系数,试验采用球形压头, w 取 0.75。

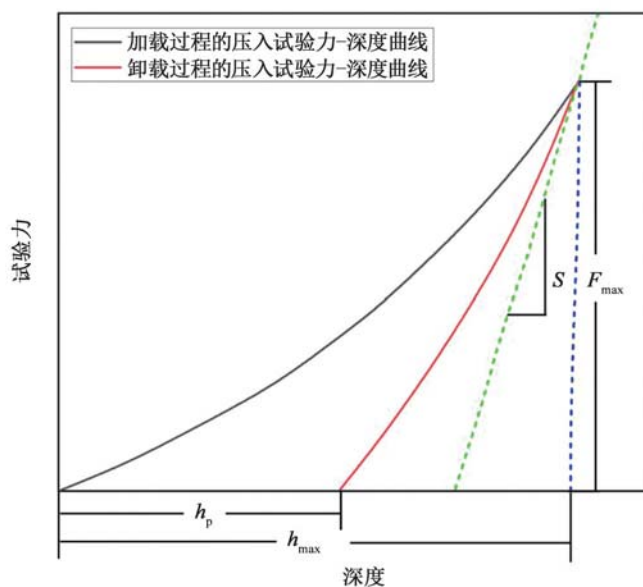


图 2 压痕法获得的试验力-深度曲线

Fig.2 Force-depth curve obtained using the indentation method

$$h_c^* = h_{\max} - w \cdot \frac{F_{\max}}{S} \quad (1)$$

由于金属材料的“流动”介质属性,金刚石压头与材料表面作用会发生塑形堆积和塑形凹陷^[24]。引入塑形分量(h_{pile})修正金属材料塑形凸起-凹陷效应,则 h_{pile} 和 h_c^* 的函数关系如式(2)所示。

$$\frac{h_{\text{pile}}}{h_c^*} = f\left(n, \frac{h_{\max}}{R}\right), \quad (2)$$

式中, n 为金属材料的应变硬化指数; R 为球形压头半径。

根据 Oliver-Pharr 模型,利用式(2)对增量循环压入的每个加卸载段进行修正,确定球形压痕下金属材料的真实应力和真实应变表达式如式(3)和式(4)所示。

$$\sigma_{\text{IT}} = \frac{1}{\Psi} \cdot \frac{F_{\max}}{\pi a^2}, \quad (3)$$

$$\varepsilon_{\text{IT}} = 0.14 \tan \theta, \quad (4)$$

式中, Ψ 为塑形约束因子,是平均接触应力与真实应力的比值,在本论文中 $\Psi=3.0$; a 为考虑弹性变形和凸起效应的真实接触半径; θ 为球形压头和试样接触时接触角度的 $1/2$ 。

基于压痕试验过程中多个增量循环加卸载确定的 σ_{IT} 和 ε_{IT} , 采用 Hollomon 方程拟合金属材料本构方程,如式(5)所示。

$$\sigma_{\text{IT}} = \begin{cases} E \cdot \varepsilon_{\text{IT}} & (\varepsilon_{\text{IT}} < \varepsilon_{\text{IT},y}) \\ K \cdot \varepsilon_{\text{IT}}^n & (\varepsilon_{\text{IT}} \geq \varepsilon_{\text{IT},y}) \end{cases}, \quad (5)$$

式中, E 为金属材料的弹性模量, K 为真应力和真应变关系式的强度系数。

屈服强度根据 Hollomon 本构方程中弹性阶段和塑形阶段曲线的交点获得,通常采用塑形应变量为0.2%时的强度作为屈服强度的值。屈服强度($\sigma_{\text{IT},y}$)由式(6)和(7)确定。

$$K \cdot \varepsilon_{\text{IT},y}^n = E \cdot (\varepsilon_{\text{IT},y} - 0.002), \quad (6)$$

$$\sigma_{\text{IT},y} = K \cdot \varepsilon_{\text{IT},y}^n \quad (7)$$

根据体积不变原理,最大应力对应的应变与应变硬化指数(n)的定量关系已得到验证^[25],因此根据经验公式(8),计算金属材料的抗拉强度 R_m 。

$$R_m = K \cdot \left(\frac{n}{e}\right)^n \quad (8)$$

2 实验结果及讨论

2.1 真空电弧熔炼样品中微米夹杂物的分布特征

选取 Al_2O_3 质量分数 0.2% 的真空电弧熔炼样品对扫描电镜法识别微米夹杂物方法的可靠性进行验证,首先将表面抛光的样品放入扫描电镜中在 1 000 倍下进行拍照,其次将扫描电镜拍照区域经机械加工为直径 800 μm 高度 2 000 μm 的试样进行高分辨显微 CT 成像,最后利用 Avizo 软件分别对扫描电镜照片和 CT 切片中微米夹杂物进行阈值分割提取,并统计微米夹杂物的尺寸分布规律,从而对扫描电镜法评定夹杂物的方法可靠性进行评定。

将 CT 切片数据导入 Avizo 软件中进行三维重构,得到真空电弧熔炼样品内部的夹杂物信息,如图 3 所示。图中灰色区域为样品的基体(图 3a),蓝色为识别的微米夹杂物(图 3b)。利用 Lable Analysis 功能对微米夹杂物的尺寸进行分析,最大夹杂物尺寸为 12.5 μm ,夹杂物的平均尺寸为 5.0 μm ,样品中夹杂物尺寸特征与实验添加的 Al_2O_3 粉末分布特征是一致的。

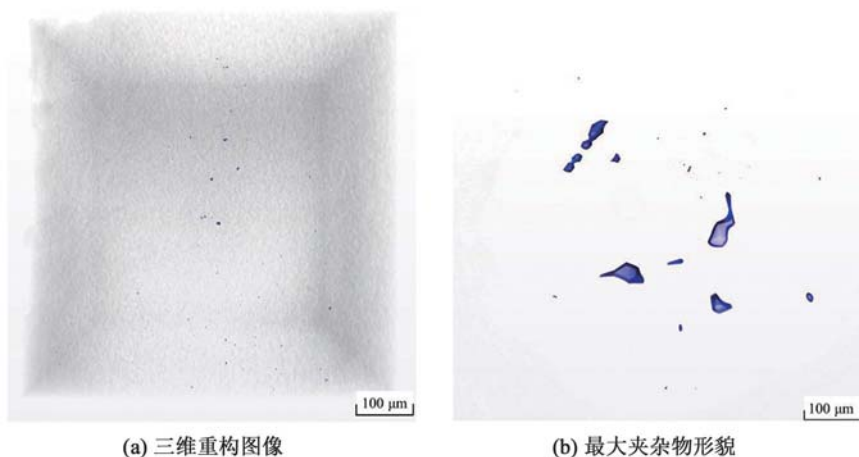


图3 Al_2O_3 添加量为2%的真空电弧熔炼样品CT实验结果

Fig.3 Computed tomography (CT) test results of the vacuum arc melting sample containing 0.2% Al_2O_3

为了验证扫描电镜法对微米夹杂物识别的准确性,选取靠近电镜观察表面的切片中夹杂物进行识别并统计特征,与扫描电镜法的统计结果进行对比,由结果可知,CT切片中夹杂物的含量为765个/ mm^2 ,扫描电镜法统计结果为730个/ mm^2 ,扫描电镜法对微米夹杂物的识别率为95.4%。微米夹杂物的尺寸分布特征如图4所示,扫描电镜法评定的微米夹杂物尺寸分布规律与CT切片数据结果基本一致。综合上述结果,利用扫描电镜评定微米夹杂物的方法是可行的。

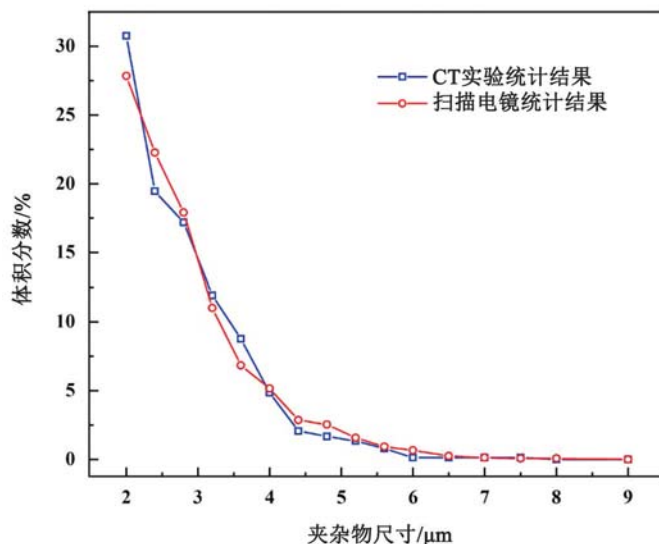


图4 扫描电镜法与CT切片实验对微米夹杂物的尺寸统计对比结果

Fig.4 Statistical comparison of the micron inclusion sizes via SEM and the CT section experiment

在扫描电镜法识别微米夹杂物的研究基础上,将真空电弧熔炼样品在扫描电镜1000倍下进行拍照,并采用Avizo软件对照片中夹杂物进行统计,得到熔炼样品中夹杂物数量与 Al_2O_3 粉末添加量之间的关系,如图5所示。由结果可知,随着 Al_2O_3 粉末的添加,熔炼样品中夹杂物的数量逐渐增多。当添加量超过1%时,样品中夹杂物的数量升高不明显,这是由于 Al_2O_3 粉末的密度要小于钢水的密度,在熔炼过程中因为比重差异导致夹杂物上浮至样品的表面,在熔炼后的样品表面也发现了白色透明的玻璃相。

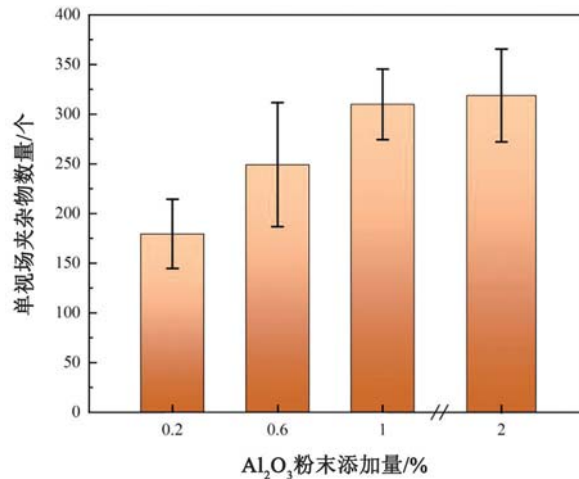


图5 熔炼样品中夹杂物的数量与 Al₂O₃ 粉末添加量的关系

Fig.5 Relationship between the quantity of inclusions in the melting sample and the quantity of Al₂O₃ powder added

2.2 微米夹杂物对材料力学性能的影响

为了评估压痕法测定力学性能方法的可靠性,从 42CrMo 锻造构件上截取试块加工成标准拉伸试样,在室温下进行拉伸,变形量采用电子式引伸计进行测量,得到样品的应力-应变曲线如图 6 所示,测试结果见表 1。

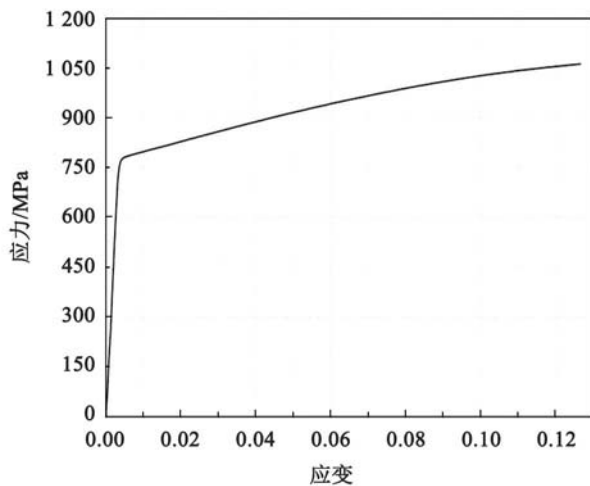


图6 常规拉伸试验应力-应变曲线

Fig.6 Stress-strain curve obtained via the conventional tensile test

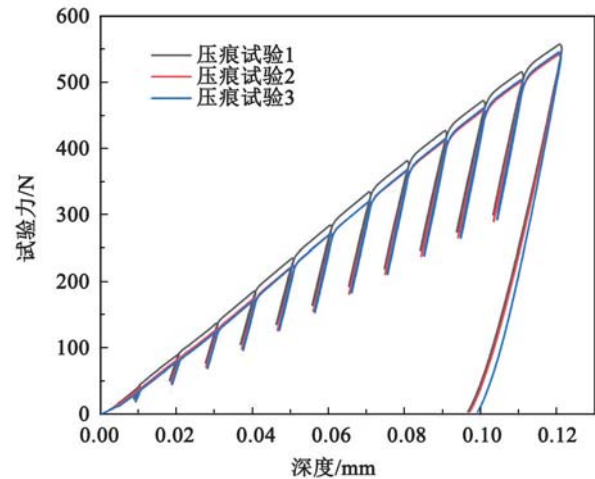


图7 压痕试验加卸载循环试验力-深度曲线

Fig.7 Force-depth curves obtained under the loading-unloading condition during the indentation test

表1 压痕法测定力学性能方法的可靠性验证结果

Table 1 Verification results of the indentation method for measuring mechanical properties

项目	拉伸试验	压痕法测定力学性能			相对误差		
		试验 2	试验 3	试验 1	试验 1	试验 2	试验 3
屈服强度	782 MPa	779 MPa	790 MPa	790 MPa	-0.4%	1.0%	1.0%
抗拉强度	1 065 MPa	1 038 MPa	1 019 MPa	1 032 MPa	-2.5%	-4.3%	-3.1%
应变硬化指数		0.098	0.09	0.093			
应力应变强度系数/(N·mm ⁻²)		1 438	1 384	1 413			

在靠近拉伸试样的位置取直径 20 mm 的试块,表面经研磨-抛光后利用压痕法进行 3 次测试,每次测试进行 8 个加卸载循环。为了保证试验的准确性,样品测试位置间隔需大于 2 mm。3 次测试的数据结果如

图7所示,从结果可知3次测试的结果曲线重合度较高。利用式(1)~(8)分别对3次压痕试验结果进行计算,结果见表1。与常规拉伸试验相比,采用压痕法测定的屈服强度误差在 $\pm 1\%$ 以内,抗拉强度误差在 $\pm 5\%$ 以内。因此,采用压痕法测定金属材料力学性能与常规方法一致性较好。

采用压痕试验测定真空熔炼试样的抗拉强度和屈服强度,依次将5个试样放入压痕仪中进行测试,得到的不同 Al_2O_3 添加量的真空熔炼样品的抗拉强度和屈服强度如图8所示。

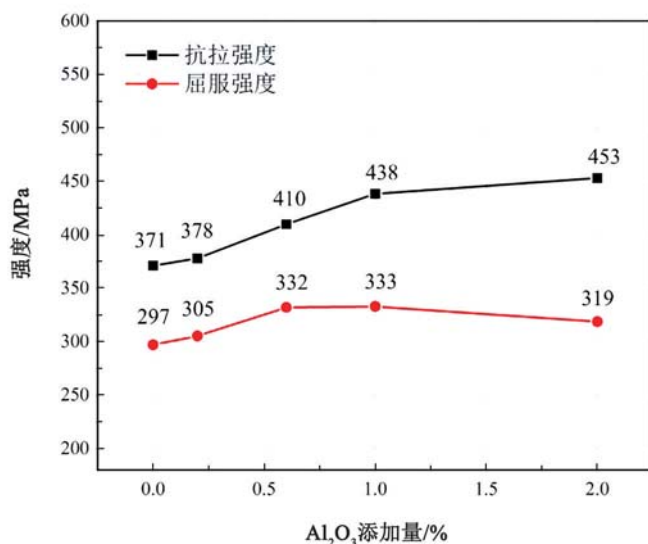


图8 不同 Al_2O_3 添加量的真空熔炼样品的抗拉强度和屈服强度

Fig.8 Tensile strength and yield strength of vacuum arc melting samples with different Al_2O_3 contents

由图8可以看出,随着 Al_2O_3 粉末的增加,试样的抗拉强度和屈服强度会增强,但是当 Al_2O_3 粉末的添加量超过1%时,抗拉强度的增速减缓,屈服强度有所降低。将真空熔炼样品放在电镜下观察,发现随着 Al_2O_3 添加量的增加,内部 $1\ \mu\text{m}$ 左右的小尺寸夹杂物增多,已有研究表明小尺寸的夹杂物会阻碍位错滑移起到强化作用^[15]。小尺寸的夹杂物比表面能较高,容易聚集形成大尺寸的夹杂物,这些大尺寸夹杂物普遍大于 $7\ \mu\text{m}$,特别是添加量在1%和2%的 Al_2O_3 粉末的样品中,这些大尺寸夹杂物呈条带状分布在样品内部,如图9所示。条带状分布的大尺寸夹杂物破坏了基体连续性,同时在受力状态下易造成局部应力集中,增加裂纹萌生的倾向,导致材料过早失效^[12, 26]。因此,在高强钢的生产中,有效控制微米级夹杂物的尺寸、分布与形态,是实现其性能优化的关键技术。

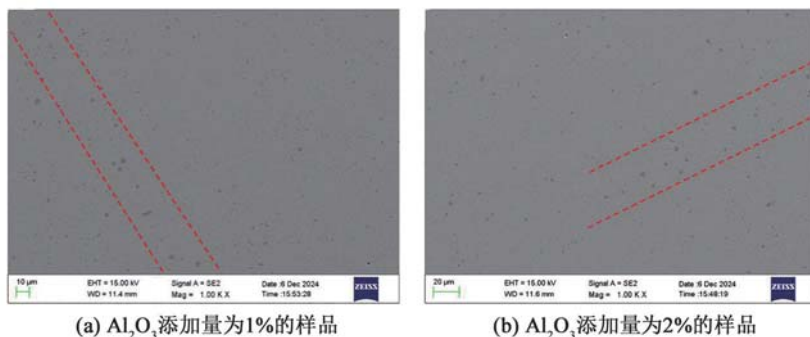


图9 大尺寸夹杂物条带状聚集区

Fig.9 Banded accumulation area of large inclusions

3 结论与建议

(1) 采用真空电弧熔炼方法制备了不同微米夹杂物含量的样品,并利用CT成像和扫描电镜的方法评定

熔炼样品中夹杂物的尺寸和数量分布规律。结果表明,随着 Al_2O_3 添加量逐渐增多,试样中小尺寸和大尺寸夹杂物数量均有所增多。当 Al_2O_3 添加量超过 1% 时,扫描电镜表明试样内部发生 Al_2O_3 夹杂物团簇的现象,同时样品中夹杂物的数量升高不明显,宏观上表现为熔炼样品表面有白色透明的玻璃相。这是因为 Al_2O_3 的密度要小于钢水的密度, Al_2O_3 夹杂物团簇导致局部密度降低,在熔炼过程中受比重差异导致 Al_2O_3 上浮至样品的表面。

(2) 利用压痕试验测试了不同 Al_2O_3 添加量的试样力学性能。结果表明,抗拉强度随 Al_2O_3 添加量逐渐增高,当 Al_2O_3 添加量超过 1% 时,抗拉强度的增高不明显,这与样品中夹杂物的含量变化规律是一致的;而屈服强度呈现先升高, Al_2O_3 添加量超过 1% 后缓慢降低的趋势。屈服强度的降低是由于一方面夹杂物增加造成了局部应力集中引起裂纹萌生,另一方面夹杂物团簇呈条带状分布,破坏了基体的连续性。

(3) 夹杂物的分布特征和压痕试验结果表明,在 Al_2O_3 添加量为 0.2 % 和 0.6 % 的样品中夹杂物尺寸细小、分布弥散,其抗拉强度和屈服强度提高非常明显;而 Al_2O_3 添加量超过 1 % 后,基体中大尺寸夹杂物增多,同时出现夹杂物团簇现象,其屈服强度降低。因此,为了提高钢的性能,应控制小尺寸夹杂物的弥散分布,避免大尺寸夹杂物的形成和条带状分布。

参考文献:

- [1] 张学伟, 张立峰, 杨文, 等. 非金属夹杂物三维形貌及其包裹的非夹杂物颗粒物来源分析[J]. 冶金分析, 2016, 36(11): 1-10. DOI: 10.13228/j.boyuan.issn1000-7571.009950.
- [2] 吕利达, 陈广兴, 刘少先. 合金化热镀锌 IF 钢板表面短白条缺陷产生原因及演变机理研究[J]. 宝钢技术, 2024(5): 41-46. DOI: 10.3969/j.issn.1008-0716.2024.05.008.
- [3] 邱健兴. Q345qD 桥梁板低温冲击性能不合格原因分析[J]. 物理测试, 2024, 42(6): 46-50. DOI: 10.13228/j.boyuan.issn1001-0777.20230124.
- [4] 李东远, 宋述鹏, 卢泽, 等. 900 MPa 级管线钢热处理工艺优化及韧性波动分析[J]. 武汉科技大学学报, 2024, 47(6): 411-419.
- [5] 李静媛, 章为夷, 魏成富, 等. 钢中夹杂物与钢的性能及断裂[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2012.
- [6] 刘强, 李想, 程慧静, 等. 基于 X 射线显微镜的钢中夹杂物三维结构分析[J]. 冶金分析, 2024, 44(11): 20-27. DOI: 10.13228/j.boyuan.issn1000-7571.012514.
- [7] 张国滨, 宁玫, 周欣欣. 钢中非金属夹杂物分析[J]. 理化检验-物理分册, 2021, 57(12): 1-7.
- [8] 耿鑫, 宋波, 刘涛, 等. 38CrMoAl 钢精炼过程夹杂物生成及演变规律[J]. 中国冶金, 2022, 32(11): 106-114. DOI: 10.13228/j.boyuan.issn1006-9356.20220419.
- [9] 代维, 朱祥, 康文捷, 等. Inconel600 合金管冷拉拔开裂原因[J]. 机械工程材料, 2021, 45(6): 14-19. DOI: 10.11973/jxgccl202106003.
- [10] ZERBST U, MADIA M, KLINGER C, et al. Defects as a root cause of fatigue failure of metallic components. II: Non-metallic inclusions[J]. Engineering Failure Analysis, 2019, 98: 228-239. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2019.01.054.
- [11] 王妍, 尹治力, 杜进英. 特大型支承辊断裂原因分析[J]. 大型铸锻件, 2023(1): 36-39. DOI: 10.14147/j.cnki.51-1396/tg.2023.01.007.
- [12] SONG Y, ZHANG H N, REN L. A review of research on MnS inclusions in high-quality steel[J]. Engineering Reports, 2024, 6(5): e12892. DOI: 10.1002/eng2.12892.
- [13] 刘强, 楚雪峰, 潜美丽. ICP-AES 法测定低合金钢中锰含量的标准比较[J]. 山西冶金, 2024, 47(9): 4-7. DOI: 10.16525/j.cnki.cn14-1167/tf.2024.09.002.
- [14] GHOSH A, MODAK P, DUTTA R, et al. Effect of MnS inclusion and crystallographic texture on anisotropy in Charpy impact toughness of low carbon ferritic steel[J]. Materials Science and Engineering: A, 2016, 654: 298-308. DOI: 10.1016/j.msea.2015.12.047.

- [15] WU M, FANG W, CHEN R M, et al. Mechanical anisotropy and local ductility in transverse tensile deformation in hot rolled steels: The role of MnS inclusions[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2019, 744: 324-334. DOI: 10.1016/j.msea.2018.12.026.
- [16] 王举金, 张立峰, 任英. 炼钢过程反应热力学与动力学及其在数值模拟仿真的应用研究进展[J]. *工程科学学报*, 2024, 46(11): 1960-1977. DOI: 10.13374/j.issn2095-9389.2023.10.26.003.
- [17] 张博文, 李小勇, 余慧, 等. 无取向硅钢凝固相变及析出相热力学计算与分析[J]. *河北冶金*, 2023(12): 20-27. DOI: 10.13630/j.cnki.13-1172.2023.1203.
- [18] 王国承. 钢中夹杂物尺寸控制理论与技术[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2015.
- [19] 沈鸿葵, 林峰, 韩明亮, 等. 轻质高熵高温合金成分设计研究进展[J]. *中国材料进展*, 2025, 44(1): 40-48.
- [20] 郭顺, 王朋坤, 顾介仁, 等. 电弧熔炼 Ti₆Al₄V/B₄C 复合材料微观组织与力学性能[J]. *焊接学报*, 2022, 43(9): 62-68. DOI:10.12073/j.hjxb.20220403002.
- [21] 严春莲, 尹立新, 任群, 等. 钢中夹杂物扫描电镜自动统计分析结果的影响因素探讨[J]. *冶金分析*, 2018, 38(8): 1-10. DOI: 10.13228/j.boyuan.issn1000-7571.010282.
- [22] YOSHINAKA F, NAKAMURA T, TAKEUCHI A, et al. Initiation and growth behaviour of small internal fatigue cracks in Ti-6Al-4V via synchrotron radiation microcomputed tomography[J]. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, 2019, 42(9): 2093-2105. DOI: 10.1111/ffe.13085.
- [23] 汤铮, 马娟娟, 李伟斌, 等. 基于神经网络的连续球压痕法预测钢轨钢拉伸力学性能[J]. *机械制造*, 2024, 62(8): 75-78.
- [24] 方健, 董莉, 陈天斌, 等. 仪器化压入技术在高铁轮辋原位性能表征中的应用[J]. *中国科学(物理学、力学、天文学)*, 2023, 53(1): 115-127.
- [25] CHEN H, CAI L X, BAO C. Equivalent-energy indentation method to predict the tensile properties of light alloys[J]. *Materials & Design*, 2019, 162: 322-330. DOI: 10.1016/j.matdes.2018.11.058.
- [26] 黄远涛, 郭峰. 基于夹杂物控制工艺的 Q235B 热轧板失效机理及优化研究[J]. *金属材料与冶金工程*, 2024, 52(4): 12-16.



(上接第 28 页)

参考文献:

- [1] 王波, 李民, 刘世萱, 等. 海洋资料浮标观测技术应用现状及发展趋势[J]. *仪器仪表学报*, 2014, 35(11): 2401-2414. DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.2014.11.001.
- [2] 许建平, 朱伯康. ARGO 全球海洋观测网与我国海洋监测技术的发展[J]. *海洋技术*, 2001, 20(2): 15-17.
- [3] 戴洪磊, 牟乃夏, 王春玉, 等. 我国海洋浮标发展现状及趋势[J]. *气象水文海洋仪器*, 2014, 31(2): 118-121. DOI: 10.19441/j.cnki.issn1006-009x.2014.02.031.
- [4] 张海君, 苏仁伟, 唐斌, 等. 未来海洋通信网络架构与关键技术[J]. *无线电通信技术*, 2021, 47(4): 384-391. DOI: 10.3969/j.issn.1003-3114.2021.04.002.
- [5] 吴佳丽, 刘向南, 孙春蕾, 等. 海洋移动通信网络无线资源管控[J]. *移动通信*, 2024, 48(11): 77-85.
- [6] 明彦坤, 董昊楠, 吴以宁, 等. 基于 MQTT 与 LoRa 的海洋机器人水面协同通信系统设计[J]. *数字海洋与水下攻防*, 2024, 7(4): 411-418. DOI: 10.19838/j.issn.2096-5753.2024.04.008.
- [7] 田雅合. 基于水声传感网络的组网与认证技术研究[D]. 南京: 东南大学, 2023. DOI: 10.27014/d.cnki.gdnau.2023.005440.
- [8] 汪炼. 微型海洋浮标的设计与实现[D]. 海口: 海南大学, 2020. DOI: 10.27073/d.cnki.ghadu.2020.000090.
- [9] 陈志国, 黎阳, 李伊苏. 窄带物联网技术及其应用[J]. *世界广播电视*, 2017(1): 4.

