

高钢级套管强韧性匹配研究*

陈浩明^{1,2}, 高盟召^{1,2}, 杨柳², 李周波^{1,2}, 李远征^{1,2}, 何石磊^{1,2},
苑清英^{1,2}, 彭建军², 张骥², 张琦³

- (1. 国家石油天然气管材工程技术研究中心, 陕西 宝鸡 721008;
2. 宝鸡石油钢管有限责任公司, 陕西 宝鸡 721008;
3. 中国石油技术开发有限公司, 北京 100020)

摘要: 为了获得非常规油气资源开采所需的高强度、高韧性套管产品, 以 C-Mn 系中碳低合金热轧管坯为试验材料, 通过 930 °C 淬火+470~550 °C 系列温度回火热处理工艺研究了该套管管材的强韧性匹配规律。结果显示: 随回火温度升高, 管材强度呈下降趋势, 冲击韧性先增后降。其原因在于随着回火温度升高, 马氏体板条发生回复和再结晶, 过饱和碳析出并形成弥散分布碳化物, 导致管材强度降低且韧性升高; 随着温度继续升高, 碳化物发生偏聚和粗化, 强化作用和晶界强度减弱, 导致管材强度和韧性降低。研究表明, 在 930 °C 淬火/55 min+(510~530) °C 回火/110 min 热处理工艺下, 管材强韧性匹配最佳, 屈服强度达到 951 MPa 以上, 0 °C 下横向冲击功平均值达到 98 J, 完全满足 Q/SY 07394 标准对 125 ksi 钢级高抗挤套管强韧性要求。

关键词: 石油套管; 高钢级; 热处理; 强韧性匹配; 弥散强化

中图分类号: TG151.1

文献标识码: A

DOI: 10.19291/j.cnki.1001-3938.2022.09.002

Study on Strength and Toughness Matching of High Grade Casing

CHEN Haoming^{1,2}, GAO Mengzhao^{1,2}, YANG Liu², LI Zhoubo^{1,2}, LI Yuanzheng^{1,2}, HE Shilei^{1,2},
YUAN Qingying^{1,2}, PENG Jianjun², ZHANG Ji², ZHANG Qi³

- (1. Chinese National Engineering Research Center for Petroleum and Natural Gas Tubular Goods, Baoji 721008, Shaanxi, China; 2. CNPC Baoji Petroleum Steel Pipe Co., Ltd., Baoji 721008, Shaanxi, China;
3. China Petroleum Technology and Development Corporation, Beijing 100020, China)

Abstract: In order to obtain high strength and toughness casing products needed for unconventional oil and gas resources exploitation, the matching law of strength and toughness of C-Mn medium carbon low alloy hot rolled tube was studied by 930 °C quenching +470~550 °C series temperature tempering heat treatment process. The results show that with the increase of tempering temperature, the strength of pipe decreases, while the impact toughness increases first and then decreases. The reason is that with the increase of tempering temperature, martensitic slat recovers and recrystallizes, supersaturated carbon precipitates and forms dispersed carbides, which leads to the decrease of strength and increase of toughness of pipe. As the temperature continues to rise, the carbide segregation and coarsening occur, and the strengthening effect and grain boundary strength weaken, resulting in the decrease of the strength and toughness of the pipe. The results indicate that under the heat treatment process of 930 °C quenching /55 min+(510~530) °C tempering /110 min, the pipe has the best matching of strength and toughness, the yield strength reaches 951 MPa and the average transverse impact energy reaches 98 J at 0 °C, fully meeting the strength and toughness requirements of 125 ksi steel grade high anti-collapse casing in Q/SY 07394 standard.

Key words: oil casing; high grade; heat treatment; strength and toughness matching; dispersion strengthened

* 基金项目: 陕西省重点研发项目“非常规油气开采用特殊螺纹套管关键技术研究”(项目编号 2022GY-132)。

0 前 言

随着非常规油气资源开采的深入发展,水平井多段、大体积压裂技术已成为其增储上产的有效手段^[1-2]。在体积压裂作业过程中,往往存在着剪切、滑移、错段等复杂的地层行为,使得套管受到复杂多变的外部应力,导致套管挤毁失效频繁发生^[3-5]。另外,在射孔压裂过程中,套管不仅需要承受井筒内、外流体产生的压力,还要承受地层瞬间压力变动所产生的冲击载荷等多种复杂载荷,常规的API高钢级套管因韧性不足,在该过程中易发生开裂,并在复杂应力条件下裂纹易发生扩展,从而导致套管失效^[6-8]。王军等^[9]研究表明,强韧性对套管的抗外压挤毁性能具有重要影响,提高套管抗挤毁强度的手段主要集中在提升强韧性和几何尺寸精度等方面。因此,高钢级套管的设计需要兼顾强度和韧性,在满足高强度的同时尽可能提高韧性指标,满足生产使用安全性^[10]。以125 ksi钢级套管为例,API SPEC 5CT要求0℃全尺寸横向冲击功 ≥ 20 J,纵向冲击功 ≥ 41 J;而Q/SY 07394高抗挤套管标准将125 ksi钢级套管冲击韧性要求提升为横向冲击功 ≥ 50 J,纵向冲击功 ≥ 70 J,强度与API SPEC 5CT保持一致,不仅可以保证套管的抗挤

强度,还可抑制损伤套管的脆性断裂,降低射孔开裂所导致的挤毁风险^[11]。本研究以中碳低合金热轧管坯为对象,研究不同热处理工艺条件下管材的强韧性匹配,从而为高强、高韧性套管研发提供技术支撑。

1 试验材料

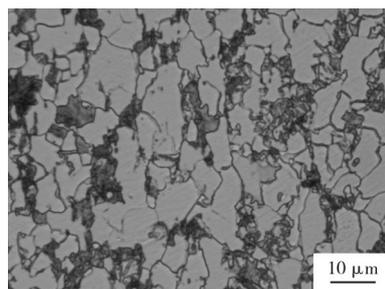
试验材料为采用超洁净冶炼、均质化连铸、热机械轧制技术制备的 $\Phi 139.7$ mm中碳低合金套管管坯。该管材成分以C、Mn元素为基础,通过添加Cr、Nb、V、Ti等强韧化合金元素,同时严格进行P、S等杂质元素控制,以期实现最终产品强度和韧性的优质匹配。管坯化学成分见表1,力学性能见表2。试验用管坯显微组织如图1所示,从图1可以看出,组织为等轴铁素体+细珠光体+贝氏体。

表1 试验用套管管坯的化学成分 %

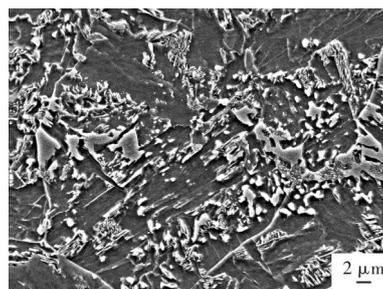
w(C)	w(Si)	w(Mn)	w(P)	w(S)	其他
≤ 0.35	≤ 0.30	≤ 1.60	≤ 0.020	≤ 0.010	≤ 3.0

表2 试验用套管管坯的力学性能

屈服强度/ MPa	抗拉强度/ MPa	伸长率%	全尺寸冲击功/J (0℃)	
			横向	纵向
575	740	25	20	25



(a) 金相组织



(b) SEM组织

图1 试验管坯显微组织

2 热处理工艺及检测方法

2.1 热处理工艺

热处理工艺参数对材料组织性能影响至关重要,合理的热处理工艺可显著提高材料的综合性能。按照YB/T 5127—2018《钢的临界点测定(膨胀法)》标准,测定该试验钢的奥氏体转变温

度(A_{C3})为857.6℃。参照相变点,选择适宜的加热温度和保温时间进行热处理试验。一般淬火温度的确定原则为钢的 A_{C3} 以上30~50℃,同时不仅考虑生产线装置实际情况(如高压水除鳞导致温降、设备布局距离等因素),而且也考虑热矫直终了温度等标准要求,因此淬火温度选择930℃。加热时间以充分奥氏体化及合金均质化

为原则，考虑生产线加热能力及钢管透热达到内外壁及心部温度均匀化，淬火保温时间选择 55 min，回火保温时间选择 110 min，回火选择 470~550 ℃系列温度。在天然气炉中开展整管全长热处理，具体工艺过程如图 2 所示。

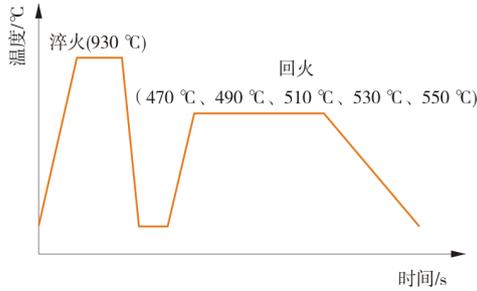
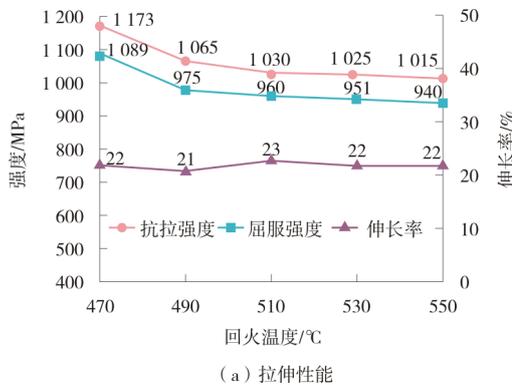


图 2 整管热处理工艺过程

2.2 检测方法

拉伸性能检测依照 ASTM A370 标准在 Z1200 拉伸试验机上进行。板状试样尺寸为 400 mm × 25.4 mm，取 2 组试样，最终试验结果取 2 组试样的平均值。

冲击性能检测依照 ASTM A370 在 DM750



(a) 拉伸性能

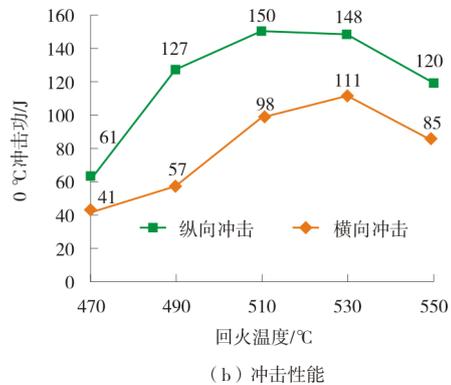
试验机上进行，V 形缺口试样尺寸为 55 mm × 10 mm × 10 mm，试验温度为 0 ℃。每组取 3 件试样，最终试验数据取 3 件试样数据的平均值。

在进行显微组织和断口观察时，将金相试样研磨、抛光后用 4% 的硝酸酒精侵蚀，使用 Olympus-PMG3 型光学显微镜、日立 S3700 扫描电子显微镜 (SEM) 进行显微组织观察；采用 Zeiss 扫描电子显微镜 (SEM) 进行冲击断口形貌观察。

3 试验结果及分析

3.1 强韧性匹配

图 3 为不同热处理工艺下套管拉伸性能和冲击性能检测结果。未经全长热处理的热轧管坯其强度处于 80 ksi 钢级水平，冲击值为 20~25 J (表 2)，但经 930 ℃淬火+470~550 ℃回火后管坯强度与韧性均得到不同程度的提升，其中屈服强度达到 135 ksi 钢级水平 (≥951 MPa)，纵向冲击功最高达 150 J，横向冲击功最高达 111 J。



(b) 冲击性能

图 3 不同热处理工艺下拉伸与冲击性能试验结果

从图 3 还可以看出，随回火温度升高，套管强度呈下降趋势，冲击韧性呈先升后降趋势，伸长率几乎保持不变。当采用 930 ℃/55 min 淬火+(510~530) ℃/110 min 回火工艺时，套管屈服强度为 951~960 MPa，抗拉强度为 1 025~1 030 MPa，伸长率达 22% 以上，横向冲击功为 98~111 J，纵向冲击功达 148 J 以上。该结果可以对标 Q/SY 07394 高抗挤套管对 125 ksi 钢级套管的要求 (屈服强度 862~1 034 MPa，抗拉强度 ≥931 MPa，伸长率 ≥13%，0 ℃横向冲击值 ≥50 J，纵向冲击

功 ≥70 J)。结果表明，在该热处理工艺下不仅可完全满足 Q/SY 07394 标准对 125 ksi 钢级高抗挤套管强韧性要求，且可具有最佳强韧性匹配。

3.2 显微组织

图 4 为淬透试样的 EBSD 晶粒尺寸检测结果，从图 4 可以看出，该试验管坯经淬火后，其奥氏体晶粒尺寸普遍小于 11 μm，平均尺寸为 3.10 μm。同时，依据 ASTM E112 晶粒度测定方法，测得晶粒度等级为 11 级，远远高于 Q/SY 07394 标准要求的 8 级，表明套管管材淬火后晶

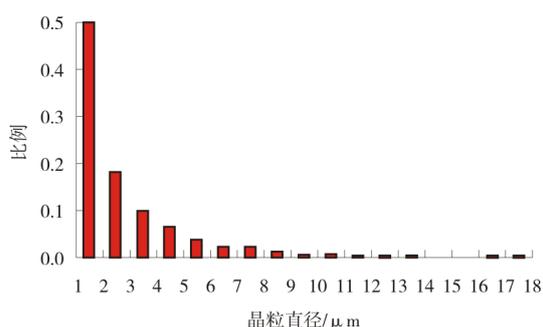


图4 淬透试样的 EBSD 晶粒尺寸检测结果

粒得到细化, 为后续进一步获得细小的回火组织并实现最佳强韧性匹配奠定了基础。

图5为不同回火温度下管材显微组织, 从图5可以看出, 在490~550℃回火时, 组织均为回火索

氏体。在490℃回火时, 晶界内马氏体板条及板条束边界清晰, 位相明显, 部分发生再结晶, 如图5(a)所示; 同时马氏体铁素体基体上析出大量细小的碳化物颗粒, 均匀弥散分布在晶界、马氏体板条界及板条束界等位置, 如图5(b)所示。当回火温度510~530℃时, 马氏体板条铁素体出现明显的再结晶, 并随着温度的升高, 马氏体板条及板条束边界比较模糊, 马氏体位相部分消失, 如图5(c)和图5(d)所示; 530℃回火时, 马氏体铁素体基体上析出碳化物占比明显多于490℃时, 碳化物析出更加充分, 如图5(e)所示。当回火温度提高到550℃时, 进一步发生再结晶, 马氏体铁素体部分呈多边形块状, 如图5(f)所示。

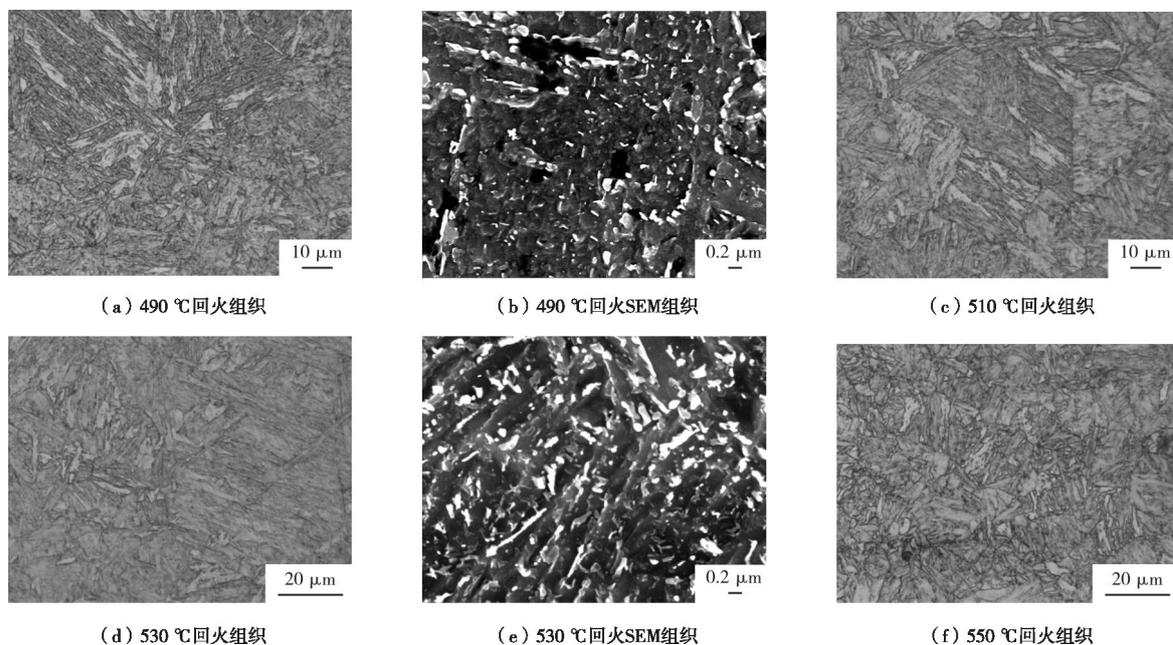


图5 不同回火温度下管材显微组织

结合图4和图5可以看出, 经淬火+回火后套管管材获得马氏体板条细小的回火索氏体组织, 且马氏体铁素体基体上弥散分布着细小碳化物颗粒。在回火过程中, 这些碳化物主要析出在晶界、板条界及板条束界等位置, 钉扎阻碍着组织晶粒长大, 从而实现细晶强化、弥散强化等作用, 使套管具有较好的强韧匹配^[12-13]。

3.3 断口分析

图6为不同回火温度下冲击断口形貌, 其中断口微观形貌为不稳定扩展区形貌。当回火温度为490℃时, 如图6(a)所示, 宏观断口存在明显的放射区和分层现象, 纤维区和剪切

唇面积所占比例较低; 微观断口如图6(b)所示, 主要呈现解理+准解理特征, 韧窝较少, 因此, 490℃回火时, 管材冲击韧性较低。当回火温度达到510℃以上时, 如图6(c)~图6(e)所示, 宏观断口纤维区和剪切唇占比明显提升, 且无明显的放射花样; 在510~530℃回火时, 从图6(f)和图6(g)可看出, 微观断口形貌以韧窝+二次裂纹为主, 管材具有较高的冲击韧性; 当回火温度升至550℃时, 微观断口中韧窝较530℃时明显减少, 且出现明显的准解理特征, 如图6(h)所示, 管材冲击韧性有所下降。

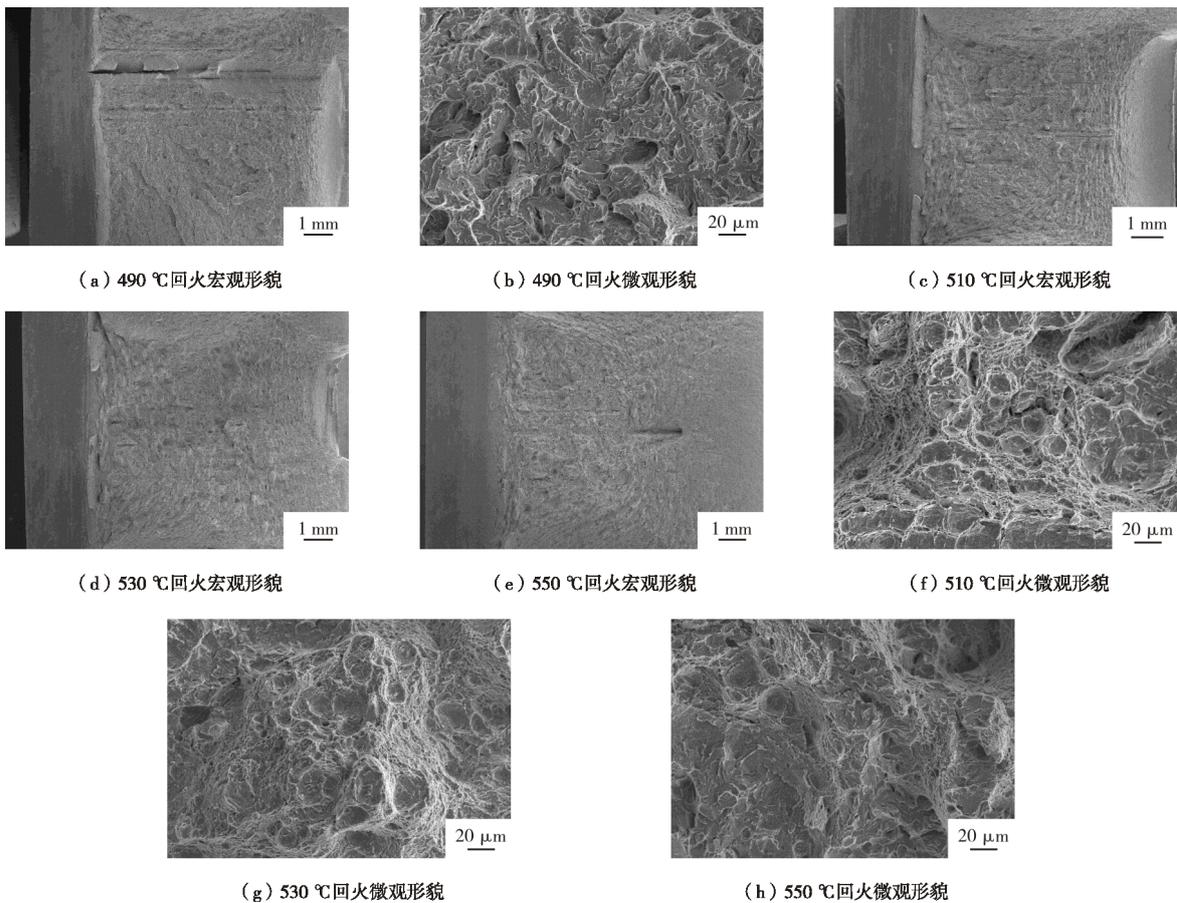


图6 不同回火温度下管材冲击断口形貌

针对上述现象分析认为,当采用 490 °C 回火处理时,回火温度相对较低,马氏体板条中过饱和的固溶碳析出不充分,材料硬度较高,内应力大,宏观上表现为高强度、低韧性;当回火温度为 510~530 °C 时,随着回火温度的升高,马氏体板条中过饱和的固溶碳进一步析出,随着马氏体板条界、板条束界及晶界上碳化物析出的增多,形成了弥散强化质点,起到钉扎晶界的作用,阻碍晶粒的长大,晶粒越细,晶界越多,裂纹扩展阻力就越大,可使材料的抗脆断能力相应提升,马氏体板条铁素体发生回复再结晶,从而使管材在该热处理温度范围内具有高强度和高韧性,乃至获得最佳的强韧性匹配;随着回火温度进一步升高,晶界及马氏体条束处碳化物球化并聚集长大,碳化物的弥散强化和钉扎作用下降,对位错运动阻碍作用显著减弱,是导致钢的强度及韧性下降的主要原因^[14-15]。

4 结论

(1) 该热轧管坯在 930 °C/55 min 淬火+(510~530) °C/110 min 回火工艺下具有最佳的强韧匹配,屈服强度达到 951 MPa 以上,抗拉强度达到 1 025 MPa 以上,伸长率 22% 以上,0 °C 横向冲击功达到 98 J 以上,纵向冲击功达到 148 J 以上,晶粒度等级达到 11 级,能够满足 125 ksi 钢级高抗挤套管管材设计要求。

(2) 在回火工艺制度下,随回火温度升高,管材强度呈下降趋势,冲击韧性呈先增加后降低趋势,其原因在于回火温度对管材的微观强化和断裂机制产生影响。随着回火温度升高,马氏体板条发生回复和再结晶,过饱和碳析出并形成弥散分布碳化物,导致管材强度降低且韧性升高,冲击断口形貌则以解理+准解理为主转变成以韧窝+二次裂纹为主。随着温度继续升高,碳化物

(下转第 21 页)