

## 20CrH 温锻内星齿轮混晶原因分析及工艺改进

徐乐钱,左锦中,袁静,莫秉干,吴炜  
(中天钢铁集团有限公司技术中心,常州 213011)

**摘要:** 特钢厂生产的 20CrH 特殊钢棒材,下游用户温锻制作内星轮后,经 965 °C × 6 h 渗碳热处理后发现混晶现象。采用光学显微镜观察并设计热处理试验验证,结果表明:锻造变形温度不均及锻后保温温度偏低,导致在后续渗碳过程中局部奥氏体晶粒出现异常长大而产生混晶。将内星轮温锻后保温温度由 710 °C 提高至 900 °C,能有效改善混晶现象,为同类特殊钢零部件温锻的工艺设计提供指导。

**关键词:** 混晶;温锻;金相组织;渗碳;内星齿轮

### Analysis and Process Improvement of Mixed Crystal in Warm Forged 20CrH Inner Star Wheel

Xu Leqian, Zuo Jinzhong, Yuan Jing, Mo Binggan, Wu Wei  
(Technology Center of Zhongtian Iron & Steel Group Co., Ltd., Changzhou 213011)

**Abstract:** The 20CrH special steel bar produced by a special steel factory, after warm forging to make inner star wheel by the downstream user, the mixed crystal phenomenon was found after carburizing heat treatment at 965 °C × 6 h. Using light microscope observation and design of heat treatment test for verification, the results show that the uneven temperature of forging deformation and the low temperature of holding after forging lead to the abnormal growth of local austenite grains in the subsequent carburizing process and the formation of mixed grains. The temperature preservation of the inner star wheel after warm forging is increased from 710 °C to 900 °C, which can effectively avoid crystal mixing and provides guidance for the process design of warm forging of similar special steel parts.

**Key Words:** Mixed Crystal; Warm Forging; Metallographic Structure; Carburizing; Inner Star Wheel

温锻通常是指金属变形温度在室温以上、完全再结晶温度以下进行的精锻过程<sup>[1]</sup>。齿轮类零件温锻成型时,既拥有热锻和冷锻成型时的优势,同时又降低了两者的劣势。相对冷锻而言,由于金属发生回复和部分再结晶,成型力变小,从而减少成型工序;相对于热锻而言,由于金属变形温度低,降低了氧化、脱碳程度,提高了锻件的表面质量和尺寸精度<sup>[2]</sup>。因此,近年来温锻工艺在齿轮等零部件制造领域得到广泛应用。特钢厂生产的 Φ36 mm 20CrH 棒材在下游用户温锻内星轮后渗碳时发现混晶现象,本文对此问题进行研究分析并采取改进措施,为同类特殊钢零部件温锻工艺设计提供指导。

#### 1 温锻内星轮工艺流程及混晶现象

原材料为 Φ36 mm 的 20CrH 热轧圆钢,化学成分见表 1,用户加工工艺流程为:原材料→锯切下料→中频感应加热至 850 ~ 900 °C →温锻(终锻温度

600 ~ 650 °C) →锻后 710 °C 保温 1.5 h 出炉空冷至常温→表面抛丸→965 °C × 6 h 渗碳→炉冷至 850 °C 淬火→180 °C 回火。

内星轮的温锻工艺流程如图 1 所示。

对内星轮成品零件过厚度中心线进行横剖,镶嵌+制样后经饱和苦味酸溶液侵蚀,目视观察横截面存在明显色差,实为混晶现象所致。

内星轮不同区域对应的金相组织如图 2,粗晶区分布在内星轮的内圈和外边界附近,晶粒尺寸 500 ~ 1 000 μm,晶粒度 0 级;细晶区分布在内星轮中间部位,晶粒尺寸 15 ~ 25 μm,晶粒度 8 ~ 9 级。

表 1 20CrH 钢的化学成分/%

Table 1 Chemical composition of 20CrH steel/%

C	Si	Mn	Cr	P	S
0.22	0.20	0.75	0.95	0.017	0.021

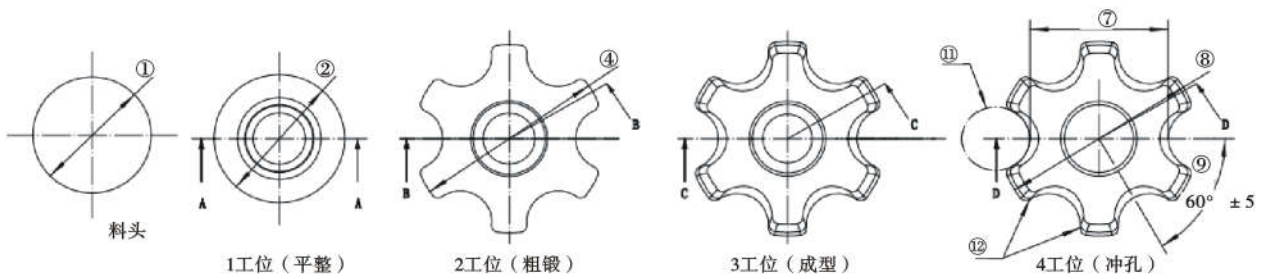


图 1 内星轮的温锻工艺流程  
Fig. 1 Warm forging process of inner star wheel

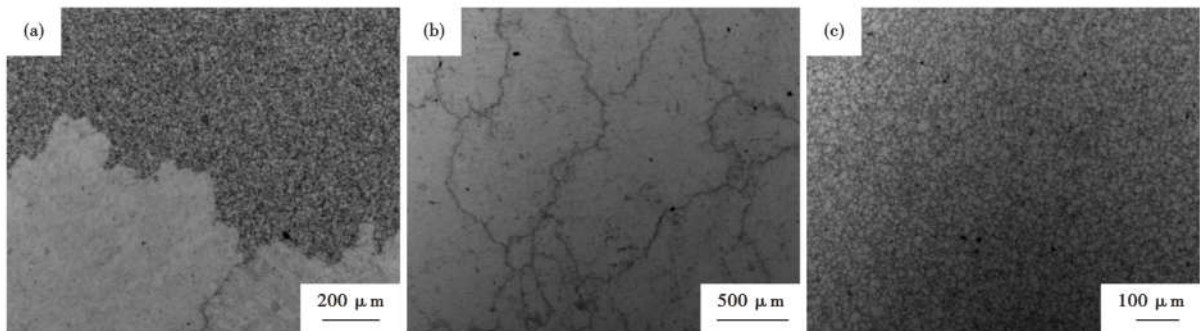


图 2 内星轮截面不同区域的金相组织:(a)过渡区,(b)粗晶区,(c)细晶区

Fig. 2 Metallographic structure photographs of different regions of the inner star wheel: (a) transition area, (b) coarse grain area, (c) fine grain area

## 2 内星轮渗碳混晶原因分析

内星轮温锻渗碳后出现混晶现象的原因可能是原材料自身在渗碳热处理过程中晶粒易于粗化,渗碳过程中影响奥氏体晶粒长大的因素很多,如钢中第二相粒子析出量不足、分布不均等均会影响渗碳中奥氏体晶粒的长大行为<sup>[3-4]</sup>。为验证是否为原材料的影响,对 Φ36 mm 的 20CrH 热轧棒材进行模拟渗碳试验,模拟渗碳热处理工艺为 965 °C 保温 6 h 后水淬,试样经饱和苦味酸溶液侵蚀后金相组织如图 3 所示。

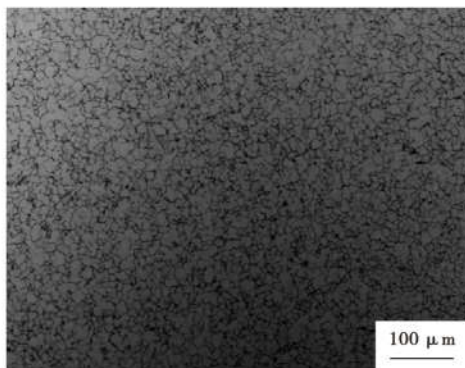


图 3 20CrH 原材料模拟渗碳组织

Fig. 3 20CrH raw material simulation carburizing metallographic structure

试验结果表明,原材料经模拟渗碳淬火后,晶粒细小均匀无混晶现象,因此,温锻内星轮的混晶不应由原材料因素导致。

为此,对用户加工的中间过程样品进行试验,通过内星轮温锻后直接进行水淬以验证是否为温锻变形过程导致的混晶,其终锻温度为  $(631 \pm 10)^\circ\text{C}$ ,对水淬后锻件进行制样 +4% 硝酸酒精溶液腐蚀后金相观察,图 4(a、b) 分别对应成品零件的粗晶区与细晶区的组织,两者组织差异明显,原内星轮粗晶区水淬后的显微组织为细小块状铁素体(F) + 马氏体(M) + 珠光体(P),细晶区对应的组织为马氏体(M) + 贝氏体(B)及少量沿原奥氏体晶界析出的先共析铁素体,因细晶区对应锻件内部,水淬时的冷却速率低于粗晶区对应的锻件外层,因而 F 沿晶界析出,剩余奥氏体转变成 M + B 组织。由图 4(a) 中晶界、晶内弥散分布的细小块状铁素体形态特征可判定其为锻造过程形变诱导析出的<sup>[5-6]</sup>,与内部组织对比可推断锻件外层在水淬前已发生 F 和 P 组织转变。上述结果表明,内星轮温锻时变形量和温度存在内外不均现象。

710 °C 保温后锻件的金相组织如图 5 所示,锻件粗晶区与细晶区的金相组织差异明显。710 °C 保温后,粗晶区域对应锻件组织主要为 F + P,其中 F 呈细小块状和条状分布,并且在 F 基体上分布大量

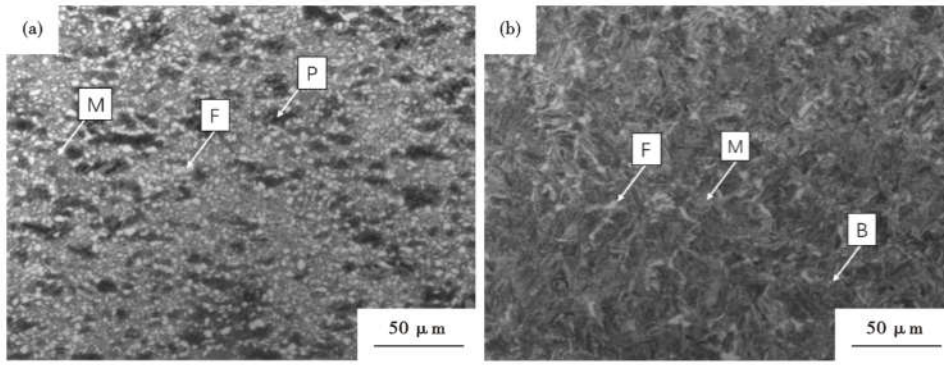


图 4 锻后水淬的内星轮金相组织:(a)粗晶区对应组织,(b)细晶区对应组织

Fig. 4 Metallographic structure of water quenched inner star wheel after forging: (a) microstructure of coarse-grained area, (b) microstructure of fine-grained area

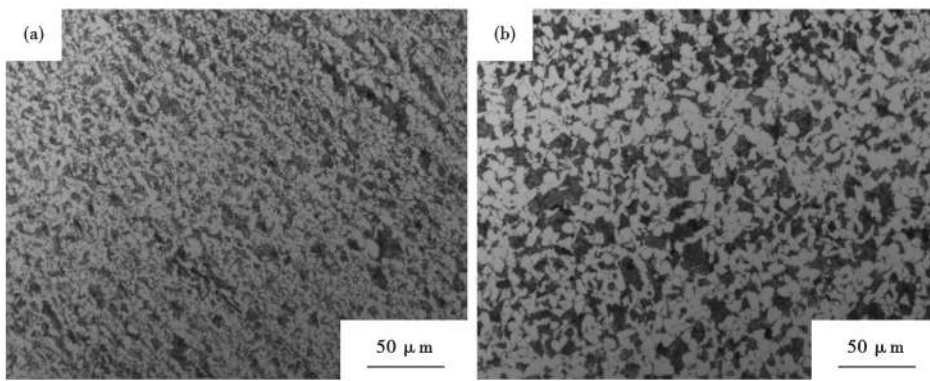


图 5 710 °C 保温后锻件金相组织:(a)粗晶区对应组织;(b)细晶区对应组织

Fig. 5 Metallographic structure of forging part after heating and holding at 710 °C temperature: (a) microstructure of coarse-grained area; (b) microstructure of fine-grained area

表 2 不同状态锻件的组织差异

Tab 2 Metallographic structure difference of forgings in different states

组织差异	温锻后水淬组织	710 °C 保温后锻件组织	渗碳内星轮成品
锻件粗晶区组织	M + P + 形变诱导析出的细小铁素体	晶粒细、F + P, F 内分布大量碳化物颗粒	粗晶(晶粒度 0 级)
锻件细晶区组织	M + B + 少量网状先共析铁素体	晶粒较粗、F + P, F 内无碳化物颗粒	细晶(晶粒度 8 ~ 9 级)

碳化物颗粒;而在锻件细晶区的组织为等轴多边形 F + P, 相对锻件粗晶区其晶粒粗大, 且铁素体内无碳化物颗粒。

不同状态粗晶区及细晶区组织差异对比见表 2。从表 2 看出, 锻件粗晶区和细晶区最大的不同是温锻空冷后组织上存在很大的差异, 虽然二者的组织都是由 F 和 P 组成, 但粗晶区中的 F 内分布着大量碳化物颗粒, 而细晶区中的 F 内则没有发现碳化物颗粒, 并且粗晶区中的 F 有较大一部分是形变诱导析出的, 对于形变诱导铁素体相变过程中, 存在碳化物沿晶界析出并聚集, 同时在晶界及晶面上发生碳的扩散, 使得周围未转变的奥氏体出现富碳现象, 在随后的冷却中发生碳化物的析出和晶内形核, 可以直接转变为粒状珠光体<sup>[7]</sup>。因此, 粗晶区的 F 中

分布着大量的碳化物颗粒。渗碳过程中, 由于粗晶区中形变诱导析出的 F 中本来就已经存在大量的碳化物颗粒, 在奥氏体晶粒的形核和长大过程中, 不需要或者只需要少量的碳扩散就可以完成; 而细晶区中的 F 由于没有或仅有极少量的碳化物颗粒, 在奥氏体晶粒的形核和长大过程中, 就必须要进行足够的碳扩散才能完成, 所以, 渗碳后这两个区域的晶粒大小就会出现非常大的差异, 从而导致内星轮渗碳后出现严重的混晶现象。

### 3 改进措施及效果

根据上述试验, 要避免内星轮渗碳后出现严重的混晶, 则需消除其组织差异, 为此, 需将锻后锻件的保温温度提高至  $A_{c3}$  温度以上<sup>[8]</sup>, 同时考虑到加热炉能力和加工成本, 因此, 将锻后零件移至加热炉

中的保温温度,由原来的 710 ℃ 提高至 900 ℃,使锻件再次进行奥氏体化,以消除形变诱导析出的 F,提高保温温度后,原粗晶区及细晶区对应的金相组织如图 6 所示,900 ℃ 保温后粗晶区对应组织为粗大

珠光体与网状趋势分布铁素体。相同保温条件下,细晶区获得晶粒细小均匀的铁素体 + 珠光体组织。二者的铁素体中都未见碳化物颗粒。

将进行 900 ℃ 保温后的锻件再进行渗碳淬火,

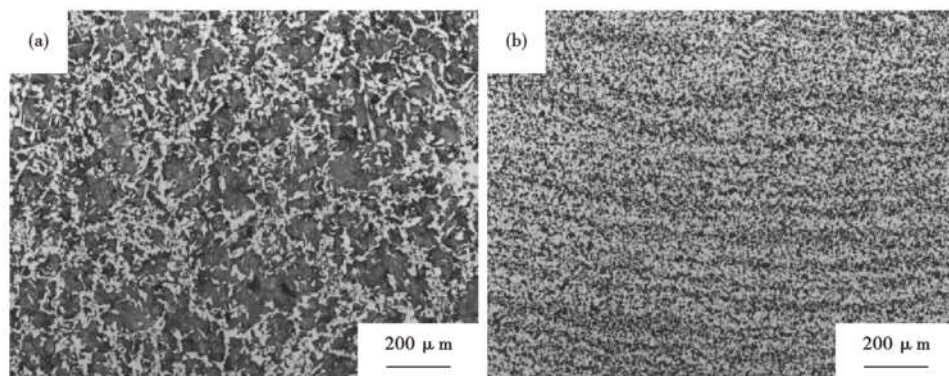


图 6 900 ℃ 保温后锻件金相组织:(a)粗晶区组织;(b)细晶区组织

Fig. 6 Metallographic structure of forging part after heating and holding at 900 ℃ temperature: (a) microstructure of coarse-grained area; (b) microstructure of fine-grained area

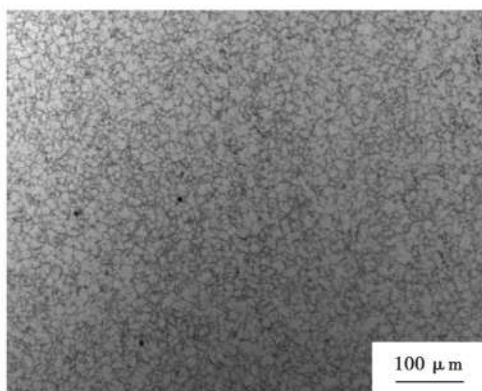


图 7 900 ℃ 保温后内星轮渗碳后的组织

Fig. 7 Metallography structure of inner star wheel after normalizing at 900 ℃ temperature

使用饱和苦味酸溶液侵蚀后,整个截面的金相组织

如图 7 所示,晶粒度为 8~9 级,均匀细小,混晶现象得到明显改善,符合用户要求。

#### 4 结论

(1) 温锻工艺加工的内星轮,由于温锻温度较低且变形不均匀,温锻冷却后,在大变形量的区域形成大量因形变诱导析出的含过饱和碳的铁素体相,经低温保温后并未能消除,在后续的渗碳加热保温过程中,这种组织容易形成粗大的奥氏体晶粒,最终导致零件渗碳后出现粗晶组织。

(2) 将温锻后的保温温度由 710 ℃ 提高到 900 ℃,可有效改善内星轮在渗碳过程中的混晶现象。

#### 参考文献

- [1] 中国机械工程学会塑性工程学会. 锻压手册(第 1 卷)锻造[J]. 制造技术与机床, 2008(12):1.
- [2] 陈祝同,王浩. 国外冷、温锻的现状和发展[J]. 锻压技术, 1984(6):44-54.
- [3] 杨延辉,王毛球,陈敬超,等. 高温渗碳齿轮钢的研究进展[J]. 特殊钢, 2013, 34(1):22-24.
- [4] 李绍杰,樊一丁,黄胜永. Al, Ti, Nb 微合金化对 ZF7 渗碳钢晶粒混晶的影响[J]. 特殊钢, 2013, 34(2):52-54.
- [5] 杨忠民,赵燕,王瑞珍,等. 形变诱导铁素体的形成机制[J]. 金属学报, 2000, 36(8):818-822.
- [6] 范莹隆,刘良江. 亚共析钢中先共析铁素体形态的研究[J]. 湘潭大学自然科学学报, 1991, 13(3):86-93.
- [7] 陈继林,冯光宏,杨栋,等. 形变量和冷却速度对 SCM435 冷锻钢形变诱导铁素体相变的影响[J]. 特殊钢, 2021, 42(3):12-15.
- [8] 白瑞娟,万长杰,董战利,等. 温锻和等温正火对 20CrMnTiH3 齿轮钢渗碳淬火后奥氏体晶粒度的影响[J]. 特殊钢, 2016, 37(3):61-63.