

钛稀土复合处理对 C-Mn 钢粗晶热影响区组织及韧性的影响

张圣华^{1 2)}, 宋 波^{1 2)}✉, 宋明明³⁾, 高启瑞^{1 2)}

1) 北京科技大学冶金与生态工程学院, 北京 100083 2) 北京科技大学钢铁冶金新技术国家重点实验室, 北京 100083

3) 武汉科技大学耐火材料与冶金国家重点实验室, 武汉 430081

✉通信作者, E-mail: songbo@metall.ustb.edu.cn

摘 要 利用 Gleeble-1500D 热模拟机进行焊接热影响区热循环模拟实验, 研究了在焊接热输入为 $65 \text{ kJ} \cdot \text{cm}^{-1}$ 时稀土单独处理和钛稀土复合处理对 C-Mn 钢粗晶热影响区组织及冲击韧性的影响, 并利用扫描电镜观察和分析了实验钢中的夹杂物和冲击断口形貌, 利用光镜观察了热循环模拟后实验钢中的微观组织. 实验结果表明: 稀土单独处理和钛稀土复合处理的试样微观组织分别主要是晶界铁素体 + 块状铁素体 + 针状铁素体和晶界铁素体 + 晶内针状铁素体. 经稀土单独处理的试样中夹杂物为 $\text{La}_2\text{O}_3\text{S}$ + 锰铝硅酸盐 + MnS 复合夹杂; 钛稀土复合处理的试样中的夹杂主要是 $\text{La}_2\text{O}_3\text{S}$ + TiO_x + 锰铝硅酸盐 + MnS 复合夹杂. 钛稀土复合处理钢中的复合夹杂更细小, 有利于形成细小的晶内针状铁素体. 钛稀土复合处理极大地改善了实验钢的焊接热影响区低温冲击韧性, 比稀土单独处理对试样的冲击性能提升效果更好.

关键词 碳-锰钢; 粗晶热影响区; 针状铁素体; 显微组织; 冲击韧性

分类号 TG142.1

Influence of Ti-rare earth addition on microstructure and toughness of coarse grain heat-affected zone in C-Mn steel

ZHANG Sheng-hua^{1 2)}, SONG Bo^{1 2)}✉, SONG Ming-ming³⁾, GAO Qi-rui^{1 2)}

1) School of Metallurgical and Ecological Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China

2) State Key Laboratory of Advanced Metallurgy, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China

3) State Key Laboratory for Refractories and Metallurgy, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430081, China

✉Corresponding author, E-mail: songbo@metall.ustb.edu.cn

ABSTRACT The influences of rare earth (RE) and Ti-RE complex treatment on the microstructures and toughness in the coarse grain heat-affected zone (CGHAZ) of C-Mn steel were investigated using a Gleeble-1500D thermal simulator with input heat energy of $65 \text{ kJ} \cdot \text{cm}^{-1}$. The inclusions and impact fracture morphology were observed and analyzed by scanning electron microscopy (SEM) and energy-dispersive X-ray (EDX), and the microstructure was characterized using an optical microscope (OM). The results show that the microstructures in the CGHAZs of RE- and Ti-RE-treated samples are mainly grain boundary ferrite (GBF) + polygonal ferrite (PF) + intragranular acicular ferrite (IAF) and grain boundary ferrite + intragranular acicular ferrite, respectively. Inclusions in the RE-treated specimen are $\text{La}_2\text{O}_3\text{S}$ + Mn-Al-Si-O + MnS, while those in the Ti-RE-treated specimen are $\text{La}_2\text{O}_3\text{S}$ + TiO_x + Mn-Al-Si-O + MnS. The complex inclusions in Ti-RE-treated steel are smaller than those in RE-treated steel, and the size of IAF in Ti-RE-treated steel is smaller. The impact properties of the CGHAZ in Ti-RE-treated C-Mn steel is improved significantly, and the material is tougher than RE-treated steel.

收稿日期: 2016-10-10

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51274269)

KEY WORDS carbon-manganese steel; coarse grain heat-affected zone (CGHAZ); acicular ferrite (AF); microstructure; impact toughness

随着焊接技术的进步,单面埋弧焊、电渣焊和气电焊等大线能量焊接技术的广泛应用使得焊接效率得到了大幅提高,同时焊接结构的体积越来越大、焊接时要求的参数越来越高,这就要求钢材具备更高的焊接性能。大量研究^[1-5]表明钢材在焊接热循环过程中由于焊接热影响区冷速的不同会产生不同的组织,进而导致焊接热影响区性能的差异,其中粗晶区的组织最为粗大,其韧性和强度较差。20 世纪 80 年代以来,国内外很多学者研究认为以夹杂物为形核核心形成的细小、交错的针状铁素体组织可以提高钢焊接热影响区的韧性和强度^[2,6-11]。1990 年氧化物冶金技术被提出以后,很多学者研究了不同氧化物诱导形成针状铁素体的能力和机理。关于钛氧化物的研究^[12-14]发现 Ti_2O_3 夹杂能促进 Ti 脱氧 C-Mn 钢中晶内针状铁素体的形成; Lee 和 Pan^[8] 认为 Ti 的硫化物比 Ti 氧化物和 MnS 夹杂诱导形成针状铁素体更有效; Song 等^[15] 研究表明当 Mg 的质量分数为 0.0015%~0.0026% 时,含 Ti 0.008% 左右的 C-Mn 钢中的 Ti-Mg-O+MnS 复合夹杂对针状铁素体形核最有利; Song 等^[16] 还发现稀土 La 和 Ce 均可促进针状铁素体形成,且当 La 和 Ce 添加比例为 3:1 时

复合处理组织中的针状铁素体更加细小; Nako 等^[17] 发现 Ti-RE-Zr 复合氧化物夹杂比 Ti、Al 氧化物更有利于针状铁素体的形核。目前,有关钛稀土复合处理对 C-Mn 钢粗晶热影响区组织及性能的影响还鲜有研究。本文利用 Gleeble-1500D 热模拟机研究在焊接热输入为 $65\text{ kJ}\cdot\text{cm}^{-1}$ 时稀土单独处理和钛稀土复合处理对 C-Mn 钢粗晶热影响区组织及冲击韧性的影响,为稀土处理改善 C-Mn 钢焊接热影响区的性能提供依据。

1 实验方法

为对比实验效果,共冶炼出 3 种不同成分的钢,分别为未进行合金处理的 TR1[#] 钢,经 La 单独处理的 TR2[#] 钢和经 La、Ti 复合处理的 TR3[#] 钢。将 5.5 kg C-Mn 钢在真空感应炉中加热至熔清,精炼 2 min 后,TR1[#] 钢不做变质处理,TR2[#] 钢和 TR3[#] 钢分别加入 La 和 La、Ti 进行变质处理,保温 3 min 后浇铸进钢锭模中空冷至室温。成型的锭子加热到 1200℃ 开锻,900℃ 终锻,成为直径 15 mm 的棒材。随后对其进行 700℃ 保温 30 min 的退火处理,以消除内部应力。实验钢的成分见表 1。

表 1 实验钢化学成分(质量分数)
Table 1 Chemical compositions of tested steels

试样编号	C	Si	Mn	S	P	Al	Ti	La	O	N
TR1 [#]	0.15	0.34	1.28	0.028	0.017	0.001	0	0	0.0025	0.0040
TR2 [#]	0.15	0.34	1.32	0.026	0.016	0.001	0	0.019	0.0068	0.0043
TR3 [#]	0.16	0.34	1.38	0.025	0.016	0.001	0.015	0.021	0.0063	0.0044

将 3 种钢加工成为 10.5 mm×10.5 mm×55 mm 的焊接热模拟试样,在 Gleeble-1500D 热模拟机上进行焊接热影响区热循环模拟实验,模拟焊接热输入为 $65\text{ kJ}\cdot\text{cm}^{-1}$,峰值温度 $T_{\text{max}}=1350\text{ }^{\circ}\text{C}$,热循环模拟相关的工艺参数根据雷卡林二维导热模型确定,峰值温度 T_{max} 停留时间设置为 1 s,由室温加热到 T_{max} 的升温速率设置为 $300\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{s}^{-1}$ 。相关热循环模拟参数见表 2。

经过模拟焊接热影响区热循环实验后的试样,加工成 10 mm×10 mm×55 mm 开 V 型槽的标准冲击试样,在 JB300B 型摆锤式冲击试验机上进行低温冲击试验,利用 JSM-6480LV 型扫描电子显微镜观察冲击试样断口。取 $\phi 10\text{ mm}\times 10\text{ mm}$ 圆柱试样,清洗、打磨和抛光后,在光学显微镜 1000 倍视场下随机拍摄 60 张夹杂物照片,并用 ImageJ 软件统计夹杂物的数量和尺寸。抛光后的试样用 4% 硝酸乙醇溶液侵蚀,在光学显微镜下

观察试样显微组织,用带有能谱的 JSM-6480LV 型扫描电子显微镜分析钢中夹杂物的尺寸和成分。

表 2 模拟焊接热影响区热循环参数
Table 2 Simulated thermal cycle parameters of heat affected zone

焊接线能量, $E/(\text{kJ}\cdot\text{cm}^{-1})$	高温停留时间, t_H/s		$t_{8/5}^*/\text{s}$
	>900℃	>1100℃	
65	62	41	129

注: * 为 800℃ 到 500℃ 的冷却时间。

2 实验结果

2.1 实验钢中的夹杂物

利用 Factsage6.4 热力学计算软件计算了冷却过程中 3 种实验钢中夹杂物随温度的析出情况。如图 1 (a) 所示,未加合金处理的 TR1[#] 钢中的夹杂主要是

MnS 和锰铝硅酸盐。经 La 处理的 TR2[#]钢中出现了析出温度高于 1700 °C 的 La₂O₂S 和少量 LaAlO₃ 夹杂。当加入 La 和 Ti 处理后, TR3[#]钢中析出的夹杂物变成了 MnS + La₂O₂S + LaAlO₃ + Ti₃O₅ + 锰铝硅酸盐。图 2 所示为扫描电镜下各实验钢中的典型夹杂微观形貌和成分。可以看出, TR1[#]中主要是长条状或球状的 MnS 夹杂和球状的锰铝硅酸盐复合夹杂, 如图 2(a) 和图 2

(b) 所示。TR2[#]钢中主要是以 La₂O₂S 和锰铝硅酸盐为核心, MnS 包裹在外层的复合夹杂, 尺寸 3 μm 左右, 呈球形, 如图 2(c) 所示。TR3[#]钢中的复合夹杂核心除 La₂O₂S 和锰铝硅酸盐外, 还含有钛的氧化物, 形状与 TR2[#]钢中的夹杂相同都为球形, 如图 2(d) 所示。由此可知, 各试样中由能谱分析得到的夹杂物种类与 Fact-Sage 软件计算的结果一致。

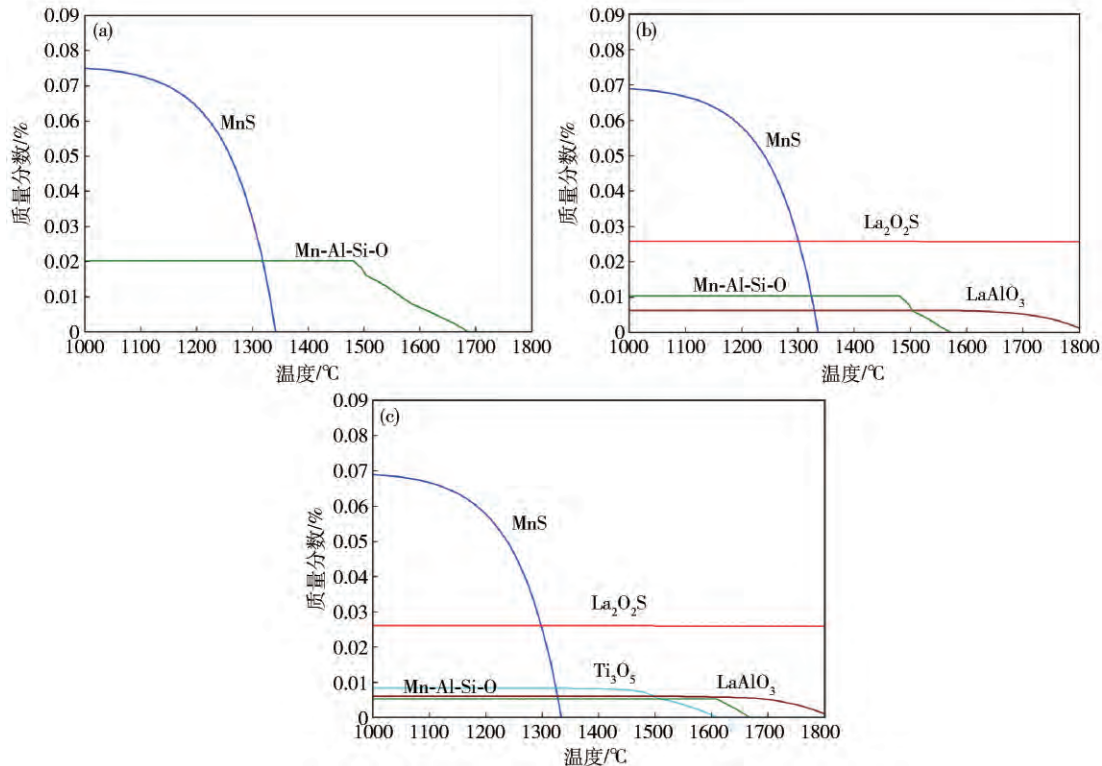


图 1 实验钢在冷却过程中夹杂物的种类和析出顺序。(a) TR1[#]; (b) TR2[#]; (c) TR3[#]

Fig. 1 Types and precipitated sequences of inclusions during cooling of tested steels: (a) TR1[#]; (b) TR2[#]; (c) TR3[#]

2.2 实验钢显微组织

图 3 所示为 3 组实验钢的锻后组织, 从图中可以看出三组试样所得到的锻后组织均为弥散分布的块状铁素体和珠光体组织, 其中经钛稀土复合处理的 TR3[#]钢中的块状铁素体块最为细小。图 4 是各实验钢在焊接热输入为 65 kJ·cm⁻¹ 条件下热模拟后的粗晶热影响区的金相组织。总的来看 3 种试样的微观组织都是以铁素体为主。TR1[#]钢中主要是粗大的晶界铁素体和从晶界向晶内长大的侧板条铁素体, 还有少量的块状铁素体, 见图 4(a)。观察 TR2[#]钢和 TR3[#]钢中的组织, 明显可以看出其中的晶界铁素体较 TR1[#]钢中的要细小, 且由晶界铁素体勾勒出的晶粒尺寸也明显小很多。TR2[#]钢中出现了一些晶内针状铁素体, 侧板条铁素体数量减少, 块状铁素体尺寸也有所减小, 见图 4(b)。而 TR3[#]钢中在晶内明显可以看到很多以夹杂物为核心形成的晶内针状铁素体, 并且这些针状铁素体更加细小, 在晶内也更加连锁交错, 见图 4(c)。相对于

TR1[#]钢, 侧板条铁素体和块状铁素体在 TR3[#]钢中的数量大幅减少。

2.3 实验钢冲击韧性

表 3 所示为焊接热输入 65 kJ·cm⁻¹ 时各试样 -20 °C 的夏比冲击功。从表中可以看出, 与未进行焊接热影响区模拟的母材相比, 3 组试样的低温冲击韧性均有所降低。其中, TR1[#]钢降低的幅度最大, 下降了 71%。TR2[#]钢的低温冲击功从 149.5 J 降低为 65.6 J, 相对母材降低了 56%, 较 TR1[#]钢的冲击功有所改善。降幅最小的 TR3[#]钢的低温冲击韧性较母材仅降低了 17%, 且其冲击值 155.3 J 比 TR1[#]钢母材的冲击值 124 J 还要高。这表明钛稀土复合处理明显改善了 C-Mn 钢的焊接热影响区低温冲击韧性, 并且比稀土单独处理的冲击性能提升效果更好。

3 实验结果讨论

3.1 夹杂物分析

夹杂物的尺寸对针状铁素体的形成有较大影响。

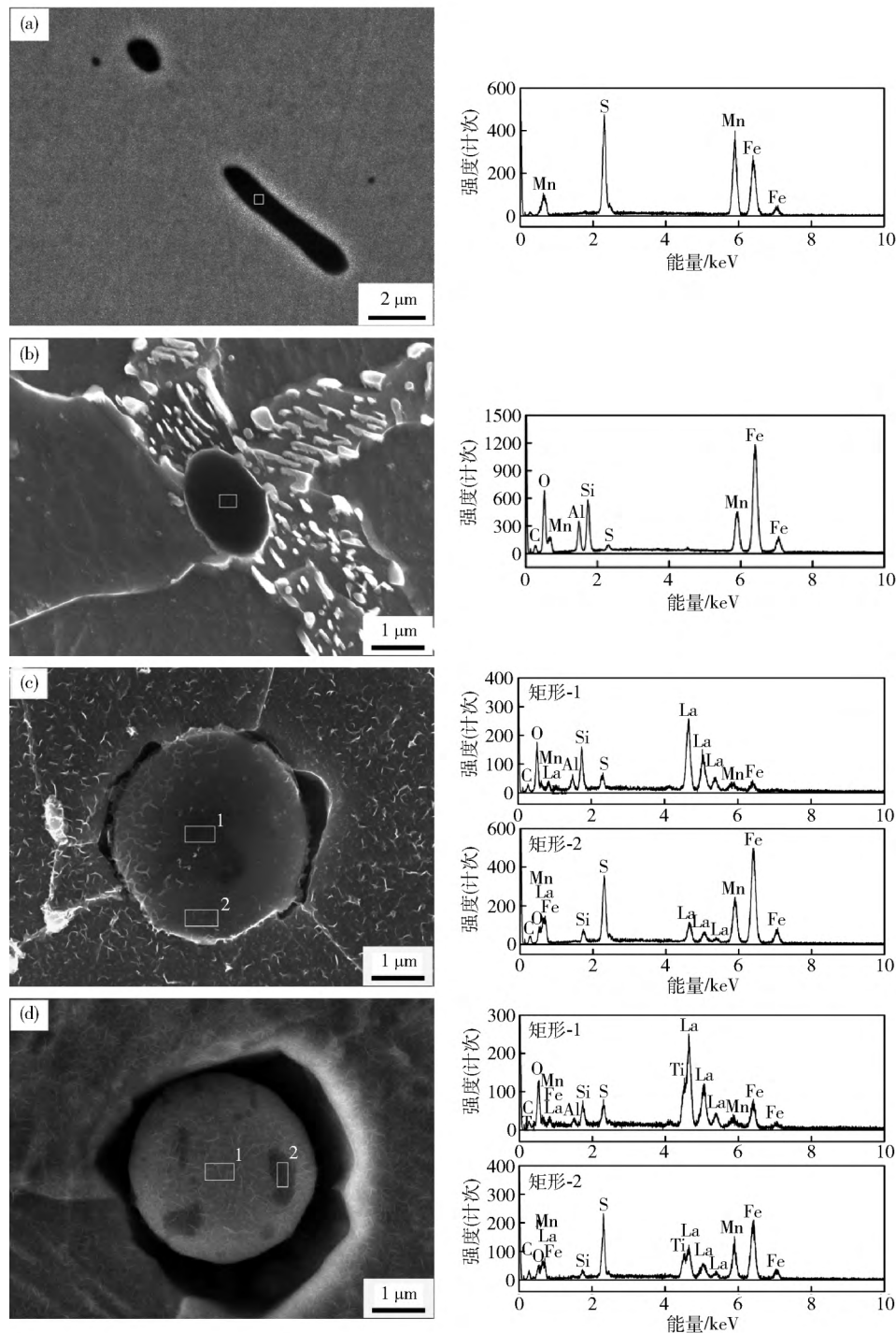


图2 实验钢中夹杂物的形貌和成分。(a),(b) TR1[#]; (c) TR2[#]; (d) TR3[#]
Fig.2 Morphology and composition of inclusions in tested steels: (a),(b) TR1[#]; (c) TR2[#]; (d) TR3[#]

表3 试样-20℃的冲击功

Table 3 Impact absorption energy of samples at -20℃

焊接线能量/ (kJ·cm ⁻¹)	TR1 [#] 冲击功/ J	TR2 [#] 冲击功/ J	TR3 [#] 冲击功/ J
0(母材)	124.0	149.5	186.4
65	36.1	65.6	155.3

图5为3种实验钢中夹杂物尺寸的统计结果。由图可

见,夹杂物尺寸在3 μm以下的比例在各试样中均占90%以上,其中尺寸在1~2 μm的夹杂物比例最大,占50%以上,TR3[#]钢中该尺寸的夹杂物比例较其他两种钢略多。值得注意的是,TR3[#]钢中尺寸小于2 μm的夹杂物所占比例约为80%,而TR2[#]钢中尺寸在2~3 μm的夹杂物所占比例近80%,这表明Ti的添加使得稀土处理钢中的夹杂物更加细小。表4为试样中所统计的夹杂物个数、数密度和直径平均尺寸。由表4可以看

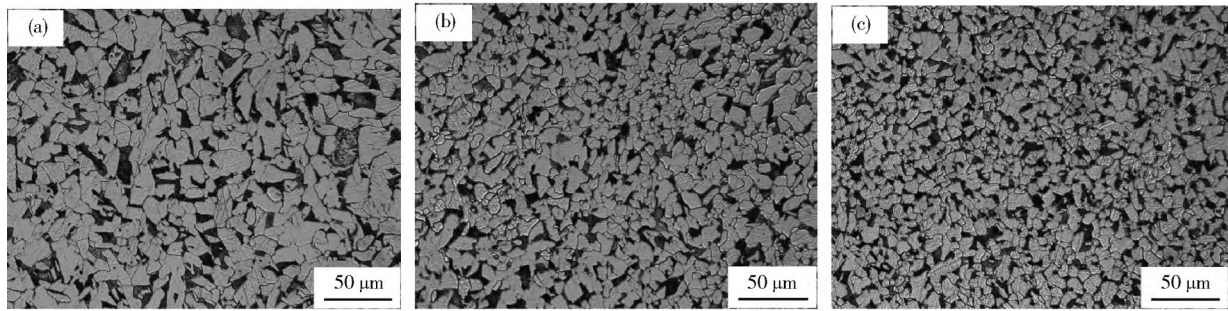


图 3 实验钢锻后组织. (a) TR1[#]; (b) TR2[#]; (c) TR3[#]

Fig. 3 Microstructure of forged tested steels: (a) TR1[#]; (b) TR2[#]; (c) TR3[#]

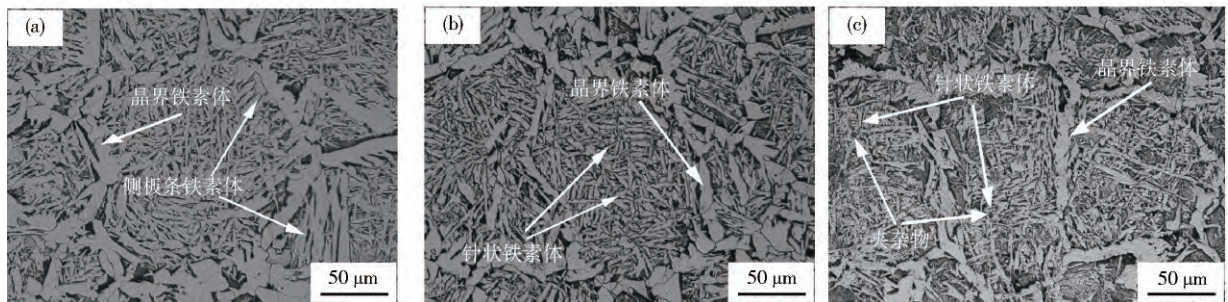


图 4 实验钢粗晶热影响区组织. (a) TR1[#]; (b) TR2[#]; (c) TR3[#]

Fig. 4 CGHAZ microstructure of tested steels: (a) TR1[#]; (b) TR2[#]; (c) TR3[#]

出 3 种试样中的夹杂物平均尺寸差别不大,总数和数密度依次增加,其中 TR3[#]钢中夹杂物较其他两种钢明显增多,说明 Ti 的加入使得钢中的夹杂物增多.一般认为细小弥散的夹杂物所形成的针状铁素体将更加细小,由图 6 可见,实验钢中细小的夹杂物形成了更细小的针状铁素体.

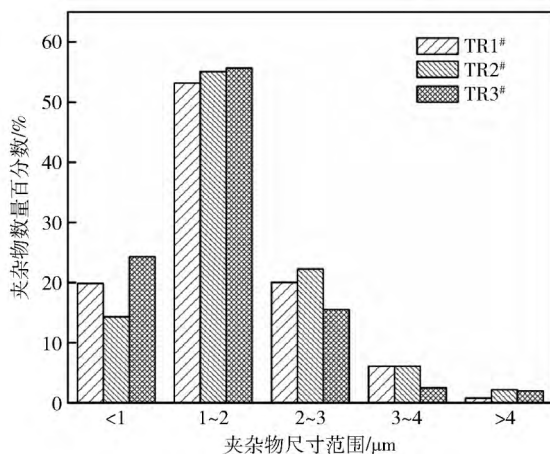


图 5 实验钢中夹杂物尺寸统计

Fig. 5 Statistics of inclusion size in tested steels

3.2 微观组织分析

通过对 3 组实验钢微观组织观察,发现不同的组织对冲击功有很大影响. Byun 等^[18]研究了 Mn 含量对钛脱氧低碳钢微观组织的影响,发现以 Ti₂O₃ 为核心形成的针状铁素体间为大角度晶界,在奥氏体内形成的

表 4 试样中夹杂物的个数、数密度和直径平均尺寸统计

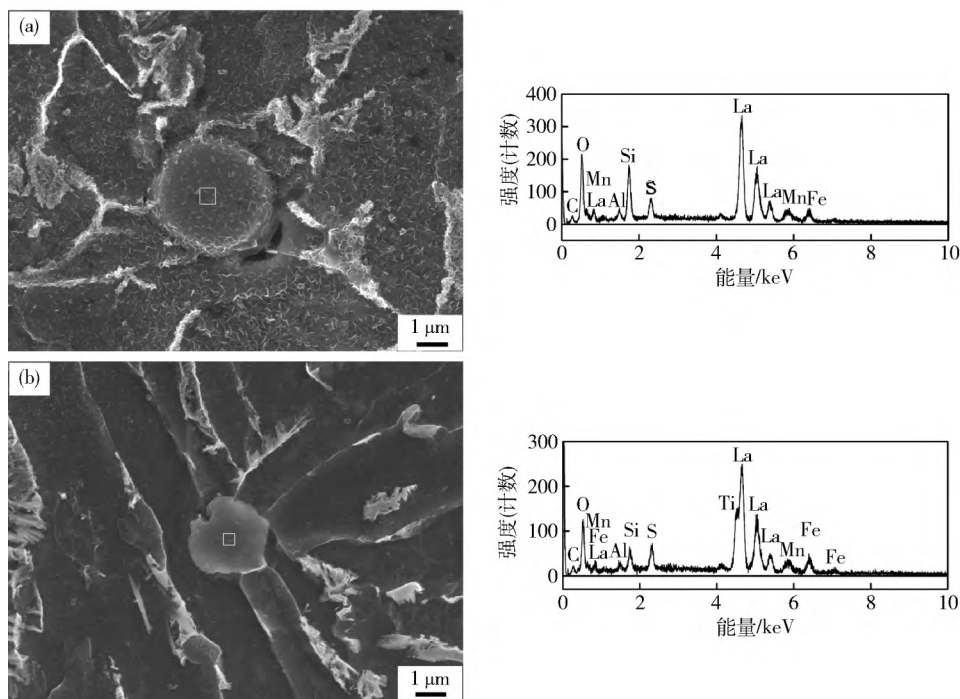
Table 4 Number, number density and average diameter of inclusions in samples

试样	夹杂物总数	数密度/mm ⁻²	直径平均尺寸/μm
TR1 [#]	639	272	1.63
TR2 [#]	768	372	1.77
TR3 [#]	954	406	1.57

平行束状贝氏体间晶界为小角度晶界. TR1[#]钢中主要组织为晶界铁素体,平行的侧板条铁素体和较规则的晶内铁素体,晶界角度小,裂纹在晶体间扩展时阻力小,对应的钢的冲击功就小; TR2[#]钢中出现了一定量的针状铁素体,但形成的针状铁素体较宽(见图 6(a)),而且分布在晶界的块状铁素体较多;而 TR3[#]钢中有大量可以作为针状铁素体形核核心的尺寸较小的钛稀土复合夹杂,形成的细小晶内针状铁素体增多(见图 6(b)),且这些针状铁素体间的交错更复杂,角度更大,裂纹扩展时需不断变化方向,遇到阻力变大,对应钢的冲击功增大.另外,从晶界铁素体勾勒出的晶粒尺寸变小,也说明稀土单独处理或钛稀土复合处理的钢中一些细小的夹杂可能有钉扎晶界的作用,细化晶粒,增大了晶粒间的接触面积,不利于裂纹的扩展.

3.3 冲击断口形貌分析

冲击断口宏观形貌可分为剪切唇区、纤维区和放

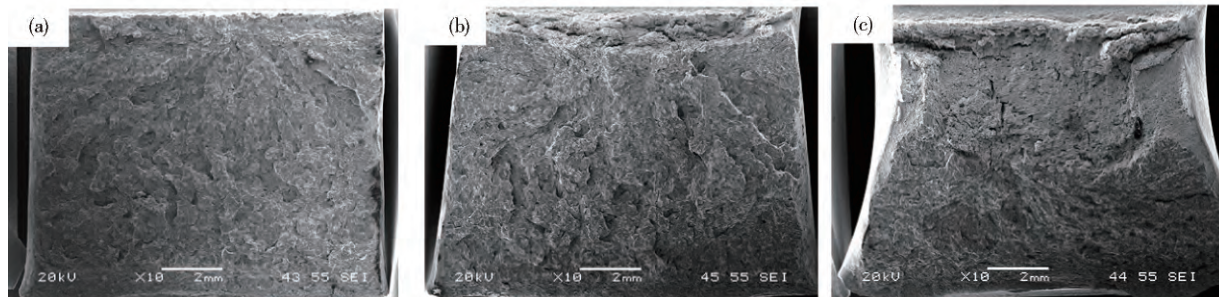
图6 实验钢中典型的晶内针状铁素体及形核夹杂物成分。(a) TR2[#]; (b) TR3[#]Fig.6 Typical intragranular acicular ferrite and inclusion compositions in tested steels: (a) TR2[#]; (b) TR3[#]

射区。剪切唇区和纤维区所占比例越大,放射区比例越小,则试样冲击韧性越好,反之冲击韧性越差。图7为3组试样低温冲击断口的宏观形貌。由图可知3组钢均为韧—脆混合断口,明显可以看出TR1[#]、TR2[#]、TR3[#]3组试样相比塑性变形量越来越大,对应的冲击功值也越来越大。TR1[#]钢冲击断口形貌主要为放射区,可看到较多放射状条纹,剪切唇区和纤维区比例极小,见图7(a)。TR2[#]钢断口区域边缘可看到剪切唇区和纤维区,比例有一定增加,但是断口还是以放射区为主,见图7(b)。经钛稀土复合处理的TR3[#]钢的断口形貌可明显看到剪切唇区和纤维区,约占整个断口区域的60%~70%,只有断口的中下部有部分放射区,见图7(c)。

由于3组实验钢冲击断口均为韧—脆混合断口,其微观形貌可分为脆性断裂解理区和延性断裂韧窝

区。图8为3组试样冲击断口脆性解理区的微观形貌。由图可看出,3组试样断口均呈现出解理断裂的典型形貌——扇形河流花样,相比较而言,TR1[#]钢的河流花样单元由很多小的河流花样汇集而成,尺寸较大,如图8(a)所示。而TR3[#]钢中的河流花样单元尺寸较小,与螺位错形成小的解理台阶。从裂纹传播路径来看,图8(a)中还可以观察到一些沿晶断裂和二次裂纹,断裂面勾勒出较完整的晶粒轮廓,而经稀土和钛稀土复合处理的试样中主要是沿着某一晶面方向扩展的不连续的穿晶断裂,如图8(b)和图8(c)所示,这可能是由于大角度晶界和晶粒之间连续性差形成的,使得裂纹传播阻力更大。

图9为3组实验钢断口延性韧窝区的微观形貌,从图中可以看出3组试样的延性断裂区主要为抛物线状的撕裂韧窝。图9(a)中TR1[#]钢断口的韧窝直径大,

图7 试样宏观断口形貌。(a) TR1[#]; (b) TR2[#]; (c) TR3[#]Fig.7 Macroscopic fracture surfaces of samples: (a) TR1[#]; (b) TR2[#]; (c) TR3[#]

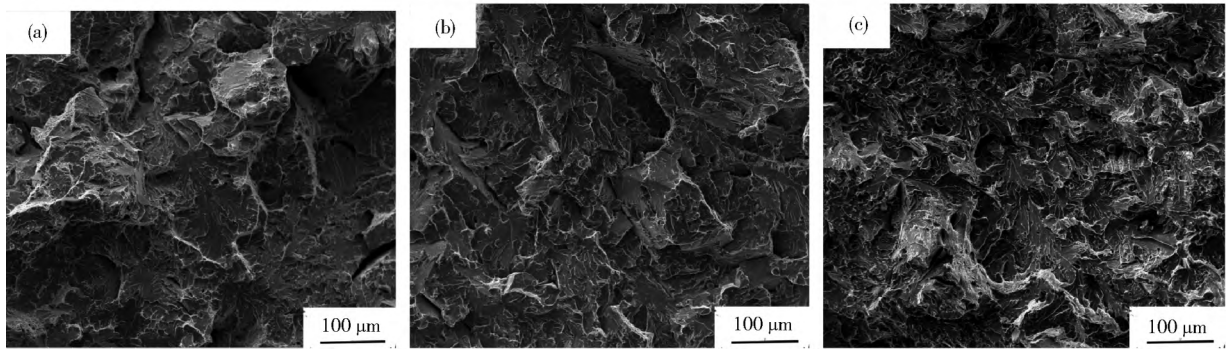


图8 试样断口脆性解理区形貌。(a) TR1[#]; (b) TR2[#]; (c) TR3[#]

Fig. 8 Brittle cleavage fracture zone morphology of samples: (a) TR1[#]; (b) TR2[#]; (c) TR3[#]

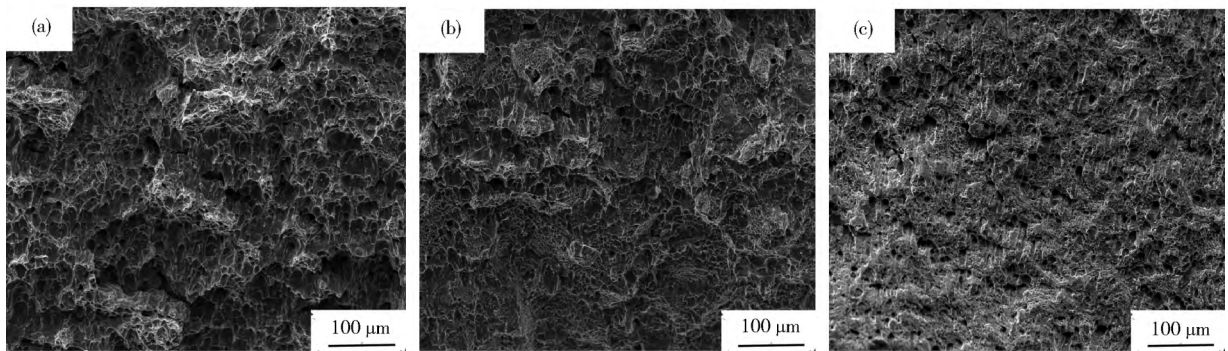


图9 试样断口延性韧窝区形貌。(a) TR1[#]; (b) TR2[#]; (c) TR3[#]

Fig. 9 Ductile fracture dimple zone morphology of tested steels: (a) TR1[#]; (b) TR2[#]; (c) TR3[#]

深度小,对应钢的塑性变形能力小,韧性差。单独稀土处理的钢韧窝尺寸变小,密度变大,见图9(b),对应钢的韧性有所提高。钛稀土复合处理的TR3[#]钢断口延性断裂区韧窝尺寸更小,密度和深度也更大,部分韧窝中还包裹着细小的夹杂,见图9(c),其对应的钢的韧性最好。

4 结论

(1) 在焊接热输入为 $65 \text{ kJ} \cdot \text{cm}^{-1}$ 条件下,稀土单独处理的试样微观组织主要是晶界铁素体、少量侧板条铁素体、尺寸较小的块状铁素体和针状铁素体,而钛稀土复合处理的试样微观组织主要是晶界铁素体和细小的晶内针状铁素体,粗晶区组织明显得到细化。

(2) 经稀土单独处理的TR2[#]试样中夹杂是 $\text{La}_2\text{O}_3\text{S}$ + 锰铝硅酸盐 + MnS 复合夹杂;钛稀土复合处理的TR3[#]试样中夹杂主要是 $\text{La}_2\text{O}_3\text{S}$ + TiO_x + 锰铝硅酸盐 + MnS 复合夹杂。TR3[#]钢中夹杂物尺寸小于TR2[#]钢,Ti的添加有利于形成更多细小的复合夹杂物,从而诱导形成更加细小的晶内针状铁素体。

(3) 钛稀土复合处理明显改善了C-Mn钢焊接热影响区的低温冲击韧性,并且比稀土单独处理的试样冲击性能提升效果更好。

参 考 文 献

- [1] Capdevila C, García-Mateo C, Chao J, et al. Advanced vanadium alloyed steel for heavy product applications. *Mater Sci Technol*, 2009, 25(11): 1383
- [2] Zhang X Y, Gao H L, Bi Z Y, et al. Effects of welding heat input on microstructure and properties of welding seam in X80 grade welded pipe. *J Mater Eng*, 2010(9): 66
(张骁勇,高惠临,毕宗岳,等. 焊接热输入对X80焊管焊缝组织与性能的影响. 材料工程, 2010(9): 66)
- [3] Li X Q, Teng Y L, Chu Y J, et al. Influence of welding thermal cycle on microstructural brittleness of T92 steel. *Trans China Weld Ins*, 2010, 31(3): 9
(李晓泉,滕亚兰,初雅杰,等. 焊接热循环对T92钢组织脆化的影响. 焊接学报, 2010, 31(3): 9)
- [4] Chen Y Q, Du Z Y, Xu L H, et al. Microstructure and mechanical properties of heat affected zone for X80 pipeline steel. *Trans China Weld Ins*, 2010, 31(5): 101
(陈延清,杜则裕,许良红. X80管线钢焊接热影响区组织和性能分析. 焊接学报, 2010, 31(5): 101)
- [5] Cui B, Peng Y, Zhao L, et al. Effects of weld thermal cycle on microstructure and properties of 1000 MPa grade weld metal. *Mater Sci Technol*, 2016, 24(1): 44
(崔冰,彭云,赵琳,等. 焊接热循环对1000 MPa级焊缝金属组织性能的影响. 材料科学与工艺, 2016, 24(1): 44)
- [6] Farrar R A, Harrison P L. Acicular ferrite in carbon-manganese weld metals: an overview. *J Mater Sci*, 1987, 22(11): 3812

- [7] Mills A R , Thewlis G , Whiteman J A . Nature of inclusions in steel weld metals and their influence on formation of acicular ferrite. *Mater Sci Technol* , 1987 , 3(12) : 1051
- [8] Lee J L , Pan Y T . Effect of sulfur content on the microstructure and toughness of simulated Heat-Affected zone in Ti-Killed steels. *Metall Trans A* , 1993 , 24(6) : 1399
- [9] Suzuki S , Ichimiya K , Akita T . High tensile strength steel plates with excellent HAZ toughness for shipbuilding: JFE EWEL technology for excellent quality in HAZ of high heat input welded joints. *JFE Tech Rep* , 2005 , 5: 24
- [10] Hu J , Du L X , Wang J J , et al . Effect of welding heat input on microstructures and toughness in simulated CGHAZ of V-N high strength steel. *Mater Sci Eng A* , 2013 , 577: 161
- [11] Shi M H , Zhang P Y , Wang C , et al . Effect of high heat input on toughness and microstructure of coarse grain heat affected zone in Zr bearing low carbon steel. *ISIJ Int* , 2014 , 54(4) : 932
- [12] Shim J H , Cho Y W , Chung S H , et al . Nucleation of intragranular ferrite at Ti_2O_3 particle in low carbon steel. *Acta Mater* , 1999 , 47(9) : 2751
- [13] Byun J S , Shim J H , Cho Y W , et al . Non-metallic inclusion and intragranular nucleation of ferrite in Ti-killed C-Mn steel. *Acta Mater* , 2003 , 51(6) : 1593
- [14] Chai F , Su H , Yang C F , et al . Nucleation behavior analysis of intragranular acicular ferrite in a Ti-killed C-Mn steel. *J Iron Steel Res Int* , 2014 , 21(3) : 369
- [15] Song M M , Song B , Hu C L , et al . Formation of acicular ferrite in Mg treated Ti-bearing C-Mn steel. *ISIJ Int* , 2015 , 55(7) : 1468
- [16] Song M M , Song B , Xin W B , et al . Effects of rare earth addition on microstructure of C-Mn steel. *Ironmaking Steelmaking* , 2015 , 42(8) : 594
- [17] Nako H , Okazaki Y , Speer J G . Acicular ferrite formation on Ti-rare earth metal-Zr complex oxides. *ISIJ Int* , 2015 , 55(1) : 250
- [18] Byun J S , Shim J H , Cho Y W . Influence of Mn on microstructural evolution in Ti-killed C-Mn steel. *Scripta Mater* , 2003 , 48(4) : 449