

SAE8640 合金钢 280 mm × 325 mm 连铸坯的高温力学性能

王宁涛^{1,2} 阮士朋^{1,2} 段路昭^{1,2} 王利军^{1,2}

(1 河北省线材工程技术研究中心, 邢台 054027; 2 邢台钢铁有限责任公司, 邢台 054027)

摘 要 采用 Gleeble 1500 热模拟试验机对 SAE8640 钢 280 mm × 325 mm 连铸坯(成分: 0.41C, 0.20Si, 0.80Mn, 0.005S, 0.014P, 0.46Cr, 0.43Ni, 0.21Mo, 0.043Al, 0.0011O, 0.0054N) 的 550 ~ 1 200 °C 力学性能进行了测定, 并应用扫描电镜观察了拉力试样的断口形貌。结果表明, SAE8640 钢有明显的 3 个脆性区: I 脆性区 > 1 200 °C, II 脆性区 950 ~ 1 000 °C, III 脆性区 650 ~ 750 °C; 该钢 950 ~ 1 000 °C 的断面收缩率为 60%, 拉伸断口为脆性河流状花样, 应避免在该温度范围进行轧制, 该钢 650 ~ 750 °C 的断面收缩率 ≥ 65%, 拉伸断口为韧性断裂, 可满足连铸坯矫直时塑性的要求。

关键词 SAE8640 合金钢 280 mm × 325 mm 连铸坯 高温 断面收缩率 脆性区 断口

High Temperature Mechanical Properties of 280 mm × 325 mm Casting Bloom of Alloy Steel SAE8640

Wang Ningtao^{1,2}, Ruan Shipeng^{1,2}, Duan Luzhao^{1,2} and Wang Lijun^{1,2}

(1 Hebei Engineering Research Center for Wire Rod, Xingtai 054027; 2 Xingtai Iron and Steel Co Ltd, Xingtai 054027)

Abstract The mechanical properties of steel SAE8640 280 mm × 325 mm casting bloom (成分: 0.41C, 0.20Si, 0.80Mn, 0.005S, 0.014P, 0.46Cr, 0.43Ni, 0.21Mo, 0.043Al, 0.0011O, 0.0054N) at 550 ~ 1 200 °C has been measured by using Gleeble 1500 thermal simulation machine, and the morphology of fracture of tensile specimen is observed by scanning electron microscope. Results show that the steel SAE8640 has obvious 3- brittle zone: I brittle zone > 1 200 °C, II brittle zone 950 ~ 1 000 °C and III brittle zone 650 ~ 750 °C; the reduction of area of steel at 950 ~ 1 000 °C is 60% and the morphology of tensile fracture is mainly river pattern type fracture, it should be avoid rolling at this temperature range; and the reduction of area of steel at 650 ~ 750 °C is ≥ 65%, the tensile fracture is tough fracture to meet the requirement on plasticity of casting bloom in straightening process.

Material Index Alloy Steel SAE8640, 280 mm × 325 mm Casting Bloom, High Temperature, Reduction of Area, Brittle Zone, Fracture

SAE8640 钢种是一种含 Ni 钢, 钢种成分(%) 为: 0.38 ~ 0.43C, 0.15 ~ 0.35Si, 0.75 ~ 1.00Mn, 0.40 ~ 0.70Ni, 0.40 ~ 0.60Cr, 0.15 ~ 0.25Mo。国内相关的钢种为 40CrNiMo, 但成分与 SAE8640 有差异, 前者合金含量更高, 在国内使用较为广泛, 后者主要是出口使用。

SAE8640 属于合金结构钢, SAE8640 热轧盘条可以用来生产冷成型螺栓或紧固件产品。一般冷镦钢中含 Ni 钢较少, Ni 含量的加入主要是增加钢种的综合力学性能。与 SAE8640 相近的钢种如 SCM440 是国内使用较为广泛的冷镦钢。两者相比, SCM440 钢的 Cr 含量较高为 0.90% ~ 1.20%, 但无 Ni 元素, 总体合金含量相当。生产中发现 SAE8640 钢塑性和韧性均好于 SCM440 钢, 且热轧盘条的强度小于 SCM440 钢, 减少了热轧盘条的脆断风险。热轧盘条的强度降低对后续客户的拉拔生产有明显的益处。由于 SAE8640 钢中的 Ni 元素仅

以固溶形式存在, 不形成碳化物, 所以降低了热轧盘条中的碳化物数量, 改善了热轧盘条强度过高的问题。

SAE8640 钢种为国内较少生产的钢种, 没有现成的经验, 为了避免在连铸和热轧过程中出现生产问题, 本文对 SAE8640 钢种的高温力学性能进行了研究。

1 试验方法

高温力学性能一般在 Gleeble 试验机上进行。目前测量钢的热塑性有多种方法, 文献上常用的是加热法和凝固法^[1], 又以凝固法使用的较多。按照变形的形式, 又分为拉伸和压缩两种, 其中拉伸所得的数据更多, 应用也更广^[2]。加热法是直接将试样均温区加热到固相线以下规定的拉伸温度。凝固法是先均温区加热到熔化状态, 保温 60 s 后冷却到固相线以下规定的拉伸温度再保温。凝固法是模拟连铸冷却时的高温力学性能, 加热法只在简单

加热到某一温度,非模拟任何工艺。

本试验采用模拟轧制的方法,与凝固法和加热法均不同。试验材料取自大方坯试样,大方坯断面尺寸为 280 mm × 325 mm,经过转炉 + LF + RH + CC 工艺生产。试样长度方向按照平行于钢坯的长度方向进行取样,取样位置在皮下 40 mm 以下位置处,避免表皮的影响。经锯床切割后加工成 $\Phi 10$ mm × 120 mm,两端带有螺纹的试样。试验材料的化学成分见表 1。

具体试验方案如图 1 所示,以 10 °C/s 的速度将试样加热至 1 100 °C,保温 5 min,然后以 3 °C/s 的速率降温或升温到不同温度下保温 3 min,以 0.01 s⁻¹ 应变速率加载拉伸。最后测定每个工艺试样的断面收缩率和抗拉强度,共做了 14 个温度。

2 结果分析

研究表明,在钢的熔点附近至 600 °C 温度区间,存在 3 个明显的脆性温度区域^[3,4]。熔点到 1 200 °C 为第 I 脆性区;1 200 ~ 900 °C 为第 II 脆性区;900 ~ 600 °C 为第 III 脆性区。

第 I 脆性区断裂主要沿树枝晶间的界面展开。当钢中 B、O、S、P 等微量元素或杂质含量增多时,凝固树枝晶之间液膜凝固点降低,会使脆性区间降低。

第 II 脆性区(1 200 ~ 900 °C)的脆化机理为:在这一温度下进行拉伸测试时,高温奥氏体固溶的 O、S 等元素以 (Fe, Mn)O、(Fe, Mn)S 等形式在奥氏体晶界沉淀。沉淀物沿晶界长大,降低了晶界强度,在应力作用下容易在晶界产生裂纹,裂纹沿晶界扩展、长大,造成沿晶断裂。奥氏体晶界上的析出物越多、越细小,钢的脆化越严重。第 II 脆性区域只在应变速率大于 10⁻²/s 时才易出现。

第 III 脆性区(900 ~ 600 °C)主要在比较低的应变速率(< 10⁻²/s)下出现,而连铸过程中,板坯弯曲、矫直以及鼓肚变形等的应变速率为(10⁻³ ~ 10⁻⁴)/s,所以连铸弯曲、矫直过程中产生的铸坯裂纹与第 III 脆性区的脆化有着密切的关系。第 III 脆性区域的脆化可进一步分为 γ 单相区低温域(800 ~ 900 °C)的脆化和 ($\alpha + \gamma$) 两相区高温域(700 ~ 800 °C)的脆化。

SAE8640 钢的热塑性曲线见图 2,也明显分为 3 段,1 200 °C 以上,断面收缩率较低,对应于第 I 脆性区。950 °C 和 1 000 °C 时断面收缩率降低,对应于第 II 脆性区。700 °C 断面收缩率再次出现低谷,对应

表 1 SAE8640 合金钢 280 mm × 325 mm 连铸坯的化学成分/%
Table 1 Chemical composition of 280 mm × 325 mm casting bloom of alloy steel SAE8640 / %

C	Si	Mn	S	P	Cr	Ni	Mo	Alt	O	N
0.41	0.20	0.80	0.005	0.014	0.46	0.43	0.21	0.043	0.001 1	0.005 4

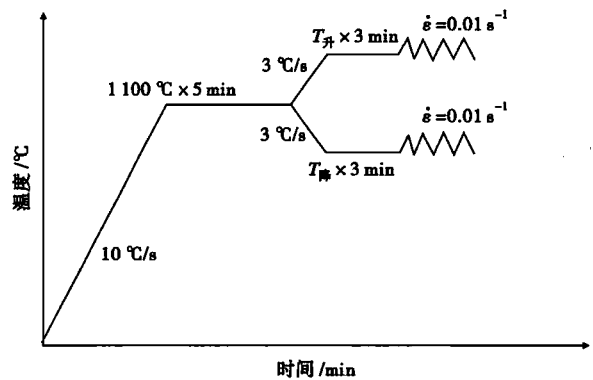


图 1 SAE8640 钢铸坯拉伸实验的温度与变形制度
Fig. 1 Tensile tested temperature and deforming scheme of casting bloom of steel SAE8640

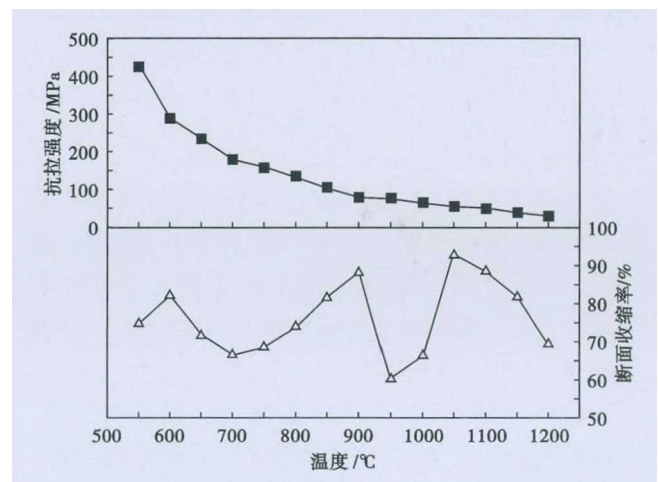


图 2 SAE8640 钢连铸坯的高温力学性能
Fig. 2 High temperature mechanical properties of casting bloom of steel SAE8640

第 III 脆性区。虽然 SAE8640 钢也分为 3 段,但是这 3 段与传统意义上的脆性区又有所区别,传统意义上的脆性区为断面收缩率 < 60%, SAE8640 整体的断面收缩率均较高,即使最低的断面收缩率也在 60% 以上。这种整体的断面收缩率较高也可能与试验方法有关。

SAE8640 钢第 II 脆性区比较明显,断面收缩率还在第 I 脆性区和第 III 脆性区以下,相比相邻区域,断面收缩率也有特别明显的降低。根据文献显示第 II 脆性区只有在应变速率大于 10⁻²/s 时才比较明显,而本实验的应变速率正好处于临界点 10⁻²/s,

可以预测,如果应变速率增大,可能断面收缩率还会继续降低。

因为本试验为模拟轧钢过程的高温力学性能,在轧钢过程中,有可能出现应变速率大于 $10^{-2}/s$ 的情况,所以需要考虑第 II 脆性区的情况。SAE8640 钢在 950 °C 和 1 000 °C 轧制时存在塑性不良的情况。从其断口扫描电镜图片(图 3)上看,950 °C 和 1 000 °C 已经不再出现韧窝,而以脆性的河流状花样为主。如前所述,该温度段的脆性主要是以析出物在晶界析出导致再结晶受到影响所致。本次所采用的大方坯成分中,氧含量较低,N、S 含量均为 50×10^{-6} 左

右,其中 AlN 容易在 1 000 °C 左右析出,形成微小的颗粒分散在晶界上,对晶界强度造成影响。按照唐广波等人^[5]在文章中引用的 AlN 析出公式,如下式所示:

$$\lg([\text{Al}][\text{N}])_{\gamma} = 1.79 - 7184/T$$

计算得出在 Al 含量 0.043% 和 N 含量 0.005 4% 下的 AlN 开始析出温度为 1 050 °C,而在 950 °C 和 1 000 °C 正好已经大量的析出。所以 AlN 的析出导致在该温度段晶界较弱,断口呈现脆性。

1 200 °C 时出现脆性,但一般轧制变形温度不会

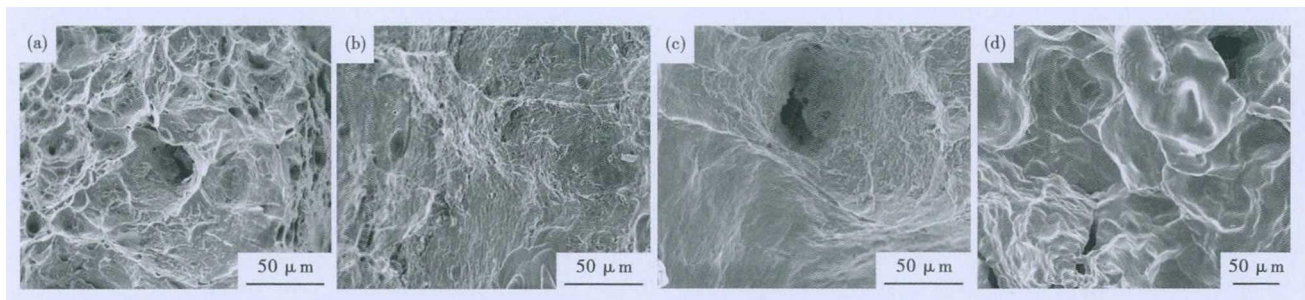


图 3 SAE8640 钢铸坯 700 °C (a), 950 °C (b), 1 000 °C (c) 和 1 200 °C (d) 高温拉伸实验试样断口形貌, SEM

Fig. 3 Morphology of high temperature tensile specimen fracture of casting bloom of steel SAE8640 at 700 °C (a), 950 °C (b), 1 000 °C (c) and 1 200 °C (d), SEM

达到如此高温,所以 1 200 °C 出现的脆性对于变形影响较小。700 °C 对应连铸坯矫直段温度附近,而 700 °C 时断口仍然保持韧窝形貌,说明此时韧性仍然较好,所以该钢种在连铸坯矫直时塑性可以满足要求。

950 ~ 1 000 °C 正好在大多数的轧制温度区间,在该区间进行变形时,由于塑性不好,导致变形能力欠佳而造成表面缺陷。虽然 950 °C 时断面收缩率在 60% 以上,但相对其他温度而言,仍然较低,且断口呈现脆性特征。在轧制和压延温度选择时应该尽量避免这一温度区间。

3 结论

(1) SAE8640 钢存在 3 个脆性区,在 550 ~ 1 200 °C,断面收缩率均在 60% 以上。

(2) SAE8640 钢在 950 ~ 1 000 °C 附近有断面收缩率降低的趋势,在轧制和高温压延过程中,变形温度尽量避开 950 ~ 1 000 °C 区域。

(3) SAE8640 钢在 650 ~ 750 °C 的断面收缩率

大于 65%,且断口呈塑性断口,其连铸坯能够满足矫直时的塑性要求。

参考文献

- [1] 邸洪双. 低碳钢的高温力学性能[J]. 东北大学学报, 2004, 25(1): 40-43.
- [2] 张永军, 韩静涛. SCM435 钢连铸坯高温热塑性研究[J]. 炼钢, 2010, 26(4): 50-54.
- [3] 张晨, 岳尔斌, 仇圣桃. 钢的高温力学性能及其影响因素分析[J]. 连铸, 2008(6): 6-9.
- [4] 常桂华, 曹亚丹. 连铸坯的高温力学性能分析[J]. 鞍钢技术, 2007, 6: 25-29.
- [5] 唐广波. 复合微合金化高强度低合金钢奥氏体相中碳氮化物析出热力学数值模拟[J]. 金属热处理, 2008, 33(8): 67-70.

王宁涛(1987-),男,硕士(2012年钢铁研究总院),工程师,2009年沈阳理工大学(本科)毕业,线材新产品开发和表面质量研究。E-mail: ddwangtao87@126.com

收稿日期: 2017-08-15