

取向硅钢的高温力学性能

裴英豪¹ 张 晨² 陈其安¹ 彭 云¹ 仇圣桃²

(1 钢铁研究总院结构材料研究所,北京 100081; 2 钢铁研究总院连铸技术国家工程研究中心,北京 100081)

摘 要 采用 Gleeble-1500D 应力/应变热模拟试验机,对实验室 30 kg 真空感应炉冶炼的模拟 50 mm 薄板坯连铸连轧流程生产的取向硅钢(0.027% C, 3.06% Si)进行了高温力学性能测试。结果表明,在 $1 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ 应变速率下,所测试的试验钢存在两个脆性温度区,即熔点至 1 300 °C 的第 I 脆性区和 800 ~ 600 °C 的第 III 脆性区。1 390 ~ 1 410 °C 是试验钢的裂纹敏感区间。在第 I 脆性区,高温下树枝晶界面被富集溶质的液相膜包围是产生脆性的主要原因。在第 III 脆性区, $\gamma \rightarrow \alpha$ 转变和 760 °C 左右 γ 、 α 和 Fe_3C 三相共存以及晶界析出物,是造成塑性恶化的主要原因。

关键词 取向硅钢 高温力学性能 零强度温度 零塑性温度

High Temperature Mechanical Properties of Grain Oriented Silicon Steel

Pei Yinghao¹, Zhang Chen², Chen Qi'an¹, Peng Yun¹ and Qiu Shengtao²

(1 Institute for Structure Materials, Central Iron and Steel Research Institute, Beijing 100081;

2 National Engineering Research Center of Continuous Casting Technology, Central Iron and Steel Research Institute, Beijing 100081)

Abstract High temperature mechanical properties of grain oriented silicon steel (0.027% C, 3.06% Si) melting by a 30 kg vacuum induction furnace in lab and simulating 50mm thin slab casting and rolling process have been tested by Gleeble-1500D stress/strain thermal simulation machine. Results show that with strain rate $1 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$, there are two brittle temperature zones for the test steel, i. e. I brittle zone- melting point to 1 300 °C and III brittle zone- 800 ~ 600 °C. 1 390 ~ 1 410 °C is crack sensitive range of the test steel. In I brittle zone the dendritic crystal boundary surrounded by liquid film of rich solute is main reason to produce brittlement. And in III brittle zone, $\gamma \rightarrow \alpha$ transformation, γ , α and Fe_3C triple phase coexistence at about 760 °C and precipitates at grain boundary are main cause of deterioration in ductility.

Material Index Grain Oriented Silicon Steel, High Temperature Mechanical Properties, Zero Strength Temperature, Zero Ductility Temperature

取向硅钢主要用于大、中型变压器铁芯,是一种重要的金属功能材料。其制造工艺复杂,生产工序长,性能影响因素多,技术要求水平高^[1]。在连铸生产过程中,钢的高温力学性能与铸坯裂纹有直接关系。针对不同钢种的高温力学性能研究已经有很多,但对硅钢尤其是取向硅钢热塑性的系统研究报道较少,本文对实验室模拟薄板坯连铸连轧流程生产的取向硅钢进行高温拉伸测试和零强度温度(ZST)、零塑性温度(ZDT)的测定,并对钢在各温度区间的热塑性变化进行分析。

1 试验材料和方法

试验用钢采用 30 kg 真空感应炉冶炼,模拟薄板坯连铸工艺,浇铸成 50 mm 厚的薄板坯,化学成分见表 1。空冷至室温后加热至 1 150 °C 保温 10 min,锻造成 $\Phi 14$ mm 圆棒,经机加工后制成 $\Phi 10 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$ 的圆柱,两端加工出螺纹。

利用 Gleeble 1500D 应力/应变热模拟试验机进行高温拉伸测试,试样放置完成后,以 25 °C/s 的速

表 1 试验钢的化学成分/%

Table 1 Chemical compositions of investigated steel /%

C	Si	Mn	P	S	Als	N	O
0.027	3.06	0.057	0.005 6	0.013	0.018	0.009 7	0.004 1

度将试样加热至 1 350 °C 保温 30 s,然后以 5 °C/s 的速度降到测试温度,保温 30 s 后以 $\dot{\epsilon} = 1 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ 的应变速率对试样进行拉伸直至断裂。当测试温度大于 1 350 °C 时,试样在此温度保温 30 s 后直接进行拉伸。根据试样拉断后的断口直径、初始状态的直径和断裂前的最高载荷计算试样在各温度下的断面收缩率(R. A.)和抗拉强度(σ_b)。

2 试验结果与分析

2.1 热塑性和强度曲线

抗拉强度(σ_b)及断面收缩率(R. A.)是表征钢的高温力学性能优劣的两个重要指标,热塑性曲线(R. A. ~ T)及强度曲线(σ_b ~ T)是钢的高温力学性能的特征曲线。图 1 所示为试验钢在不同温度下的断面收缩率和强度曲线。

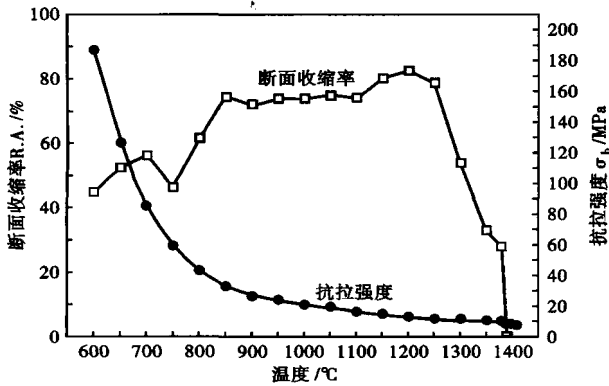


图1 温度对 0.027C-3.06Si 取向硅钢的断面收缩率及抗拉强度影响

Fig.1 Effect of temperature on reduction of area and tensile strength of 0.027C-3.06Si grain oriented silicon steel

从图 1 可以看出,试样的抗拉强度随温度降低而逐渐升高。对于断面收缩率,一般以 R. A. = 60% 作参照,来划分热塑性曲线中高塑性区和低塑性区的范围^[2]。由图 1 可知,从熔点 (T_m) 到 600 °C 范围内,存在 $T_m \sim 1300$ °C 和 800 ~ 600 °C 两个脆性温度区。在 1300 °C 以上, R. A. 值迅速降低,在 1390 °C 时几乎为 0。在 1300 °C 以下,随温度降低, R. A. 值快速上升,在 1250 ~ 850 °C, 试样具有良好的塑性, R. A. 值在 70% 以上。温度降到 850 °C 以下后, R. A. 值再次降低,进入了通常所称钢的第三脆性温度区,在 750 °C 时, R. A. 值降到最低点(46.5%),其后随温度的进一步下降 R. A. 值又有所回升。

2.2 零强度温度和零塑性温度

零强度温度 (ZST) 和零塑性温度 (ZDT) 是衡量材料高温行为的重要参数,是衡量钢的裂纹敏感性的重要判据^[3]。前者表征固液界面刚凝固的金属开始具有抵抗外力作用的温度,后者表征已凝固的金属开始具有抵抗变形能力的温度。在 $\Delta T = ZST - ZDT$ 温度区间,钢虽具有一定的强度,但无抵抗塑性变形的能力, ΔT 越大,在这段温度范围内受外力作用产生裂纹的几率越大。试验测定 $ZST = 1410$ °C, 而 $ZDT = 1390$ °C, 则 1390 ~ 1410 °C 是试验取向硅钢的裂纹敏感区间。

2.3 第 I 脆性温度区的脆化原因分析

在 $T_m \sim 1300$ °C 的高温脆性区,试样的塑性很低,通过扫描电镜观察 1350 °C 时的试样断口发现,样品中存在液相凝固的现象(图 2)。在钢的熔点附近的脆性温度区,脆性主要是由于树枝晶间富集氧、硫和磷等杂质元素,降低了固相线温度,在高温下树枝晶被液相膜包围,降低了枝晶间的结合强度,导致

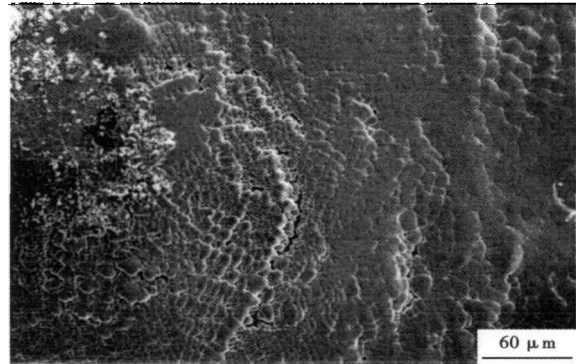


图2 0.027C-3.06Si 取向硅钢在 1350 °C 的断口形貌, SEM
Fig.2 Morphology of fracture of 0.027C-3.06Si grain oriented silicon steel at 1350 °C, SEM

凝固前沿易产生裂纹。对于试验中的直接加热试样,其脆化过程是首先出现晶界初熔,继而在拉伸应力的作用下形成孔洞,在熔融区不断扩展时,孔洞沿晶界长大直至最后断裂^[2]。

2.4 第三脆性温度区的断裂机理分析

850 ~ 600 °C 温度区间为试验钢的第三脆性区。由图 3 断口形貌观察可知,随着断面收缩率的降低,试样从 1250 ~ 850 °C 温度区的塑性断裂向脆性断裂转变。1050 °C 拉伸断口表面有许多深浅不同的凹坑存在,且凹坑周围均发生较大的塑性变形,是典型的穿晶塑性断裂,而 750 °C 拉伸断口表面可以观察到明显的沿晶裂纹,裂纹周围发生较小的塑性变形,此时主要为沿晶脆性断裂。

由 3.25% Si-Fe 合金的 Fe-C 相图^[1]可知,在试验钢元素含量范围内,温度从液相线开始下降时,钢从液相首先全部转变为 α 铁素体,随后在 1250 °C 左右,开始有部分 α 相向 γ 相转变;温度降到 1150 °C 左右时,钢中 γ 相比比例达到最大值,之后随温度降低, γ 相含量逐渐减少。在 760 °C 左右发生 $\gamma \rightarrow \alpha + Fe_3C$ 转变,直至 γ 相全部消失,随后温度下降直到室温,钢中只含有 α 相和 Fe_3C 相。

在第三脆性温度区,随着温度从 800 °C 下降, γ 相含量持续减少,这些少量的 γ 相位于 α 晶界处。由于 γ 相和 α 相强度不同,所以基体的塑性不连续,变形时,应力集中在 γ 和 α 晶界处。此外,在冷却过程中从钢中析出的 AlN、MnS 等析出物以及各种氧化物夹杂,在晶界沉淀成为应力集中源。当外力作用时,试样便易于在晶界附近变形,在析出物或夹杂物处引起晶界滑移,形成孔洞,增加了晶界脆性,最终导致沿晶断裂^[4]。图 4 所示为在试验钢铸坯中观察到的沿晶界析出的复合析出物 (AlN + MnS +

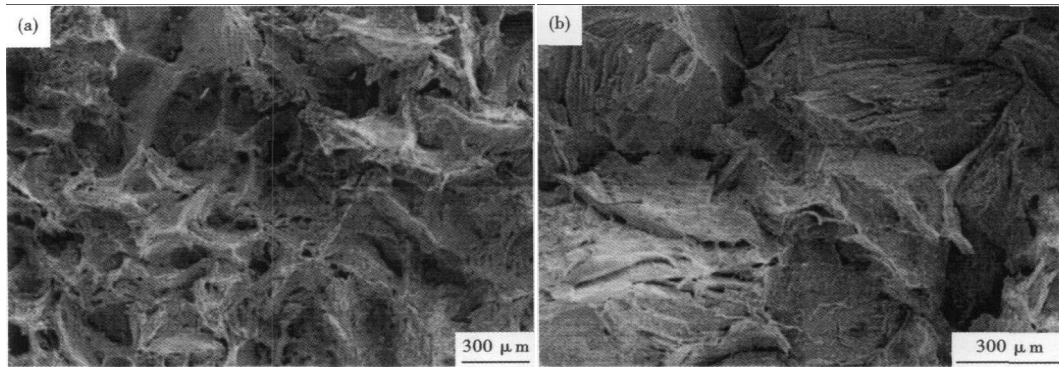


图 3 0.027C-3.06Si 取向硅钢 1050 °C (a) 和 750 °C (b) 的断口形貌, SEM

Fig. 3 Morphology of fracture of 0.027C-3.06Si grain oriented silicon steel at 1050 °C (a) and 750 °C (b), SEM

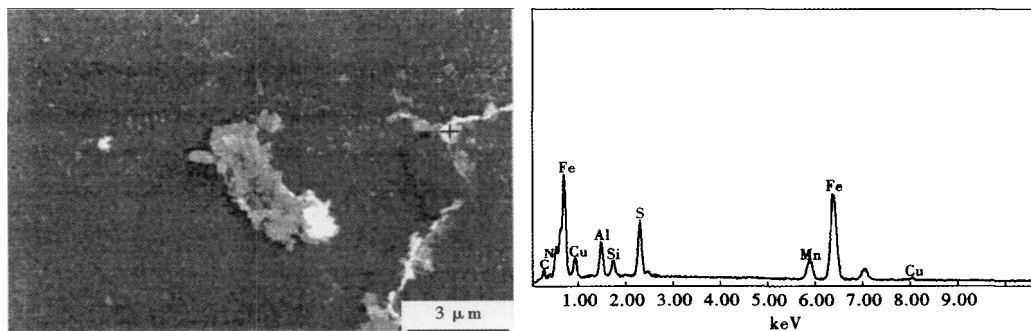


图 4 0.027C-3.06Si 取向硅钢铸坯中复合析出物 (AIN + MnS + Cu₂S) 的形貌及能谱

Fig. 4 Morphology and energy spectrum of complex precipitates (AIN + MnS + Cu₂S) in casting slab of 0.027C-3.06Si grain oriented silicon steel

Cu₂S)。

在 760 °C 左右很窄的一个温度范围内,钢中发生 $\gamma \rightarrow \alpha + \text{Fe}_3\text{C}$ 转变, γ 、 α 和 Fe_3C 三相共存。由于各相的强度不一,在三相交区域,钢的塑性很不连续,应力也更加容易集中,裂纹就更容易产生,此时钢的塑性最差。由于冷却时过冷度的存在,一般在 700 ~ 750 °C 钢的塑性最差, R. A. 值最低,图 1 中的断面收缩率曲线也说明了这一点。随着温度进一步降低, $\gamma \rightarrow \alpha + \text{Fe}_3\text{C}$ 转变完成, γ 相消失,钢中只剩余 α 和 Fe_3C 两相,裂纹的产生和扩展相对变得困难,钢的塑性又有所好转。

3 结论

(1) 当应变速率为 $1 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ 时,试验取向硅钢存在两个脆性温度区,即第 I 脆性区 $T_m \sim 1300$ °C 和第 III 脆性区 800 ~ 600 °C。在 1250 ~ 850 °C,试样具有良好的塑性,断面收缩率在 70% 以上。

(2) 试验测定样品的零强度温度 ZST = 1410 °C,零塑性温度 ZDT = 1390 °C, 1390 ~ 1410 °C 是

试验取向硅钢的裂纹敏感区间。

(3) 在第 I 脆性区,高温下树枝晶界面被富集溶质的液相膜包围是产生脆性的主要原因。在第 III 脆性区,钢的 $\gamma \rightarrow \alpha$ 转变和 760 °C 左右 γ 、 α 和 Fe_3C 三相共存以及晶界析出物,是造成塑性恶化的主要原因。

国家自然科学基金和宝山钢铁股份有限公司联合资助项目 (50934009)

参考文献

- 1 何忠治. 电工钢. 北京:冶金工业出版社,1996
- 2 蔡开科,党紫久. 连铸钢高温力学性能专辑. 北京科技大学学报, 1993, 15(增刊):30
- 3 蔡开科. 连铸坯裂纹与钢的高温力学行为. 连铸, 1990(6):2
- 4 Mintz B, Yue S, Jonas J J. Hot Ductility of Steels and Its Relationship to the Problem of Transverse Cracking during Continuous Casting. International Materials Reviews, 1991, 36(5):187

裴英豪(1982-),男,博士生,薄板坯连铸连轧取向、无取向硅钢的研究。

收稿日期:2010-02-05