

时效温度对二次硬化超高强度钢 M54 力学性能和组织的影响

王 飞¹ 杨卓越² 庞学东¹ 孙 勇¹ 翟羽佳¹ 李建新¹ 赵成志¹ 王 瑞¹ 严晓红¹

(1 抚顺特殊钢股份有限公司技术中心, 抚顺 113001; 2 钢铁研究总院, 北京 100081)

摘 要 试验用 M54 钢(% : 0.28 ~ 0.32C, ≤ 0.10Si, ≤ 0.10Mn, ≤ 0.005S, ≤ 0.008P, 9.5 ~ 10.5Ni, 6.6 ~ 7.4Co, 1.8 ~ 2.2Mo, 1.1 ~ 1.5W, 0.7 ~ 1.3Cr, 0.04 ~ 0.16V) 由 5.8 t 真空感应炉 + 2.2 t 真空自耗炉熔炼并锻成 Φ170 mm 棒材。锻材 1/2R 切取的 Φ5 mm 试样经 1 075 °C 90 min 空冷和 1 060 °C 75 min 油冷固溶处理 + 在 -73 °C 120 min 深冷处理 + 400 ~ 600 °C 300 min 空冷时效处理。采用光学和扫描电子显微镜等分析研究了时效温度对二次硬化超高强度钢 M54 的力学性能及组织的影响。结果表明, 试验 M54 钢在 520 °C 300 min 时效后具有优异的综合力学性能, 抗拉强度 2 040 MPa, 冲击功 62 J, 断裂韧性 110 MPa · m^{1/2}; 在 560 °C 时效时, 出现了沿晶断裂形貌, 该钢冲击功 K_{U2} 和断裂韧性 K_{IC} 分别降至 26 J 和 80.6 MPa · m^{1/2}, 随着时效温度升高至 600 °C 时试验钢的冲击功 K_{U2} 和断裂韧性 K_{IC} 分别增加到 56 J 和 131 MPa · m^{1/2}。

关键词 超高强度钢 M54 时效温度 二次硬化 力学性能 复合夹杂物

Effect of Aging Temperature on Mechanical Properties and Structure of Secondary-Hardening Ultra-High Strength Steel M54

Wang Fei¹, Yang Zhuoyue², Pang Xuedong¹, Sun Yong¹, Zhai Yujia¹, Li Jianxin¹,
Zhao Chengzhi¹, Wang Rui¹ and Yan Xiaohong¹

(1 Technology Center, Fushun Special Steel Co Ltd, Fushun 113001;
2 Central Iron and Steel Research Institute, Beijing 100081)

Abstract The tested steel M54 (% : 0.28 ~ 0.32C, ≤ 0.10Si, ≤ 0.10Mn, ≤ 0.005S, ≤ 0.008P, 9.5 ~ 10.5Ni, 6.6 ~ 7.4Co, 1.8 ~ 2.2Mo, 1.1 ~ 1.5W, 0.7 ~ 1.3Cr, 0.04 ~ 0.16V) is melted by 5.8 t vacuum induction furnace + 2.2 t vacuum consumable electrode furnace, and forged to Φ170 mm bar products. The Φ5 mm test specimens cut at 1/2 R of forged bar are treated by solid solution treatment at 1 075 °C for 90 min, air cooling and at 1 060 °C for 75 min, oil cooling + deep-cooling treatment at -73 °C for 120 min + aged treatment at 400 ~ 600 °C for 300 min, air cooling. The effect of aging temperature on mechanical properties and structure of secondary-hardening ultra-high strength steel M54 is studied and analyzed by optical and scanning electron microscope etc. Results show that tested steel M54 aged at 520 °C for 300 min has excellent comprehensive mechanical properties-tensile strength 2 040 MPa, impact energy 62 J and fracture toughness 110 MPa · m^{1/2}; with aging at 560 °C the morphology of intergranular fracture occurs in steel and the impact energy K_{U2} and fracture toughness K_{IC} of the steel decrease respectively to 26 J and 80.6 MPa · m^{1/2}, and with increasing aging temperature to 600 °C the impact energy K_{U2} and fracture toughness K_{IC} of tested steel increase respectively to 56 J and 131 MPa · m^{1/2}.

Material Index Ultra-High Strength Steel M54, Aging Temperature, Secondary-Hardening, Mechanical Properties, Compound Inclusion

C-Co-Ni-Cr-Mo 系二次硬化超高强度钢的研究^[1-2]得到了广泛关注, 学者们^[3]侧重高 Co-Ni 马氏体超高强度钢的强度的研究, 然而随着航空航天工业的迅速发展, 急需强韧性匹配优异^[4]的高性能特殊用途的结构件与之对应。此外, 学者们^[5]做了大量的有关如何改善高 Co-Ni 马氏体超高强度钢韧性的研究, Rice and Johnson^[6]通过控制强化相尺寸的方法提高裂纹扩展的敏感性, 进而改善钢的断裂韧性。通过控制 AF1410 时效过程中细化析出强化相来提高综合力学性能^[7], Figueroa and Robinson^[8-9]对逆转变薄膜奥氏体层影响 AerMet100 的断裂韧性研究表明, 逆转变薄膜奥氏体层显著改善了其断裂

韧性。2012 年, 由美国 QuesTek 公司开发了新一代二次硬化钢超高强度钢 M54^[10], 与传统的 AF1410 和 AerMet100 相比, 提高了 C 含量, 降低了 Co 含量, 添加了 1.3% W, 该钢的强韧性稍弱, 但是该钢抵御氢脆的敏感性较高。抚顺特钢公司对该钢做了研发试制, 研究了时效温度对 M54 钢力学性能及微观组织的影响。

1 试验材料和热处理工艺

试验用钢采用抚顺特钢“真空感应炉 + 真空自耗重熔”冶炼, 真空感应炉容量 5.8 t, 真空自耗炉锭重 2.2 t, 真空自耗锭 Φ406 mm, 其化学成分见表 1。

表 1 M54 钢的化学成分/%
Table 1 Chemical composition of steel M54 /%

C	Ni	Co	Cr	Mo	W	V	Si	Mn	S	P
0.28~0.32	9.5~10.5	6.6~7.4	0.7~1.3	1.8~2.2	1.1~1.5	0.04~0.16	≤0.10	≤0.10	≤0.005	≤0.008

真空自耗锭经高温均质化处理后锻造成 Φ170 mm 的棒材,在其1/2R 处上切取拉伸、冲击试样坯料以及断裂韧性(K_{IC})试样,所有试样的热处理工艺如表 2,拉伸试样坯料按照国家标准 GB/T 228-2002 最终加工成 Φ5 mm,标距长 25 mm 的标准拉伸试样,用 WE300B 拉伸试验机测试室温拉伸性能,冲击试样坯料最终按照国家标准 GB/T229-2007 加工成 10 mm × 10 mm × 55 mm 的标准“U”型缺口冲击试样,用 JBN-300B 冲击试验机测试冲击性能, K_{IC} 试样坯料按照国家标准 GB/T4161-2007 精加工成 20 mm × 40 mm × 190 mm 的标准 SE(B) 试样,用 MTS880 电液伺服万能试验机测试断裂韧性值,每组热处理状态取 3 个试样测试力学性能并取均值,用日立 S-4300 冷场发射扫描电子显微镜和 Olympus Gx51 型光学显微镜观察断口形貌及其微观组织。

2 试验结果与分析

2.1 时效温度对力学性能的影响

除断后伸长率外,时效温度对屈服强度($R_{0.2}$)、抗拉强度(R_m),断面收缩率(Z)均有明显的影响(图 1a),400~520 °C 随着时效温度的升高屈服强度增大,超过 520 °C 后快速降低,抗拉强度也有类似变化规律,在 520 °C 断面收缩率出现峰值,特别注意的是 560 °C 断面收缩率和伸长率(A)均出现谷值,尤其是冲击功(K_{U2})和断裂韧性从 520 °C 时效处理的 62 J、110 $MPa \cdot m^{1/2}$ 降低到 560 °C 的 26 J、80.6

表 2 M54 钢热处理工艺

Table 2 Heat treatment of steel M54

固溶处理			深冷处理		时效处理		
温度/°C	时间/min	冷却方式	温度/°C	时间/min	温度/°C	时间/min	冷却方式
					400		
					440		
1 075	90	空冷	-73	120	480	300	空冷
1 060	75	油淬			520		
					560		
					600		

$MPa \cdot m^{1/2}$,600 °C 时效处理后迅速增加到 56 J、131 $MPa \cdot m^{1/2}$ (图 1b)。

2.2 冲击断口和断裂韧性形貌

400~520 °C 提高时效温度,冲击功明显的上升,由图 2 的断口形貌看出,随着时效温度的升高,冲击断口有明显的变化,除了 560 °C 时效冲击断口呈现“冰糖状”的脆性断裂形貌,故出现冲击功的谷值 26 J,其余时效温度下的冲击断口都是韧性断裂形貌,冲击试样在 U 型缺口根部形成裂纹,随后裂纹快速扩展使试样断裂,冲击功迅速下降,继续提高时效温度,在 600 °C 时效时,冲击断口出现由少量较大韧窝加准解理形貌,冲击功上升。

图 3 经时效断裂后 K_{IC} 试样断口形貌,球状 $Ca(AlO_2)_2$, SiO_2 , $Nb(CN)$ 的复合夹杂物^[11]在预制裂纹附近增加了微裂纹萌生的概率,由于复合夹杂物附近应力较为集中,随后在受力过程中,夹杂物与

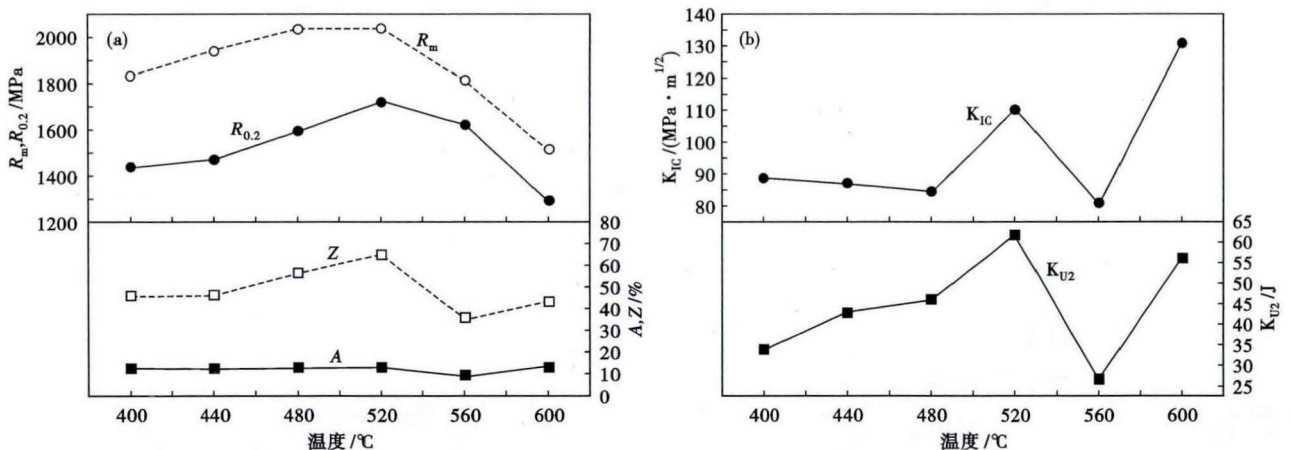


图 1 时效温度对实验 M54 钢屈服 $R_{0.2}$ 、抗拉强度 R_m 、伸长率 A 、断面收缩率 Z (a) 和冲击功 K_{U2} 、断裂韧性 K_{IC} (b) 的影响
Fig. 1 Effect of aging temperature on yield strength $R_{0.2}$, tensile strength R_m , elongation A , and reduction of area Z (a) and impact energy K_{U2} and fracture toughness K_{IC} (b) of tested steel M54

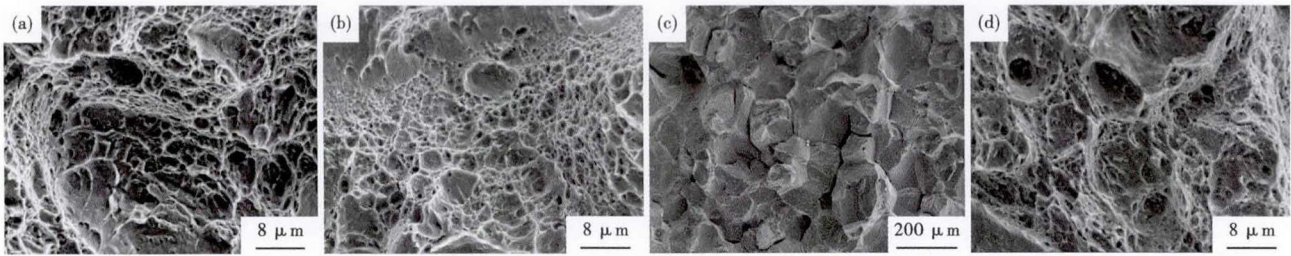


图2 (a)480 °C;(b)520 °C;(c)560 °C和(d)600 °C时效对 M54 钢冲击断口形貌的影响

Fig.2 Effect of aging at 480 °C (a), 520 °C (b), 560 °C (c) and 600 °C (d) on morphology of impact fracture of steel M54

基体分开或者破裂产生空穴,在空穴处萌生微裂纹,随后断裂失稳。

2.3 时效温度对微观组织变化的影响

由图4可知,基体组织是位向不同的板条马氏体形态,随着时效温度逐渐提高,板条马氏体束逐渐粗化随后分解析出粗大的渗碳体,并在480 °C板条马氏体上开始析出强化相M₂C^[12],随后继续提高时效温度,逆转变奥氏体的含量逐渐增大,在板条马氏体束之间的逆转变奥氏体层明显变宽,在断裂过程中,裂纹扩展的尖端遇到逆转变奥氏体薄膜层时发生钝化,进而明显的提高了钢的断裂韧性。

2.4 时效温度对力学性能结果的分析

马氏体基体上M₃C渗碳体^[13-14]逐渐溶解获得纳米级M₂C析出强化,故在400~520 °C力学性能有显著的提高,M54钢时效析出相M₂C碳化物小于10 nm^[15],以共格或半共格方式析出;在520 °C之前,板块边界粗大的渗碳体对基体的强度有益,但Mo和W扩散温度较高,致形成M₂C碳化物的析出量不大,削弱了二次强化效应,随后由于马氏体基体内较高的C、Mo和W增大了时效过程中的M₂C碳化物和析出量,并且W和Mo元素复合添加延缓过时效,出现了二次硬化峰值,高密度的板条马氏体位错以Orowan机制绕过不可变形的M₂C碳化物时需要较大应力而继续滑移,因此极大的增强了二次强化效应,钢的抗拉强度为2 040 MPa、屈服强度为1 722 MPa、硬度值为54。

时效温度继续升高,M₂C碳化物粗化导致其附近应力集中和位错的回复及逆转变奥氏体的产

生,易产生滑移进而降低钢的强度,在600 °C时效

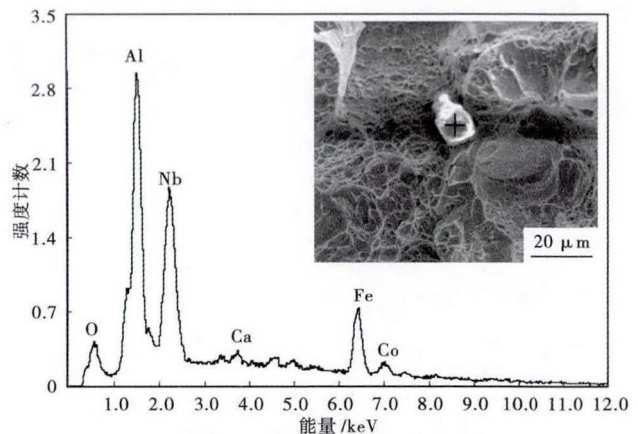


图3 520 °C时效 M54 钢断裂韧性断口 SEM 形貌及能谱分析

Fig.3 SEM morphology and energy spectrum analysis of fracture of K_{IC} test of steel M54 aged at 520 °C

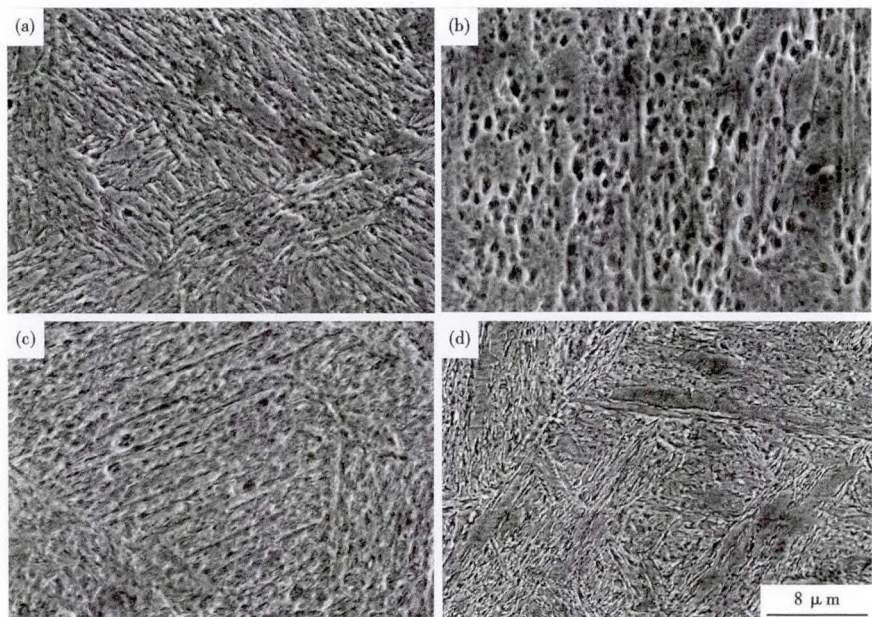


图4 (a)480 °C;(b)520 °C;(c)560 °C和(d)600 °C时效对 M54 钢组织的影响

Fig.4 Effect of aging at 480 °C (a), 520 °C (b), 560 °C (c) and 600 °C (d) on structure of steel M54

时,钢的抗拉强度降到1 505 MPa、屈服强度降到1 285 MPa,硬度值为45,在560 ℃时效时,合金中的Ni、Cr等合金元素与钢中微量的杂质元素在晶界发生偏聚,促使杂质元素富集,导致晶界脆化,出现高温回火脆性,恶化了钢的综合力学性能,尤其是冲击功和断裂韧性值从520 ℃峰时效的62 J、110 MPa·m^{1/2}降低到560 ℃的26 J、80.6 MPa·m^{1/2},之后由于逆转变奥氏体层的形成钝化裂纹尖端进而提高了钢的韧性,球状Ca(AlO₂)₂、SiO₂、Nb(CN)复合夹杂物附近及应力集中的复合夹杂物处萌生微裂纹也恶化了钢的韧性。

3 结论

(1) M54 钢经过1 075 ℃ 90 min 空冷,1 060 ℃

75 min 油冷,-73 ℃ 2 h 空冷,520 ℃ 5 h 空冷(峰时效)处理后,钢的抗拉强度≥2 000 MPa、冲击功≥60 J及断裂韧性值≥110 MPa·m^{1/2},具有最佳的强韧性匹配度。

(2) 经过1 075 ℃ 90 min 空冷,1 060 ℃ 75 min 油冷,-73 ℃ 2 h 空冷,560 ℃ 5 h 空冷时效处理后,M54 钢断口形貌呈现沿晶断裂。

(3) 经过1 075 ℃ 90 min 空冷,1 060 ℃ 75 min 油冷,-73 ℃ 2 h 空冷,600 ℃ 5 h 空冷时效处理后,M54 钢马氏体板条间隙析出了薄膜状的逆转变奥氏体,使得钢的断裂韧性值达到最佳131 MPa·m^{1/2},但是相对应的强度反而下降,这和强化相M₂C碳化物粗大有关。

参考文献

[1] Guler M, Guler E, Kahveci N. Aspects of Thermal Martensite in a FeNiMnCo Alloy[J]. Micron Journal Elsevier, 2010, 41: 537-539.

[2] Hu Z F, Wu X F. High Resolution Electron Microscopy of Precipitates in High Co-Ni Alloy Steel[J]. Micron Journal Elsevier, 2003, 34: 19-23.

[3] Wang L D, Jiang L Z, Zhu M, et al. Improvement of Toughness of Ultrahigh Strength Steel Aermet 100[J]. Journal of Materials Science & Technology, 2005, 21: 710-714.

[4] Hu Z, Wu X, Li X, et al. Study on the Precipitation of M₂C in High Co-Ni Alloy Steel[J]. Journal of Iron and Steel Research (International), 2001, 10: 493-495.

[5] Handerhan K J, Garrison W M, Moody N R. A Comparison of the Fracture Behavior of Two Heats of the Secondary Hardening Steel AF1410[J]. Metallurgical and Materials Transactions, 1993, A 20A: 105-123.

[6] Rice J R, Johnson M A. Inelastic Behavior of Solids[M]. New York: McGraw-HILL, 1970: 641-672.

[7] Olson G B. Overview: Science of Steel. In: Innovations in Ultrahigh-strength Steel Technology[M]. US Army Laboratory Command, Materials Technology Laboratory, 1987: 33-66.

[8] Figueroa D, Robinson M J. The Effects of Sacrificial Coatings on Hydrogen Embrittlement and Re-embrittlement of Ultra High Strength Steels[J]. Corrosion Science, 2007, 50: 1066-1079.

[9] Figueroa D, Robinson M J. Hydrogen Transport and Embrittlement in 300 M and AerMet100 Ultra High Strength Steels[J]. Corrosion Science, 2010, 52: 1593-1602.

[10] Olson G B. 2013. Ferrium® M54® Overview. QuesTek Innovations LLC, <http://www.quesstek.com/ferrium-m54.html>

[11] 王 飞. 新型二次硬化钢相变组织与强韧性内在关系研究[D]. 北京 & 昆明: 钢铁研究总院 & 昆明理工大学, 2016.

[12] 吴 迪, 厉 勇, 王春旭, 等. 2 200 MPa 级二次硬化型超高强度钢析出相及力学性能[J]. 钢铁, 2016(8): 60-63.

[13] 赵振业, 凌 斌, 钟 平, 等. 用场离子显微镜和原子探针研究 23NiCo 钢中 M₂C 的回火析出机制[J]. 金属热处理学报, 2000, 21(2): 14-23.

[14] Ayer R, Machmeier P. On the Characteristic of M₂C Carbides in the Peak Hardening Regime of Aermet100 Steel [J]. Metallurgical and Materials Transaction A, 1998, 29A: 903-905.

[15] Wang Chenchong, Zhang Chi, Yang Zhigang. Austenite Layer and Precipitation in High Co-Ni Maraging Steel [J]. Micron Journal Elsevier, 2014, 67: 112-116.

王 飞(1989-),男,硕士(2016年钢铁研究总院/昆明理工大学毕业),工程师,2013年长春工业大学(本科)毕业,二次硬化超高强度钢的研究。E-mail:w_fwdd@163.com

收稿日期:2017-06-25

**欢迎全国冶金、机械、耐材及相关
行业在《特殊钢》杂志上刊登工艺设备
和技术、产品研发宣传广告**