

高磁感取向硅钢高温力学性能 与热加工性能

时朋召¹, 李江波^{2*}, 乔家龙¹, 郭飞虎¹, 仇圣桃¹

(1. 钢铁研究总院连铸技术国家工程研究中心, 北京 100081; 2. 湖南华菱涟源钢铁有限公司技术中心, 湖南 娄底 417009)

摘要:采用 Gleeble3800 热模拟试验机对高磁感取向硅钢铸坯进行高温拉伸和高温压缩试验, 研究温度对高磁感取向硅钢的高温力学性能(抗拉强度和断面收缩率)的影响关系, 同时研究了高磁感取向硅钢的热加工性能。结果表明, 高磁感取向硅钢的第Ⅰ脆性区温度为熔点 ~ 1 200 °C, 第Ⅲ脆性区温度为 750 °C 附近, 不存在第Ⅱ脆性区; 750 °C 试样断裂机制为沿晶脆性, 且在断口处存在 Al、Si 等的氧化夹杂物; 当形变量和温度一定的情况下, 试样随应变速率增大, 变形抗力大幅提高。

关键词:高磁感取向硅钢; 高温力学性能; 热加工性能; 脆性区; 变形抗力

中图分类号: TF76, TG115.5

文献标志码: A

文章编号: 1004-7638(2023)04-0135-07

DOI: 10.7513/j.issn.1004-7638.2023.04.020

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



听语音
与作者
聊科研

High temperature mechanical properties and hot working properties of high magnetic orientation silicon steel

Shi Pengzhao¹, Li Jiangbo^{2*}, Qiao Jialong¹, Guo Feihu¹, Qiu Shengtao¹

(1. National Research Center of Continuous Casting Technology, Central Iron and Steel Research Institute, Beijing 100081, China; 2. Technology Center, Hunan Valin Lianyuan Iron and Steel Co., Ltd., Loudi 417009, Hunan, China)

Abstract: In this paper, Gleeble3800 thermal simulation test machine was used to conduct high temperature tensile and high temperature compression experiments on high magnetic induction oriented silicon steel billets. The influence of temperature on high temperature mechanical properties (tensile strength and section shrinkage) of high magnetic induction oriented silicon steel, and the hot working properties of high magnetic induction oriented silicon steel were studied. The results showed that the temperature of the first brittle zone of high magnetic orientation silicon steel was around the melting point ~ 1 200 °C, and the temperature of the third brittle zone was about 750 °C, and there was no second brittle zone. The fracture mechanism of the sample at 750 °C is intergranular brittle fracture, and there are Al, Si and other oxidation inclusions at the fracture surface. When the shape variable and temperature are constant, the deformation resistance of the specimen increases with the increase of strain rate.

Key words: highly magnetically oriented silicon steel, mechanical behavior under high temperature, hot working property, brittle zone, deformation resistance

收稿日期: 2022-06-21

作者简介: 时朋召, 1990 年出生, 男, 河北石家庄人, 博士, 研究方向: 连铸工艺优化研究, E-mail: shipengzhao1990@163.com; * 通讯作者: 李江波, 1987 年出生, 男, 河南三门峡人, 硕士, 工程师, 研究方向: 取向硅钢炼钢与连铸工艺研究, E-mail: lijiangbo361@163.com。

0 引言

电工钢在电子、电力等领域占有不可或缺的地位,是一种重要的软磁合金,其生产工艺复杂,性能影响因素较多,且技术要求水平高^[1]。铸坯的高温力学性能(抗拉强度与断面收缩率)与铸坯裂纹的产生原因有着密切的联系^[2-5]。取向硅钢中 Si(3.2%左右)含量相对较高,钢中 Si 元素含量越高,其材料的热传导率较低,凝固速度相对较慢,当连铸二次冷却量不合理时,则会导致铸坯裂纹产生。

文献 [6] 采用热模拟机试验,得出 TWIP 钢的第 I 脆性区间为 1 250 ℃ 到熔点,断裂形式为沿晶断裂,第 III 脆性区间为 650 ~ 800 ℃。裴英豪等^[7]利用 Gleeble1500D 试验机研究了薄板坯取向硅钢(0.027%C, 3.06%Si)的高温力学性能,试验材料存在第 I、III 两个脆性区,分别为熔点至 1 300 ℃ 和 800 ~ 600 ℃。侯泽旺等^[8]研究了普通取向硅钢在第 III 脆性区塑性差的主要原因。迟宏宵^[9]等采用 Gleeble3800 试验机研究了 M2 高速钢高温力学性能,其零塑性温度为 1 220 ℃,零强度温度为 1 250 ℃。曾祥群等^[10]采用热模拟试验机分析了高氮钢的高温热加工性能。林琳^[11]讨论了双向不锈钢 2 205 在 1 000 ~ 1 200 ℃ 条件下压缩变形的热加工性能。文献 [12] 研究了 Fe-6.5%Si 高硅钢在 650 ~ 950 ℃ 的热加工性能,试验结果表明应力对变形温度和应变速率影响很大,且最佳的工艺参数为加工温度 ≥ 900 ℃,应变速率为 $0.01 \sim 10 \text{ s}^{-1}$ 。元鹏飞等^[13]采用 Gleeble3500 热模拟试验机研究了 D36 船板钢的不同脆性温度区,其第 III 脆性区在 600 ~ 950 ℃,要控制连铸坯矫直温度高于 950 ℃ 以上。

目前对于其他钢种的研究较多,而关于高磁感取向硅钢铸坯的高温力学性能所做的研究相对较少。笔者采用 Gleeble3800 热模拟试验机对高磁感取向硅钢铸坯锻造后试样材料进行高温拉伸和高温压缩试验,研究温度对高磁感取向硅钢的高温力学性能(抗拉强度和断面收缩率)的影响关系,得出了取向硅钢的脆性区温度区间和材料塑性低的原因。同时研究了变形温度、变形量和应变速率对高温变形抗力的影响。为高磁感取向硅钢的连铸、轧制工艺提供理论数据,具有重要意义。

1 试验材料及方案

1.1 试验材料与设备

为了研究高磁感取向硅钢的高温力学性能,为连铸工艺和轧制工艺提供理论基础,采用 Gleeble3800 试验机进行热模拟试样的高温拉伸和高温压缩试验。铸坯试样取自国内某钢厂板坯连铸机生产的高磁感取向硅钢铸坯,试样的主要化学成分见表 1,试验材料的 C 含量在 0.05% ~ 0.06%,Si 含量在 3.1% ~ 3.3%。将铸坯锻造成 $\varnothing 13 \text{ mm}$ 钢棒,然后再进行试样加工成目标规格,其中拉伸试样规格为 $\varnothing 10 \text{ mm} \times 120 \text{ mm}$,螺纹 $M10 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$;压缩试样为 $\varnothing 10 \text{ mm} \times 15 \text{ mm}$ 。

表 1 试样的主要化学成分
Table 1 Main chemical composition of samples %

C	Si	Mn	P	S	Cr
0.05 ~ 0.06	3.0 ~ 3.3	0.08 ~ 0.1	0.02 ~ 0.03	0.005 ~ 0.009	<0.15

1.2 试验方案

为研究高磁感取向硅钢高温力学性能和热加工性能,分别制定 Hi-B 取向硅钢铸坯的高温拉伸和高温压缩试验工艺制度。高温拉伸试验的温度及形变制度,将准备好的取向硅钢拉伸试样先以 $20 \text{ }^{\circ}\text{C/s}$ 加热至 1 250 ℃,保温 30 s 后使试样温度均匀,再以 $5 \text{ }^{\circ}\text{C/s}$ 冷却至变形测试温度,再保温 30 s 后,拉伸测试温度在 650 ~ 1 200 ℃,每相隔 50 ℃ 为一个温度测试条件对试样进行拉伸试验,应变速率为 $3 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ 。记录不同拉伸试验温度条件下试样的抗拉强度大小,并测量与计算试样拉断后断口大小和断面收缩率,并观察和分析试样断口形貌,以及采用扫描电镜能谱分析断口处夹杂物尺寸与类型。

高温压缩试验的温度及形变制度。将高磁感取向硅钢铸坯试样先以 $10 \text{ }^{\circ}\text{C/s}$ 加热升温至 1 150 ℃,保温 5 min 后使试样温度均匀,再以 $10 \text{ }^{\circ}\text{C/s}$ 冷却至变形测试温度,保温 3 min 以后,分别在 850 ~ 1 150 ℃,每相隔 50 ℃ 为一个温度测试条件对试样进行压缩试验,压下率设定为 60%,变形应变速率分别为 $1、5 \text{ s}^{-1}$,变形后进行水淬处理。

2 试验结果讨论与分析

2.1 高温拉伸试验结果

2.1.1 抗拉强度与断面收缩率分析

按照拟定的高温拉伸试验的温度及形变制度试

验, 每个温度条件下测试两根试样, 求其平均值作为最后结果。Gleeble3800 热模拟试验机测试的拉伸试验结果见表 2。

表 2 拉伸试验数据
Table 2 Tensile tests data

测试温度/℃	断后总长度/mm	断面收缩率/%	抗拉强度/MPa
650	124.93	67.60	106.7
700	124.95	68.27	76.4
750	123.53	53.76	78.2
800	125.21	70.66	56.3
850	127.49	83.66	42.2
900	127.34	82.22	35.7
950	127.56	86.86	25.9
1 000	127.20	82.60	27.8
1 050	124.83	74.41	16.8
1 100	124.42	72.09	15.0
1 150	124.35	72.35	11.7
1 200	122.54	45.73	8.2

高磁感取向硅钢铸坯试样拉断时抗拉强度和断面收缩率随温度变化曲线如图 1 所示。由图 1 可以看出, 随着温度由 650 ℃ 升高到 1 200 ℃, 试样的抗拉强度逐渐降低, 在 650 ℃ 时试样的抗拉强度为 106.7 MPa, 而在 1 200 ℃ 时试样的抗拉强度只有 8.2 MPa。

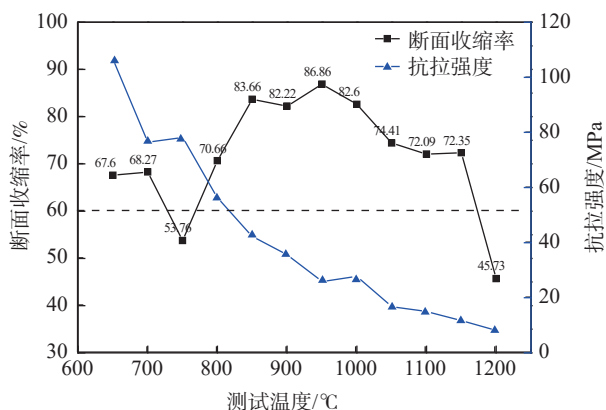


图 1 抗拉强度和断面收缩率随温度的变化曲线

Fig. 1 Variation of tensile strength and section shrinkage with temperature

由文献 [14-15] 可知, 在钢的液相线至 600 ℃ 温度区间, 正常情况下存在三个明显的脆性温度区域。高温区 (1 200 ℃ ~ 液相线) 为第 I 脆性区; 中温区 (900 ~ 1 200 ℃) 为第 II 脆性区; 低温区 (700 ~ 900 ℃) 为第 III 脆性区, 这一脆性区是与钢中的 $\gamma \rightarrow \alpha$ 转变相关的。钢的化学成分、试验的应变速率等因素会影响钢的三个温度脆性区, 三个脆性区域可能不会同时表现出脆性, 有时甚至还会发生脆性

区的重叠情况。

由图 1 可看出, 试验材料的热塑性相对较好, 在高温拉伸试验所经 600 ~ 1 250 ℃ 温度范围内, 除了 750 ℃ 和 1 200 ℃ 的断面收缩率 A 低于 60%, 断面收缩率分别为 53.76% 和 45.73%, 而其他温度点的断面收缩率 A 均在 60% 以上, 其中 850 ~ 1 000 ℃ 温度范围内塑性较高, 均等于高于 80%, 其中 950 ℃ 时塑性最好, 断面收缩率达到 86.86%。由断面收缩率试验结果可以得出, 高磁感取向硅钢的第 I 脆性区温度为熔点约 1 200 ℃, 不存在明显的第 II 脆性区, 第 III 脆性区温度为 750 ℃ 附近。因此, 在制订连铸二次冷却制度时可以此作为理论参考, 控制铸坯温度在合适的温度范围内, 避开低塑性区, 防止铸坯裂纹的产生。因设备条件所限, 试验测试温度未能达到零强度温度 (ZST), 但由抗拉强度值可知, 1 200 ℃ 以上已经接近零强度温度。

基于表 1 中高磁感取向硅钢试样化学成分, 采用参考公式^[16] 计算试样材料的液固相线, 得出高磁感取向硅钢试样的液相线温度 T_L 约为 1 509 ℃, 固相线温度 T_S 约为 1 467 ℃。由 3.25%Si-Fe 相图和图 2 可以得出, 在取向硅钢元素含量范围内, 当温度从液相线 (1 509 ℃) 开始逐渐下降时, 钢从液相开始全部转变为 α 铁素体, 随着温度继续降低到 1 250 ℃ 左右, 开始发生部分 α 相向 γ 相转变; 温度降到 1 150 ℃, 钢中 γ 相比比例达到最大值, 再随着温度降低, γ 相比比例逐渐减少。当温度继续下降到 750 ℃ 左右时会出现 $\gamma \rightarrow \alpha + \text{Fe}_3\text{C}$ 转变, 由于不同相的塑性和强度不一致, 在三相交界区域, 试验钢的塑性很不连续也很低, 由此可解释图 1 中 750 ℃ 时试样的低断面收缩率。随着温度降低, $\gamma \rightarrow \alpha + \text{Fe}_3\text{C}$ 转变完成, 钢中只有 $\alpha + \text{Fe}_3\text{C}$ 两相, 钢的塑性又有所好转。

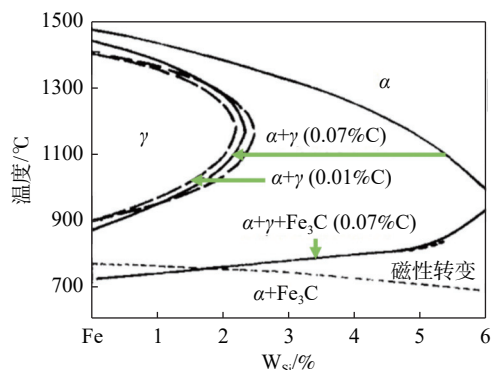


图 2 少量 C 对 Fe-Si 相图中 α 和 γ 相线的影响

Fig. 2 Effect of a small amount of C on α and γ phase lines in Fe-Si phase diagram

2.1.2 断口形貌结果与分析

取向硅钢材料在各测试温度表现出不同的塑性,采用扫描电子显微镜观察不同温度试验条件下的断口形貌并分析试样断口断裂形式。不同温度条件下的断口宏观和微观形貌如图3~4所示,以及拉伸试样断口部分夹杂物能谱如图5所示。

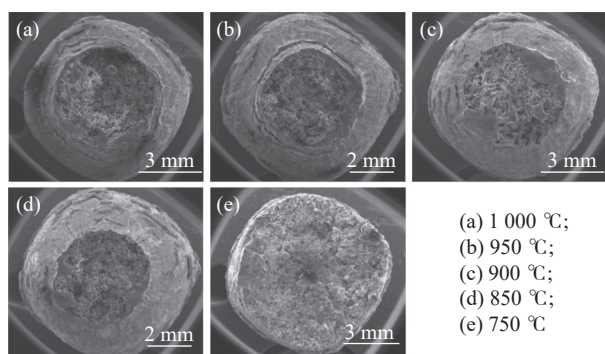


图3 试样在不同温度拉断时断口宏观形貌照片

Fig. 3 Macroscopic morphology of the specimens pulled at different temperatures

从图3~4可以看出,试样拉断温度1000~850 °C条件下,拉断过程中固相连接部分较少,即试

样断口收缩率较大,这也与表2中断面收缩率统计结果相符,且通过试样断口形貌可以判断出断口均为韧性断裂。在950 °C到850 °C条件下拉断的断口发现存留枝晶组织。由图4、5可知,750 °C断裂时的断口形貌呈现冰糖状,为典型的沿晶脆性断裂类型,此时的断口收缩率较小为53.76%。且由能谱分析可以发现,断口区域存在着Al、Si的氧化物夹杂,其对试样的塑性是有害的。

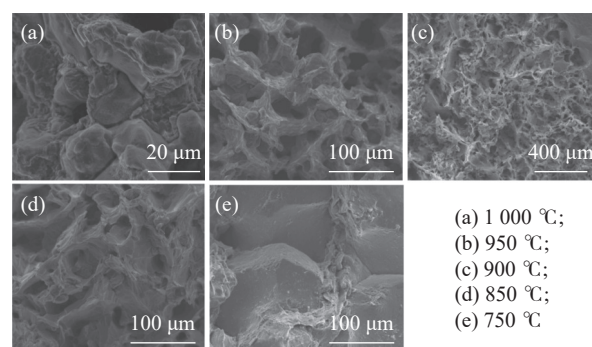


图4 试样在不同温度拉断时断口微观形貌照片

Fig. 4 Fractograph of the samples pulled at different temperatures

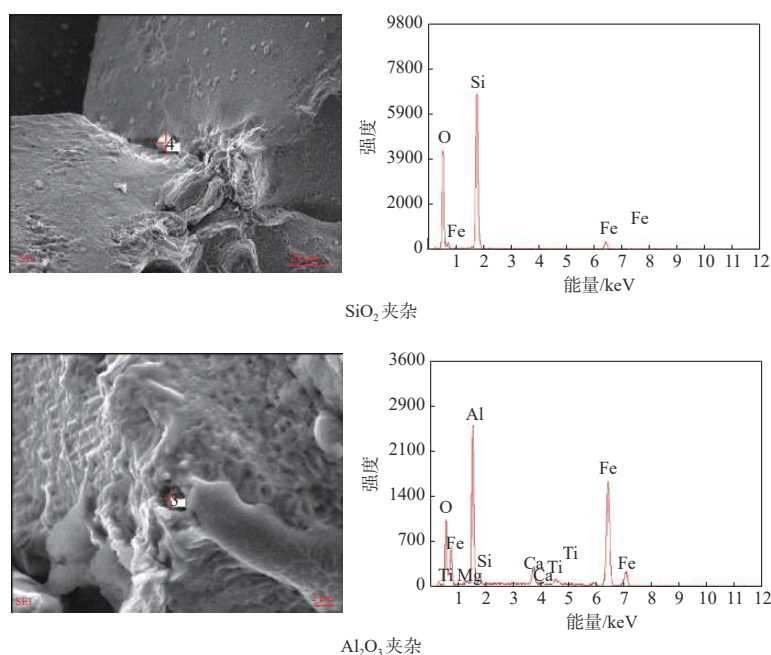


图5 750 °C时试样断口形貌扫描电镜照片与能谱

Fig. 5 SEM images and energy spectrum of the fracture morphology at 750 °C

2.2 高温压缩试验结果

金属热加工性能是影响轧钢工艺的重要参数,而高温变形抗力是表征金属材料热加工性能的一个基本物理量^[17-18]。在取向硅钢材料热加工时,需要考虑其不同温度和变形速率条件下对变形抗力大

小的影响规律,变形抗力大小对设备选取以及工艺参数选定具有重要影响。因此,研究高磁感取向硅钢在高温塑性热加工时的变形抗力规律,对实际生产中各种轧制工艺参数的选取和优化工艺有重要的指导意义。

2.2.1 变形温度和变形程度对高温变形抗力的影响

影响变形抗力的因素很多, 而变形温度是最主要和直观的因素。按照试验方案进行压缩试验。图6为不同应变速率(1 s^{-1} 和 5 s^{-1})条件下变形量对高温变形抗力的变化曲线。

由图6可知, 随着变形温度由 $850\text{ }^{\circ}\text{C}$ 升高到 $1150\text{ }^{\circ}\text{C}$, 在 1 s^{-1} 应变速率下的变形抗力峰值由 186.3 MPa 降低到 52.9 MPa , 而 5 s^{-1} 应变速率下的变形抗力峰值由 306.8 MPa 降低到 116.1 MPa , 且在相同温度时随着变形量由 $0\sim 10\text{ mm}$ 的增加, 试

样的变形抗力的应力值也随之增加。出现这种结果的原因是当变形温度逐渐升高时, 金属材料原子间的键力减弱, 也就造成了金属原子间的结合力降低, 从而使金属的强度指标均降低, 使变形抗力降低, 有利于进行塑性变形。同时, 在较高温度条件下金属材料发生变形时, 会更容易发生回复和再结晶现象, 可减轻甚至消除由于塑性变形所产生的加工硬化, 高温变形抗力变大是因为金属材料在塑性变形时的加工硬化现象^[19]。

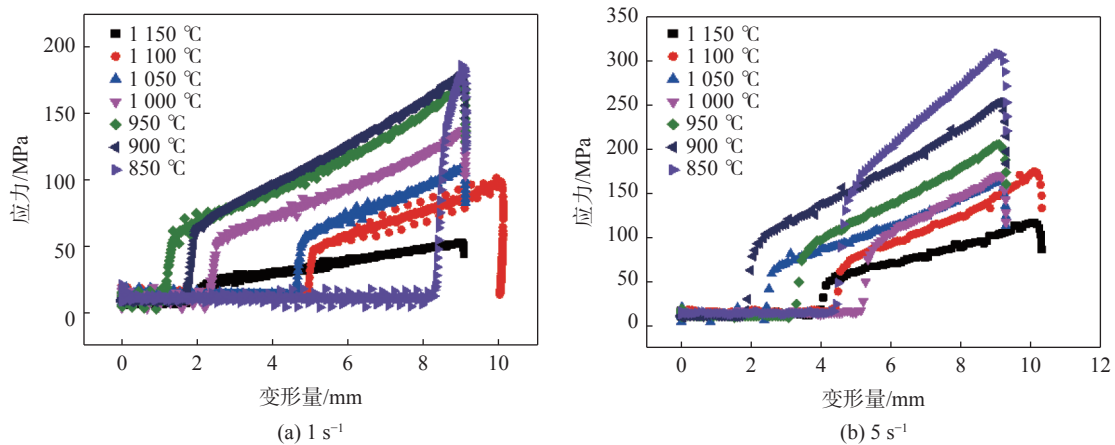


图6 1 s^{-1} 和 5 s^{-1} 应变速率下变形量对高温变形抗力的变化曲线

Fig. 6 Variation curves of high temperature deformation resistance at strain rates 1 s^{-1} and 5 s^{-1}

2.2.2 应变速率对高温变形抗力的影响

金属材料在不同的变形温度下, 应变速率也对变形抗力大小具有重要影响。图7所示为高磁

感取向硅钢在不同应变速率和不同的变形温度($850\sim 1150\text{ }^{\circ}\text{C}$)、变形量($0\sim 10\text{ mm}$)下的应力变形量曲线。

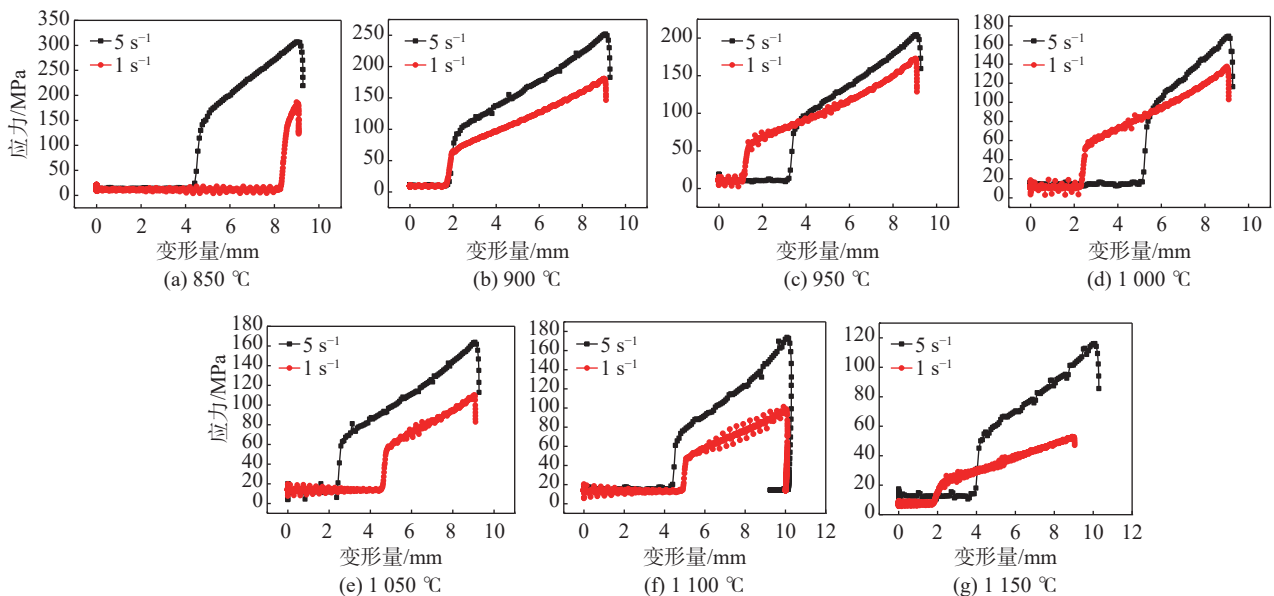


图7 不同应变速率下高温变形抗力的变化曲线

Fig. 7 Variation curves of high temperature deformation resistance at different strain rates

由图7可知,应变速率对变形抗力的影响较大,对比 1 s^{-1} 应变速率和 5 s^{-1} 应变速率时试验的变形抗力,当变形温度相同时, 5 s^{-1} 应变速率比 1 s^{-1} 应变速率试验下的变形抗力更大。这是因为当应变速率变大时,相对应的就是发生变形的过程时间减小,孕育时间与成核长大时间减小,动态再结晶与动态回复的相对减少,热变形过程中的加工硬化现象依然存在,从而使变形抗力增加。且在 $850\sim 1150\text{ }^{\circ}\text{C}$ 变形温度之间,变形抗力应力值在 $850\text{ }^{\circ}\text{C}$ 更大,其应力极值达到 310 MPa 。综合来看,形变量和应变速率一定的情况下,随温度升高,变形抗力大幅降低,所需轧制力小;形变量和温度一定的情况下,随应变速率增大,变形抗力大幅提高,所需轧制力大^[20]。

3 结论

采用Gleeble3800热模拟试验机,研究了高磁取向硅钢的高温力学性能和热加工性能,得出以

下结论:

1)高磁取向硅钢材料的热塑性相对较好,在高温拉伸试验所经 $600\sim 1250\text{ }^{\circ}\text{C}$ 温度范围内,除了 $750\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $1200\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的断面收缩率 A 低于60%,其他温度点的断面收缩率 A 均在60%以上,其中 $850\sim 1000\text{ }^{\circ}\text{C}$ 温度范围内塑性最高,均等于高于80%,即高磁取向硅钢的第Ⅰ脆性区温度为熔点约 $1200\text{ }^{\circ}\text{C}$,不存在明显的第Ⅱ脆性区,第Ⅲ脆性区温度为 $750\text{ }^{\circ}\text{C}$ 附近。

2)试样在 $750\text{ }^{\circ}\text{C}$ 断裂时的断口形貌呈现冰糖状,为典型的沿晶脆性断裂类型,此时的断口收缩率较小为53.76%,且在断口区域存在着Al、Si的氧化物夹杂,其对试样的塑性有害。

3)形变量和应变速率一定的情况下,试样随温度升高,变形抗力大幅降低,所需轧制力减小;当形变量和温度一定的情况下,试样随应变速率增大,变形抗力大幅提高,所需轧制力大。

参考文献

- [1] He Zhongzhi, Zhao Yu, Luo Haiwen. Electrical steel [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2012.
(何忠治, 赵宇, 罗海文. 电工钢[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2012.)
- [2] Duan Weiping, Yuan Hang, Li Jingshe. High temperature mechanical properties of 30CrMo fine blanking steel continuous casting slab[J]. Special Steel, 2021, 42(5): 4.
(段卫平, 袁航, 李京社, 等. 30CrMo精冲钢连铸板坯高温力学性能研究[J]. 特殊钢, 2021, 42(5): 4.)
- [3] Li Li, Du Yizhe, Wang Qinzhen, et al. Mechanical properties of Q345 steel continuous casting billet under compression at high temperature[J]. China Metallurgy, 2021, 31(4): 5.
(李丽, 杜一哲, 汪勤政, 等. Q345钢连铸坯压缩状态下的高温力学性能[J]. 中国冶金, 2021, 31(4): 5.)
- [4] Yuan Hang, Yang Shufeng, Wang Tiantian, et al. Research progress of transverse crack at corner of continuous casting slab in subperitectic microalloyed steel[J]. China Metallurgy, 2020, 30(10): 1-8.
(袁航, 杨树峰, 王田田, 等. 亚包晶微合金钢连铸板坯角部横裂纹研究进展[J]. 中国冶金, 2020, 30(10): 1-8.)
- [5] Ma Jingchao. Cause analysis of transverse crack in abnormal corner of slab[J]. China Metallurgy, 2021, 31(6): 77-81.
(马静超. 板坯非正常角部横裂纹产生原因分析[J]. 中国冶金, 2021, 31(6): 77-81.)
- [6] Lan Peng, Tang Haiyan, Ji Yuan, et al. Thermal plasticity and fracture mechanism of Fe-22Mn-0.7C TWIP steel[J]. Journal of Engineering Science, 2016, 38(6): 795-804.
(兰鹏, 唐海燕, 纪元, 等. Fe-22Mn-0.7C TWIP钢的热塑性及断裂机制[J]. 工程科学学报, 2016, 38(6): 795-804.)
- [7] Pei Yinghao, Zhang Chen, Chen Qi'an, et al. High temperature mechanical properties of oriented silicon steel[J]. Special Steel, 2010, 31(4): 3.
(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): 3.)
- [8] Hou Zewang, Zhang Chen, Xiang Li, et al. Study on thermoplasticity of common oriented silicon steel[J]. Iron Steel Vanadium Titanium, 2010, 31(4): 5.
(侯泽旺, 张晨, 项利, 等. 普通取向硅钢的热塑性研究[J]. 钢铁钒钛, 2010, 31(4): 5.)
- [9] Chi Hongxiao, Xu Huixia, Fang Feng, et al. High temperature mechanical properties of M2 high speed steel[J]. China Metallurgy, 2016, 26(1): 31-34.
(迟宏霄, 徐辉霞, 方峰, 等. M2高速钢的高温力学性能[J]. 中国冶金, 2016, 26(1): 31-34.)
- [10] Zeng Xiangqun, Liu Runzao, Zhu Rong, et al. Research on hot working properties of high nitrogen steel[J]. Industrial Heating, 2016, 45(2): 1-4, 11.
(曾祥群, 刘润藻, 朱荣, 等. 高氮钢热加工性能研究[J]. 工业加热, 2016, 45(2): 1-4, 11.)

- [11] Lin Lin. Research on hot working performance of duplex stainless steel[J]. Engineering Technology Research, 2017, (7): 89–91.
(林琳. 双相不锈钢的热加工性能研究[J]. 工程技术研究, 2017, (7): 89–91.)
- [12] Wen Sheng, Han Chao, Bao Ze, *et al.* Flow behavior characteristics and processing map of Fe-6.5%Si alloys during hot compression[J]. Metals - Open Access Metallurgy Journal, 2018, 8(3): 186.
(温胜, 韩超, 鲍泽, 等. Fe-6.5%Si合金热压缩过程研究[J]. 金属, 2018, 8(3): 186.)
- [13] Yuan Pengfei, Wu Huajie, Yue Feng, *et al.* Study on mechanical properties of Nb-Ti-V microalloyed ship plate steel at high temperature[J]. Iron Steel Vanadium Titanium, 2012, 33(1): 76–81.
(元鹏飞, 吴华杰, 岳峰, 等. Nb-Ti-V微合金化船板钢的高温力学性能研究[J]. 钢铁钒钛, 2012, 33(1): 76–81.)
- [14] Wang Jianfeng, Deng Shen, Rao Jiangping, *et al.* Study on mechanical properties of niob-titanium and niob-vanadium titanium microalloyed steel at high temperature[J]. Steelmaking, 2011, 27(1): 46–49.
(王建峰, 邓深, 饶江平, 等. 铌钛及铌钒钛微合金钢的高温力学性能研究[J]. 炼钢, 2011, 27(1): 46–49.)
- [15] Cai Kaike. Quality control of continuous casting billet [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2010.
(蔡开科. 连铸坯质量控制[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2010.)
- [16] Ai Xi, Sun Yanhui, Zeng Yanan, *et al.* Effect of low temperature brittle zone on surface transverse crack of S355 J2 steel[J]. Steelmaking, 2014, 30(3): 69–73.
(艾西, 孙彦辉, 曾亚南, 等. S355 J2钢低温脆性区对表面横裂纹的影响研究[J]. 炼钢, 2014, 30(3): 69–73.)
- [17] Kong Wei, Chen Yingfeng, Cang Daqiang. Effect of different hot rolling parameters on deformation resistance of non-oriented silicon steel[J]. Science Technology and Engineering, 2018, 18(34): 6.
(孔为, 陈迎峰, 苍大强. 不同热轧参数对无取向硅钢变形抗力的影响[J]. 科学技术与工程, 2018, 18(34): 6.)
- [18] Wang Dongchen, Ruan Shipeng, Wang Ningtao, *et al.* Effect of Si content on deformation resistance of medium carbon cold heading steel[J]. Steel Rolling, 2021, 38(4): 5.
(王冬晨, 阮士朋, 王宁涛, 等. Si含量对中碳冷镦钢变形抗力的影响[J]. 轧钢, 2021, 38(4): 5.)
- [19] Ma Menghan, Huang Ting, Shen Yongfeng. Effect of rolling process on microstructure and mechanical properties of D6A steel[J]. Materials Science and Technology, 2021, 29(1): 7.
(马梦晗, 黄婷, 申勇峰. 轧制工艺对D6A钢微观组织和力学性能的影响[J]. 材料科学与工艺, 2021, 29(1): 7.)
- [20] Zhang Wendong. Simulation of temperature field and rolling force of H-beam hot rolling [D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2010.
(张文东. H型钢热轧温度场及轧制力模拟[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2010.)

编辑 唐肖

国内首个超长钛合金连续油管制造基地落户中山

2023年8月1日, 广东福维德焊接股份有限公司(以下简称福维德)投资的钛合金连续油管及钛合金相关产业化智能制造基地项目签约仪式在广东省中山火炬高技术产业开发区举行。该项目投资总额5亿元, 预计达产后年产值达8.3亿元, 综合新增税收1.1亿元。

据悉, 福维德将在广东省中山市建成国内首个超长钛合金连续油管生产制造基地, 同时, 成立钛合金连续油管研究院, 并组建国内强制性标准认证实验室。该项目有望填补国内钛合金材料及其带材制备工艺技术、钛合金连续油管制造工艺技术及配套专用装备的空白, 为我国在苛刻环境下油气资源的开采、集运提供有力的材料及装备支撑, 具有重大战略意义和深远的发展前景。

摘自 <https://www.cnmn.com.cn/ShowNews1.aspx?id=446192>