

高牌号无取向硅钢 70 mm 连铸板坯-Φ13 mm 锻材的高温力学性能

花艳侠^{1,2} 张晨² 马良² 荣哲² 项利² 仇圣桃²

(1 辽宁科技大学,鞍山 114000; 2 钢铁研究总院连铸技术国家工程研究中心,北京 100081)

摘要 通过 Gleeble-1500 应力-应变热模拟试验机测试了由 70 mm 连铸坯锻成的 Φ13 mm 棒材的高牌号无取向硅钢(成分:0.002 7C,3.06Si,0.32Mn,0.013P,0.004S,0.50Al,0.002 7Ti,0.004 2 N)的高温(600~1 250 ℃)力学性能。结果表明,在应变速率为 $1 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ 时,高牌号无取向硅钢中仅存在第 I 脆性温度区(1 250 ℃至熔点),第 II 脆性温度区和第 III 脆性温度区均未出现,主要原因是超低碳($\leq 50 \times 10^{-6}$)、高硅(3% Si)致使硅钢凝固冷却过程中不经历 α - γ - α 相变,避免了固溶的硫、氧等元素以 (Fe, Mn)O、(Fe, Mn)S、 Al_2O_3 等形式在奥氏体晶界沉淀和长大导致晶界强度降低,产生裂纹。

关键词 高牌号无取向硅钢 70 mm 连铸板坯 高温力学性能 相变

Elevated-Temperature Mechanical Properties of Φ13 mm Bar Forged from 70 mm Casting Slab of High Grade Non-Oriented Silicon Steel

Hua Yanxia^{1,2}, Zhang Chen², Ma Liang², Rong Zhe², Xiang Li² and Qiu Shengtao²

(1 Liaoning Science and Technology University, Anshan 114000; 2 National Engineering Research Center of Continuous Casting Technology, Central Iron and Steel Research Institute, Beijing 100081)

Abstract The mechanical properties of Φ13 mm bar forged from 70 mm casting thin slab of high grade non-oriented silicon steel (composition: 0.002 7C, 3.06Si, 0.32Mn, 0.013P, 0.004S, 0.50Al, 0.002 7Ti, 0.004 2N) at elevated temperature 600~1 250 ℃ are measured by Gleeble-1500 stress-strain thermal simulation machine. Results show that with strain rate $1 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$, only I brittle zone (1 250 ℃ to melting point) exists in the high grade non-oriented silicon steel, and the II brittle zone and III brittle zone are all of no-occurrence. The main cause is that the extra-low carbon content ($\leq 50 \times 10^{-6}$) and high silicon content (3% Si) in steel lead to no-course of α - γ - α phase transformation during silicon steel solidifying and cooling process to avoid the sulfur, oxygen etc elements in solid solution status in forms of (Fe, Mn)O, (Fe, Mn)S and Al_2O_3 precipitated and grown at austenite grain boundary resulting in the strength of grain boundary decreasing and the cracks occurring.

Material Index High Grade Non-Oriented Silicon Steel, 70 mm Casting Slab, Elevated-Temperature Mechanical Properties, Phase Transformation

高牌号无取向电工钢主要用于容量较大的大、中型电机和发电机(如大型汽轮、水轮发电机的铁芯),此外也可用在高效节能家电、电动汽车、无刷 DC 和 AC 感应电机铁芯^[1]。为满足国内市场缺口,减少进口量,近几年我国在电工钢领域的重要研究课题之一就是大力研发高牌号无取向电工钢^[2]。无取向电工钢是一种低碳合金钢,裂纹缺陷强烈影响铸坯质量^[3],但目前无取向电工钢连铸坯高温力学性能的公开报道还不多,笔者在 Gleeble-1500 热模拟机上对高牌号无取向电工钢连铸坯的高温延塑性进行了研究。

1 试验材料和方法

试样取自钢厂经 120 t 转炉-RH 真空精炼-连铸工序生产的高牌号无取向电工钢连铸坯,铸坯断面为 1 270 mm × 70 mm,成分见表 1。将铸坯锻造成

Φ13 mm 的圆棒,再将圆棒加工成试验所要求的标准试样 Φ10 mm × 110 mm,螺纹 M10 × 10 mm。高温力学性能测试在热应力应变模拟试验机上进行测试,试样用氩气保护,采用断面收缩率表征钢的塑性,抗拉强度表征钢的强度。

将试样先以 20 ℃/s 加热至 1 250 ℃,保温 30 s 后,以 5 ℃/s 冷却至变形测试温度,保温 30 s,分别在 600, 650, 700, 750, 800, 850, 900, 950, 1 000, 1 050, 1 100, 1 150, 1 200, 1 250 ℃ 测试温度下变形,应变速率为 $1 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$,温度及形变制度如图 1 所示。

表 1 试验高牌号无取向硅钢的分析成分 /%

Table 1 Analysis of test high grade non-oriented silicon steel /%

C	Si	Mn	P	S	Cu	Al	Ti	N
0.002 7	3.06	0.32	0.013	0.004	0.021	0.50	0.002 7	0.004 2

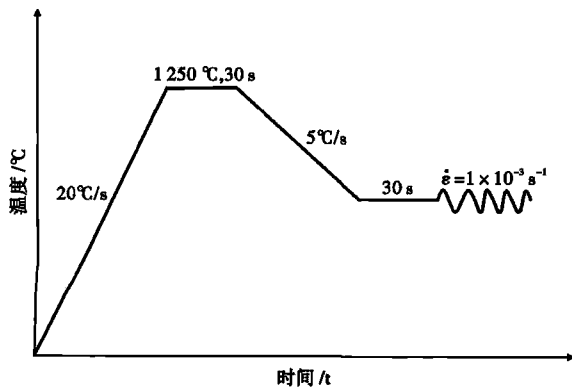


图 1 试验高牌号无取向硅钢的拉伸温度及形变参数
Fig.1 Tension test temperature and deformation parameters of test high grade non-oriented silicon steel

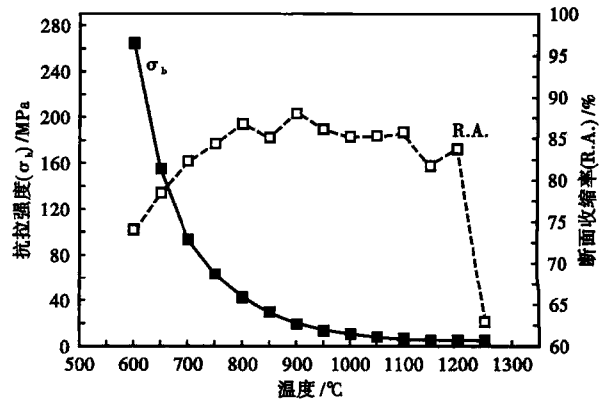


图 2 温度对试验高牌号无取向硅钢抗拉强度和断面收缩率的影响
Fig.2 Effect of temperature on tensile strength and reduction of area of test high grade non-oriented silicon steel

2 试验结果与分析

2.1 热塑性和强度曲线

一般用抗拉强度 (σ_b)、断面收缩率 (R. A.) 来表征钢的高温力学性能,对应的热塑性曲线 (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 2 所示为断面收缩率、抗拉强度随温度的变化曲线,由图 2 可知,在 800 °C 以下,随形变温度升高,试样抗拉强度快速降低,在 800 °C 以上,抗拉强度降低的速度趋于缓和;热塑性曲线可划分为 3 个阶段,第 1 阶段为 600 ~ 800 °C, R. A. 由 75% 单调增加到 85% 左右,第 2 阶段为 800 ~ 1 200 °C, R. A. 值在 82% ~ 86% 间浮动,第 3 阶段为 1 200 ~ 1 250 °C, R. A. 值由 85% 骤降至 63%。一般以 R. A. = 60% 为临界值区分热塑性曲线的高塑性区和低塑性区^[4],则本实验材料除在 1 200 °C 以上为低塑性区外,其它区均为高塑性区。因此本材料仅存在第 I 脆性温度区,而第 II 脆性温度区 (1 200 ~ 900 °C) 和第 III 脆性温度区 (900 ~ 600 °C) 均未出现。

2.2 高温脆性分析

使用蔡司 SUPRA-55VP 扫描电子显微镜观察了高温拉伸试样的断口断裂形式,结果如图 3 所示。由图 3 可知,试样在 1 250、1 200 °C 发生了沿晶脆性断裂,断口微观组织也为典型的树枝晶形貌,脆断机制可能是液态金属最后凝固部分由于杂质含量较高而造成树枝晶交界处弱化,也可能是凝固完毕前树枝晶交界处金属的收缩造成的显微疏松,导致树枝晶交界处弱化所致。这在图 3 (a, b) 能谱分析结果,即该区域夹杂物主要以 Al、Si 的氧化物为主得以印证。

2.3 第 II 脆性温度区高塑性分析

由图 2 可知,试验钢在 800 ~ 1 200 °C 范围仍保持较高的塑性,图 3 (c) 所示为试样在 950 °C 的断口形貌及能谱分析结果,由图 3 可知,试验钢在该区域出现了颈缩空洞。一般认为钢中第 II 脆性温度区内材料脆化的主要原因是高温奥氏体固溶的硫、氧等元素倾向以 (Fe, Mn)O、(Fe, Mn)S、Al₂O₃ 等形式在

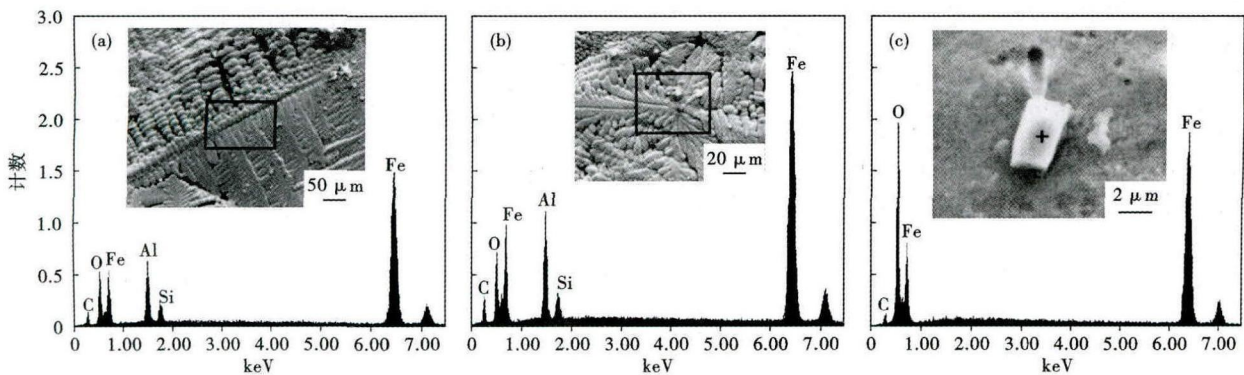


图 3 试验高牌号无取向硅钢 1 250 °C (a), 1 200 °C (b), 950 °C (c) 拉伸断口的 SEM 形貌和能谱分析
Fig.3 SEM morphology of tensile fracture and energy spectrum analysis of test high grade non-oriented silicon steel at 1 250 °C (a), 1 200 °C (b) and 950 °C (c)

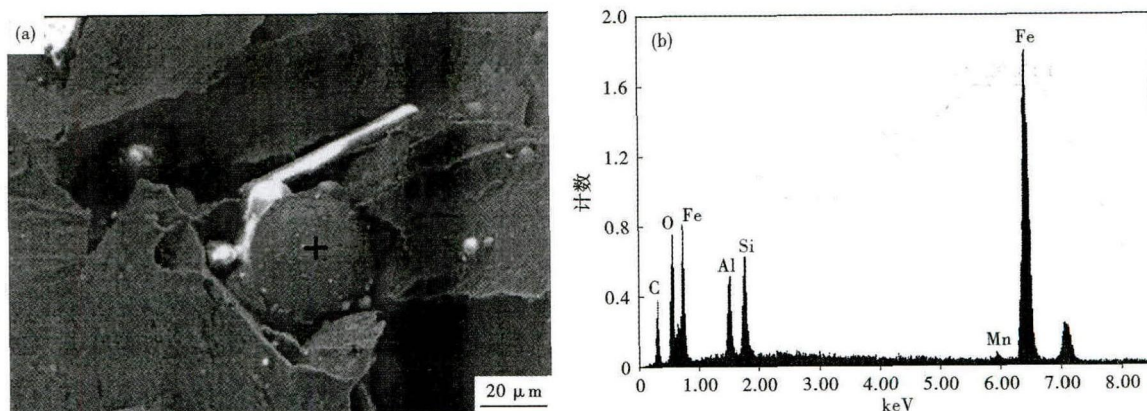


图 4 试验高牌号无取向硅钢 600 °C 时拉伸断口 SEM 形貌(a) 和能谱分析(b)

Fig.4 SEM morphology of tensile fracture (a) and energy spectrum analysis (b) of test high grade non-oriented silicon steel at 600 °C

奥氏体晶界沉淀、长大而降低了晶界强度,在应力作用下裂纹易在晶界处萌生、长大和扩展,造成沿晶断裂^[5],裴英豪等对取向硅钢高温力学性能的研究也得到了类似的结果^[6]。但对本试验材料而言,由于 C 含量极低($\leq 50 \times 10^{-6}$)、Si 含量高(3.06%),由 C-Fe-Si 相图可知,试验钢在凝固冷却过程中一直处于铁素体单相区^[1],故 (Fe, Mn)O、(Fe, Mn)S、Al₂O₃ 等粒子不易在奥氏体晶界沉淀长大,此外,试验钢无高温相变还避免了易偏聚元素(如 S)在晶界偏聚量增大导致的高温塑性降低。因此试验钢在第 II 脆性温度区未出现脆性断裂而表现出良好塑性。

2.4 第 III 脆性温度区高塑性分析

钢中第 III 脆性温度区内常见的脆化机理是 γ - α 相变导致两相区脆化并易引起沿晶断裂。但对于本实验钢而言,低碳高硅使得试验钢保持单相组织,相较于中低牌号无取向硅钢(Si 含量较低)和取向硅钢(在铸坯阶段 C 含量较高,扩大了 γ 相区),试验钢在传统的第 III 脆性温度区(900 ~ 600 °C)内不存在 γ - α 两相区,所以本材料热塑性试验中未出现由于两相区脆化引起的沿晶断裂,虽然随测试温度的降低,断面收缩率呈下降趋势,但较其它种类硅钢仍呈现为较好的塑性(R. A. $\geq 70\%$)。图 4(a) 所示为试样在 600 °C 时拉断后的断口形貌和断口处的夹杂物,由图 4(a) 可知,600 °C 时断口仍为穿晶断裂,存在大量大小不一的韧窝。图 4(b) 表明韧窝处夹杂物主要以 Al、Si、Mn 的氧化物为主。

3 结论

(1) 试验研究的高牌号无取向硅钢有着良好的热塑性,应变速率为 $1 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ 时,在 600 ~ 1 250 °C 试验温度范围内,断面收缩率 R. A. 均大于 60%,800 ~ 1 200 °C 时 R. A. 值在 82% ~ 86%。

(2) 试验研究的高牌号无取向硅钢仅存在第 I 脆性温度区(1 250 °C 至熔点),不存在第 II、III 脆性温度区。

(3) 试验钢保持良好热塑性的主要原因在于成分上的低碳高硅使得凝固及冷却过程无固态相变,一直是单一的铁素体相所致。

参考文献

- [1] 何忠治. 电工钢[M]. 北京:冶金工业出版社,1996.
- [2] 卢凤喜,何敏. 高牌号无取向电工钢生产技术[J]. 武钢技术, 2006(6):13-16.
- [3] 熊毅刚. 板坯连铸[M]. 北京:冶金工业出版社,1994:123.
- [4] Suzuki H G, Nishimura S, Yanaguchi S. Characteristics of Embrittlement in Steels Above 600°C [J]. Tetsu-to-Hagane, 1979, 65(14): 1180-2038.
- [5] 王明林. 齿轮钢连铸坯高温力学性能的研究[D]. 北京:北京科技大学,1998.
- [6] 裴英豪,张晨,陈其安,等. 取向硅钢的高温力学性能[J]. 特殊钢,2010,31(4):46-48.

花艳侠(1988-),女,硕士研究生(辽宁科技大学),2012年辽宁科技大学(本科)毕业,电工钢的基础理论与生产工艺研究。E-mail:huayx0926@126.com

收稿日期:2014-08-28