

热处理对高强度易切削沉淀硬化不锈钢 2Cr16Ni3Mo2CuN 力学性能的影响

李志高 谦 高登攀 江志华 姜洪胜 许广鹏
(北京航空材料研究院第三研究室,北京 100095) (抚顺特殊钢集团有限责任公司,抚顺 113001)

摘要 高强度易切削沉淀硬化不锈钢 2Cr16Ni3Mo2CuN 在退火状态下有优良的切削性能。研究了经过一级退火温度 710 ~ 800 °C 和二级退火温度 570 ~ 620 °C 处理后 2Cr16Ni3Mo2CuN 钢的布氏硬度 (HB) 值,以及 1 050 ~ 1 085 °C 45 min 油冷, -70 °C 2 h, 150, 170 °C 回火后的力学性能。试验结果表明, 710 ~ 740 °C 5 h 空冷 + 620 °C 5 h 空冷处理后, 2Cr16Ni3Mo2CuN 钢 HB 值在 321 以下; 1 050 ~ 1 085 °C 淬火, 150 ~ 200 °C 回火处理后, 该钢强度极限 $\sigma_b \geq 1 520$ MPa, $\delta_5 \geq 12\%$, 冲击功 $A_{KU} \geq 40$ J。2Cr16Ni3Mo2CuN 钢具有明显的二次硬化特征, 二次硬化峰温度范围为 480 ~ 520 °C。

关键词 易切削 高强度 沉淀硬化不锈钢 热处理 力学性能

Effect of Heat Treatment on Mechanical Properties of High Strength Free-Cutting Precipitation Hardening Stainless Steel 2Cr16Ni3Mo2CuN

Li Zhi, Gao Qian, Gao Dengpan and Jiang Zhihua
(No.3 research office, Beijing Institute of Aeronautical Materials, Beijing 100095)
Jiang Hongsheng and Xu Guangpeng
(Fushun Special Steel (Group) Co Ltd, Fushun 113001)

Abstract The high strength free-cutting precipitation hardening stainless steel 2Cr16Ni3Mo2CuN has excellent cutting property in annealing conditions. The Brinell hardness (HB) number of steel 2Cr16Ni3Mo2CuN treated by first annealing at temperature between 710 °C and 800 °C and second annealing at temperature between 570 °C and 620 °C and the mechanical properties of steel treated with 1 050 ~ 1 085 °C for 45 min oil cooling, -70 °C for 2 h and 150 °C or 170 °C tempering have been studied. The test results showed that HB number of steel 2Cr16Ni3Mo2CuN treated with 710 ~ 740 °C for 5 h + 620 °C 5 h was less than 321 and tensile strength σ_b of steel was $\geq 1 520$ MPa, $\delta_5 \geq 12\%$ and impact energy $A_{KU} \geq 40$ J. The steel 2Cr16Ni3Mo2CuN showed obvious secondary hardening effect and the peak temperature range of this effect was between 480 °C and 520 °C.

Material Index Free Cutting, High Strength, Precipitation Hardening Stainless Steel, Heat Treatment, Mechanical Properties

2Cr16Ni3Mo2CuN 钢是一种新型的易切削不锈钢,同时又属于马氏体沉淀硬化不锈钢,主要用于制造航空仪表和自动化系统传动机构零件。随着切削速度的提高,2Cr16Ni3Mo2CuN 钢粗糙度明显下降,完全符合易切削钢的切削特点。在退火状态下 2Cr16Ni3Mo2CuN 钢具有优异的切削性能:在走刀(进给)量 0.04 mm/r、吃刀(切削)深度为 0.5 mm,切削速度 41.7 m/min、吃刀量为 0.5 mm 时,2Cr16Ni3Mo2CuN 钢粗糙度达到 1.08 μm ,且在切削速度为 70.3 m/min 的条件下,该钢粗糙度达到 0.56 μm ,均优于马氏体热强不锈钢 1Cr11Ni2W2MoV。

本文在对 2Cr16Ni3Mo2CuN 钢热处理工艺和力学性能研究的基础上,结合化学成分特点分析了该钢的强化机理。

1 试验钢的化学成分和试验方法

2Cr16Ni3Mo2CuN 钢的化学成分见表 1。钢采用非真空感应 + 电渣重熔方法炼制,炼钢过程中加入 S、P,以保证钢的切削性能。经开坯、锻造后制成 $\Phi 20$ mm 棒材,用于开展试验研究。首先进行 2Cr16Ni3Mo2CuN 钢退火工艺与力学性能之间关系研究,了解不同退火制度与硬度的关系,进而进行不同淬火温度 (1050 ~ 1085 °C)、回火温度

表 1 试验用钢的化学成分/%
Table 1 Chemical compositions of test steels /%

| 钢种 | C | Si | Mn | S | P | Cr | Ni | Mo | Cu | N |
|----------------|-----------|-------|-----------|-----------|-----------|-------------|-----------|------|------|-------|
| 2Cr16Ni3Mo2CuN | 0.17 | 0.22 | 0.78 | 0.15 | 0.07 | 14.99 | 3.52 | 1.60 | 1.20 | 0.079 |
| Y2Cr13Ni2 | 0.20~0.30 | ≤0.50 | 0.80~1.20 | 0.15~0.25 | 0.08~0.15 | 12.00~14.00 | 1.50~2.00 | - | - | - |

(150~580℃)与强度、冲击韧度的关系研究,结合化学成分,分析该钢的强化特点。

2 退火热处理对硬度(HB)的影响

采用膨胀法测定 2Cr16Ni3Mo2CuN 钢的相变点温度, A_{c1} 点是 640℃、 A_{c3} 点是 785℃、 M_s 点是 135℃, 由此, 选择两级退火温度范围进行热处理试验, 一级退火温度选择为 710~800℃, 保温 5 h 后空冷, 二级退火处理选择 570~620℃, 保温 5 h 后空冷, 之后测试材料的硬度(见表 2)。可以看出, 随着一级退火处理温度的提高, 在二级退火处理后硬度普遍提高, 对于二级退火处理, 随着退火温度的提高, 硬度则下降。二级退火处理时温度在 A_{c1} 点(640℃)以下越高, 越有利于马氏体的分解, 使组织接近于平衡组织。对于在退火状态下使用的零件, 平衡组织有利于保持较高的综合性能。

表 2 退火工艺对 2Cr16Ni3Mo2CuN 钢硬度(HB)的影响
Table 2 Effect of annealing procedure on hardness (HB) of steel 2Cr16Ni3Mo2CuN

| 一级退火温度/℃ | 二级退火温度/℃ | 布氏硬度(HB) |
|----------|----------|----------|
| 710 | 570 | 334 |
| | 580 | 325 |
| | 600 | 321 |
| | 620 | 310 |
| 740 | 570 | 332 |
| | 580 | 334 |
| | 600 | 330 |
| | 620 | 316 |
| 770 | 570 | 348 |
| | 580 | 334 |
| | 600 | 330 |
| | 620 | 321 |
| 800 | 570 | 347 |
| | 580 | 334 |
| | 600 | 330 |
| | 620 | 325 |

3 淬火、回火对力学性能的影响

参考 15-5PH 钢、17-4PH 钢和 AFC-77 钢等含铜、含钼马氏体沉淀硬化不锈钢的热处理加热淬火温度, 并考虑到使 2Cr16Ni3Mo2CuN 钢尽量发挥马氏体强化和时效强化作用, 淬火加热温度选择

为 1050~1085℃, 对力学性能试样毛坯保温 45 min 后油冷(在 1065℃油冷淬火后取出一个试样测试硬度), 并紧接着进行 -70℃保温 2 h 冷处理(取出一个试样测试硬度), 空气中回温到室温, 之后分别在 150℃和 170℃保温 2 h 后空冷, 试样精加工后测试室温拉伸、冲击和硬度的变化, 试验结果见表 3。

由表 3 可以看出, 仅经过油冷处理, 硬度只有 HRC22.8, 说明此时组织中存在大量残余奥氏体, 再经过 -70℃保温 2 h 冷处理后硬度为 HRC48.5, 提高一倍多, 表明冷处理进一步促进了马氏体相变, 这是该钢的重要特征之一; 在 1050~1085℃范围内, 淬火加热温度对拉伸、冲击等性能影响不大, 而回火温度则明显影响抗拉强度和硬度, 较低温度回火时硬度明显提高。

表 3 2Cr16Ni3Mo2CuN 钢加热温度、回火温度对室温力学性能的影响

Table 3 Effect of quenching and tempering temperature on ambient mechanical properties of steel 2Cr16Ni3Mo2CuN

| 淬火和冷处理 | 回火温度/℃ | σ_b /MPa | δ_5 /% | A_{K12} /J | HRC |
|----------------------------|--------|-----------------|---------------|--------------|------|
| 1050℃45 min 油冷, -70℃2 h | 150 | 1686 | 14.7 | 80.8 | 50.3 |
| | 170 | 1583 | 15.0 | 79.0 | 48.2 |
| 1065℃45 min 油冷, -70℃2 h | 150 | 1678 | 17.1 | 66.5 | 48.5 |
| | 170 | 1617 | 18.1 | 43.7 | 48.0 |
| 1085℃45 min 油冷, -70℃2 h | 150 | 1680 | 14.2 | 71.4 | 50.0 |
| | 170 | 1582 | 15.0 | 78.3 | 48.1 |

注: 1065℃45 min 油冷: HRC22.8; 1065℃45 min 油冷, -70℃2 h: HRC48.5

2Cr16Ni3Mo2CuN 钢化学成分中间隙强化元素 C、N 总量为 0.25%, 直接在马氏体相变过程中产生强化作用, 这在一般沉淀硬化不锈钢中并不多见。马氏体热强不锈钢如 1Cr11Ni2W2MoV 钢、GX-8 钢 C+N 的含量不超过 0.15%, 马氏体沉淀硬化不锈钢如 15-5PH、17-4PH 和 PH13-8Mo 间隙强化元素不超过 0.05%^[1,2], 只有 AFC-77 不锈钢^[3](典型成分(%)为 0.15C-14.5Cr-13.5Co-5Mo-0.5V-0.05N)间隙强化元素 C+N 含量超过了 0.20%, 该钢在 150℃回火时硬度超过 HRC50。

2Cr16Ni3Mo2CuN 钢化学成分的这一特点一方面使该钢在低温回火时可以达到高硬度,同时便于制造精密、耐磨零件。另一个值得注意的特点是对应高强度下较高的塑性和冲击韧度,当然,该性能的提高应不至于影响钢的易切削性能。

2Cr16Ni3Mo2CuN 钢不同回火温度与力学性能之间的关系见图 1(试样毛坯淬火处理制度是 1 050 °C 保温 45 min 后油冷并 -70 °C 保温 2 h 冷处理,空气中回温到室温)。可以看出,材料显示出明显的二次硬化特征,经过 450 °C 回火处理后抗拉强度、硬度明显提高,在 480 ~ 520 °C 范围内,形成二次硬化峰,此时塑性延伸率仍保持较高的水平。

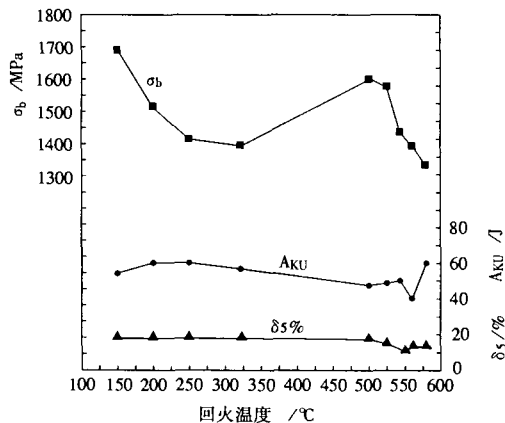


图 1 2Cr16Ni3Mo2CuN 钢回火温度对力学性能的影响
Fig.1 Effect of tempering temperature on mechanical properties of steel 2Cr16Ni3Mo2CuN

目前航空领域唯一列入材料手册中的易切削马氏体不锈钢为 Y2Cr13Ni2 钢(见表 1),由其回火温度与力学性能的数据可知^[4],低温(200 °C 以下)回火,强度、硬度与 2Cr16Ni3Mo2CuN 钢相当,随着回火温度的提高,在 300 °C 回火后强度呈明显下降趋势,500 °C 以上回火后强度急剧下降,硬度随回火温度的降低略滞后于强度,但在 500 °C 以上回火后下降趋势明显。该钢无二次硬化特征。

钼元素在马氏体沉淀硬化不锈钢中的作用体现在多个方面,在强化马氏体的基础上,回火时由于形成细小弥散的 Mo_2C 和 Fe_2Mo 等强化相,增加回火稳定性和强化二次硬化、时效硬化效应,使钢的强度增加,而韧性基本不降低^[5];已开展的 Fe-Cr-Ni-Co-Mo 系马氏体沉淀硬化不锈钢二次硬化

特征研究表明,钼的二次硬化峰温度约在 540 °C^[6];铜在马氏体沉淀硬化不锈钢中的作用主要是引起二次硬化反应,弥散沉淀析出 M_2X 相,铜的二次硬化峰形成温度约在 450 ~ 490 °C 之间;研究表明^[5],高铬马氏体不锈钢铜含量超过 1% 时即可以表现出明显的二次硬化特征。

对于 2Cr16Ni3Mo2CuN 钢而言,超过 450 °C 回火后抗拉强度明显提高,表明此时铜元素起到明显的二次硬化作用,钼元素的二次硬化峰滞后铜元素约 70 °C,两种元素共同的二次硬化作用,使 2Cr16Ni3Mo2CuN 钢二次硬化峰在 480 ~ 520 °C。

上述特点使 2Cr16Ni3Mo2CuN 钢既可以在退火状态下使用,也可在低温回火(要求高硬度)和高温回火状态(要求一定的高温稳定性)下使用。

4 结论

(1) 新型易切削沉淀硬化不锈钢 2Cr16Ni3Mo2CuN 钢采用退火工艺:710 ~ 740 °C 保温 5 h 后,空冷到室温并在 620 °C 保温 5 h,空冷到室温处理后,布氏硬度在 HBS321 以下,有利于该钢在平衡组织状态下使用。

(2) 1 050 ~ 1 085 °C 范围内淬火、在 150 ~ 200 °C 回火时,淬火温度对力学性能影响不大,在 150 °C 以下使用,能够保证 σ_b 大于 1 520 MPa, δ_5 大于 12%, A_{KU} 在 40 J 以上;2Cr16Ni3Mo2CuN 钢具有明显的二次硬化特征,二次硬化峰温度范围在 480 ~ 520 °C,该特点有利于 2Cr16Ni3Mo2CuN 钢在较高温度下使用。

参考文献

- 1 Metals and Ceramics Information Center, Structural Alloys Handbook, Ohio Vol. 1, Columbus, 1990
- 2 Metals and Ceramics Information Center, Structural Alloys Handbook, Vol. 2, Columbus, Ohio, 1990
- 3 赵振业.合金钢设计.北京:国防工业出版社,1999,278
- 4 中国航空材料手册编辑委员会.中国航空材料手册(第 1 卷 结构钢不锈钢).北京:中国标准出版社(第 2 版),2002,444
- 5 陈世英,张廷凯,康喜范,等.不锈钢.北京:原子能出版社,1995,36
- 6 赵振业,李春志,李志,等.探索强韧化机理,创新超高强度高韧性不锈钢.中国有色金属学报,2004,14(5):12

李志(1964-),男,博士,高级工程师,从事高强度不锈钢、结构钢的研究和应用。