

热处理对 60Si2CrVAT 弹簧钢组织和力学性能的影响

王 凯 殷 匠 顾文俊 胡俊辉
(宝钢股份有限公司特殊钢分公司,上海 200940)

摘 要 试验了 890 ~ 930 °C 淬火, 400 ~ 440 °C 回火时淬-回火温度对 160 mm × 160 mm 连铸坯轧成的 Φ21 mm 60Si2CrVAT 弹簧钢组织和力学性能的影响。结果表明, 910 °C 淬火-回火后的 60Si2CrVAT 钢抗拉强度高于 890 °C 和 930 °C 淬火-回火钢的抗拉强度, 不同淬火温度下钢的抗拉强度随回火温度升高而降低。分析了拉伸断口的组织形貌。

关键词 高强度弹簧钢 60Si2CrVAT 热处理 力学性能

Effect of Heat Treatment on Structure and Mechanical Properties of Spring Steel 60Si2CrVAT

Wang Kai, Yin Jiang, Gu Wenjun and Hu Junhui
(Special Steel Branch, Baoshan Iron & Steel Co Ltd, Shanghai 200940)

Abstract The effect of quenching and tempering temperature of Φ21 mm finished products rolled by 160 mm × 160 mm concasting billet of spring steel 60Si2CrVAT quenched at 890 ~ 930 °C and tempered at 400 ~ 440 °C on structure and mechanical properties of steel has been tested. Results showed that the tensile strength of tempered spring steel 60Si2CrVAT quenched at 910 °C was higher than that quenched at 890 °C and 930 °C, and with increasing tempering temperature the tensile strength of steel quenched at different temperature decreased. The structure morphology of tensile fracture was analyzed.

Material Index High Strength Spring Steel 60Si2CrVAT, Heat Treatment, Mechanical Properties

60Si2CrVAT 是使用级别高达 1 900 MPa 的高强度弹簧钢, 具有良好的综合性能, 主要用于制造高载荷、耐冲击弹簧, 如铁路货车转向架旁承弹簧和汽车悬架弹簧等。

1 试验材料

试验用材料为热轧退火态的铁路机车转向架用弹簧钢 60Si2CrVAT, 化学成分如表 1 所示。其生产

流程为 EAF 电弧炉初炼 + LF-VD 精炼 + 160 mm × 160 mm 连铸。热轧为 Φ21 mm 规格后退火。力学性能试样加工采用 GB/T228-2002 标准中的 R4 标准试样。

2 热处理工艺对弹簧钢机械性能的影响

为了得到较高的强度和弹性极限, 弹簧钢的热处理工艺一般采用淬火加中温回火, 热处理最终组

表 1 60Si2CrVAT 弹簧钢的化学成分/%
Table 1 Chemical composition of spring steel 60Si2CrVAT /%

C	Mn	Si	Cr	V	P	S	Cu	Ni	[O]/10 ⁻⁶	[H]/10 ⁻⁶
0.56 ~ 0.64	0.40 ~ 0.70	1.40 ~ 1.80	0.90 ~ 1.20	0.10 ~ 0.20	≤ 0.015	≤ 0.015	≤ 0.20	≤ 0.35	≤ 13	≤ 1.3

织为回火屈氏体。对淬火温度的选择是既要保证充分奥氏体化, 又要保持较细的晶粒^[1], 晶粒细化能显著提高弹簧钢的冲击值^[2]。而对回火工艺的选择应确保获得适当的回火组织^[3]。

由于试验钢 60Si2CrVAT 中含有微合金化元素 V, 在 900 °C 以下较难溶解^[4], 同时, 根据文献^[5]计算的 60Si2CrVAT 回火方程:

$$H = 97 - 0.1471 T + 8.5714 \times 10^{-5} T^2 - (T + 273)$$

$$\times (1.1471 + 1.7143 \times 10^{-4} T) \ln \left[1 + \frac{\lg t}{C} \right]$$

式中: H- 回火硬度(HRC); T- 回火温度/°C; t- 回火时间/h; C- 与钢的成分有关的 Holloman-Jaffe 常数, 一般取 20 左右^[6]。

因此该钢的试验热处理工艺淬火温度选取为 890 ~ 930 °C, 回火温度选取为 400 ~ 440 °C。通过双因子三水平的正交试验设计, 按表 2 所列的热处

表 2 热处理工艺对 60Si2CrVAT 弹簧钢机械性能的影响
Table 2 Effect of heat treatment process on mechanical properties of spring steel 60Si2CrVAT

热处理工艺		R_m /	$R_{p0.2}$ /	A /	Z /	硬度值
淬火/°C	回火/°C	MPa	MPa	%	%	(HB)
890	400	2 080	1 980	8	32	522
890	420	1 980	1 870	9	35(b)	492
890	440	1 860	1 760	9	28	451
910	400	2 220	2 110	7	27(a)	573
910	420	2 140	2 050	8	32	538
910	440	2 080	1 950	10	30	507
930	400	1 940	1 810	10	31.5	464
930	420	1 840	1 730	7	36.5	451
930	440	1 820	1 700	11.5	28	426

理工艺参数进行处理后,按 GB/T228-2002 标准中的 R4 标准试样加工力学性能试样后送检,实测机械性能结果如表 2 所示。

当淬火温度低于 900 °C 时,由于微合金元素 V 没有充分溶解,抗拉强度较低;当淬火温度为 930 °C 时,淬火到室温后的组织中残余奥氏体的含量较低,其过冷奥氏体稳定性不高,淬火冷却到室温,马氏体转变较完全^[7]。由表 2 和图 1 可见,60Si2CrVAT 弹簧钢 910 °C 淬火的抗拉强度高于 890 °C 和 930 °C 淬火后钢的抗拉强度。

由图 1 可见,60Si2CrVAT 弹簧钢在 400 ~ 440 °C 回火时,抗拉强度随回火温度的提高而降低。

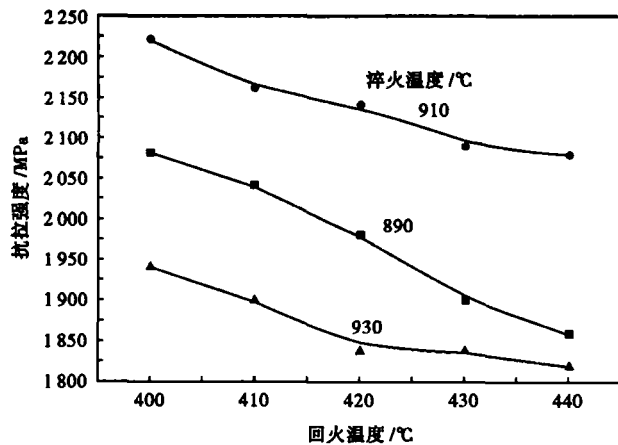


图 1 回火温度对 60Si2CrVAT 钢强度的影响

Fig. 1 Tempering temperature on tensile strength of spring steel 60Si2CrVAT

3 组织对弹簧钢机械性能的影响

60Si2CrVAT 弹簧钢热轧态机械性能为: R_m -1 150 MPa, $R_{p0.2}$ - 770 MPa, A - 17.0%, Z - 45.5%。热轧退火态机械性能为: R_m - 810 MPa, $R_{p0.2}$ - 490 MPa, A - 23.5%, Z - 51.0%。

图 2 为不同热处理工艺条件下的 60Si2CrVAT

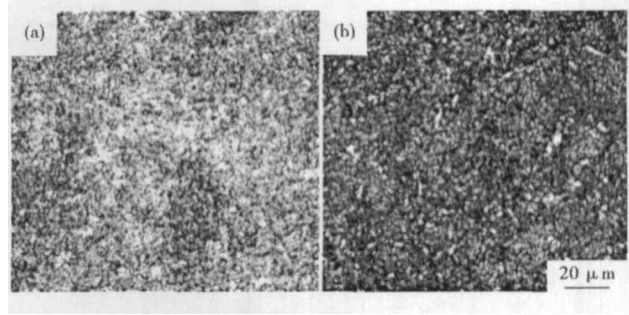


图 2 60Si2CrVAT 弹簧钢不同热处理状态下的组织形貌:
(a) 高强度状态(910 °C 30 min 油冷 + 400 °C 60 min 水冷);
(b) 高塑性状态(890 °C 30 min 油冷 + 420 °C 90 min 水冷)

Fig. 2 Morphology of structure of spring steel 60Si2CrVAT with different heat treatment status: (a) high strength status (910 °C 30 min, oil cooling + 400 °C 60 min, water cooling); (b) high plasticity status (890 °C 30 min, oil cooling + 420 °C 90 min, water cooling)

弹簧钢的组织照片。图 2(a) 为高强度状态下(试样 a)的组织图片,其机械性能为: R_m - 2 220 MPa, $R_{p0.2}$ - 2 110 MPa, A - 7.0%, Z - 27.0%; 图 2(b) 为高塑性状态下(试样 b)的组织图片,其机械性能为: R_m - 1 980 MPa, $R_{p0.2}$ - 1 870 MPa, A - 9.0%, Z - 35.0%。

图 2(a) 为淬火充分而回火不足条件下的组织,其强度较高而塑性较低,组织为回火屈氏体与极少量的铁素体,且晶界处弥散分布着大量未溶的碳化物。由于回火不足,造成其组织、成分的不均匀,这也是影响材料塑性的主要因素;图 2(b) 为淬火不足而回火充分条件下的组织,其强度较低而塑性较高,组织为细致的回火屈氏体,由于淬火温度较低,部分微合金化元素未能充分溶解,分布于晶界,易导致材料的脆性断裂。

4 不同机械性能下的弹簧钢拉伸断口分析

对拉伸试样的断口进行分析,发现断口形貌呈现不同的特征。正常情况下裂纹源位于断口中央,此时的塑性值一般较好;而有时则会出现裂纹源不在断口中央的异常断口,此时的塑性值一般很低。

正常断口外形一般呈“杯锥状”。如图 3(a) 所示,裂纹源位于断口中央,且断口区域通常分为 3 个部分,即中央的纤维区(I)、过渡的芒星区(II)以及周边的剪切唇(III)。

而异常断口裂纹源不在断口中央,而是处于断口的偏心位置或接近试样表面,大部分试样的裂纹源位于疏松点处,在纵向为疏松流线位置。此外,试样在轴心区域之外存在白点、夹杂、气泡、缩孔等缺陷,也会直接影响裂纹的萌生和扩展方式,从而影响试样的断口特征^[8]。

从断裂机理的分析可以看出,不同的断裂形式

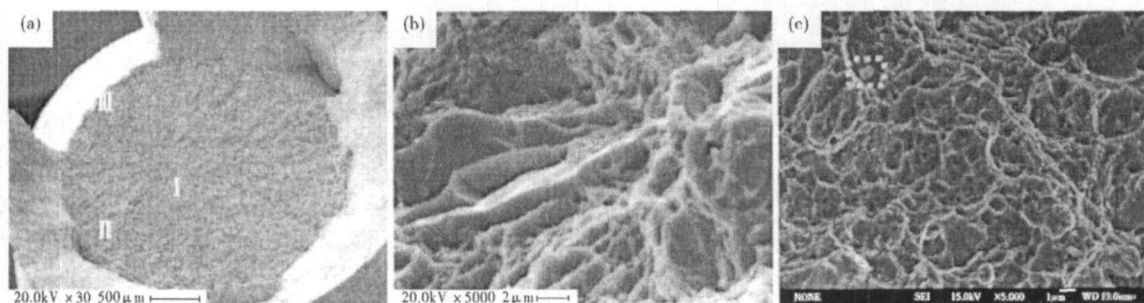


图 3 60Si2CrVAT 弹簧钢典型断口全貌(a),脆性断口(b)和韧性断口(c)形貌,SEM

Fig. 3 Morphology of typical whole fracture (a), brittle fracture (b) and toughness fracture (c) of spring steel 60Si2CrVAT, SEM

其断口形貌也大不相同。如图 3(b)为试样 a 的断口形貌,为高强度拉伸试样典型脆性断口。由图 3(b)可见,由于回火温度较低,晶界处可能有未溶的碳化物,所以晶界很脆,其断裂形式一般为回火不足造成的沿晶断裂,由于低熔点有害元素偏聚于晶界,产生沿晶断裂。图 3(c)为试样 b 的断口形貌,为高塑性拉伸试样典型韧性断口。由图 3(b)、(c)可见,断口形貌中分布了大量的等轴韧窝,这正是材料良好塑性的重要保证。

此外,断裂的裂纹源一般为缩颈截面中心区域的显微裂纹、夹杂物或析出物等。对等轴韧窝的微观图象分析表明,每个等轴韧窝中存在非金属夹杂(如硫化锰)。

可见,较大较深的等轴韧窝是金属材料具有良好塑性的断口特征。高强高韧的弹簧钢拉伸试样断口应具备此特征。

5 结论

(1) 铁路弹簧用钢 60Si2CrVAT 的抗拉强度在 890 ~ 910 °C 之间随淬火温度的提高而增加,在 910 ~ 930 °C 之间随淬火温度的提高而减少,而在 400 ~ 440 °C 回火时抗拉强度随回火温度的提高而降低。

(2) 典型 60Si2CrVAT 钢拉伸试样断口的裂纹源,一般为缩颈截面中心区域的显微裂纹、夹杂物或析出物等,较大较深的等轴韧窝是金属良好塑性的重要保证。

参考文献

- 1 Akio Yoneguchi, Jeffere Schaad, Yutaka Kurebayashi, et al. Development of High Strength Spring Steel and Its Application to Automotive Coil Spring. 2000 Society of Automotive Engineers. Inc:10
- 2 Barani A A, Ponge D, Raabe D. Refinement of Grain Boundary Carbides in a Si-Cr Spring Steel by Thermomechanical Treatment. Materials Science and Engineering A426, 2006:194
- 3 徐德祥,尹钟大. 热处理工艺对弹簧钢组织和性能的影响. 特殊钢, 2003, 24(6):1
- 4 高惠菊. 合金弹簧钢 60Si2CrVA 的等温转变及连续冷却转变. 特殊钢, 2003, 24(6):23
- 5 宛 农, 雷应华. 60Si2CrVA 弹簧钢回火特性的模拟和分析. 机车车辆工艺, 2004, 8(4):1
- 6 Karl-Erik Thelning. Steel and Its Heat Treatment - 2nd ed. London: Printed in Great Britain by Mackays of Chatham Ltd, 1984:288
- 7 Book C R. Principles of the Heat Treatment of Plain Carbon and Low Alloy Steels. Ohio: ASM International, 1996:307
- 8 唐忠云. 60Si2CrVA 弹簧钢拉伸试样断口分析. 机车车辆工艺, 2002, 2(1):9

王 凯(1979-),男,工程师,2005 年哈尔滨工业大学毕业,钢铁工艺设计及研究。

收稿日期:2007-05-18

· 特殊钢信息 ·

《特殊钢》的 h 指数位居同类专业期刊前列

期刊在一定时间内发表的论文中,至少有 h 篇论文在某一特定时间内的被引频次不低于 h 次,而其余论文的被引频次又不大于 h 次时,这一 h 值就称为期刊的 h 指数。它是由美国科学家赫希(Hirsch J E)于 2005 年 8 月提出的一项新的文献计量指标,不但可用于评价论文作者的个人成就,也可用于对一个群体(如期刊、学科、科研机构等)的评价。成为评价期刊论文质量和数量的一项新的指标。

清华大学中国科学文献计量评价研究中心等单位对 2005 年全国公开发行的 6331 种专业期刊的有关资料进行收集统计后,于 2006 年 11 月由科学出版社公开出版了《中

国学术期刊综合引证报告(2006 版)》,公布了《特殊钢》杂志 2001 ~ 2003 年的载文量在 2001 ~ 2005 年的被引频次符合上述含义的 h 值为 6,这项指数在与《特殊钢》2005 年同居于“黑色金属”类杂志 20 种专业期刊中排名第 4 而位居前列。《特殊钢》2006 年 h 指数(CN)提高至 7。

期刊的 h 指数是对总被引频次、影响因子等传统的计量指标的很好补充和发展,也是对期刊整体评价与论文评价相结合的一种探索、实践和创新。目前已得到国内外文献情报界专家和同行的广泛关注、重视和认可。

(范文田)