

基于内聚力模型夹杂物诱发 Q235 钢坯裂纹萌生与扩展的有限元分析

张凤君¹, 冯乾², 宋晓明^{2*}, 宋劲松², 杜祥科³, 张帅⁴, 杨志刚¹, 邸高翔⁵

1. 承德市安全生产技术服务中心, 河北 承德, 067000
2. 河北石油职业技术大学, 机械系, 河北 承德, 067000
3. 宽城双兴矿山设备制造有限公司, 河北 承德, 067000
4. 中信戴卡股份有限公司, 河北 秦皇岛, 066011
5. 华北铝业新材料科技有限公司, 河北 保定, 072750

摘要: Q235 钢凭借其出色的综合性能、低廉的成本和良好的加工性, 被广泛应用于建筑、桥梁、压力容器等及时行业。在超高拉速连铸过程中, 非金属夹杂物作为典型的不连续缺陷, 是诱发铸坯微裂纹并恶化其质量的关键因素。为阐明夹杂物对 Q235B 钢基体力学性能及界面开裂行为的影响, 本研究结合高温单轴拉伸实验与 Abaqus 有限元模拟, 基于内聚力模型建立了嵌入不同特征夹杂物的微观力学模型。系统分析了 Q235B 钢中典型夹杂物 (Al₂O₃、MnS 及硅酸类复合夹杂物) 在热-力耦合作用下, 从界面初始损伤到裂纹萌生与扩展的完整过程。结果表明: 非金属夹杂物的种类与几何形态显著影响钢基体中的应力场分布。其中, 具有尖锐棱角的复合夹杂物最易引发局部应力集中, 其界面峰值应力高达 30.5 MPa, 在最低外加应力 (11.3 MPa) 下即率先萌生裂纹, 而 MnS 和 Al₂O₃ 夹杂物的相应值分别为 20.7 MPa 和 23.4 MPa。所有裂纹均在最大界面应力处 ($\alpha=90^\circ$) 初始形核, 随后应力集中转移至裂纹尖端, 驱动裂纹沿界面扩展并最终穿透基体。复合夹杂物因几何形状不规则, 其界面承载能力最弱、损伤扩展最快、能量耗散最高, 对基体连续性破坏最为严重。本研究通过实验与模拟相结合, 揭示了连铸过程中夹杂物/基体界面裂纹的萌生理与临界条件, 为通过控制夹杂物形态 (尤其是避免生成尖角状复合夹杂物) 来提升 Q235 钢铸坯质量提供了明确的理论依据。

关键词: Q235 钢; 非金属夹杂物; 内聚力模型; 界面开裂; 应力集中; 有限元分析

Numerical simulation of crack initiation and propagation induced by inclusions in Q235 steel billets analyzed by cohesive force model

Fengjun Zhang¹, Qian Feng², Xiaoming Song^{2*}, Jinsong Song², Xiangke Du³, Shuai Zhang⁴, Zhigang Yang¹, Gaoxiang Di⁵

1. Chengde Work Safety Technology Service Center, Chengde 067000, Hebei, China.
2. Department of Mechanical Engineering, Hebei Petroleum University of Technology, Chengde 067000, Hebei, China.
3. Kuancheng Shuangxing Mining Equipment Manufacturing Co., Ltd., Chengde 067000, Hebei, China.
4. CITIC Dicastal Co., Ltd., Qinhuangdao 066011, Hebei, China.

5. North China Aluminum New Material Technology Co., Ltd., Baoding 072750, Hebei, China.

Abstract: Q235 steel is widely used in industries such as construction, bridge building and the manufacture of pressure vessels due to its excellent all-round performance, low cost and good workability. In the ultra-high-speed continuous casting process, non-metallic inclusions are the key discontinuous defects that induce microcracks in the cast billet and deteriorate its quality. In order to elucidate the influence of inclusions on the mechanical properties and interfacial cracking behaviour of the Q235B steel matrix, this study combined high-temperature uniaxial tensile experiments with Abaqus finite element simulation. A micro-mechanical model was then established that was embedded with different characteristic inclusions, based on the cohesive force model. The system analysed the complete process of typical inclusions (Al_2O_3 , MnS and silicate composite inclusions) in Q235B steel under thermal-mechanical coupling, from initial interface damage to crack initiation and propagation. The results indicate that the types and geometric shapes of non-metallic inclusions significantly affect the stress field distribution in the steel matrix. Composite inclusions with sharp edges were found to be most prone to local stress concentration, with a peak interface stress of up to 30.5 MPa. Cracks first initiate at the lowest applied stress (11.3 MPa), whereas the corresponding values for MnS and Al_2O_3 inclusions are 20.7 MPa and 23.4 MPa, respectively. All cracks initially nucleate at the maximum interface stress ($\alpha=90^\circ$), after which stress concentration transfers to the crack tip. This drives the crack to propagate along the interface and ultimately penetrate the matrix. Due to their irregular geometric shapes, composite inclusions have the weakest interface bearing capacity, the fastest damage propagation and the highest energy dissipation, causing the most severe damage to the continuity of the matrix. This study combines experiments and simulations to reveal the initiation mechanism and critical conditions of interface cracks between inclusions and the matrix during continuous casting. This provides a clear theoretical basis for improving the quality of Q235 steel castings by controlling the morphology of the inclusions and avoiding the formation of sharp composite inclusions.

Keywords: Q235 steel; Inclusions; Cohesive force model; Interface cracking; Stress concentration; Finite Element Analysis

Q235 钢（尤其是广泛使用的 Q235B 级）作为我国产量最大、应用最广的普通碳素结构钢，因其优异的韧性、良好的焊接性能及成本优势，在建筑结构、桥梁工程、机械零部件、压力容器及交通运输等领域扮演着基石角色^[1]。薄板坯连铸连轧技术作为一种高效、节能的短流程工艺，极大满足了 Q235 钢的大规模生产需求^[2]。然而，在该工艺的超高拉速连铸过程中，结晶器内初生坯壳的凝固行为对钢液的洁净度极为敏感。钢液中残留的非金属夹杂物（如 Al_2O_3 、MnS 及复合氧化物等）是典型的微观不连续缺陷，它们破坏了钢基体的完整性，极易在坯壳内部引发应力集中，成为裂纹萌生的核心源头^[3-5]。铸坯裂纹若在后续轧制中无法愈合，将直接遗传至成品，严重影响钢材的性能与服役寿命。因此，深入理解不同种类夹杂物诱发 Q235 钢铸坯微裂纹的微观机理，对于优化连铸工艺、提升铸坯本征质量具有重要的理论意义与工程价值。

夹杂物诱发基体开裂的物理本质在于其与钢基体在力学性能（如弹性模量、热膨胀系数）上的失配，以及几何形态造成的不连续性^[6]。在外部载荷（如热应力、机械弯曲应力）作用下，这种失配会导致夹杂物/基体界面处产生显著的局部应力集中，进而驱动界面脱粘、孔洞形核与裂纹扩展。研究表明，夹杂物的种类、尺寸、形态及分布均对材料的最终断裂行为有决定性影响^[7, 8]。近年来，研究学者们为了弄清夹杂物诱发裂纹萌生与扩展的机理，集中利用模拟与实验相结合的方法进行研

究。刘鹏飞^[9]利用晶体塑性-相场耦合方法对镍基高温合金中夹杂物对裂纹演化机制进行研究,引入多重疲劳裂纹驱动力,模拟夹杂物局部损伤累积导致材料弱化、失效直至裂纹扩展全过程。Guan^[10]等人利用 Voronoi 有限元方法证实了非金属夹杂物对铸坯启裂的直接影响,并说明当非金属夹杂物柔软、小而浅时,裂纹更容易生长。D. Krewerth 等人^[11]分析了多种 42CrMo4 铸坯高周裂纹的诱发成因,结果表明,不仅夹杂物的种类与裂纹起始失效类型有关系,夹杂物的深度和力学性能也与裂纹的扩展有直接影响。由此可见,夹杂物的特征和物理性能将直接决定铸坯质量的好坏。然而,现有研究多集中于单一夹杂物类型且在材料服役状态中,针对连铸高温过程中,仍缺乏夹杂物诱发界面损伤演变全过程研究。

因此,本文以某钢厂超高拉速连铸生产的 Q235B 钢为研究对象,采用高温实验和数值模拟相结合的研究方法明确不同形状、种类及力学性能的夹杂物对铸坯裂纹萌生与扩展的影响规律。不仅系统分析了 Q235 钢的高温力学性能,还全面表征了不同种夹杂物的微观形貌和力学性能。最重要的是,基于内聚力模型利用 Abaqus 有限元模拟软件分析了高温拉伸载荷下夹杂物/基体界面的应力分布、损伤起始与演化、裂纹扩展路径以及能量耗散特征。旨在定量揭示夹杂物种类与几何形态对 Q235 钢铸坯界面开裂行为的影响机理,为连铸工艺中通过“夹杂物形态控制”来抑制铸坯裂纹提供理论依据。

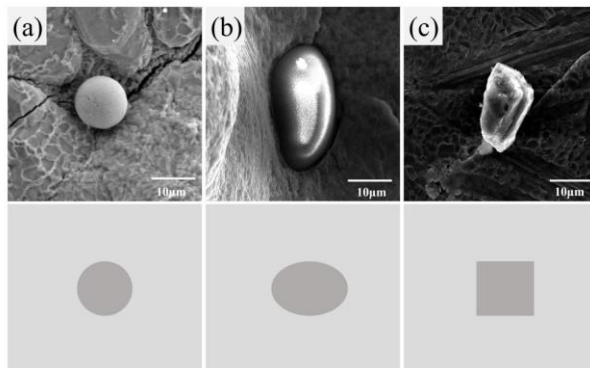
1 材料与方法

1.1 试样及热处理方法

研究中所采用的 Q235B 钢是某钢厂中超高拉速薄板坯工况下进行生产的,主要化学成分为: C 0.16, Mn 0.45, Si 0.21, S 0.018, P 0.021, 余量为 Fe。首先将 Q235B 薄板坯加工为 $\Phi 10 \text{ mm} \times 120 \text{ mm}$ 且在两端有 M10 的处理试样,其次利用 Gleeble-3800 热模拟试验机将试样以 $10 \text{ }^\circ\text{C/s}$ 的升温速率加热至 $1350 \text{ }^\circ\text{C}$ 并保温 3 分钟,然后以 $35 \text{ }^\circ\text{C/s}$ 的速率降温至 $1200 \text{ }^\circ\text{C}$ 进行拉伸实验,直至拉断,确保全过程与高拉速薄板坯连铸工况保持一致,材料的高温延性损失采用真实总应变能进行评估。

1.2 夹杂物/基体界面模型构建方法

基于前期的研究基础可知, Q235B 铸坯中主要存在三种夹杂物,分别为:圆形的 MnS 夹杂物、椭圆形状的 Al_2O_3 夹杂物和 SiO_2 包覆结合其他微量元素形成的不规则的硅酸盐类夹杂物,基于该形貌构建典型夹杂物的几何模型,如图 1 所示。



(a) MnS 夹杂物显微形貌及模型; (b) Al_2O_3 夹杂物显微形貌及模型; (c) 硅酸盐复合夹杂物显微形貌及模型

图 1 Q235 铸坯中典型夹杂物显微形貌及几何模型

Fig. 1 Typical microstructure and geometric model of inclusions in Q235 castings

1.3 内聚力模型的有限元模拟方法

为研究夹杂物/基体界面的裂纹萌生与扩展规律,基于热模拟实验获得的真实应力-应变曲线,基于 Abaqus 软件中内聚力有限元模型,将钢基体设置为弹塑性变形,非金属夹杂物设置为弹性变形(视为脆性相)。基体尺寸为 $50\ \mu\text{m} \times 50\ \mu\text{m}$ 的正方形,单个夹杂物内嵌于中心,夹杂物等效直径约为 $10\ \mu\text{m}$ 。单元类型:基体与夹杂物采用平面应变四节点减缩积分单元(CPS4R),界面层采用零厚度四节点内聚力单元(COH2D4)。对夹杂物周围区域进行网格细化,以保证应力计算精度。边界条件如图 2 所示:模型底部固定,上端施加竖直向上的位移载荷,速度为 $0.05\ \text{mm/s}$,该速度对应于连铸应变率转换为单轴拉伸的加载速率。夹杂物性能参数如表 1 所示。

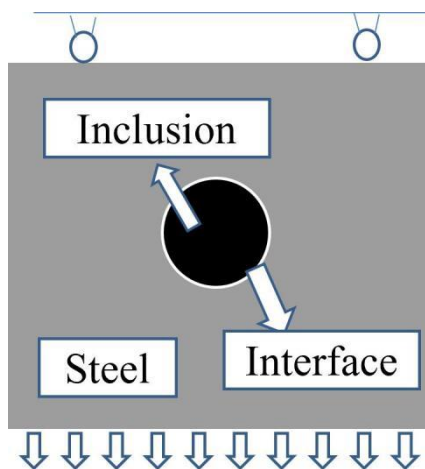


图 2 夹杂物/基体边界条件示意图

Fig. 2 Schematic diagram of boundary conditions for inclusions/matrix

表 1 夹杂物和钢基体的弹性模量和泊松比

Table 1 Elastic modulus and Poisson's ratio of inclusions and steel matrix

物相种类	杨氏模量/(GPa)	泊松比
钢基体	4.2	0.37
Al_2O_3	353.1	0.21
MnS	103	0.3
复合夹杂物	330	0.14

2 结果与分析

2.1 单轴拉伸实验及模型验证

图 3 为 Q235 在 $1050^\circ\text{C}\sim 1350^\circ\text{C}$ 温度下的应力-应变曲线实验结果。由图 3 可知,随着温度的升高,铸坯的抗拉强度、屈服强度和真实应变总能量呈降低趋势。在结晶器温度 (1200°C) 时, Q235 铸坯的抗拉强度约为 $18\ \text{MPa}$,屈服强度约为 $15\ \text{MPa}$,真实总应变能约为 $0.34\ \text{J/mm}^2$ 。该曲线反映了材料在连铸相关热-力学条件下的宏观力学行为,为后续有限元分析提供了基础参数。

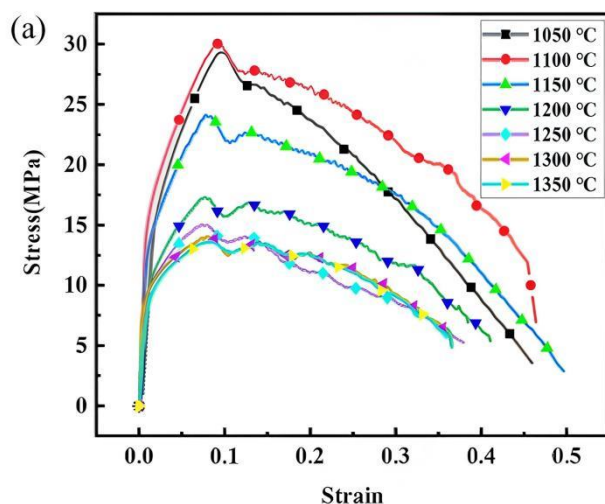


图 3 Q235 铸坯在不同温度下的应力-应变曲线

Fig. 3 Stress strain curves of Q235 castings at different temperatures

为验证有限元模型的可靠性，将模拟所得应力-应变曲线与实验结果进行对比，如图 6 所示。两者在弹性段、屈服段及软化段均表现出良好的一致性，平均相对误差在允许范围内（例如<5%），表明所建立的内聚力模型能够有效反映 Q235B 钢在该工况下的力学响应。

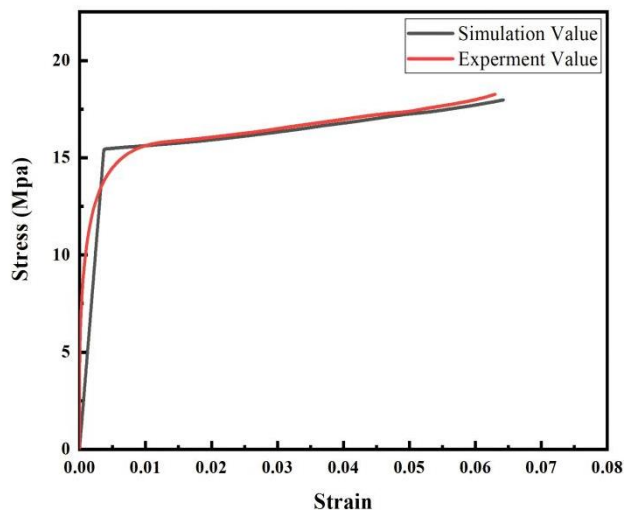


图 4 单轴拉伸实验与仿真误差分析

Fig. 4 Error Analysis of Uniaxial Tensile Experiment and Simulation

2.2 夹杂物/基体界面启裂行为研究

加载过程中的应力分布如图 5 所示，夹杂物和钢基体最初是连续的，首先应力集中于拉伸载荷的一端的钢基体内部，应力逐渐扩散至夹杂物内部区域，裂纹萌生前，夹杂物与基体未分离，界面未发生损伤，夹杂物与基体均处于弹性变化范围内，不同类型的夹杂物均呈现类似规律。

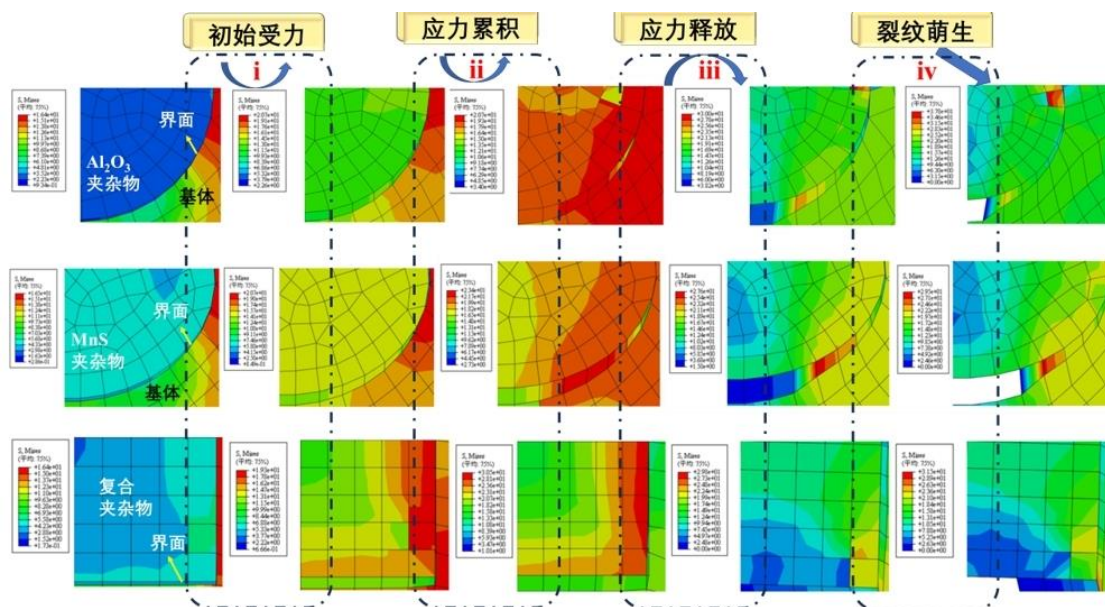


图 5 Q235 钢中典型夹杂物的应力分布模拟结果

Fig. 5 Simulation results of stress distribution of typical inclusions in Q235 steel

应力变化规律为：界面初始受力，会存在应力集中，当达到界面的最大强度之后，会应力释放，最终界面裂纹萌生。其中夹杂物破坏了基体的不连续性，应力累积导致应力分布不均匀，然后最大应力产生在夹杂物-基体界面处，其中 MnS、Al₂O₃ 和复合夹杂物此时的界面的应力分别为 20.7 MPa、23.4 MPa 和 30.5 MPa，而且在裂纹扩展的过程中，材料的应力在逐渐减小。复合夹杂物的应力最大，在载荷继续加载期间，界面处的应力逐渐减小，最终导致界面失效。随着界面裂纹的萌生，基体与夹杂之间的应力得到释放，应力集中转移至新的裂纹尖端，成为裂纹扩展的驱动力。一旦裂纹萌生，界面上的间隙将迅速增大缺口，在裂纹扩展的过程中还可以发现模型中的应力逐渐减小。

与此同时，裂纹萌生前，最大应力位于夹杂物与基体接触的地方，角度 α （与 y 轴之间的夹角）为 90°。夹杂物基体界面裂纹首先在应力集中处以拉裂形式萌生，裂纹沿界面逐渐扩展；最终进入基体，导致断裂；界面的开裂方式与界面的朝向和加载有关。当界面与加载方向夹角较大时，界面主要以拉裂形式破坏。较小时，界面以剪切开裂为主。应力集中于夹杂物与基体接触的地方，角度为 90° 裂纹产生于夹杂物-基体界面应力最大的地方。随着裂纹的产生，裂纹发生处夹杂物和基体的应力集中效应减弱，裂纹尖端的应力集中效应变得非常突出，这将进一步促进裂纹沿界面扩展，最终使裂纹进入基体，导致破坏。

2.3 夹杂物/基体界面裂纹扩展行为研究

图 6 为不同夹杂物模型的损伤（SDEG）云图。图 6（a₁）~（c₁）为界面开始损伤阶段，在临近夹杂物应力集中的一端出现 SDEG 峰值，损伤区域为极小部分，在夹杂物的最左端位置。图 6（a₂）~（c₂）和（a₃）~（c₂）为界面裂纹扩展阶段，可以发现，随着拉伸时间的变长，界面处损伤的不断积累变大，相同位置的 SDEG 的值变大，直至为 1，界面产生裂纹，继而随着裂纹尖端的移动，界面受到损伤的区域扩大，图 6（a₄）~（c₄）的第四幅图表示界面开始发生失效的破坏阶段，当 SDEG=1 表示界面发生破坏，产生裂纹，夹杂物与基体之间的界面发生脱离，随着位移载荷的增加，界面失效不断向下一位置进行扩展。

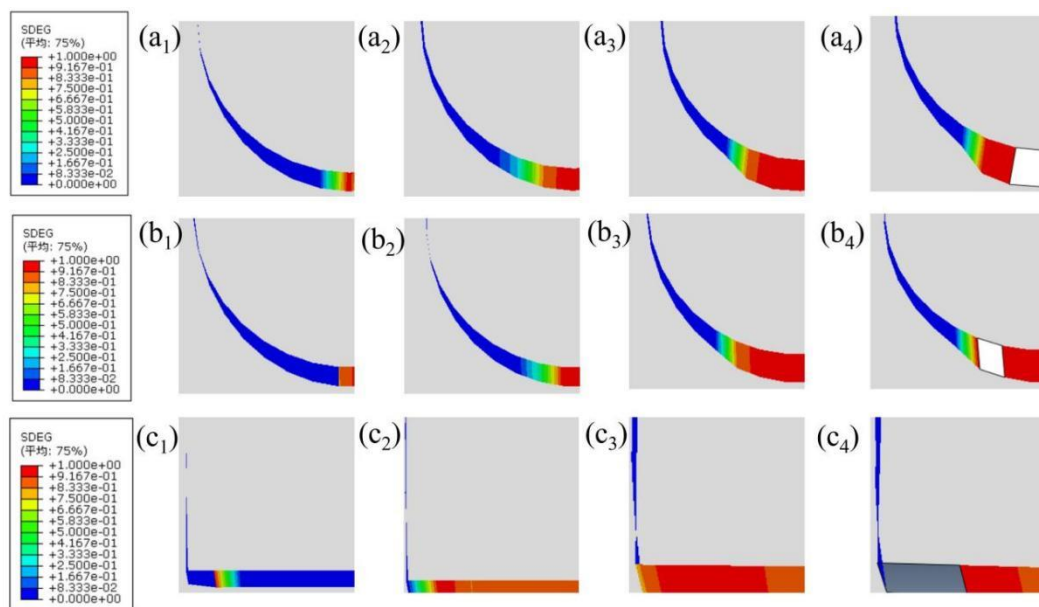
(a) MnS 夹杂物 ; (b) Al₂O₃ 夹杂物 ; (c) 复合夹杂物

图 6 典型夹杂物的损伤因子模拟结果

Fig. 6 Simulation results of typical inclusion damage factors

为进一步研究夹杂物/基体界面裂纹扩展行为,提取相同位置,即 $\alpha=90^\circ$ 时,提取不同模型相同位置的损伤因子 (SDEG) 进行比较,其 SDEG-时间曲线如图 7 所示。由图 7 可知,当夹杂物为复合夹杂物时,其界面在相同的载荷下率先出现界面开裂,这是因为复合夹杂物的界面位置对材料的危害较大,而对于嵌入 MnS 和 Al₂O₃ 夹杂物的钢基体,发生损伤的时间较晚,水平向右移了约 0.33 s。对比三条曲线的 SDEG 曲线,均呈线性上升,上升的趋势和幅度大致一样。此外,夹杂物不同,界面的承载能力不同,临界断裂位移也不一样,当夹杂物为复合夹杂物时,由于该夹杂物相对存在棱角,更容易产生应力集中,所以导致该模型界面初始应力状态便达到最大值 11.3 MPa,复合夹杂物大于 Al₂O₃ 大于 MnS。复合夹杂物的界面所积聚的能量提前达到了材料所能抵抗的最大值,所以复合夹杂物在发生较小的位移之后,界面裂纹扩展。

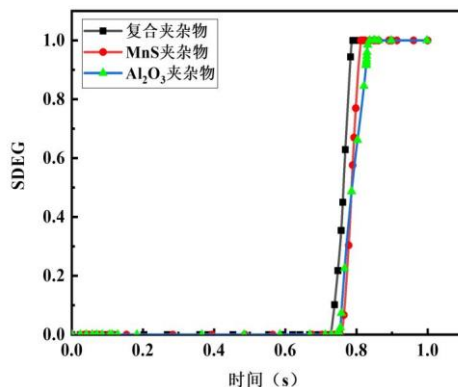


图 7 典型夹杂物的损伤因子随时间变化曲线

Fig. 7 Time variation curve of damage factor for typical inclusions

4 结论

(1) 通过高温单轴拉伸实验获得了 Q235B 钢在连铸相关温度 (1050~1350 °C) 下的应力-应变

曲线, 并以此验证了内聚力有限元模型的可靠性。模拟结果与实验曲线吻合良好, 表明所建立的模型能够准确反映夹杂物/基体界面的损伤演化过程;

(2) 夹杂物的种类与几何形态显著影响界面应力集中程度。复合夹杂物(四边形尖角)的界面峰值应力最高(30.5 MPa), 其次为 Al_2O_3 (23.4 MPa) 和 MnS (20.7 MPa)。所有裂纹均在 $\alpha=90^\circ$ (最大界面应力位置) 初始形核, 随后应力集中转移至裂纹尖端, 驱动裂纹沿界面扩展, 最终穿透基体;

(3) 界面损伤因子(SDEG)演化规律表明, 复合夹杂物的界面损伤起始最早, 较 MnS 和 Al_2O_3 提前约 0.33 s。其临界断裂位移最小, 承载能力最弱, 且损伤扩展速率最快。尖角几何形态是导致界面脆性开裂的关键因素。

参考文献

- [1] 丁发兴, 余志武, 温海林. 高温后 Q235 钢材力学性能试验研究[J]. 建筑材料学报, 2006, (2): 245-249.
- [2] 杨晓东. 板坯连铸凝固过程中温度与应力的有限元分析[D]. 重庆: 重庆大学, 2010.
- [3] 秦彦帅, 曲艳东, 李继野, 等. 爆炸冲击载荷下钢板-混凝土组合结构的动态性能和破坏机理研究进展[J]. 混凝土与水泥制品, 2021, (3): 82-87.
- [4] Mishnaevsky Jr L, Brøndsted P. Three-dimensional numerical modelling of damage initiation in unidirectional fiber-reinforced composites with ductile matrix[J]. Materials Science and Engineering: A, 2008, 498(1-2): 81-86.
- [5] Gao J, Kedir N, Hernandez J A, et al. Dynamic fracture of glass fiber-reinforced ductile polymer matrix composites and loading rate effect[J]. Composites Part B: Engineering, 2022, 235: 109754.
- [6] Ziccarelli A, Kanvinde A, Deierlein G. Cyclic adaptive cohesive zone model to simulate ductile crack propagation in steel structures due to ultra - low cycle fatigue[J]. Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures, 2023, 46(5): 1821-1836.
- [7] 李昌鹏, 庞建超, 王子龙, 等. 2 GPa 超高强中锰钢中的夹杂物对其高周疲劳性能的影响[J]. 材料研究学报, 2025, 39(12): 892-900.
- [8] 邸高翔. 超高速薄板坯初生坯壳裂纹萌生、扩展模拟研究[D]. 唐山: 华北理工大学, 2024.
- [9] 刘鹏飞. 基于晶体塑性-相场耦合方法的镍基高温合金疲劳裂纹演化机制研究[D]. 北京: 北京科技大学, 2025.
- [10] Guan J, Wang L, Zhang C, et al. Effects of non-metallic inclusions on the crack propagation in bearing steel[J]. Tribology International, 2017, 106: 123-131.
- [11] Krewerth D, Lippmann T, Weidner A, et al. Influence of non-metallic inclusions on fatigue life in the very high cycle fatigue regime[J]. International Journal of Fatigue, 2016, 84: 40-52.

基金项目: 河北省高等学校科学技术研究项目 (BJ2026318, QN2024188), 承德市应用技术与开发暨可持续发展议程创新示范区专项科技计划项目 (202305B023, 202404B070, 202404B105)。

第 1 作者简介: 张凤君 (1979-), 女, 副高级工程师, 研究方向: 矿山安全技术及工程。E-mail: zhang03140311@163.com。

***通讯作者简介:** 宋晓明 (1987-), 男, 副教授, 研究方向: 材料力学。E-mail: songxm012@126.com。