

## 精密车削用 16MnCrS5 钢棒材生产工艺优化

张光鸿<sup>1,2</sup>, 龙开西<sup>1,2</sup>, 何英武<sup>1,2</sup>, 向鑫<sup>1,2</sup>

(大冶特殊钢有限公司 1 棒材研究所; 2 高品质特殊钢湖北省重点实验室, 黄石 435001)

**摘要:** 通过试验确定精密车削用 16MnCrS5 棒材的生产工艺, 研究合适的硫含量、冷却速度和退火温度参数, 满足高端汽车销轴精密车削零件要求。结果表明, 试验的 S 含量 0.028% ~ 0.035% 的 16MnCrS5 热轧棒材以 1.37 ~ 1.69 °C/s 冷却速度冷却后, 再采用连续退火炉进行 620 °C × 6 h 的去应力退火, 可得到硬度满足 180 ~ 215HBW 的去应力退火精密车削用棒材。

**关键词:** 16MnCrS5 钢; 精密车削; 硬度; 硫含量; 去应力退火

## Optimization of Production Process of 16MnCrS5 Steel Bar for Precision Turning

Zhang Guanghong<sup>1,2</sup>, Long Kaixi<sup>1,2</sup>, He Yingwu<sup>1,2</sup>, Xiang Xin<sup>1,2</sup>

(1 Bar Research Institute; 2 Hubei Key Laboratory of High Quality Special Steel, Daye Special Steel Co., Ltd., Huangshi 435001)

**Abstract:** Through experiments, the production process of 16MnCrS5 steel bars for precision turning is determined, and the appropriate sulfur content, cooling speed and annealing temperature parameters are studied to meet the requirements of high-end automotive pin precision turning parts. The results show that the tested 16MnCrS5 steel hot-rolled bars with S content ranging from 0.028% to 0.035% were cooled at a cooling rate of 1.37 to 1.69 °C/s, and then subjected to stress relief annealing at 620 °C for 6 h in a continuous annealing furnace, and the hardness was 180-215HBW which met customer requirements of that for stress relief annealing precision turning bar.

**Key Words:** 16MnCrS5 Steel; Precision Turning; Hardness; Sulfur Contents; Stress Relief Annealing

16MnCrS5 钢是从德国引进并通过合金元素 Mn、Cr 等实现钢的强韧化, 属于低碳淬硬钢, 此钢中添加 0.020% ~ 0.040% 的 S 元素, 促进了钢中 MnS 夹杂物形成, 具有易切削性能<sup>[1-2]</sup>, 广泛用于汽车齿轮、销轴等零部件。

对于要求高精密车削汽车销轴用棒材交货硬度 180 ~ 215HBW, 一般热轧生产的 16MnCrS5 钢不能满足要求。开发初期生产验证热轧的 16MnCrS5 棒材(交货硬度 ≤ 255HBW)车加工不稳定, 不仅零件精度不够, 还出现缠屑、打刀等异常现象, 不能满足生产要求。查阅相关文献资料经分析认为棒材在轧制冷却过程中, 因其表面和心部冷却速度差造成棒材内外温度差而产生残余内应力, 这种内应力与后续加工因素累积, 容易产生零件变形<sup>[3]</sup>, 影响零件精度, 所以高要求的车削用棒材需要去应力退火。

从车削生产实践发现, 若棒材硬度低, 则车加工粘刀、缠屑、零件表面粗糙度差<sup>[4]</sup>、尺寸精度差; 若棒材硬度高, 则刀具磨损加剧, 加工困难。

综上, 作为原料生产企业很有必要研究 16MnCrS5 棒材的硫含量、冷却速度和去应力退火温度的工艺参数, 生产出满足客户精密车加工需求的棒材。

### 1 试验材料生产工艺流程

16MnCrS5 棒材试验材料生产工艺流程为: EAF(70 t) → LF(80 t) → VD/RH(80 t) → CC(240 mm × 240 mm) → 连铸坯加热(步进式加热炉) → 轧制成棒材 → 冷却 → 去应力退火 → 检测、包装, 成品棒材规格为 Φ16 ~ 50 mm。16MnCrS5 棒材的化学成分见表 1。要求 A 类硫化物级别 ≤ 3.0 级(按 ASTM E45-2018 标准 A 法检测, 取样位置棒材半径 1/2 处)。

表 1 试验 16MnCrS5 钢的化学成分/%  
Table 1 Chemical composition of tested 16MnCrS5 steel/%

项目	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Cu
标准成分范围	0.14~0.19	≤0.40	1.10~1.30	≤0.025	0.020~0.040	1.00~1.10	≤0.30	≤0.10	≤0.20
试验钢成分	0.17	0.25	1.20	0.010	0.029	1.05	0.03	0.02	0.05

## 2 试验过程

### 2.1 硫含量

为确定最优的硫含量,取不同硫含量的 10 个炉号 16MnCrS5 棒材,对 A 类硫化物级别进行了检测,结果如图 1 所示。最终优选硫含量 0.028% ~ 0.035%,在满足 A 类硫化物级别 ≤ 3.0 级的前提下,促进了钢中 MnS 夹杂物形成,提供更优的切削性能。

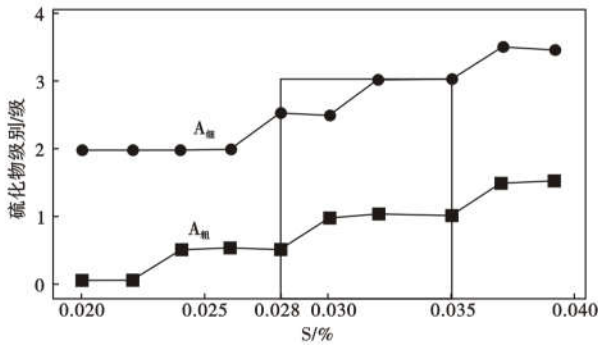


图 1 硫含量对试验 16MnCrS5 钢棒材 A 类硫化物级别的影响

Fig.1 Effect of sulfur content on class A sulfide grade of tested 16MnCrS5 steel bar

### 2.2 热轧棒材冷却速度

#### 2.2.1 CCT 曲线的测定

依据 YB/T5127-2018《钢的临界点测定膨胀法》标准,使用 DIL805L 型淬火相变膨胀仪测得不同冷速下的时间-膨胀量-温度曲线,利用切线法处理获得不同冷速下的相变开始和终了温度,再结合金相组织和硬度试验,绘制 16MnCrS5 试验钢的 CCT 曲线图<sup>[5]</sup>,如图 2 所示,为 16MnCrS5 试验钢的轧后冷却工艺的制定提供参考。

#### 2.2.2 终轧温度和保温时间

收集统计钢厂小棒车间生产的 152 批,直径为 Φ16 ~ 50 mm 的热轧态 16MnCrS5 棒材,其硬度分布直方图如图 3 所示,硬度均在 180 ~ 250HBW。一般热轧态棒材应为去应力退火留有硬度降低余量,也就是热轧态的棒材硬度应控制在 180 ~ 250HBW 中上限为宜,所以初始设定热轧态硬度 220 ~ 250HBW,可避免去应力退火后棒材硬度偏低<sup>[6]</sup>。

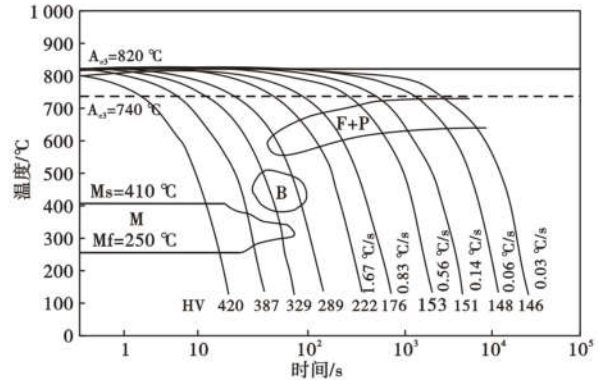


图 2 试验 16MnCrS5 钢的 CCT 曲线

Fig. 2 Continuous cooling transformation curves of tested 16MnCrS5 steel

参考 16MnCrS5 试验钢 CCT 曲线,图 2 中冷却曲线显示冷却速度在 1.67 °C/s 的对应材料硬度为 222HV 可作为参考。棒材的终轧温度和直径大小直接影响棒材在保温罩内的冷却速度<sup>[7]</sup>,棒材的直径越大,冷速越慢,终轧温度需要相应进行调整。本次试验的 16MnCrS5 棒材的直径为 Φ22 mm,根据经验公式将终轧温度设定在 850 ~ 930 °C,棒材在保温罩内的保温时间为 240 s(保温罩内冷却时间是由保温罩的长度和出钢节奏决定的,出钢节奏快导致坯料加热质量差,出钢节奏慢影响生产效率)。

#### 2.2.3 棒材冷却速度与硬度关系

保温罩内棒材的保温时间 240 s 不变,对终轧温度进行试验(终轧温度 850 ~ 930 °C),以确定棒材的实际冷速和热轧硬度对应关系。试验轧制 9 批 Φ22 mm 规格 16MnCrS5 钢,终轧温度在 850 ~ 930 °C,

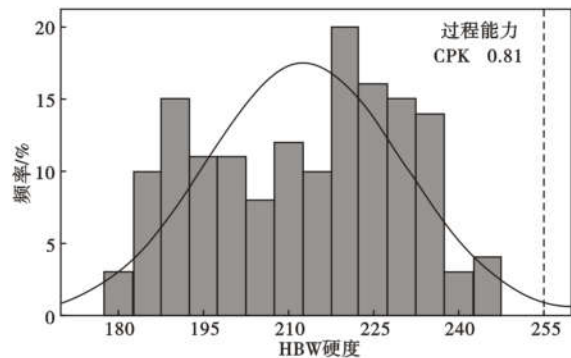


图 3 16MnCrS5 钢棒材硬度 (HBW) 分布直方图

Fig.3 Distribution histogram of hardness HBW of 16MnCrS5 steel bars

表 2 试验钢棒材冷却速度和硬度结果

Table 2 Experimental steel bar cooling rate and hardness results

试验批次	终轧温度/℃	出保温罩温度/℃	冷速/(℃·s <sup>-1</sup> )	热轧硬度 1(HBW)	热轧硬度 2(HBW)	热轧平均硬度(HBW)
1	851	481	1.54	231	231	231.0
2	860	486	1.56	232	236	234.0
3	872	495	1.57	237	242	239.5
4	881	500	1.59	243	245	244.0
5	889	542	1.45	229	228	228.5
6	902	564	1.41	225	224	224.5
7	910	578	1.38	222	224	223.0
8	922	580	1.43	227	230	228.5
9	931	588	1.43	227	226	226.5

注:冷速=(终轧温度-出保温罩温度)/保温时间 240 s

从 850 ℃开始每增加约 10 ℃作为一种终轧温度,工艺结束后待棒材冷却到室温后取样,按 GB/T 231.1-2018《金属材料布氏硬度试验 第 1 部分:试验方法》检测棒材硬度(每批检测 2 个硬度数据后取平均值),最终冷速和硬度结果见表 2。

表 2 结果表明,在同样的保温时间的情况下,16MnCrS5 热轧棒材冷却速度和硬度存在相关性,采用 Minitab 软件绘制试验钢的冷却速度和热轧硬度线性回归模型<sup>[8]</sup>如图 4 所示,回归模型误差占总误差的百分比  $R-Sq=85.5\%$ ,说明回归模型与数据吻合度较好。调整后的回归模型误差占总误差的百分比  $R-Sq(adj)=83.4\%$ , $R-Sq(adj)$ 与  $R-Sq$  越接近,此回归模型可靠。 $R-Sq(adj)>70\%$  证实试验钢的冷却速度和热轧硬度存在相关性,由试验模型回归公式(硬度  $HBW=110.9+80.92\times$  冷却速度/(℃·s<sup>-1</sup>)可反推热轧棒材硬度 220~250HBW 对应的冷却速度为 1.35~1.72 ℃/s。考虑实际硬度检测  $\pm 2HBW$  的偏差,棒材硬度按 222~248HBW 控制,优选棒材冷却速度 1.37~1.69 ℃/s。

## 2.3 去应力退火工艺

### 2.3.1 去应力退火温度

去应力退火温度及时间是热处理的最关键参

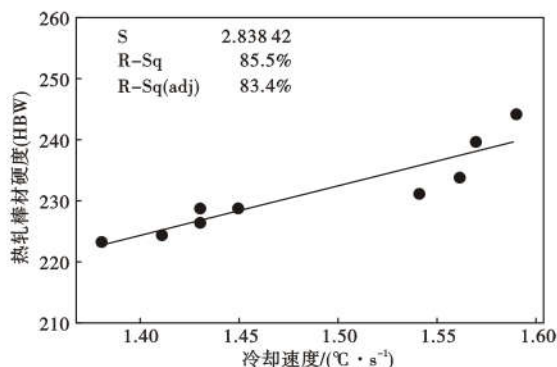


图 4 试验钢棒材的冷却速度和热轧硬度回归曲线

Fig. 4 Regression curve of cooling rate and hot rolling hardness of experimental steel bars

数。一般来说,在进行去应力退火时,温度过低,棒材不会在短时间内完成应力释放,相应退火时间需延长,热处理效率低。温度越高,所需的退火时间越短,应力去除效果越好,但温度过高会导致棒材组织结构发生变化,造成棒材硬度降低值超出预期。所以初始设定去应力退火的温度在  $A_{C1}$  线下 100 ℃左右,CCT 曲线(如图 2)显示 16MnCrS5 钢的  $A_{C1}$  温度为 740 ℃,优选将试验棒材的去应力退火温度设定为 600~670 ℃。棒材在炉内保温时间与棒材直径有关,棒材的直径越大,升温速度越慢,相应的加热时间也需延长。试验用 16MnCrS5 棒材的直径为  $\Phi 22$  mm,根据生产工艺经验公式将去应力退火炉保温时间设定为 6 h(大生产共同组批需要,尽可能与常规退火工艺时间要求保持一致,这里不再进行保温时间最优化试验)。

### 2.3.2 棒材去应力退火与硬度关系

采用常规连续退火炉,对同一批棒材硬度平均值为 235HBW、直径为  $\Phi 22$  mm 的 16MnCrS5 棒材分 8 种不同工艺进行退火温度试验(去应力退火温度 600~670 ℃),以确定棒材的退火温度与退火后棒材硬度对应关系。按 GB/T 231.1-2018《金属材料布氏硬度试验 第 1 部分:试验方法》检测棒材硬度(每批不同位置检测 3 个硬度试样后取平均值),退火温度和退火后棒材硬度结果见表 3。

从表 3 可以看出,在同样的 6 h 去应力退火情况下,16MnCrS5 钢去应力退火温度和硬度降幅存在相关性,采用 Minitab 软件绘制试验钢的退火温度和退火后的硬度降幅线性回归模型如图 5,回归模型误差占总误差的百分比  $R-Sq=98.4\%$ ,说明回归模型与数据吻合度极好。调整后的回归模型误差占总误差的百分比  $R-Sq(adj)=98.3\%$ , $R-Sq(adj)$ 与  $R-Sq$  接近,此回归模型非常可靠。 $R-Sq(adj)>85\%$  证实试验钢的去应力退火温度与硬度降幅存在强相关性。参考图 5 回归公式,将热轧态

表 3 试验钢退火温度和退火后的硬度结果  
Table 3 Experimental steel bar annealing temperature and hardness results after annealing

试验钢 批次号	退火温 度/℃	退火前硬度平 均值(HBW)	退火硬度(HBW)			退火硬度平 均值(HBW)	退火硬度 降幅(HBW)
			1	2	3		
1	600	235	215	218	213	215	20
2	610	235	207	205	209	207	28
3	620	235	200	198	195	198	37
4	630	235	190	189	187	189	46
5	640	235	182	178	179	180	55
6	650	235	171	176	172	173	62
7	660	235	169	165	167	167	68
8	670	235	163	158	160	160	75

注:退火硬度降幅=退火前硬度平均值-退火硬度平均值

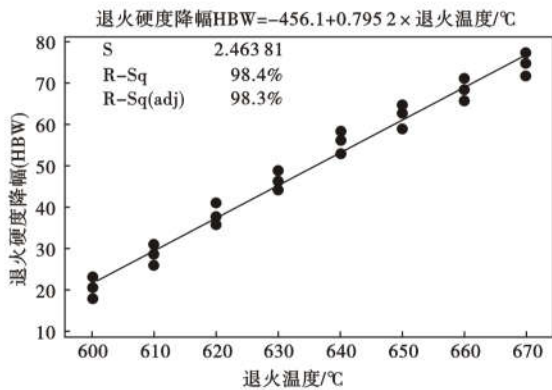


图 5 试验钢棒材的退火温度和硬度降幅的回归曲线

Fig. 5 Regression curve of annealing temperature and hardness drop of tested steel bars

棒材的 222 ~ 248HBW 硬度降低至 180 ~ 215HBW, 理想的硬度降低幅度为 37.5HBW(计算方法:222 ~ 248HBW 的中位数 235HBW 与 180 ~ 215HBW 的中位数 197.5HBW 的差值为 37.5HBW), 回归公式反推出的最优退火温度为 620 °C。

参考文献

[1] 黄雷, 吴海涛, 瞿万里, 等. 钢中硫化物的种类及其有利作用[J]. 金属热处理, 2018, 43(4): 102-105.  
 [2] 徐秋香, 邵亮. 硫易切削齿轮钢的开发[J]. 特殊钢, 2002, 23(1): 83-84.  
 [3] 王晓明, 李成鑫. 芯棒去应力退火工艺的研究[J]. 大型铸锻件, 2012(3): 17-19.  
 [4] 苏嘉玲. 机械加工影响表面粗糙度的因素及改善措施[J]. 新技术新工艺, 2010(11): 10-11.

3 生产验证

基于以上工艺试验研究, 量产 19 批约 540 t Φ16 ~ 55 mm 规格的 16MnCrS5 去应力退火棒材, S 含量 0.028% ~ 0.032%, 硫化物级别  $A_{\text{细}} = 2.5 \sim 3.0$  级,  $A_{\text{粗}} \leq 1.0$  级, 硬度在 188 ~ 207HBW, 满足硫化物  $A_{\text{细}} \leq 3.0$  级,  $A_{\text{粗}} \leq 3.0$  级, 硬度符合 180 ~ 215HBW 的要求, 合格率 100%, 用户使用良好, 成功实现去应力退火精密车削用棒材量产。

4 结论

S 含量 0.028% ~ 0.035% 的 16MnCrS5 热轧棒材以 1.37 ~ 1.69 °C/s 冷却速度冷却后, 采用常规连续退火炉进行 620 °C × 6 h 的去应力退火, 可以得到硬度满足 180 ~ 215HBW 的去应力退火的精密车削用 16MnCrS5 棒材, 满足高端汽车精密车削销轴零件的性能要求。

[5] 孟延军, 孙岩, 安治国, 等. 齿轮钢 16MnCr 的过冷奥氏体连续冷却转变规律[J]. 金属热处理, 2018, 43(4): 102-105.  
 [6] 袁淑君. 17CrNiMo6 齿轮钢生产实践[J]. 山东冶金, 2021, 43(3): 6-8.  
 [7] 袁武华, 彭振宇. 终轧温度及轧后冷却速率对 20CrMnTi 钢棒材显微组织及硬度的影响[J]. 机械工程材料, 2013, 37(2): 6-9.  
 [8] 汤进, 黄莉莉, 赵海峰, 等. 使用自适应线性回归的多标签分类算法[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2021, 40(9): 69-74.