



## 稀土对中锰耐磨钢高温热塑性的影响

李 民, 刘洪波, 车晓锐, 李 杰, 黄建坤, 张彩东, 李双江  
(河北河钢材料技术研究院有限公司智能炼钢创新中心, 石家庄 050023)

**摘 要:**采用 Gleeble3500 热模拟试验机、场发射扫描电镜(SEM)、OLS4100 共聚焦显微镜、金相显微镜等多项技术手段对不同稀土含量下中锰耐磨钢高温力学性能进行了系统研究。结果表明,在稀土含量(质量分数)为 0.038% 时,中锰钢在 700、800、900、1 000、1 100、1 200 °C 最大抗拉强度分别由 396.64、228.07、113.25、75.15、42.97、25.11 MPa 增加到 414.85、238.28、130.59、76.14、44.59、28.09 MPa。这是由于稀土的添加可细化晶粒尺寸从而增加钢的抗拉强度。金相实验表明,与未添加稀土相比,当稀土含量为 0.038% 时,中锰钢晶粒度由 6.80 级提高到 7.12 级。通过共聚焦显微镜发现稀土添加使中锰钢动态再结晶现象发生温度由 800 °C 延迟到 900 °C。此外,稀土添加可明显提高中锰钢在 1 000~1 200 °C 断面收缩率,分别从 47.3%、53.9%、46.78% 提高到 65.64%、76.56%、50.26%。即稀土的添加明显提高了中锰钢在 1 000~1 200 °C 高温热塑性。

**关键词:**中锰耐磨钢; 稀土; 高温热塑性; 断面收缩率; 动态再结晶

**DOI:**10. 20057/j. 1003-8620. N250527 **中图分类号:**TG142. 72

## Effort of Rare Earth on High Temperature Thermoplastic of Medium Manganese Wear-resistant Steel

Li Min, Liu Hongbo, Che Xiaorui, Li Jie, Huang Jiankun, Zhang Caidong, Li Shuangjiang  
(Intelligent Steelmaking Innovation center of Hebei Iron & Steel Materials Technology Research Institute Co., Ltd., Shijiazhuang 050023, China;)

**Abstract:** The high temperature mechanical properties of medium manganese wear-resistant steel with different rare earth content had been systematically studied by using Gleeble 3500 thermal simulation testing machine, SEM (scanning electron microscope), OLS4100 confocal microscope and metallographic microscope. The results showed that the maximum high temperature tensile strength of medium manganese steel increased from 396.64, 228.07, 113.25, 75.15, 42.97, 25.11 MPa to 414.85, 238.28, 130.59, 76.14, 44.59, 28.09 MPa respectively at 700, 800, 900, 1 000, 1 100, 1 200 °C with 0.038% rare earth content (mass fraction). This is because the addition of rare earths can refine the grain size and increase the tensile strength. Metallographic experiments showed that the grain size of medium manganese steel increased from 6.80 grade to 7.12 grade when rare earth content was 0.038% compared with that without adding rare earth. It was found that the temperature of dynamic recrystallization of manganese in medium manganese steel was delayed from 800 °C to 900 °C by rare earth addition. In addition, the addition of rare earth can significantly increase the reduction area (R. A.) of medium manganese steel at 1 000 °C-1 200 °C increased from 47.3%, 53.9%, 46.78% to 65.64%, 76.56%, 50.26% respectively. That is, the addition of rare earth significantly improves the high temperature thermoplasticity of medium manganese steel at 1 000 °C-1 200 °C.

**Key Words :** Medium Manganese Wear-resistant Steel; Rare Earth; High Temperature Thermoplastic; Reduction of Area; Dynamic Recrystallization

高碳中锰耐磨钢(简称“中锰钢”)因其优异的耐磨性能被广泛应用于冶金<sup>[1-2]</sup>、建材<sup>[3]</sup>、矿山<sup>[4-5]</sup>、机械<sup>[6-7]</sup>等相关领域。与传统耐磨钢相比,中锰钢耐磨性能更优,使用寿命更长<sup>[3]</sup>。然而,高 C<sup>[8-10]</sup>、高 Mn<sup>[11-13]</sup>含量的存在使得中锰钢热导率低<sup>[14-15]</sup>、液固两相区较宽<sup>[7]</sup>、偏析现象严重<sup>[16-18]</sup>,导致中锰钢难以

满足连铸生产,国内外只有少数企业能够进行连铸化生产,并且连铸产品的表面缺陷较严重,铸坯表面仍存在严重的裂纹缺陷,无法进行热装热送,导致能耗增加,资源浪费<sup>[19-20]</sup>。

铸坯裂纹产生的原因较为复杂,受钢种成分<sup>[21-23]</sup>、生产设备<sup>[24-26]</sup>、冶炼工艺<sup>[27-29]</sup>、凝固条件<sup>[30-31]</sup>

**基金项目:**河北省钢铁联合基金《高碳中锰耐磨钢凝固特性与组织调控机理研究》(E2021318004);中央引导地方科技发展资金项目《面向 LNG 用高锰奥氏体低温钢连铸技术基础研究》(216Z1009G)

**作者简介:**李 民(1995—),男,硕士,工程师; **E-mail :**limin03@hbisco.com; **收稿日期:**2025-08-18

Editorial Office of Special Steel. OA under CC BY-NC-ND 4.0

等多方面共同影响,但钢在高温下的力学性能才是最根本最内在的影响因素<sup>[32-33]</sup>。钢的热塑性是其高温力学性能的表现,是影响铸坯质量的内因,只有深入探究钢在不同凝固条件下的高温热塑性,才能更好的在工艺及生产设备上提出相应的解决措施,减少甚至根除中锰钢过程中的裂纹缺陷。然而,针对高锰钢在高温热塑性的研究较少,王育田等<sup>[34]</sup>通过Gleeble热模拟机对5%Mn含量的中锰钢的热塑性进行了模拟实验研究,发现形变诱导铁素体相变的发生导致钢在750℃的热塑性最低。孙剑等<sup>[19]</sup>研究了BTW1钢在600~1250℃温度下的高温热塑性,发现在加热温度为950℃时,BTW1钢的断面收缩率下降到最低值29.23%,为易脆断区间。近年来,随着中锰钢应用领域的不断扩大,中锰钢产业化及连铸生产越来越受到关注,尤其是与连铸坯质量相关的高温热塑性成为行业内研究的热点与难点问题<sup>[35-36]</sup>,因此,开展中锰钢高温热塑性研究是十分重要的。

钢中添加稀土可以起到净化钢液、变质夹杂以及微合金化的作用从而显著提高钢的力学性能<sup>[37-38]</sup>,然而,针对稀土对钢高温热塑性的研究几乎鲜有报道,本研究以中锰钢为研究对象,采用多种技术方法深入研究了稀土添加对中锰钢高温热塑性的及组织影响规律,为中锰钢凝固质量及连铸化生产提供了理论指导。

## 1 试验材料及方法

试验所用中锰钢在河钢材料技术研究院50 kg真空感应炉冶炼,其中,M钢未加入稀土,M-RE钢加入0.1%稀土合金,得到的铸锭切除冒口后在铸锭横截面中心取 $\phi 30 \text{ mm} \times 20 \text{ mm}$ 圆柱样品进行成分测试,表1为测试得到中锰钢主要成分。

表1 中锰钢化学成分(质量分数)

钢号	Chemical composition of medium manganese steel					
	%					
	C	Mn	Cr	Mo	La	Ce
M	0.888	7.88	2.04	0.334	-	-
M-RE	0.925	9.04	2.13	0.337	0.014	0.024

本研究高温力学性能测试采用美国公司Dynamic systems Inc-Gleeble3800热模拟机加热拉伸法进行操作,为保证实验的准确性,分别在铸锭相同位置取样,然后加工成 $\phi 10 \text{ mm} \times 120 \text{ mm}$ 的圆棒状,两端加工成M10螺纹,螺纹长度为15 mm,试验过程中以600℃/min的升温速率加热到1200℃然后

将其保温7 min以消除试样的组织应力。为了更加接近工业连铸现场,随后将试样再以600℃/min的速率降温至1000℃,然后以180℃/min的速率升温至1100℃,温度达到1100℃后,以180℃/min的速率分别升温(降温)至1200、1100、1000、900、800、700℃后。温度达到预设温度后保温30 s,以 $3 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ 的应变速率进行拉伸,直至断裂,具体加热制度如图所1示。试验结束后立即喷入大量压缩空气冷却以保持试样在高温状态下的断口形貌和金相特点。待实验结束后,统计不同稀土含量下各温度下的真应力-应变曲线与断面收缩率,从而对中锰钢的高温力学性能进行评判。

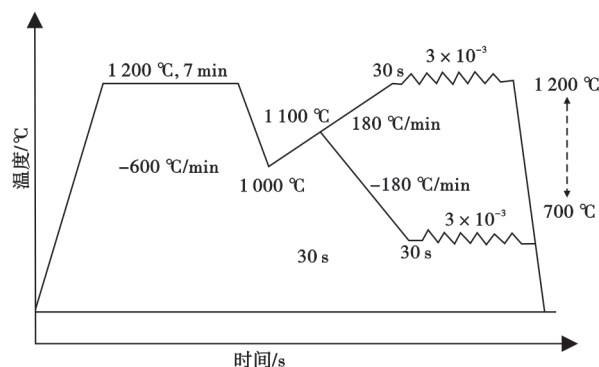


图1 高温拉伸实验温度控制示意图

Fig. 1 Schematic diagram of temperature regime in high temperature tensile test

采用场发射扫描电镜(SEM)对不同温度下高温拉伸断口进行宏观形貌分析,观察高温断裂机制,待分析完成后利用线切割在断口处进行纵抛,将纵抛样进行镶嵌并进行磨、抛后采用浓度为10%硝酸酒精溶液进行腐蚀,通过共聚焦显微镜进行微观形貌分析。

## 2 试验结果与讨论

### 2.1 最大抗拉强度及真应力应变曲线

如图2所示,稀土添加后,中锰钢在700、800、900、1000、1100、1200℃时最大抗拉强分别由396.64、228.07、113.25、75.15、42.97、25.11 MPa增加到414.85、238.28、130.59、76.14、44.59、28.09 MPa。稀土添加可以起到细化晶粒尺寸的作用,可能是导致中锰钢抗拉强度增大的原因。此外,某些钢种如果在高温拉伸过程中会出现动态再结晶现象,此现象的发生可以减缓钢基体中应力集中,也能起到细化晶粒的作用。在相同面积范围内,晶粒越细化,

其数量和密度增加,晶界面积也越大,对位错的阻碍错用增强,相应的抗拉强度也会增大<sup>[24]</sup>。

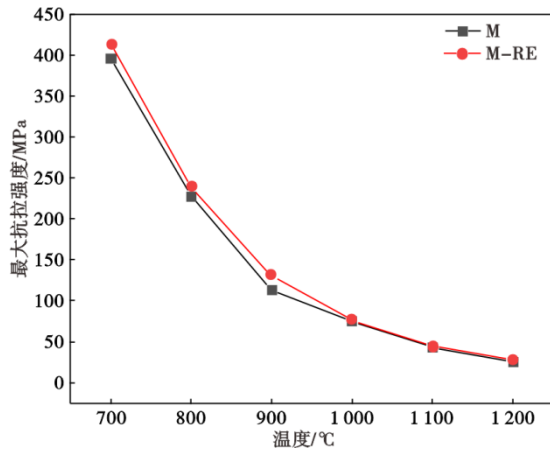


图2 中锰钢在各温度下最大抗拉强度

Fig. 2 Maximum tensile strength of medium manganese steel at various temperatures

图3为中锰钢700~1200℃时真应力应变曲线,M钢和M-RE钢在900~1200℃时曲线在峰值附近存在一段波动现象,此为动态再结晶软化和加工硬化共同作用的结果<sup>[32]</sup>,而在700℃时二者都未发生此现象,表明此温度下未发生动态再结晶现象;在800℃时M钢和M-RE钢曲线未能明显判断是否有此现象的发生,因此,需要通过拉伸断口进一步分析此现象是否存在。

为验证稀土添加是否起到对中锰钢晶粒尺寸细化的作用,对M钢与M-RE钢的开展了金相检测。因铸态组织较为粗大,为排除偶然因素影响,采用相同的轧制工艺对M钢和M-RE钢进行轧制后的金相检测如图4所示,M钢与M-RE钢的晶粒度分别为6.80级别与7.12级别,这表明稀土添加确实细化了中锰钢晶粒尺寸。

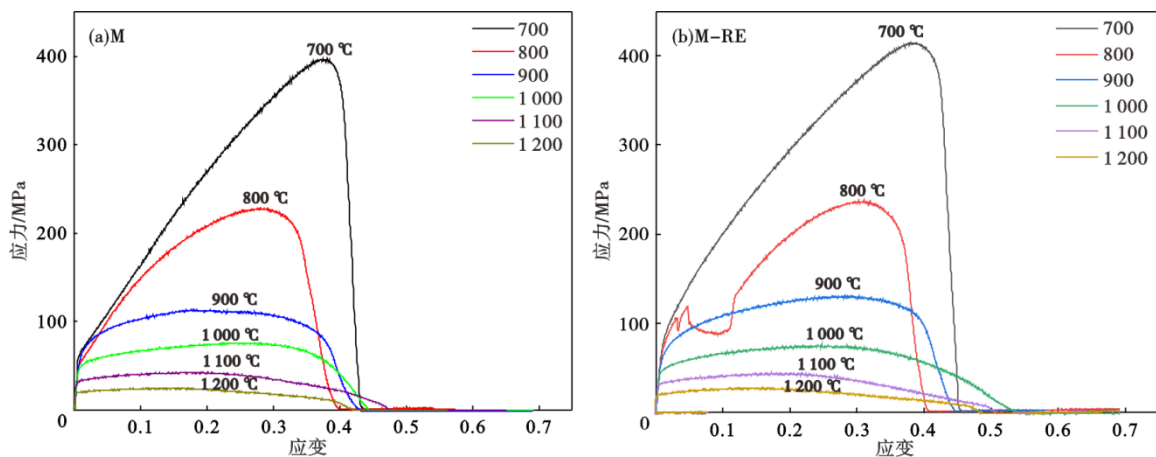


图3 中锰钢真应力应变曲线:(a)M钢,(b)M-RE钢

Fig. 3 True stress-strain curves of medium manganese steel : (a) M steel, (b) M-RE steel

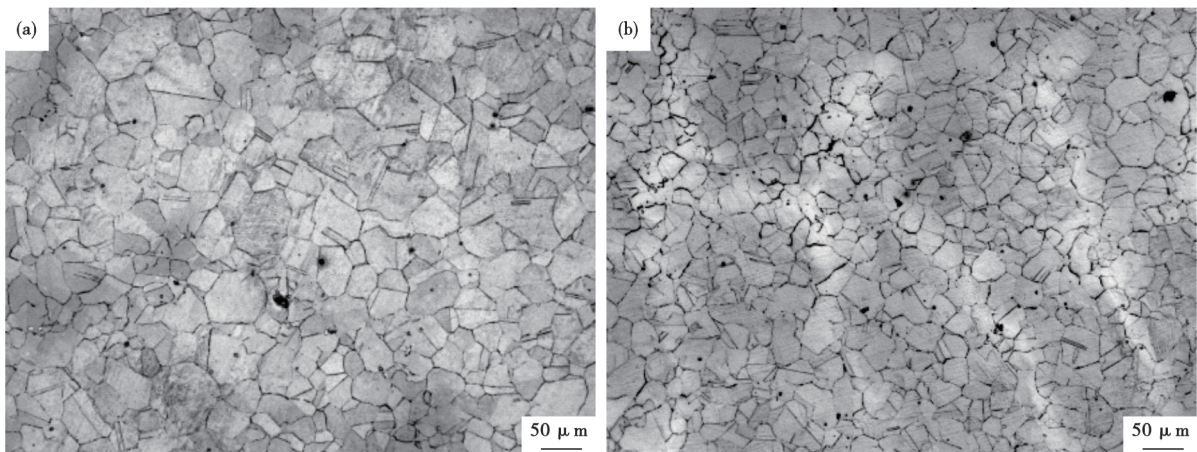


图4 中锰钢晶粒度:(a)M钢,(b)M-RE钢

Fig. 4 Grain size of medium manganese steel : (a) M steel, (b) M-RE steel

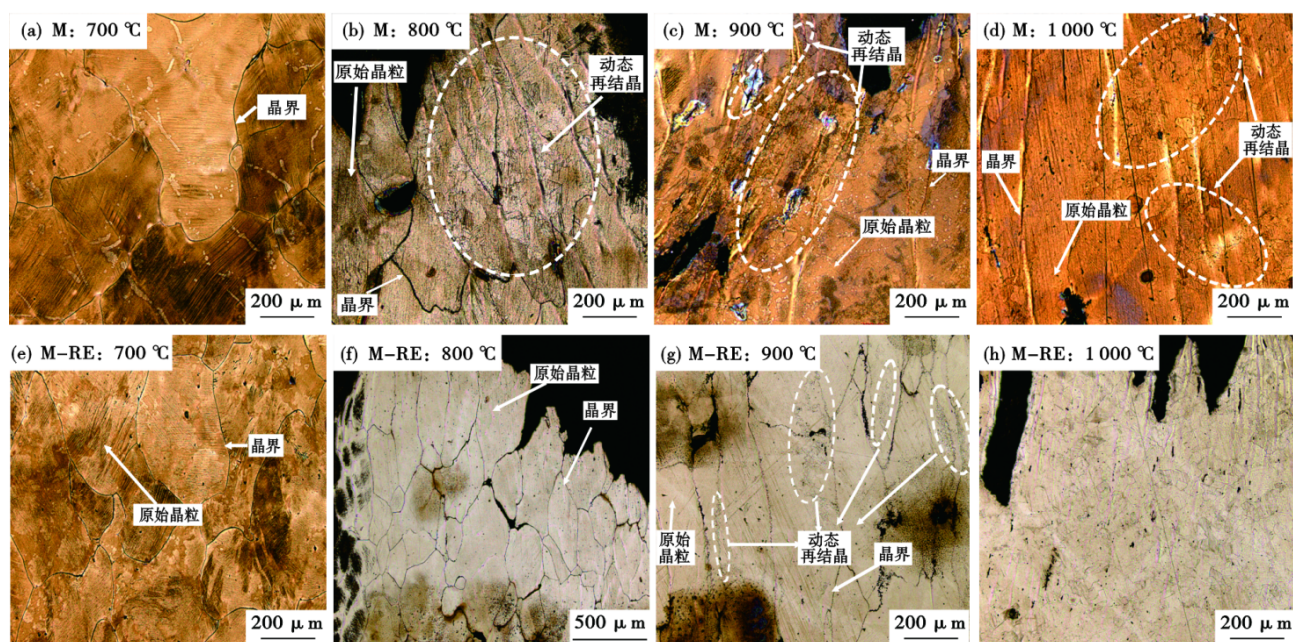


图5 700~1000 °C时中锰钢不同温度时高温拉伸断口组织形貌:(a)M,700 °C;(b)M,800 °C;(c)M,900 °C;(d)M,1 000 °C;(e)M-RE,700 °C;(f)M-RE,800 °C;(g)M-RE,900 °C;(h)M-RE,1 000 °C

Fig. 5 High temperature tensile fracture morphology of medium manganese steel at 700 °C–1 000 °C:(a)M,700 °C;(b)M,800 °C;(c)M,900 °C;(d)M,10 00 °C;(e)M-RE,700 °C;(f)M-RE,800 °C;(g)M-RE,900 °C;(h)M-RE,1 000 °C

## 2.2 动态再结晶

钢在高温拉伸过程中发生动态再结晶现象,也可以显著提高钢的高温热塑性能,因此,为进一步探究与确认中锰钢塑性性能是否与动态再结晶现象相关,将M钢、M-RE钢在700~1 000 °C内高温拉伸断口分别进行纵向抛光,经自动磨样机磨、抛处理后,然后采用10%硝酸酒精溶液对高温拉伸断口的纵截面进行了腐蚀,利用共聚焦显微镜观察了各温度下晶粒及其组织形貌图,具体结果如图5所示。

由图5所知,M钢在700 °C时,断口附近晶粒都较为粗大,未观察到明显动态再结晶现象,此时断口附近均为原始奥氏体晶粒。随着温度升高至800 °C,断口处可明显观察到存在与其它区域原始奥氏体晶粒不同的大量细小的晶粒,此为动态再结晶发生而导致的,随温度继续增加,在900 °C及1 000 °C时均发现了明显动态再结晶现象的发生。此外,温度升高,断口处细小晶粒的数量显著增加,表明动态再结晶现象发生区域与现象越来越多。

由图5(e)和(f)可知,M-RE钢在700、800 °C时都未发现明显的动态再结晶现象的发生,这可能与稀土加入,M-RE钢中晶粒较小,因此,其自身的高温塑性性能较为优良有关,未见明显动态再结晶现象中的细小晶粒。随着温度升高至900 °C时,M-RE

钢的断口处可观察到明显的动态再结晶现象的发生,随温度继续升高至1 000 °C,动态再结晶现象随处可见。

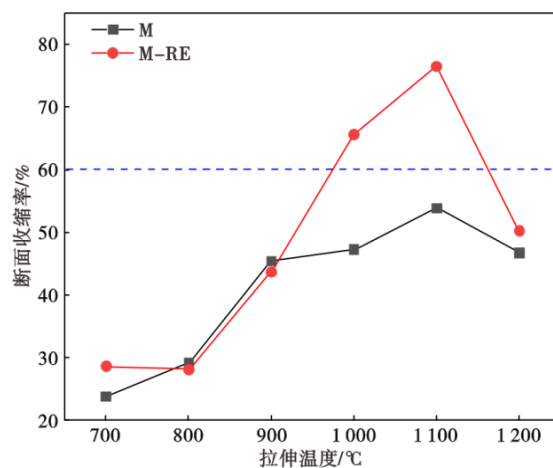


图6 中锰钢不同温度下断面收缩率

Fig. 6 The reduction of area of medium manganese steel at different temperatures

由以上分析可知,在高温拉伸实验过程中,M钢在800 °C动态再结晶现象就已发生,而在M-RE钢中900 °C才可见明显的动态再结晶现象的发生,但在700~800 °C时M钢的最大抗拉强度均小于M-RE钢,因此,稀土添加导致中锰钢最大抗拉强度的提升的

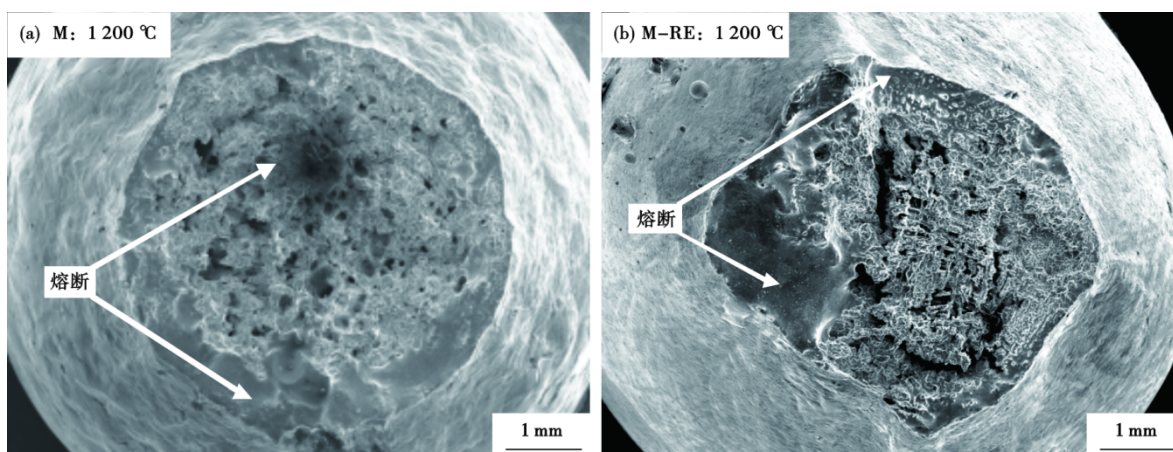


图7 中锰钢 1200 °C时的高温熔断断面:(a)M钢,(b)M-RE钢

Fig. 7 High temperature fracture morphology of medium manganese steel at 1200 °C: (a)M steel, (b)M-RE steel

根本原因是稀土细化晶粒尺寸,而非动态再结晶现象。此外,稀土的添加在一定程度上延缓了的中锰钢的动态再结晶现象的发生,这是因为稀土的添加会细化晶粒,提高钢的高温力学性能,因此,在高温拉伸过程中自身优异的性能便可抵抗裂纹的形成与延展,不需要动态再结晶现象发生进一步细化晶粒抵抗变形。

### 2.3 断面收缩率

断面收缩率(简称R.A.)可以在一定程度上对钢的延展性及裂纹敏感性进行表征。王新华等<sup>[39]</sup>指出当R.A.小于40%时,铸坯的裂纹敏感性会剧烈增强。但也有研究者指出<sup>[40]</sup>,当R.A.低于60%时,钢的热塑性能会显著下降,容易在连铸过程中产生裂纹缺陷,而在60%以上时,热塑性能良好。由此可知,针对钢种及工艺不同,目前,业界尚未对R.A.判断裂纹敏感性的绝对数值达到统一。在本文中,基于中锰钢在各温度下R.A.实测值,将R.A.为60%时作为热裂纹敏感性的判断依据。图6为统计得到M钢与M-RE钢在700~1200 °C内的R.A.的对比结果。

是否添加稀土对R.A.随温度的变化规律影响不大,主要影响R.A.在各温度下的绝对数值。在800~1100 °C时,R.A.都随温度的升高而增加,在1100 °C时R.A.均达到最大值,而在1200 °C时急剧下降,此温度下中锰钢高温拉伸过程时发生了熔断行为,如图7所示,导致R.A.迅速下降。此外,可以发现,在所测试温度范围内,M钢的R.A.都低于60%,表明此时中锰钢的热裂纹敏感性较强,并且在此温度区间内未见明显的第三脆性区间。而在M-RE钢中,在1000~1200 °C范围内的R.A.均显著高于M钢,R.A.值分别由1000~1200 °C的47.3%,53.9%,46.78%提高到65.64%,76.56%,50.26%。在1000~1100 °C时M-RE钢的R.A.都超过了60%,表明经稀土处理可以显著提升中锰钢在1000~1200 °C热塑性。然而在800~900 °C时,M-RE钢的R.A.与M钢相差不大甚至低于M0,这表明稀土的添加只是改善了高温区间的塑性性能,而对低温时中锰钢塑性影响不大,而导致此现象发生的原因需进一步分析。

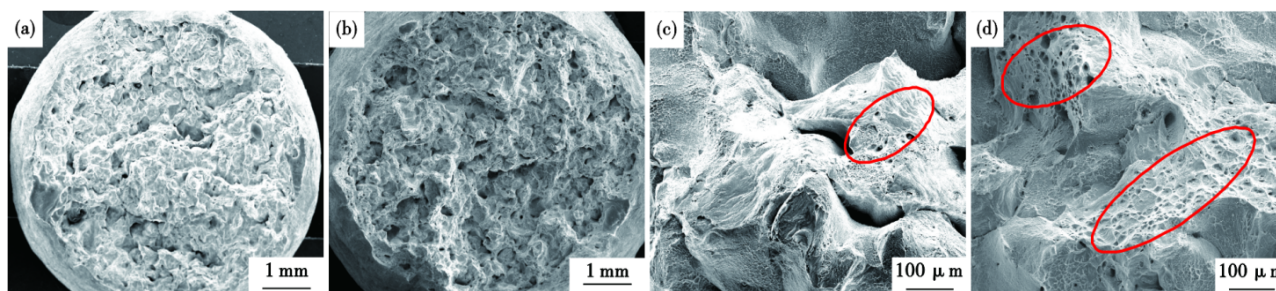


图8 中锰钢 700 °C时的高温断面形貌:(a)M;(b)M-RE;(c)M;(d)M-RE

Fig. 8 High temperature fracture morphology of medium manganese steel at 700 °C: (a)M; (b)M-RE; (c)M; (d)M-RE

## 2.4 断口宏观形貌

图8为M与M-RE在700℃下高温拉伸实验后宏观和局部断口形貌,从宏观断口形貌可以明显看出,中锰钢在此测试温度下的收缩行为并不明显,

断口形貌呈现冰糖状结构,并且为细长的分层状态。图8(C)为M钢局部断口放大图,从图8中可以发现,在700℃时M钢断口存在少量的韧窝。韧窝的存在可以有效阻断钢中裂纹沿晶界扩展,可以有效

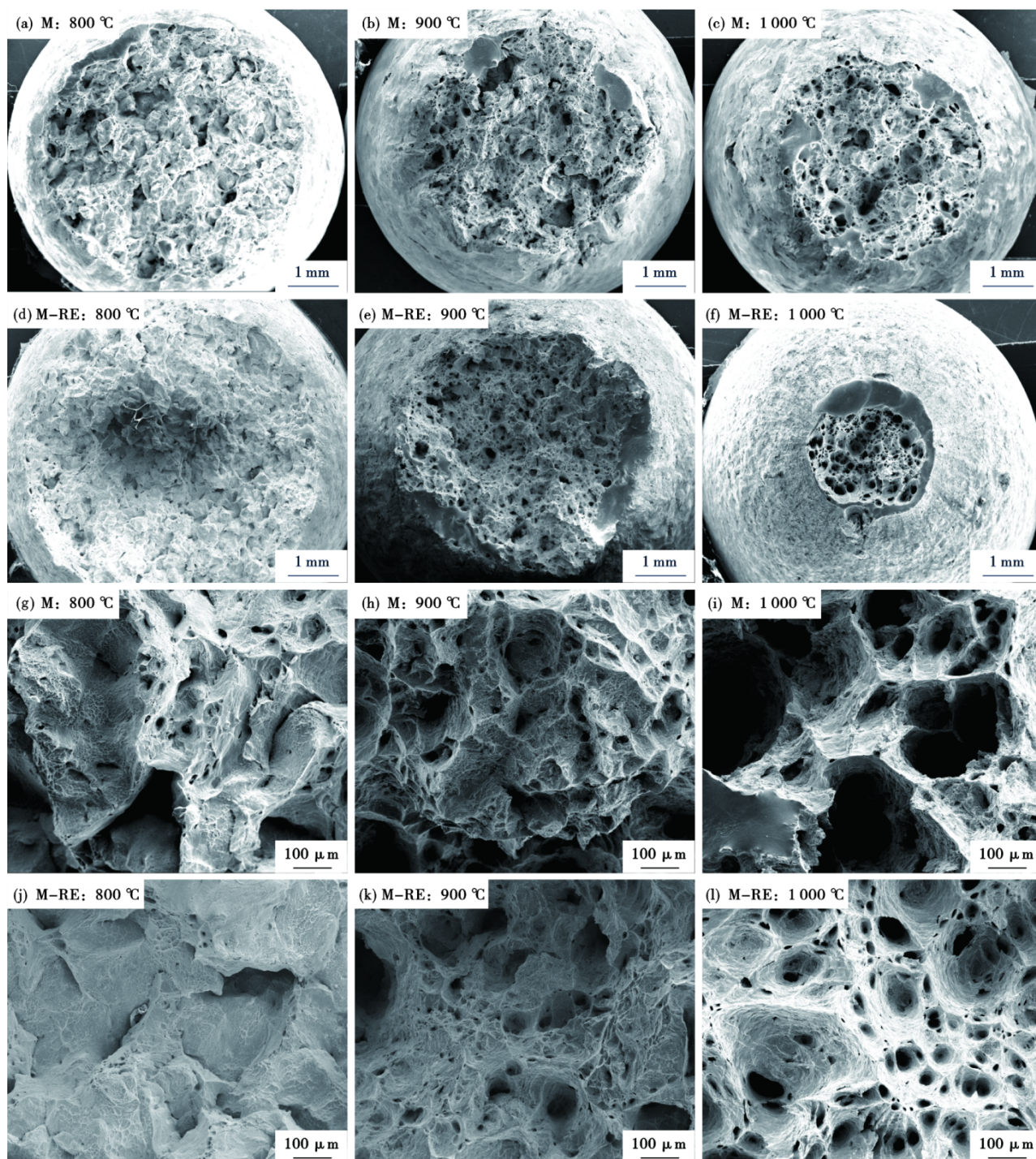


图9 800~1 100℃时高温拉伸断口放大图:(a)M,800℃;(b)M,900℃;(c)M,1 000℃;(d)M-RE,800℃;(e)M-RE,900℃;(f)M-RE,1 000℃;(g)M,800℃;(h)M,900℃;(i)M,1 000℃;(j)M-RE,800℃;(k)M-RE,800℃;(l)M-RE,800℃  
 Fig. 9 High temperature fracture morphology of medium manganese steel at 800 °C–1 200 °C: (a)M, 800 °C; (b)M, 900 °C; (c)M, 1 000 °C; (d)M-RE, 800 °C; (e)M-RE, 900 °C; (f)M-RE, 1 000 °C; (g)M, 800 °C; (h)M, 900 °C; (i)M, 1 000 °C; (j)M-RE, 800 °C; (k)M-RE, 800 °C; (l)M-RE, 800 °C

改善钢的热塑性能,此外,在 700 °C 时 M-RE 钢中韧窝的数量与密度明显高于 M 钢,这也可以解释在图 6 中, M-RE 钢的 R.A. 大于 M 钢,其热塑性能优于 M 钢。

M、M-RE 钢在 800~1 000 °C 下的拉伸断口形貌及其放大图如 9 所示,针对 M 钢可发现, 800 °C 时的韧窝[图 9(a)与(g)]所占断口面积明显多于 700 °C [图 8(a)与(c)],这也可以解释图 6 中 M 钢在 800 °C 的断面收缩率高于 700 °C。此外,随着加热温度持续升高至 900 °C [图 9(b)、(h)]与 1 000 °C, [图 9(c)与(i)], M 韧窝所占断口面积持续增加,断面收缩率也持续增加,证明韧窝存在确实可以改善中锰钢高温塑性性能。而对于 M-RE 钢,在 800 °C [如图 9(d)(j)]时的韧窝所占断口面积反而较 700 °C 少[图 7(b)(d)],与图 6 中其断面收缩率小于 700 °C 变化规律一致,随加热温度分别增加至 900、1 000 °C,韧窝占断口比例显著增加,其断面收缩率增加,塑性性能改善。需要注意的是,在 800、900 °C 时 M 钢的韧窝所占断口比例是显著高于 M-RE 钢的,这也可以解释前文提到的稀土添加后的 M-RE 钢在 800、900 °C 时断面收缩率反而低于 M 钢。

### 参考文献

- [1] Han R Y, Yang G W, Fu Z X, et al. Effect of low-temperature hot rolling on the microstructure and mechanical properties of air-cooling medium manganese martensitic wear-resistant steel [J]. *Materials Characterization*, 2023, 203: 113139.
- [2] Li M, Liu H B, Xie R Y, et al. Investigation of the liquidus temperature calculation method for medium manganese steel [J]. *High Temperature Materials and Processes*, 2023, 42: 20220285.
- [3] 唐春霞, 曹文全. 耐磨钢的国内生产现状及发展前景 [J]. *宽厚板*, 2018, 24(3): 37-41.
- [4] 张 晨. 耐磨钢在煤矿刮板输送机上的应用 [J]. *机械管理开发*, 2019, 34(12): 148-149+161.
- [5] 李 丁. 中锰耐磨钢 BTW1 在汾西矿业集团的应用研究 [J]. *山西焦煤科技*, 2017, 41(4): 51-53.
- [6] 汪 健. 刮板输送机用中锰钢的摩擦腐蚀行为研究 [D]. 徐州: 中国矿业大学, 2018.
- [7] Ge S R, Wang Q L, Wang J X. The impact wear-resistance enhancement mechanism of medium manganese steel and its applications in mining machines [J]. *Wear*, 2017, 376-377: 1097-1104.
- [8] 窦彩虹, 魏世忠, 司岸恒, 等. C 含量和热处理对中锰耐磨钢组织与性能的影响 [J]. *铸造技术*, 2018, 39(2): 289-294.
- [9] 白韶斌, 牛伟强, 肖文涛, 等. 中锰钢的研究进展及未来研究展望 [J]. *热加工工艺*, 2022, 51(14): 1-9.
- [10] 陈绍春, 林新强, 朱康正, 等. 合金化和稀土变质处理对奥氏

### 3 结论

1) 通过 Gleeble3800 热模拟试验机对不同稀土含量下中锰钢高温力学性能进行了研究,结果表明当添加稀土(质量分数)0.038% 时,中锰钢 700、800、900、1 000、1 100、1 200 °C 时最大抗拉强度分别由 396.64、228.07、113.25、75.15、42.97、25.11 MPa 增加到 414.85、238.28、130.59、76.14、44.59、28.09 MPa。金相实验表明, M 钢与 M-RE 钢晶粒度级别分别为 6.80, 7.12, 抗拉强度的增加与稀土钢的细晶强化有关。

2) 当稀土加入量(质量分数)为 0.038% 时,中锰钢在 1 000~1 200 °C 范围内断面收缩率分别从 47.3%、53.9%、46.78% 提高到 65.64%、76.56%、50.26%,而在 800~900 °C 变化不大。表明稀土添加显著提高了 1 000~1 200 °C 时高温热塑性。

3) 共聚焦显微镜研究发现, M 钢在 800 °C 以上存在明显的动态再结晶现象, M-RE 钢在 900 °C 才发现大量动态再结晶现象的发生,表明稀土的添加可提高动态再结晶温度。这是因为稀土的加入即可明显细化晶粒尺寸,因此在 900 °C 以下时不需要动态再结晶现象细化晶粒来抵抗变形。

体中锰钢热导率及耐磨性的影响 [J]. *过程工程学报*, 2017, 17(1): 144-150.

- [11] Grajcar A., Kalinowska-Ozgowicz E., Opiela M. et al. Effects of Mn and Nb on the macro-and microsegregation in high-Mn high-Al content TRIP steels [J]. *Archives of Materials Science and Engineering* 2011, volume(1): 5-14.
- [12] 马伟刚, 张由景, 杨超飞, 等. Mn 含量对中锰钢微观组织及力学性能的影响 [J]. *材料开发与应用*, 2020, 35(3): 26-31.
- [13] 宋仁伯, 霍巍丰, 周乃鹏, 等. Fe-Mn-Al-C 系中锰钢的研究现状与发展前景 [J]. *工程科学学报*, 2020, 42(7): 814-828.
- [14] Lan P, Zhang J Q. Thermophysical properties and solidification defects of Fe-22Mn-0.7C TWIP steel [J]. *Steel Research International*, 2016, 87(2): 250-261.
- [15] 朱康正. 稀土和合金元素对奥氏体中锰钢热导率的影响 [D]. 福州: 福州大学, 2016.
- [16] 李 民, 刘洪波, 车晓锐, 等. 中锰耐磨钢 Cr、Mn 元素偏析行为分析 [J]. *河北冶金*, 2023(12): 40-45.
- [17] 王大智, 刘军占, 罗 辉, 等. 中锰耐磨钢连铸板坯分层缺陷分析 [J]. *宝钢技术*, 2016(3): 36-40.
- [18] 徐娟萍. 成分和组织调控对中锰钢力学行为和抗氢性能的影响 [D]. 北京: 北京科技大学, 2022.
- [19] 孙 剑, 刘占礼, 李 杰, 等. BTW1 钢连铸板坯高温热塑性行为分析 [J]. *特殊钢*, 2024, 45(6): 12-16.

- [20] Sozańska-Jędrasik L, Mazurkiewicz J, Borek W, et al. Carbides Analysis of the High Strength and Low Density Fe-Mn-Al-Si Steel. Archives of Metallurgy and Materials. 2018, No. 63. (1): 265-276.
- [21] 朱礼龙. 包晶钢用超高碱度保护渣的理论研究和应用[D]. 重庆: 重庆大学, 2018.
- [22] 张福成, 陈 晨, 刘 帅, 等. 高锰钢研究进展: 成分、组织和性能调控[J]. 钢铁, 2024, 59(3): 1-18+78.
- [23] 何 航, 王子超, 曾 杰, 等. 连铸坯表面纵裂纹的形成与控制研究现状[J]. 连铸, 2024, 49(2): 1-7.
- [24] Brimacombe J K, Sorimachi K. Crack formation in the continuous casting of steel[J]. Metallurgical Transactions B, 1977, 8(2): 489-505.
- [25] 周景一, 朱立光, 王 博, 等. Q235B钢矩形坯结晶器锥度优化研究[J]. 上海金属, 2022, 44(1): 99-104+110.
- [26] 宗 健, 董延楠, 涂高岭, 等. 立式连铸P91钢大圆坯表面纵裂缺陷及其控制[J]. 中国冶金, 2024, 34(5): 65-73.
- [27] Liu K, Cheng S S, Li Y Q. Study of crack sensitivity of peritectic steels[J]. Coatings, 2022, 12(1): 15.
- [28] Zhang J, Chen D F, Zhang C Q, et al. Dynamic spray cooling control model based on the tracking of velocity and superheat for the continuous casting steel [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2016, 229: 651-658.
- [29] Seok Y J, Yoon J K. The effect of casting conditions on the formation of longitudinal surface crack in the beam blank caster [J]. Metals and Materials International, 2002, 8(6): 543-550.
- [30] Huang X, Thomas B G, Najjar F M. Modeling superheat removal during continuous casting of steel slabs[J]. Metallurgical Transactions B, 1992, 23(3): 339-356.
- [31] 史伟宁. 连铸结晶器水量对40Cr钢方坯表面裂纹的影响[J]. 连铸, 2023, 48(2): 84-89+105.
- [32] 申耀祖. Fe-Mn-C-Al系高锰钢凝固特性及高温力学性能研究[D]. 北京: 北京科技大学, 2021.
- [33] 刘洪波. Fe-Mn-C(-Al)系TWIP钢冶炼与凝固相关基础研究[D]. 北京: 北京科技大学, 2018.
- [34] 王育田, 王存宇, 石发才, 等. 中锰钢热塑性第Ⅲ脆性区原因分析[J]. 连铸, 2015, 40(6): 67-69.
- [35] 侯道远. 薄带连铸中锰钢组织演变与力学性能研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2019.
- [36] 罗 森, 朱苗勇. 高锰钢凝固特性及连铸工艺研究现状[J]. 钢铁, 2023, 58(9): 39-58.
- [37] 周雪凡, 李冬玲, 周晴晴, 等. 油井管用钢中含铈夹杂物的原位统计分布表征[J]. 钢铁研究学报, 2024, 36(8): 1089-1097.
- [38] Zhong L Q, Wang Z G, Luo Q S, et al. Effects of cerium addition on the microstructure, mechanical properties and strain hardening behavior of TWIP steel Fe-18Mn-0.6C [J]. Materials Characterization, 2022, 183: 111626.
- [39] 王新华, 朱国森, 于会香, 等. 高碳钢连铸板坯高温力学性能[J]. 北京科技大学学报, 2005, 27(5): 545-548.
- [40] Suzuki H G, Nishimura S, Yamaguchi S. Characteristics of hot ductility in steels subjected to the melting and solidification [J]. Transactions of the Iron and Steel Institute of Japan, 1982, 22(1): 48-56.