

GCr15 轴承钢高温力学性能的研究

朱立光 路文刚

(河北理工大学冶金与能源学院,唐山 063009)

摘要 用 Gleeble-3500 热模拟试验机测试了 GCr15 (0.98% C, 1.51% Cr) 轴承钢连铸坯的高温力学性能, 得出 GCr15 钢的零塑性温度为 1 400 °C, 零强度温度为 1 450 °C, 良好塑性区为 1 250 ~ 950 °C, 第Ⅲ脆性区为 950 ~ 600 °C, 并用扫描电镜分析了塑性区与脆性区的断口形貌。研究表明, GCr15 钢连铸坯的矫直温度应控制 ≥ 950 °C。

关键词 GCr15 轴承钢 连铸坯 高温力学性能

A Study on High Temperature Mechanical Properties of GCr15 Bearing Steel

Zhu Liguang and Lu Wengang

(College of metallurgy and Energy, Hebei Polytechnic University, Tangshan 063009)

Abstract High temperature mechanical properties of cast billet of GCr15 bearing steel (0.98% C, 1.51% Cr) have been tested by using Gleeble-3500 thermal simulation test machine to get that zero plastic temperature (ZDT) of GCr15 steel - 1 400 °C, zero strength temperature - 1 450 °C, optimum plastic temperature range - 1 250 ~ 950 °C and III brittle temperature range - 950 ~ 600 °C. The fracture morphology of billet at plastic temperature range and brittle temperature range was analyzed by SEM. The study results show that the straightening temperature of cast billet should be controlled ≥ 950 °C.

Material Index GCr15 Bearing Steel, Cast Billet, High Temperature Mechanical Property

钢的高温力学性能试验所用的试样直接取于铸坯,其晶粒度大小和柱状晶组织应与连铸坯相一致。因此,实验室的热塑性试验能较好地模拟连铸矫直过程。已有的研究和试验证明^[1,2],热塑性试验所得结果对预测连铸条件下横裂纹的发生是很有意义的。

1 试验方法

沿拉坯方向取 300 mm 长的钢墩,取样位置要具有代表性,所取轴承钢试样的化学成分如表 1。

表 1 GCr15 轴承钢的化学成分/%

Table 1 Chemical composition of GCr15 bearing steel /%

C	Si	Mn	Cr	P	S
0.98	0.26	0.38	1.51	0.015	0.020

加工后的最终试样总长 120 mm,两端有 15 mm 部分螺纹,试样尺寸 $\Phi 10$ mm \times 120 mm,如图 1。

测试步骤如下:

(1) 对熔点 T_s 至 600 °C 范围内的 3 个温度区进行测试。测试温度为:600 ~ 1 300 °C。

(2) 为了模拟连铸过程,采用加热工艺^[3]为:先

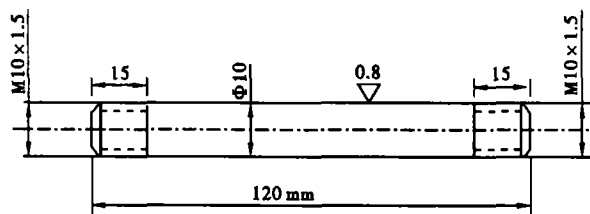


图 1 GCr15 轴承钢高温机械性能试样的尺寸

Fig. 1 Size of specimen of GCr15 bearing steel for high temperature mechanical properties test

将试样按 10 °C/s 的加热速度加热至熔化状态,并保温 1 min。在加热过程中,当温度接近熔点时,采用较缓慢的升温速度,并施加很小的压缩应力以防止出现孔洞。自熔点降至试验温度的冷却速度为 3 °C/s,拉伸前在试验温度下保持 1 min。

(3) 将试样均温区的长度取为 10 mm,试验采用位移控制,以计算平均拉伸应变速率。根据连铸生产实际,热塑性试验中选取的应变速率为 10^{-3} /s。

(4) 将一对 Pt-Pt10% Rh 的热电偶分别单根点焊在试样表面。Gleeble-3500 试验机采用电阻加热法,试样芯部温度与表面温度差别不大^[4]。

(5) 试验在氩气保护中进行,试样被拉断后,立即对断口附近区域大量喷水冷却,以使断口保持原

貌,并进行超声波清洗,用电镜观察断口形貌。

2 试验结果和分析

2.1 高温力学性能

GCr15 钢不同温度下试样断面收缩率 RA 与抗拉强度 σ_b 变化曲线如图 2 所示。

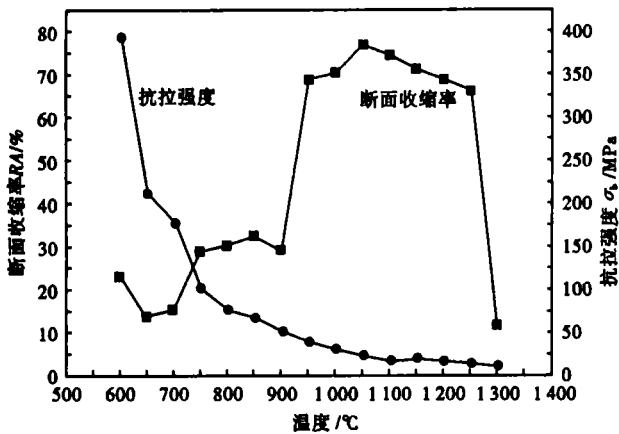


图 2 温度对 GCr15 轴承钢断面收缩率与抗拉强度的影响
Fig.2 Effect of temperature on reduction of area and tensile strength of GCr15 bearing steel

由图 2 可见, GCr15 钢的断面收缩率 RA 在 950 ~ 600 °C 范围内出现一个低谷,当温度由 950 °C 降到 900 °C 时,试样的 RA 值迅速下降,由 68.94% 降到 29.14%,随后 RA 值又有所回升。以 RA 低于 60% 作为脆性的判断依据,试验所用钢 GCr15 的第三脆性区为 950 ~ 600 °C。在 1150 ~ 950 °C 范围试样的 RA 值都在 60% 以上,具有良好的塑性。达到 1250 °C 以上,塑性又迅速下降,至 1400 °C 左右,RA 几乎为 0,因此 GCr15 钢的零塑性温度(ZDT)应为 1400 °C。本试验在 $\epsilon = 1 \times 10^{-3}$ /s 的情况下进行,因应变速率较低,没有出现第二脆性区。

GCr15 钢极限强度随着温度的升高,在 600 ~

850 °C 区间,强度从 391.05 MPa 迅速下降至 66.09 MPa。在 850 ~ 1300 °C 之间,强度降低缓慢;该钢零塑性温度(ZDT)仍具有一定的强度,温度继续升高至 1450 °C,抗拉强度降低为 0,即零强度温度(ZST)。

2.2 GCr15 钢断口形貌

GCr15 钢在 1250 ~ 950 °C 之间具有良好的塑性,其断面收缩率均在 60% 以上。由图 3(b)可见,950 °C 时,试样断裂部位存在着大小不同的孔洞,且边缘有很大的塑性变形,此时试样为穿晶延性断裂。由图 3(a)可以看出在 1250 °C 时,晶粒边界处由于过熔而导致的深沟,由于过熔使得断口部分区域失去了孔洞形貌特征。

在本试验条件下,GCr15 钢的第三脆性区温度区间为 950 ~ 600 °C。尤其在 750 °C 以下其断面收缩率低于 30%。由图 4 可以看到 750 °C 时,试样断口呈“冰糖”状,周围塑性变形不明显,此时试样为沿晶断裂。

3 断裂机理分析

3.1 第一脆性温度区断裂机理

GCr15 钢的第一脆性温度区为:熔点 $T_s \sim 1250$ °C。硫、磷、氧等杂质元素偏析引起树枝晶间存在低熔点液相膜,当温度升到足够高时,部分晶界开始熔化,在拉应力的作用下,沿晶界开裂并直至拉断。

3.2 第三脆性温度区断裂机理

第三脆性温度区的脆性主要有两个原因,即奥氏体单相区低温域的脆化和奥氏体-铁素体转变区高温域的脆化。前者由钢中质点 AlN 、 TiN 、 $NbCN$ 等的析出引起^[5],后者为两相区脆化,在 $\gamma \rightarrow \alpha$ 转变时优先在奥氏体晶界处析出薄膜状的 α 铁素体, α 铁素体较软,其强度仅为奥氏体的 1/4,因此在外力作

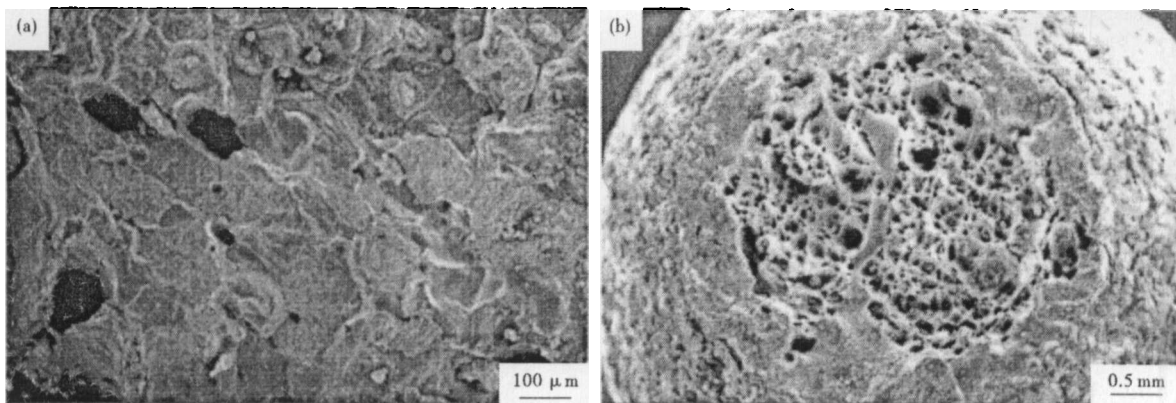


图 3 GCr15 钢铸坯在良好塑性温度区断口形貌,SEM:(a) 1250 °C;(b) 950 °C
Fig.3 Fracture morphology of cast billet of GCr15 bearing steel at optimum plastic temperature range,SEM:(a) 1250 °C;(b) 950 °C

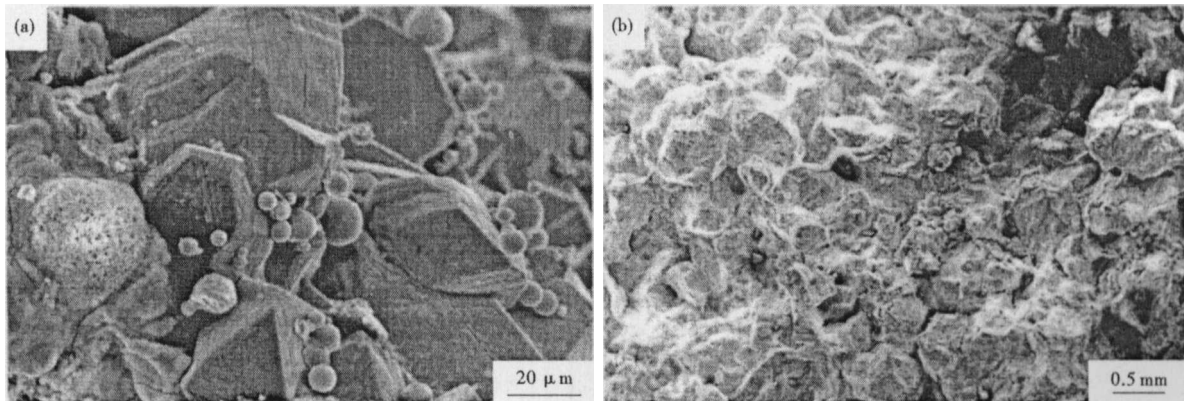


图4 GCr15 钢铸坯在脆性温度区断口形貌,SEM:(a) 750 °C;(b) 600 °C

Fig.4 Fracture morphology of cast billet of GCr15 bearing steel at brittle temperature range,SEM:(a) 750 °C;(b) 600 °C

用下,变形主要集中在沿奥氏体晶界分布的 α 铁素体中,使 α 相中存在的微小孔洞和裂纹聚合、长大,最后导致晶界断裂。

在第Ⅲ脆性温度区范围内,试样的拉伸断口呈沿晶与穿晶的混合断裂模式。在此温度区间,晶界只具有一定的迁移能力,沿晶界析出的析出物能钉扎晶界,阻碍了晶界的迁移。析出物沿晶界析出,同时晶内也有少量析出物,这些细小的粒子在部分晶界析出,钉扎了晶界,阻碍了晶界的迁移,使得裂纹沿晶界扩展,最终导致沿晶断裂。所以在此温度区间,部分晶界具有较高的迁移能力,而部分被析出物钉扎的晶界迁移能力降低,导致了穿晶与沿晶的混合断裂方式。

3.3 良好塑性区断裂机理

1 250 ~ 950 °C 的温度范围已进入奥氏体单相区的高温区域,并动态再结晶。动态再结晶使晶界在高温高应变下获得足够的驱动力而发生迁移,此时晶界迁移的速度超过了晶界滑移的速度,使已形成的微裂纹被包围在晶粒中,阻止了裂纹的扩展,致使这些裂纹的聚集和长大不能在晶界上产生,因此具有良好的热塑性。晶界迁移能阻断晶界的裂纹,但這些裂纹对晶界也产生拖拽力,而“捕获”正在迁移的晶界。如果捕获频率或裂纹拖拽力大,即使在变形初期原奥氏体晶界面从发生的裂纹处移开,最终仍会发生晶间断裂。

3.4 连铸与高温力学性能的关系

文献[6]指出,钢中碳含量对内裂有显著影响,随碳含量增加,内裂纹敏感性增大。同时碳含量增加,导热性也变差。选择合理的二冷制度使铸坯在弯曲或矫直时的表面温度避开第Ⅲ脆性温度区域是防止横裂的主要措施之一。在连铸生产中,降低二

次冷却区的冷却强度,即采用弱冷却可以减轻和防止裂纹的产生,在钢的高温性能试验中,也得出了同样的结果。GCr15 属碳含量较高的钢种,因此,连铸二冷配水采用弱冷,拉速也相应降低一个档次。

4 结论

(1) GCr15 连铸坯良好塑性区温度范围为1 250 ~ 950 °C;没有出现第Ⅱ脆性区,第Ⅲ脆性区温度范围为950 ~ 600 °C。

(2) 铸坯矫直温度应避开低温脆性区,GCr15 钢的矫直温度应控制在950 °C以上。

(3) 降低二冷区的冷却强度,采用弱冷;并适当降低拉速,以减轻和防止裂纹的产生。

河北省科学技术研究与发展计划基金资助项目(编号:02212221D-2)

参考文献

- Mintz B, Jonas J. Influence of Manganese and Sulfur on Hot Ductility of Steels Heated Directly to Temperature. *Metallurgical Materials Science and Technology*, 1994, 10(10): 721
- Essadiqi E, Jonas J. Effect of Deformation on Ferrite Nucleation and Growth in A Plain Carbon and Two Microalloyed Steels. *Mater. Trans.*, 1985, 19A: 417
- 姚利丽. 鞍钢连铸板坯二冷配水软件的研究:[硕士学位论文]. 北京:北京科技大学, 2003
- Chen Wayne, Gleeble Systems, Application. *Gleeble Systems Training School*. N. Y., USA: 1998
- Mintz B, Yue S, Jonas J. Hot Ductility of Steels and its Relationship to the Problem of Transverse Cracking during. *International Materials Reviews*, 1991, 36(5): 187
- 袁伟霞,董汉雄,袁桂莲. 中碳钢高温力学性能研究及在连铸生产中的应用. *炼钢*, 1999, 15(1): 28

朱立光(1965-),男,教授,副校长,北京科技大学毕业,炼钢、二次精炼和连铸研究。

收稿日期:2007-02-25