

## 紧固件用 SA-540 合金钢的强韧化工艺研究

王兆英<sup>1,2,3</sup>, 吴畏<sup>1,2,3</sup>, 赵振<sup>1,2,3</sup>, 罗文韬<sup>1,3</sup>, 宋金辉<sup>1,3</sup>, 喻峰<sup>1,3</sup>

(1 重庆材料研究院有限公司, 重庆 400707; 2 国家仪表功能材料工程技术研究中心, 重庆 400707; 3 耐腐蚀合金重庆市重点实验室, 重庆 400707)

**摘要:**通过成分优化( $\% : 0.35 \sim 0.46\text{C}, 0.6 \sim 1.0\text{Cr}, 1.50 \sim 2.05\text{Ni}, 0.18 \sim 0.32\text{Mo}, 0.1\text{V}$ )、冶炼工艺(3 t VIM + ESR)以及热处理工艺(再次热处理工艺:  $850^\circ\text{C}$  2 h 水冷 +  $590^\circ\text{C}$  5 h 水冷)的合理制定, 获得了满足指标要求的紧固件用高强高韧 SA-540 合金钢材料。结果表明, 为确保 SA-540 合金钢高温  $300^\circ\text{C}$  规定塑性延伸强度  $R_{p0.2} \geq 860$  MPa, 室温抗拉强度应控制在  $1150 \sim 1170$  MPa, 仅有 20 MPa 的强度范围。对于经  $850^\circ\text{C}$  2 h 淬火/水冷 +  $560^\circ\text{C}$  5 h 回火/水冷调质处理后室温抗拉强度超标的紧固件, 可再次通过重新淬火并提高回火热处理温度 ( $850^\circ\text{C}$  2 h 淬火/水冷 +  $590^\circ\text{C}$  5 h 回火/水冷) 使合金钢拉伸性能满足指标要求。SA-540 合金钢淬火后随回火的温度升高, 呈现抗拉强度和屈服强度下降、伸长率和断面收缩率增加的变化趋势。添加 0.1% V 的 SA-540 合金钢, 可明显提高合金钢的强度和塑性指标, 但低温冲击性能降低明显。

**关键词:** SA-540 合金钢; 紧固件; 热处理; 拉伸性能

## Strengthening and Toughening of SA-540 Alloy Steel for Fasteners

Wang Zhaoying<sup>1,2,3</sup>, Wu Wei<sup>1,2,3</sup>, Zhao Zhen<sup>1,2,3</sup>, Luo Wentao<sup>1,3</sup>, Song Jinhui<sup>1,3</sup>, Yu Feng<sup>1,3</sup>

(1 Chongqing Materials Research Institute Co., Ltd., Chongqing 400707;

2 National Engineering Research Center for Instrument Functional Materials, Chongqing 400707;

3 Chongqing Key Laboratory of Corrosion-resistant Alloys, Chongqing 400707)

**Abstract:** In this paper, the SA-540 high strength and high toughness steel for fasteners is obtained by the optimization of composition ( $\% : 0.35 \sim 0.46\text{C}, 0.6 \sim 1.0\text{Cr}, 1.50 \sim 2.05\text{Ni}, 0.18 \sim 0.32\text{Mo}, 0.1\text{V}$ ), the reasonable formulation of smelting process (3 t VIM + ESR) and heat treatment process (re-heat treated at  $850^\circ\text{C}$  for 2 h water cooling +  $590^\circ\text{C}$  for 5 h water cooling). The results show that in order to ensure the specified plastic elongation strength  $R_{p0.2} \geq 860$  MPa of SA-540 steel at  $300^\circ\text{C}$ , the tensile strength at room temperature should be controlled in the range of  $1150 \sim 1170$  MPa, with only a strength window of 20 MPa. For the materials whose tensile strength at room temperature exceeds the standard after quenching at  $850^\circ\text{C}$  for 2 h/water cooling + tempering at  $560^\circ\text{C}$  for 5h/water cooling, the tensile properties of the alloy steel can meet the index requirements by reheating and quenching at  $850^\circ\text{C}$  for 2 h/water cooling + tempering at  $590^\circ\text{C}$  5 h/water cooling. With the increase of tempering temperature after quenching, the tensile strength and yield strength of SA-540 steel decrease, and the elongation and reduction of area of steel increase. Adding 0.1% vanadium to SA-540 steel can obviously improve the strength and plasticity of steel, but the low-temperature impact property decreases significantly.

**Key Words:** SA-540 Alloy Steel; Fastener; Heat Treatment; Tensile Properties

工业上广泛应用的紧固件其品种规格繁多, 性能用途各异, 是工业各行业中不可或缺的一种门类<sup>[1-3]</sup>。在新材料选用方面, 高强合金结构钢以其优异强韧性和低成本等特点得到广泛应用, 主要用于航空领域关键承力部件及各类紧固件。然而, 我国紧固件行业在设计、制造以及使用方面仍存在创新不足等问题, 与国外紧固件同行技术水平相比差距较大<sup>[4,5]</sup>。随着结构钢材的广泛应用, 其工作环境的日益复杂, 对钢材设计提出了更高的要求, 如延长钢

材的使用寿命, 节约成本, 以便更好的走在市场前沿。高强度化始终是钢的发展主题, 但同时还需要解决高强度化后导致的韧塑性降低等问题, 因此, 控制钢的强韧化是钢材生产中重要的一环<sup>[6]</sup>。钢材的强韧性能包括强度(屈服强度  $R_{p0.2}$  和抗拉强度  $R_m$ )、塑性(延伸率  $A$  和断面收缩率  $Z$ )和韧性(脆性转变温度  $T_c$  和冲击功  $A_k$ ), 它们之间互相牵连又相互矛盾, 很难使其中的某一项性能单独地发生变化。一般来说, 钢的强度和韧性主要通过提高钢的洁净

度,细化晶粒等方法来改善。

SA-540 材料是一种高强合金钢,含有 Cr、Mo、Ni 等合金元素,淬透性较好,常在调质状态下(淬火+高温回火)使用<sup>[7-8]</sup>。调质处理可以在保持其他力学性能变化不大的情况下,获得一定的强度和韧性。钢中通过添加 Nb、V、Ti 等合金元素可大幅改善钢的力学性能和使用特性,它们的基本作用是固溶、偏聚和沉淀,带来的有益效果包括细化晶粒、析出强化相等,从而提高合金的综合性能<sup>[9-13]</sup>。同时,在冶炼以及后续加工过程中,不可避免也会产生一些缺陷,诸如冶炼过程的气泡、夹渣,冷热变形加工的带状组织,以及热处理不当造成脱碳、过热或过烧等都会影响材料力学性能<sup>[14-15]</sup>。

本文针对紧固件用材料 SA-540 合金钢,从成分优化设计、冶炼方法、热处理工艺等方面对材料的强化工艺进行了研究,旨在为紧固件用材料 SA-540

钢在后续生产过程提供数据和工艺指导,同时为使用该材料设计和制造紧固件提供参考。

## 1 实验材料与方法

### 1.1 实验材料

实验材料为紧固件用 SA-540 合金钢,为考虑成分设计优化,在原合金钢成分的基础上添加了 0.1% V,成分要求如表 1 所示。合金钢采用真空感应熔炼炉(VIM)+电渣重熔(ESR)的双联冶炼工艺。采用 3 t 真空感应熔炼炉进行熔炼,末期真空度优于 20 Pa,搅拌时间不少于 30 min。电渣渣系为 70% CaF<sub>2</sub>-20% CaO-10% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 三元渣系,渣的碱度 3.5。冶炼完成后钢锭的直径为  $\Phi 600$  mm  $\times$  L(mm)。冶炼完毕后的成分分析按照 ASTM A751-2001 执行。钢锭采用 25MN 快锻机锻造,轧制成圆钢,设计圆钢的规格为  $\Phi 200^{+20}$   $\times$  L(mm),总锻造比为 6。

表 1 SA-540 合金钢优化前后设计成分/%

Table 1 Design chemical composition of SA-540 alloy steel before and after optimization/%

工艺	C	Si	P	S	Mn	Cr	Ni	Mo	V	Fe
优化前	0.35~0.46	0.13~0.37	≤0.025	≤0.025	0.56~0.99	0.60~1.00	1.50~2.05	0.18~0.32	-	Bal.
优化后	0.35~0.46	0.13~0.37	≤0.025	≤0.025	0.56~0.99	0.60~1.00	1.50~2.05	0.18~0.32	0.1	Bal.

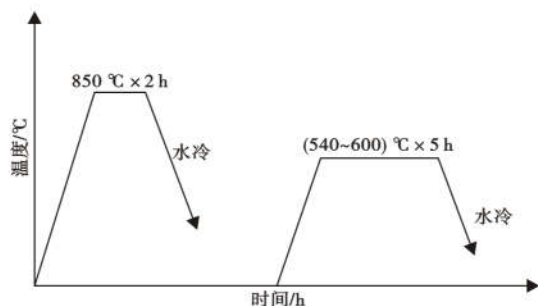


图 1 SA-540 钢热处理工艺

Fig. 1 Heat treatment process of SA-540 steel

### 1.2 实验方法

本实验用试样取自热处理后的材料本体上,试样的纵轴位于材料本体厚度中点与表面间的中点,通过线切割方法加工,拉伸试样尺寸为  $\Phi 20$  mm  $\times$  125 mm,冲击试样尺寸为 10.4 mm  $\times$  10.4 mm  $\times$  55 mm,金相试样尺寸为 10.4 mm  $\times$  10.4 mm  $\times$  12 mm。冲击试样采用 ASTM A370 图 11A 型, V 型缺口,顺轧制方向开槽口。合金钢 SA-540 淬火工艺为:850 °C 2 h/水冷,然后分别采用不同的回火工艺,具体热处理工艺如图 1。热处理设备采用台车式电阻加热炉,温度偏差不得超过  $\pm 8$  °C,将热电偶安装在棒料上直接控制热处理材料的温度,保证热处

理效果。室温和 300 °C 拉伸试验在 Zwick Z250 电子万能试验机上进行,低温冲击试验在 ZBC2302 液晶全自动摆锤冲击试验机上进行。金相试样经科林二号试剂腐蚀后,在 OLYMPUS-GX51 金相显微镜上观察微观组织形貌,晶粒度观察面为纵向。力学性能试验均取 3 个试样进行 3 次重复试验,并对试验结果求取平均值。非金属夹杂物和晶粒度分别按 ASTM E45 中的方法 A、ASTM E112 进行评定,每批均取一件,观察面为纵向。

## 2 结果及分析

### 2.1 化学成分

汇总实际生产 4 个熔炼炉号的材料化学成分见表 2 所示。其结果完全符合材料成分要求,且各炉材料成分波动较小、一致性较好,这得益于合金钢成分设计合理以及冶炼工艺参数选取合理并正确实施。实验用不含 V 和含 V 材料分别取自炉号为 B 和 C。

### 2.2 非金属夹杂物及晶粒度

钢中非金属夹杂物的性质、形态、分布、尺寸及含量不同,对钢性能的影响也不同。所以提高材料的质量,生产出洁净钢,控制非金属夹杂物性质和形

表 2 试验 SA-540 钢化学成分/%  
Table 2 Chemical composition of test SA-540 steels/%

炉号	C	Si	P	S	Mn	Cr	Ni	Mo	V	Fe
A	0.40	0.26	0.009 0	0.002 0	0.84	0.86	1.89	0.26	-	Bal.
B	0.43	0.28	0.008 4	0.002 1	0.81	0.88	1.94	0.27	-	Bal.
C	0.41	0.28	0.007 9	0.001 9	0.93	0.92	1.94	0.27	0.10	Bal.
D	0.43	0.30	0.006 7	0.002 2	0.82	0.87	1.96	0.28	0.10	Bal.

态、数量分布,是冶炼过程中的一项艰巨任务。各炉号 SA-540 合金钢非金属夹杂物及晶粒度检测结果见表 3。可以看到,各批次合金钢材料非金属夹杂物及铁素体晶粒度均满足指标要求,这得益于冶炼

方法及工艺参数制定合理以及后续热处理制度的合理制定。添加合金元素 V 后,晶粒细化,这是由于回火过程中产生的弥散分布的碳氮化物可以阻止铁素体晶粒长大<sup>[11]</sup>。

表 3 SA-540 钢非金属夹杂物和晶粒度检测结果/级  
Table 3 Test results of non-metallic inclusions and grain size of SA-540 steel/rating

炉号	晶粒度	A 类		B 类		C 类		D 类	
		粗系	细系	粗系	细系	粗系	细系	粗系	细系
指标要求	5 级或更细	≤1.5	≤1.5	≤1.5	≤1.5	≤1.5	≤1.5	≤1.5	≤1.5
A	7.0	0	0	0	0	0	0	0	1.0
B	7.5	0	0	0	0	0	0	0	1.5
C	8.0	0	0	0	0	0	0	0	1.0
D	8.0	0	0	0	0	0	0	0	1.0

2.3 拉伸性能

拉伸试验经 850℃ 2 h 淬火/水冷 + 560℃ 5 h 回火/水冷热处理后,室温和 300℃ 高温拉伸性能分别见表 4 和表 5。由表 4 可知,紧固件-23 件批次和紧固件-74 件批次两组室温抗拉强度超过上限 1 170 MPa,分别为 1 210 MPa 和 1 180 MPa(表 4 标★数据),其他批次均满足指标要求。高温拉伸性能均满足指标要求。两组室温抗拉强度超限批次对应的显微组织如图 2 所示。可以看到,组织均为回

火索氏体,两者无明显差异,这说明制定的热处理工艺整体上是合理的,只需要对个别批次因成分的差异做适当调整即可。

由表 4 和表 5 的检测数据可以看出,当室温抗拉强度为 1 150 MPa 时,对应的 300℃ 规定塑性延伸强度在 868 ~ 869 MPa,超标准 8 ~ 9 MPa,所以为了确保 300℃ 规定塑性延伸强度  $R_{p0.2} \geq 860$  MPa,其室温抗拉强度应不低于 1 150 MPa。因指标要求的抗拉强度控制在 1 070 ~ 1 170 MPa,其上下限相

表 4 SA-540 钢室温拉伸性能  
Table 4 Room temperature tensile properties of SA-540 steel

检测批次	规定塑性延伸强度( $R_{p0.2}$ )/MPa	抗拉强度( $R_m$ )/MPa	断后伸长率(A)/%	断面收缩率(Z)/%
指标要求	≥965	1 070 ~ 1 170	≥11	≥40
紧固件-42 件批	1 040	1 165	17	55
紧固件-23 件批	1 120	1 210★	17	56
紧固件-77 件批	1 030	1 150	17	52
紧固件-73 件批	1 030	1 150	17	55
紧固件-13 件批	1 030	1 150	17	52
紧固件-74 件批	1 060	1 180★	16	54

表 5 SA-540 钢 300℃ 高温拉伸性能  
Table 5 High temperature tensile properties of SA-540 steel at 300℃

检测批次	规定塑性延伸强度( $R_{p0.2}$ )/MPa	抗拉强度( $R_m$ )/MPa	断后伸长率(A)/%	断面收缩率(Z)/%
指标要求	≥860	≥960	实测	实测
紧固件-42 件批	960	1 145	18	59
紧固件-23 件批	966	1 130	19	60
紧固件-77 件批	868	1 102	22	73
紧固件-73 件批	869	1 104	21	72
紧固件-13 件批	868	1 102	22	73
紧固件-74 件批	896	1 120	23.5	74.5

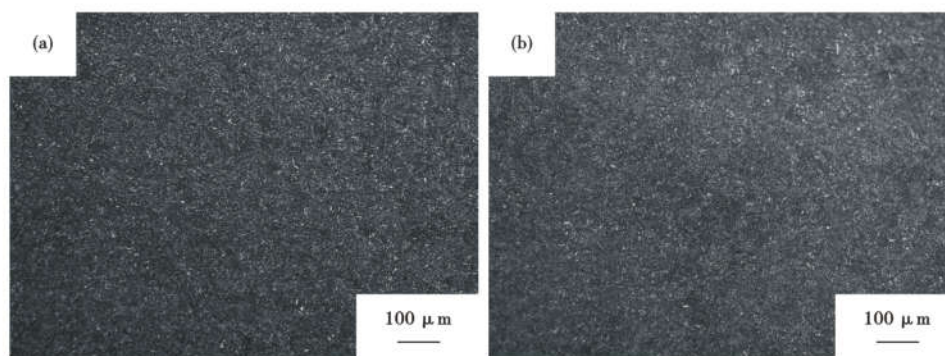


图 2 SA-540 钢热处理组织(850 ℃ 2 h 淬火/水冷 + 560 ℃ 5 h 回火/水冷)(a) 紧固件-23 件批次; (b) 紧固件-74 件批次  
 Fig.2 Heat treatment structure of SA-540 steel (850 ℃ 2 h quenching, water cooling + 560 ℃ 5 h tempering, water cooling) (a) Fasteners-23 piece batch; (b) Fasteners-74 piece batch

差 100 MPa 的范围。但从实际检测结果来看,上下限之差仅 20 MPa(1 150 ~ 1 170 MPa),技术要求苛刻,生产难度相当之大,这一技术难题在研究同一材料的其他文献中也有报道<sup>[16]</sup>。

针对 SA-540 钢有两组抗拉强度超过上限批次材料,通过补充回火热处理:560 ℃ 3 h 回火,水冷(记为:热处理工艺①);重新淬火并提高回火热处

理温度:850 ℃ 2 h 淬火/水冷 + 590 ℃ 5 h 回火/水冷(记为:热处理工艺②)。两组紧固件 23 件批和紧固件 74 件批重新热处理后的显微组织如图 3 所示。可以看到,与热处理前的组织相比,补充回火后碳化物颗粒明显地发生了聚集长大,而重新淬火并提高回火温度对应的组织明显优于补充回火组织,碳化物尺寸更小,分散度更高。

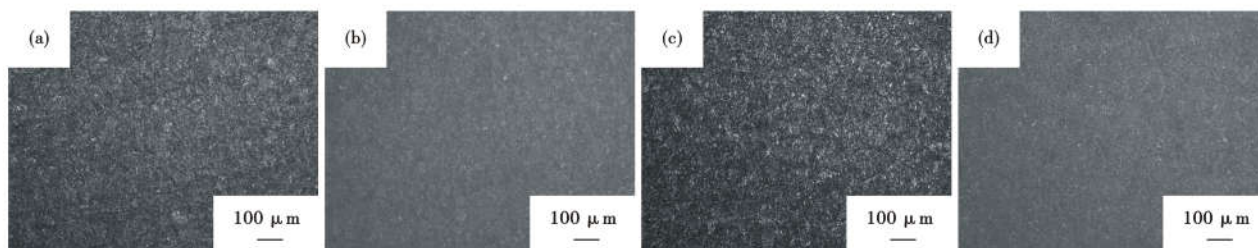


图 3 SA-540 钢补充热处理组织:(a)(c) 补充回火 560 ℃ 3 h,水冷①; (b)(d) 二次热处理 850 ℃ 2 h,水冷 + 590 ℃ 5 h,水冷②; (a)(b) 紧固件 23 件批次; (c)(d) 紧固件 74 件批次  
 Fig.3 Microstructure of SA-540 steel after reheat treatment: (a)(c) additional temper at 560℃ for 3 h water cooling ①; (b)(d) supplementary heat treatment at 850 ℃ for 2 h water cooling + temper at 590 ℃ for 5 h water cooling ②; (a)(b) Fasteners-23 piece batch; (c)(d) Fasteners-74 piece batch

重新热处理后室温和拉伸试验结果见表 6 和表 7。可以看到,采取热处理方案①重新回火后,对于紧固件 23 件批,室温强度和塑性无变化,室温抗拉强度仍高于指标值(表 6 标★数据),说明重新回火温度偏低或保温时间较短;而高温强度降低,塑性指标提高;对于紧固件 74 件批,高温下呈现出强度降低、塑性变化不明显的趋势,而高温规定塑性延伸强度 854 MPa 低于指标不小于 860 MPa 要求(表 7 标★数据)。采取热处理方案②重新淬火并提高回火热处理温度后,对于紧固件 23 件批次,室温和高温均呈现出强度降低、塑性提高的趋势;对于紧固件 74 件批,室温和高温均呈现强度降低,室温塑性变化不明显,高温塑性降低的趋势。中碳低合金钢淬

火后在 500 ~ 600 ℃ 回火过程中,由于铁素体相发生回复过程、碳化物聚集粗化,使合金钢呈现强度降低、塑性提高的变化趋势<sup>[17]</sup>。结合本次两种热处理工艺组织和拉伸性能数据,可以看到,热处理工艺②重新淬火,并提高回火热处理温度带来的效果明显优于热处理工艺①重新回火热处理。

图 4 为回火温度及合金元素钒对淬火后(850 ℃ 2 h 淬火/水冷)合金钢 SA-540 室温力学性能的影响。可以看到,不添加 V 的材料随着回火温度的升高,抗拉强度和屈服强度逐渐下降,其中在 540 ℃ 时抗拉强度和屈服强度达到最大值,分别为 1 240 MPa、1 160 MPa;而伸长率和断面收缩率变化与之相反,二者随回火温度的升高逐渐提升,在

表 6 SA-540 钢合金补充热处理后室温拉伸性能  
Table 6 Room temperature tensile properties of SA-540 steel after supplementary heat treatment

检测批次	规定塑性延伸强度 ( $R_{p0.2}$ )/MPa	抗拉强度 ( $R_m$ )/MPa	断后伸长率 ( $A$ )/%	断面收缩率 ( $Z$ )/%
指标要求	$\geq 965$	1 070 ~ 1 170	$\geq 11$	$\geq 40$
紧固件-23 件批重①	1 120	1 210*	17	56
紧固件-23 件批重②	1 030	1 120	19	59
紧固件-74 件批重①	-	-	-	-
紧固件-74 件批重②	1 020	1 150	17	52

表 7 SA-540 钢补充热处理后 300 °C 拉伸性能  
Table 7 300 °C tensile properties of SA-540 steel after supplementary heat treatment

检测批次	规定塑性延伸强度 ( $R_{p0.2}$ )/MPa	抗拉强度 ( $R_m$ )/MPa	断后伸长率 ( $A$ )/%	断面收缩率 ( $Z$ )/%
指标要求	$\geq 860$	$\geq 960$	实测	实测
紧固件-23 件批重①	871.5	1 046.5	21	74.5
紧固件-23 件批重②	864.5	1 029	20.5	70
紧固件-74 件批重①	854*	1 071	22.5	76.5
紧固件-74 件批重②	871.5	1 074.5	21.5	77

600 °C 达到最大值, 分别为 17.5% 和 60%。合金添加 V 元素后, 在 540 ~ 600 °C 回火可明显提高材料的抗拉强度和屈服强度。540 °C 回火时抗拉强度由 1 240 MPa 提高至 1 308 MPa, 屈服强度由 1 160 MPa 提高至 1 188 MPa; 600 °C 回火时抗拉强度由 1 046 MPa 提高至 1 058 MPa, 屈服强度由 952 MPa 提高至 958 MPa。这是由于 V 元素为强碳化物形成

元素, 添加 0.1% V 后, 可提高合金的强度。同时注意到加入 V 后合金钢的强度和塑性变化规律同不含 V 一致, 强度均随回火温度的升高呈现降低的趋势, 伸长率和断面收缩率随回火温度的升高呈现增加的趋势。因此, 在实际生产中, 当合金钢强度较高时, 可以通过适当提升回火温度的方法降低强度, 以满足工件的使用要求。

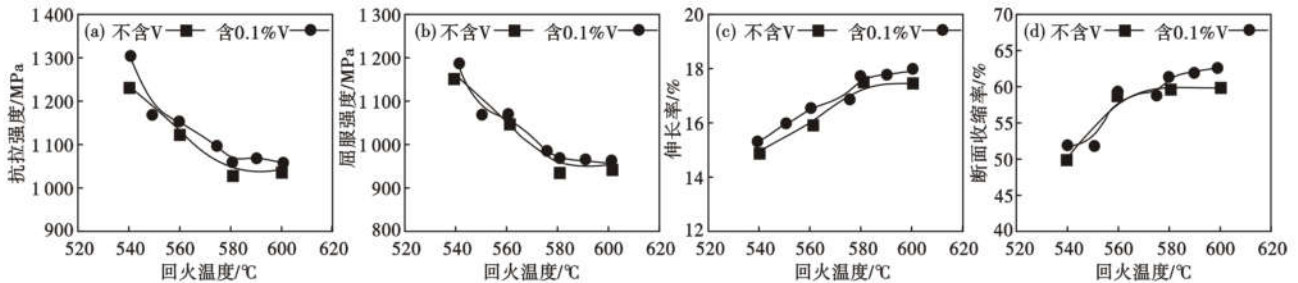


图 4 回火温度及合金元素钒 V 对淬火后 SA-540 合金钢室温拉伸性能的影响: (a) 抗拉强度, (b) 屈服强度, (c) 伸长率和 (d) 断面收缩率

Fig. 4 Effects of tempering temperature and alloying element vanadium V on room temperature tensile properties of SA-540 steel: (a) tensile strength, (b) yield strength, (c) elongation and (d) reduction of area

### 2.4 冲击韧性

材料经 850 °C 2h 淬火/水冷, 在 540 ~ 600 °C 分别回火 5 h 后, 低温冲击试验结果见表 8。可以看到, 对于不含 V 的试样, 测试温度在 -15 °C 和 -20 °C 下, 所有指标均满足要求, 冲击吸收能量较好, 侧膨胀值随回火温度升高而增加, 符合紧固件的安全要求。此外, 可以观察到 V 元素的加入大幅度降低了 SA-540 钢在 -15 °C 和 -20 °C 低温冲击试验的冲击吸收功, 该结论与文献[9]报道一致。回火温度为 560 °C 时, -15 °C 试验温度下吸收功由 92.7 J 降低至 37.3 J, -20 °C 试验温度下吸收功由 92.7 J 降低至 41.3 J; 回火温度为 600 °C 时, -15 °C 试验

温度下吸收功由 125.0 J 降低至 36.7 J, -20 °C 试验温度下吸收功由 114.3 J 降低至 32.3 J。由于 V 的沉淀强化和固溶强化作用, 提高了合金钢的强度 (如图 4), 必然会以降低韧性作为补偿。

### 3 结论

(1) 通过成分设计、冶炼工艺以及热处理工艺的合理制定与精细化实施, 实现了 SA-540 钢的各项理化指标, 包括成分、非金属夹杂物、晶粒度、室温和 300 °C 的拉伸性能、低温冲击 (-15 °C 和 -20 °C) 韧性等均满足指标要求。

(2) 规范中要求 SA-540 钢的室温抗拉强度为

表 8 SA-540 钢冲击性能检测结果  
Table 8 SA-540 steel impact performance test results

回火温度/℃	试验温度/℃	吸收功/J		夏比 Cv 冲击侧膨胀值/mm		纤维断面率/%	
		测试值	平均值	测试值	平均值	测试值	平均值
指标要求		平均: ≥41; 个别 ≥34 <sup>[注]</sup>		实测		实测	
540	-15 ℃	53/55/62	56.7	0.6/0.48/0.58		100/100/100	100
	-20 ℃	50/54/52	52.0	0.37/0.42/0.54		100/100/100	100
560	-15 ℃	92/96/90	92.7	0.78/0.89/0.80		100/100/100	100
	-20 ℃	94/88/96	92.7	0.81/1.08/0.88		100/100/100	100
580	-15 ℃	98/100/104	100.7	1.11/1.03/1.28		100/100/100	100
	-20 ℃	110/100/102	104.0	0.94/1.10/1.08		100/100/100	100
600	-15 ℃	118/145/112	125.0	1.16/1.41/1.14		100/100/100	100
	-20 ℃	114/113/116	114.3	1.26/1.03/1.26		100/100/100	100
V-560	-15 ℃	33/42/37	37.3	0.45/0.36/0.22		100/100/100	100
	-20 ℃	38/42/44	41.3	0.33/0.32/0.48		100/100/100	100
V-600	-15 ℃	36/36/38	36.7	0.37/0.39/0.21		100/100/100	100
	-20 ℃	32/32/33	32.3	0.34/0.22/0.39		100/100/100	100

注: 一组(三个)试样中只允许有一个试样的吸收能量低于 41J, 但不低于 34J。

1 070 ~ 1 170 MPa, 上下限之间相差 100 MPa, 研究发现, 要确保高温 300 ℃ 规定塑性延伸强度  $R_{p0.2} \geq 860$  MPa, 实际的室温抗拉强度应控制在 1 150 ~ 1 170 MPa, 仅相差 20 MPa, 这对合金钢的生产各个环节提出了严格要求, 需精细化控制。

(3) 合金钢 SA-540 经 850 ℃ 2 h 淬火/水冷 + 560 ℃ 5 h 回火/水冷调质处理后, 仍有个别批次室温抗拉强度数值超标, 可通过重新淬火并提高回火

热处理温度的方案使拉伸性能满足指标要求, 热处理工艺为: 850 ℃ 2 h 淬火/水冷 + 590 ℃ 5 h 回火/水冷。

(4) 合金钢 SA-540 无论是否加 V, 室温拉伸强度均随回火温度升高而降低、塑性增加。添加 0.1% V 元素可明显提高合金的室温抗拉强度和屈服强度, 伸长率和断面收缩率也略有提升, 但低温冲击性能降低明显。

#### 参考文献

- [1] 李战卫, 于学森, 沈奎, 等. 高强度汽车紧固件用钢 SCr440 连续冷却和等温冷却组织转变研究及应用[J]. 特殊钢, 2022, 43(2): 90-94.
- [2] 孙淑玲, 王琦. 航空航天螺纹紧固件失效模式及预防[J]. 航空标准化与质量, 2022, 311(1): 39-43.
- [3] 纪翔, 张汛涛, 宋先捷, 等. 不同热处理后航空紧固件用 17-4PH 钢耐腐蚀性及硬度的研究[J]. 热加工工艺, 2022, 50(20): 130-136.
- [4] 苗生沛, 张辉. 航空发动机用紧固件现状分析[J]. 科技创新与应用, 2022, 12(9): 95-98.
- [5] 李英亮, 李月, 何文军, 等. 国内高端紧固件标准的不足与改进思路[J]. 航天标准化, 2019(3): 39-41.
- [6] 董瀚, 廉心桐, 胡春东, 等. 钢的高性能化理论与技术进展[J]. 金属学报, 2020, 56(4): 558-582.
- [7] 万积俊. 核用电大规格 SA-540 B23 材料特性研究[J]. 铸造工程, 2021, 45(6): 9-13.
- [8] 郑兴文. SA540 钢螺丝螺母热处理工艺[J]. 热处理, 1999, 53(1): 24-26.
- [9] 童明伟, 袁泽喜, 张开广, 等. 不同工艺条件下钒对微合金钢组织与性能的影响[J]. 金属热处理, 2010, 35(11): 45-49.
- [10] 沈奎, 江卓俊, 于学森, 等. 微合金化钒钼对高碳钢组织转变影响[J]. 特殊钢, 2019, 40(4): 62-65.
- [11] 李力军, 杨瑞林. 钒对低合金钢的组织及性能的影响[J]. 钢铁, 1997, 32(7): 45-48, 53.
- [12] Liu H, Fu P, Liu H, et al. Effect of Vanadium Micro-Alloying on the Microstructure Evolution and Mechanical Properties of 718H Pre-Hardened Mold Steel[J]. Journal of Materials Science and Technology -Shenyang-, 2019. 35(11): 2526-2536.
- [13] BG Y A, BX S, CZ L B, et al. Effects of Vanadium on the Microstructure and Mechanical Properties of a High Strength Low Alloy Martensite Steel[J]. Materials & Design, 2013, 50(1): 102-107.
- [14] 张卫攀, 刘红艳, 徐桂喜, 等. 高品质自卸车厢体用 NM450 耐磨钢板的开发[J]. 特殊钢, 2022, 43(3): 39-42.
- [15] 杨玉婷, 陈东方. G50 超高强度钢冶炼工艺与韧性的相关性研究[J]. 特钢技术, 2008, 14(3): 30-32.
- [16] 侯志全. SA-540B23CL. 2 核用电材料研制[J]. 特钢技术, 2016, 22(3): 48-51.
- [17] 崔忠圻, 覃耀春. 金属学与热处理-第 2 版[M]. 北京: 机械工业出版社, 2007: 268-276.