

## 氮对 Mn18Cr18N 护环钢高温力学性能的影响

陈慧琴

(北京航空材料研究院,北京 100095)

刘建生 郭会光

(太原科技大学,太原 030024)

**摘要** 护环是汽轮发电机的重要部件。用 Gleeble-1500 热模拟试验机研究了成分(%)为:(1) 0.53C-16.98Mn-3.17Cr, (2) 0.12C-19.57Mn-19.27Cr-0.60N 和 (3) 0.06C-18.58Mn-19.15Cr-0.69N 3 种护环钢在 800 ~ 1 200 °C 的高温变形应力-应变曲线以及含 N 护环钢的高温塑性-断面收缩率。结果表明,随钢中氮含量的增加,动态再结晶需要的临界变形量越大,相应的变形抗力逐渐增大;含 N 钢在 1 050 °C 塑性最大,高温塑性随钢中氮含量的增加而减小,因此改善变形方式以提高工艺塑性是防止热裂,提高护环质量的有效途径。

**关键词** 氮 Mn18Cr18N 护环钢 高温力学性能

## Effect of Nitrogen on Mechanical Properties of Retaining Ring Steel Mn18Cr18N at High Temperature

Chen Huiqin

(Beijing Research Institute of Aeronautical Materials, Beijing 100095)

Liu Jiansheng and Guo Huiguang

(Taiyuan University of Science and Technology, Taiyuan 030024)

**Abstract** The retaining ring is an important component of turbogenerator. The high deformation stress-strain curves of three kind of retaining ring steel-0.53C-16.98Mn-3.17Cr(1), 0.12C-19.57Mn-19.27Cr-0.60N(2) and 0.06C-18.58Mn-19.15Cr-0.69N(3) and the high temperature plasticity- reduction of area of containing nitrogen retaining ring steel at temperature 800 ~ 1 200 °C have been studied by Gleeble-1500 thermal simulation machine. The results showed that with increasing nitrogen content in steel, the critical deformation value for dynamic recrystallization increased in order to gradually increase corresponding deformation force; the maximum reduction of area of containing nitrogen steel was at 1 050 °C, and the high plastic deformation region shrunk with increasing nitrogen content in steel. Therefore modifying deformation model to increase process plasticity is an available way to increase the quality of retaining ring.

**Material Index** Nitrogen, Mn18Cr18N Steel for Retaining Ring, Mechanical Properties at High Temperature

护环是汽轮发电机组中承受应力最高的部件,因此要求有足够高的强度、良好的塑韧性、均匀的组织性能和最小的残余应力。护环在强磁场和腐蚀介质中运转,所以通常采用高强度奥氏体无磁钢锻制,并要求有较高的抗应力腐蚀能力。20 世纪 80 年代前,护环多用 50Mn18Cr4 系列钢制造,这种钢无论其强度、塑性等力学性能,还是其导磁、金相等物理性能,可以满足设计使用要求。但是经过几十年的运行实践表明,50Mn18Cr4 系列钢的抗应力腐蚀能力较差。

20 世纪 70 年代后期开发了 Mn18Cr18N 护环钢,该钢强度、导磁率可满足要求,其塑性、韧性优于 50Mn18Cr4 钢外,还极大地提高了抗应力腐蚀能力。

目前,国外都采用 Mn18Cr18N 钢制造大容量机组的护环锻件<sup>[1-5]</sup>。国内 20 世纪 80 年代中后

期引进 Mn18Cr18N 护环钢,并组织科研院校合作对 Mn18Cr18N 护环钢的冶炼、电渣重熔及锻造工艺等进行了研究。

通过研究 Mn18Cr18N 护环钢控制锻造和控制冷却机理,提出的护环扩挤复合热锻新技术,为合理控制成形过程中的热力参数实现控制锻造提供了一条有效途径<sup>[6-11]</sup>。

为了提高制造 Mn18Cr18N 护环的强度等级,中国二重在对影响 Mn18Cr18N 钢中氮含量的因素进行分析研究和实验的基础上,冶炼出了氮含量达 0.69% 的 Mn18Cr18N 钢<sup>[12]</sup>。高氮护环钢的成功冶炼,提高了护环钢的强度,但也带来热锻开裂倾向更加严重、成形力大等问题。为此,促进了护环扩挤复合热锻新技术的应用,该技术通过改变变形方式,可以有效地防止热锻开裂,改善工艺塑性,实现控制锻造。并针对氮含量达 0.69% 的

Mn18Cr18N 护环钢的高温力学性能,经过对该工艺进行工程化改进,成功地进行了 50MW 护环的生产试验。

### 1 护环钢高温变形行为

图 1 为采用 Gleeble-1500 热模拟试验机,通过高温压缩试验获得的铸态 50Mn18Cr4(护环钢 1)

和含氮量为 0.6% (护环钢 2)、0.69% 锻态 Mn18Cr18N(护环钢 3)3 种钢的高温变形应力应变曲线。试样尺寸相同( $\Phi 8 \text{ mm} \times 12 \text{ mm}$ ),试验温度 1 200~900  $^{\circ}\text{C}$ ,应变速率 0.05  $\text{s}^{-1}$ ,3 种材料的化学成分见表 1。护环钢 1、2 采用分段压缩变形方式,护环钢 3 采用连续压缩变形方式。

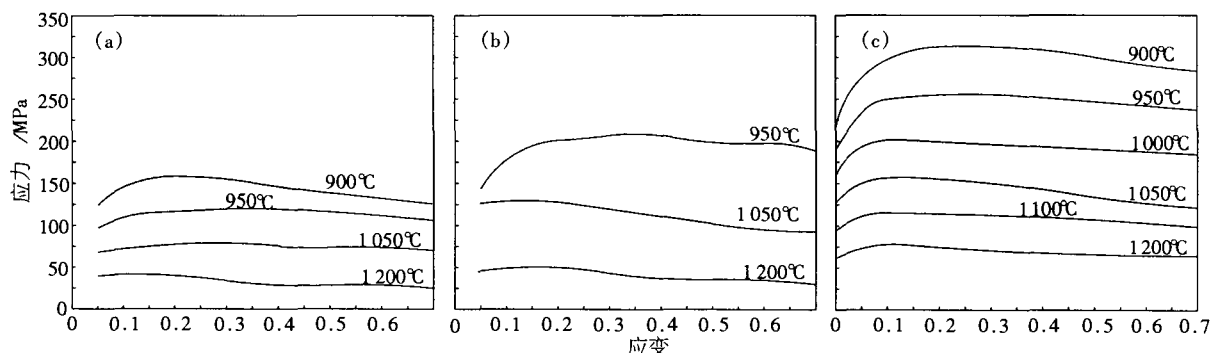


图 1 1:0.53C-16.98Mn-3.17Cr (a); 2: 0.12C-19.57Mn-19.27Cr-0.60N (b); 3: 0.06C-18.58Mn-19.15Cr-0.69N (c) 的高温变形应力应变曲线

Fig.1 Stress-strain curves of retaining ring steel 1: 0.53C-16.98Mn-3.17Cr (a), 2: 0.12C-19.57Mn-19.27Cr-0.60N (b) and 3: 0.06C-18.58Mn-19.15Cr-0.69N (c) at high temperature

表 1 3 种试验护环钢的化学成分/%

Table 1 Chemical compositions of three kind of test steels /%

护环钢	C	Mn	Cr	N	Si	S	P
1	0.53	16.98	3.17	-	0.56	0.004	0.20
2	0.12	19.57	19.27	0.60	0.44	0.005	0.024
3	0.06	18.58	19.15	0.69	0.37	0.004	0.16

由图 1 可知,3 种护环钢在高温变形时具有动态再结晶型流变曲线,即变形初期,随着变形,应力不断增大,达到峰值应力后,由于动态再结晶的进行,出现了不同程度的软化,应力下降,并逐渐达到稳态阶段。

经分析试验数据得出:护环钢 1 的动态再结晶激活能  $Q = 315.71 \text{ kJ/mol}$ ,硬化指数  $n = 5.39$ ;护环钢 2 的激活能  $Q = 344.12 \text{ kJ/mol}$ ,硬化指数  $n = 5.17^{[8]}$ ;护环钢 3 的激活能  $Q = 592.72 \text{ kJ/mol}$ ,硬化指数  $n = 9.11^{[13]}$ ;试验数据表明,50Mn18Cr4 钢的动态再结晶激活能比 Mn18Cr18N 钢的小。Mn18Cr18N 钢的动态再结晶激活能随着氮含量的增加而增大。也就是说,随着氮含量的增加,发生动态再结晶需要的能量越大,即动态再结晶需要的临界变形量越大,并且相应的变形抗力也逐渐增大。

### 2 护环钢高温塑性

护环钢的高温塑性直接影响护环热锻开裂的倾向性。文献[10]采用高温压缩试验,然后用显微镜观察裂纹萌生情况,并将萌生第 1 条微观裂纹作为塑性极限,研究了护环钢 2 的高温塑性。指出试样在不同温度下热压变形,产生的显微裂纹主要为沿晶破裂。产生微观破裂的极限变形值为:900  $^{\circ}\text{C}$ -38%、950  $^{\circ}\text{C}$ -46%、1 050  $^{\circ}\text{C}$ -53%、1 100  $^{\circ}\text{C}$ -40%。

本文采用高温拉伸试验研究了护环钢 3 的高温塑性,试验结果如图 2 所示。其极限变形值大约为:900  $^{\circ}\text{C}$ -26%、950  $^{\circ}\text{C}$ -35%、1 050  $^{\circ}\text{C}$ -72%、1 100  $^{\circ}\text{C}$ -68%。比较两种钢的高温塑性值可知,两种钢在 1 050  $^{\circ}\text{C}$  塑性最高。两种钢高温塑性的趋势是随着温度的升高,塑性值增大,到某一温度(约 1 050  $^{\circ}\text{C}$ )达到最大值,然后又随着温度的增加而降低。分析其原因,在 1 050  $^{\circ}\text{C}$  左右,钢中碳化物充分固溶,且温度越高越易进行动态再结晶,从而塑性较高。温度超过 1 050  $^{\circ}\text{C}$ ,继续升高温度,将出现过热、过烧现象,因而降低了塑性。在 1 050  $^{\circ}\text{C}$  到 900  $^{\circ}\text{C}$  之间,护环钢 3 高温塑性的下降趋势比护环钢 2 大,也即其高塑性温度区间随着

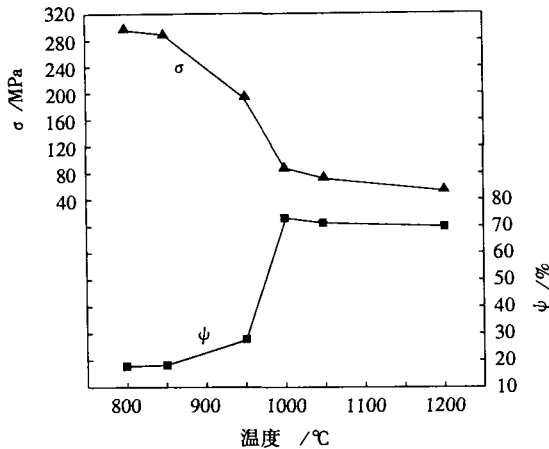


图 2 护环钢 3 高温拉伸时的塑性和强度

Fig.2 Tensile strength and Reduction of area of retaining steel 3 at high temperature

含氮量的增加而减小。

护环钢的高温流变曲线和高温塑性都表明,在变形温度区间,随着含氮量的增加,Mn18Cr18N护环钢的变形抗力增加,发生动态再结晶需要的变形量增大。所有这些性能都表明,随着含氮量的增加和温度的降低,塑性降低,Mn18Cr18N护环钢的热裂倾向增大。因此,为防止热锻裂纹的产生,热锻必须控制在很窄的温度区间内完成。

### 3 高氮 Mn18Cr18N 护环钢热锻工艺改进

根据护环钢的高温变形行为,对含氮量高的

Mn18Cr18N 护环钢必须进行控制锻造,即把热锻过程中的温度控制在塑性较高、动态再结晶容易发生的范围内。另外热锻工艺的塑性不仅取决于材料的塑性,而且取决于变形工艺中的应力状态<sup>[14]</sup>。

采用三向压应力的变形工艺有助于提高工艺塑性。护环传统锻造常采用缴粗-冲孔-芯轴拔长-芯轴扩孔等自由锻工序,应力状态不利于改善工艺塑性。而且自由锻操作复杂,坯料温度降低快,也不利于将热锻工艺控制在很窄的温度区间内完成。

根据防止热裂省力成形新技术原理,提出了采用包套模内成形的方案,包套在热锻中不仅可以防止坯料温度下降太快,而且有润滑作用,可以降低高含氮量 Mn18Cr18N 钢的热锻载荷。有关该工艺的研究在文献[15~18]中进行了详细的阐述和计算。该工艺采用包套模内冲挤-分步扩挤复合热成形新方法完成护环的锻造,并成功地进行了 50MW 护环的生产试验。

### 4 结论

随 Mn18Cr18N 中氮含量的增加,动态再结晶激活能增大,相应的变形抗力亦增大。含 0.69% N 钢高温最佳塑性区较窄为 1 050 °C 左右,因此改善变形方式,采用包套成型方式是防止护环热裂,提高其质量的有效途径。

### 参考文献

- 1 陈玉明,周维志,宋雷钧,等.汽轮发电机无磁性护环锻件材料的演变过程和研究概况.大型铸锻件,2002(3):48
- 2 周维志,孙晓洁,徐国涛.Mn18Cr18N 护环生产工艺研究概况.大型铸锻件,2001(1):52
- 3 周维志,孙晓洁,李子凌,等.奥氏体护环钢的发展历程.大型铸锻件,1999(4):43
- 4 陈大金.大型发电机用 Mn18Cr18N 护环制造的技术关键.大型铸锻件,1997(1):24
- 5 易邦旺,胡燕,郎文运,等.氮含量对 Cr18Mn18N 无磁不锈钢力学性能、磁导率和组织的影响.钢铁,1998,33(3):43
- 6 陈慧琴,张巧丽,郭会光,等.护环热锻新技术.锻压技术,2000,25(12):7
- 7 陈慧琴,郭会光,王全聪,等.环筒件扩挤复合成形新技术的试验研究.太原重型机械学院学报,1997(3):277
- 8 陈慧琴,郭会光,吴庆培.Mn18Cr18N 护环钢热变形特征的研究.太原重型机械学院学报,1998(3):206
- 9 郭会光,王全聪,吕建斌,等.制造大型汽轮发电机护环关键技术的研究.锻压技术,1998,23(13):3
- 10 郭会光,张巧丽,陈慧琴,等.Mn18Cr18N 钢热变形机制的研究.特殊钢,1999,20(2):14
- 11 张巧丽,温建盛,陆宝成.护环钢热成形微观机制的模拟研究.铸造设备研究,2000(1):23
- 12 邓林涛,刘志颖,刘晓光,等.提高 18Mn-18Cr-N 护环钢中氮含量及收得率的研究.大型铸锻件,2002(3):5
- 13 武建国,郭会光,刘建生.Mn18Cr18N 护环钢热变形特性的试验研究.大型铸锻件,2004(3):1
- 14 Kopp R and Bernrath G.The Deformation of Formability for Cold and Hot Forming Condition, Metal Working, 1999(4+5):147
- 15 陈慧琴,刘建生,郭会光.Research on Hot Forming Process of a Retaining Ring of High-nitrogen Steel.金属学报英文版,2004(5):767
- 16 杨超操,刘建生,陈慧琴,等.Mn18Cr18N 钢护环热成形新工艺数值模拟的研究.大型铸锻件,2004(3):5
- 17 张巧丽,郭会光,陈慧琴.高强钢护环省力热成形技术的开发.锻压装备与制造技术,2004(3):46
- 18 张巧丽,郭会光,陈慧琴.大型环筒件包套冲挤新成形技术的开发研究.重型机械,2004(3):31

陈慧琴(1968-),女,在读博士研究生。从事材料加工过程模拟与控制研究。