

基于数据优化开发广泛适用性稀土 热成形钢的试验研究

刘艳超¹, 杜文斌^{2,3*}, 刘承军^{2,3}

- (1. 辽宁科技学院 信息学院, 辽宁 本溪 117004;
2. 东北大学 多金属共生矿生态化冶金教育部重点实验室, 辽宁 沈阳 110819;
3. 东北大学 冶金学院, 辽宁 沈阳 110819)

摘 要: 为了扩大热成形钢 1500HS 的工艺窗口, 基于前期对稀土在钢中应用文献的统计分析, 开展了在热成形钢 1500HS 中添加稀土的试验研究。本研究利用真空感应炉冶炼不添加和添加特定 Ce 含量的热成形钢, 并采用 Gleeble-3800 热模拟试验机和金相分析技术等, 对试样相变进行对比分析。结果表明, Ce 可有效提高奥氏体稳定性, 使铁素体转变区间缩小, 铁素体转变温度降低 28 °C ~ 34 °C。Ce 对热成形钢贝氏体和马氏体转变温度影响不明显, 但促使马氏体临界冷却速率由 30 °C/s 降为 20 °C/s。热成形钢中添加 Ce 可有效增加热成形冲压合模工艺窗口。本试验条件下, 可降低热成形钢冲压合模工艺窗口 45 °C, 有利于环境温度较低, 或薄规格产品生产使用。

关键词: 热成形; 稀土; 1500HS; 热模拟; 组织

中图分类号: TG142

文献标识码: A

文章编号: 1004-0277(2026)02-0041-08

随着我国环境治理力度的增加, 汽车节能减排成为行业热点, 而汽车材料轻量化则成为近些年的热门课题^[1-3]。提高汽车用钢强度可在保障汽车安全性前提下, 通过减薄、减重实现节能减排。其中, 热成形成为最典型的应用技术^[4]。热成形钢加热至奥氏体状态, 然后转移至带冷却装置的模具内, 在奥氏体状态成形后, 模内淬火, 获得 100% 马氏体组织。所获得的零件强度高, 尺寸精度高。其制备的零件主要用于汽车 A 柱、B 柱、前后保险杠和门

内的防撞杆等防撞部件。目前, 热成形钢在汽车白车身用钢中的占比已超过 30%^[5]。

1500HS 是热成形钢最主要的材料, 热冲压成形后获得 100% 马氏体组织, 抗拉强度达到 1500 MPa。与冷成型零件相比, 使用热成形零件主要为了减薄。因此, 规格以 1.4 mm ~ 2.0 mm 冷轧板为主。但近些年, 热成形零件使用范围扩展至结构件, 其厚度规格需要更薄, 1.0 mm ~ 1.2 mm 也开始陆续使用。然而, 薄规格热成形零件生产合格率显著降

收稿日期: 2024-07-03

基金项目: 国家自然科学基金委员会-辽宁联合基金项目(U1908224)

作者简介: 刘艳超(1982-), 女, 辽宁朝阳人, 硕士, 副教授, 主要从事数据处理技术相关研究, E-mail: liu_yanchao@foxmail.com

* 通信作者: 杜文斌, 博士, 副研究员, E-mail: du_duwenbin@163.com

DOI: 10.3724/S1004-0277.202602005

低,特别在环境温度较低情况下,零件冲压前易发生相变导致零件失效。这已成为困扰热成形钢应用的棘手问题。

解决这一问题的核心技术是推迟铁素体相变,同时不降低材料淬透性,保障更宽的冲压工艺窗口。文献[6,7]表明 Mo 和 B 具有这种作用,但高碳中添加 Mo 合金焊接性影响较大,而热成形钢中已添加 B 微合金,增加 B 用量会引起其他一系列问题。低碳钢中研究结果表明^[8~10],稀土微合金具有推迟铁素体相变的效果。但在热成形钢中相关研究较少,若能利用我国独特的稀土资源解决热成形钢工艺窗口问题,充分利用我国特有的稀土资源,

研究开发稀土微合金钢,把稀土的资源优势转化为钢铁产品的质量优势和品种优势具有非常重要的战略意义。因此,本研究经过对大量文献进行数据分析,制定了研究方案,针对稀土 Ce 对热成形钢相变的影响进行系统的分析和讨论。

1 研究方法

1.1 试样制备

为了对比分析 Ce 在热成形钢中的作用,本研究以 1500HS 成分为基础进行对比试验,冶炼一炉不添加稀土的 1500HS 样品,并冶炼一炉添加 Ce 的 1500HSCe 作为对比样品。两炉试验钢熔炼成分如表 1 所示。

表 1 热成形钢成分/% (质量分数)

Table 1 Composition of press hardening steel/% (Mass fraction)

No.	C	Si	Mn	P	S	Alt	B	Ti	Ce
1500HS	0.22	0.22	1.43	0.005	0.004	0.041	0.0015	0.030	—
1500HSCe	0.23	0.24	1.46	0.004	0.001	0.064	0.0017	0.032	0.0247

冶炼均以工业生产的 20# 钢作为熔炼母料,在此基础上适当配加硅铁、锰铁、电极石墨、工业纯铁等,利用 100 kg 真空感应炉冶炼,采用铝线进行充分脱氧后,添加钛铁进行固氮处理,最后添加硼铁充分搅拌。添加 Ce 的试验钢,出钢前添加 Ce 线,充分搅拌后出钢。

铸锭使用 750 kg 空气锤锻造成 80 mm×80 mm 钢锭,然后采用小型热轧机轧制成 12 mm 厚板材,锻造和轧制之后均采用空冷处理。然后,沿轧制方向取图 1 所示尺寸试样,并在热模拟试验机上进行连续冷却转变测试试验。

1.2 检测方法和研究方案

不同成分试验钢加工成图 1 所示试样后,使用 Gleeble-3800 热模拟试验机进行热模拟试验,热模拟工艺如图 2 所示。试样以 10 ℃/s 加热到 1200 ℃,保温 3 min,以 10 ℃/s 降温到 900 ℃保温 30 s,变形 50%,然后分别以 0.5 ℃/s、1 ℃/s、2 ℃/s、5 ℃/s、10 ℃/s、20 ℃/s、30 ℃/s、40 ℃/s 不同冷却速度降温到 200 ℃。

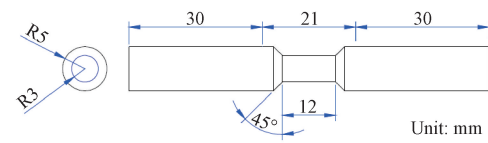


图 1 热模拟试样尺寸

Fig. 1 Sample size of thermal simulated test

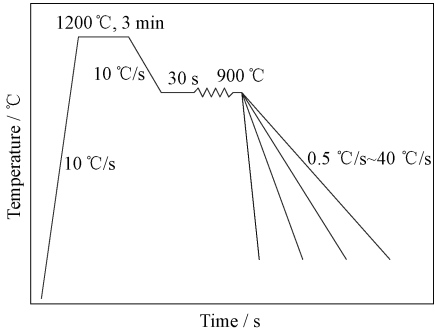


图 2 热模拟工艺示意图

Fig. 2 Schematic diagram of thermal simulation process

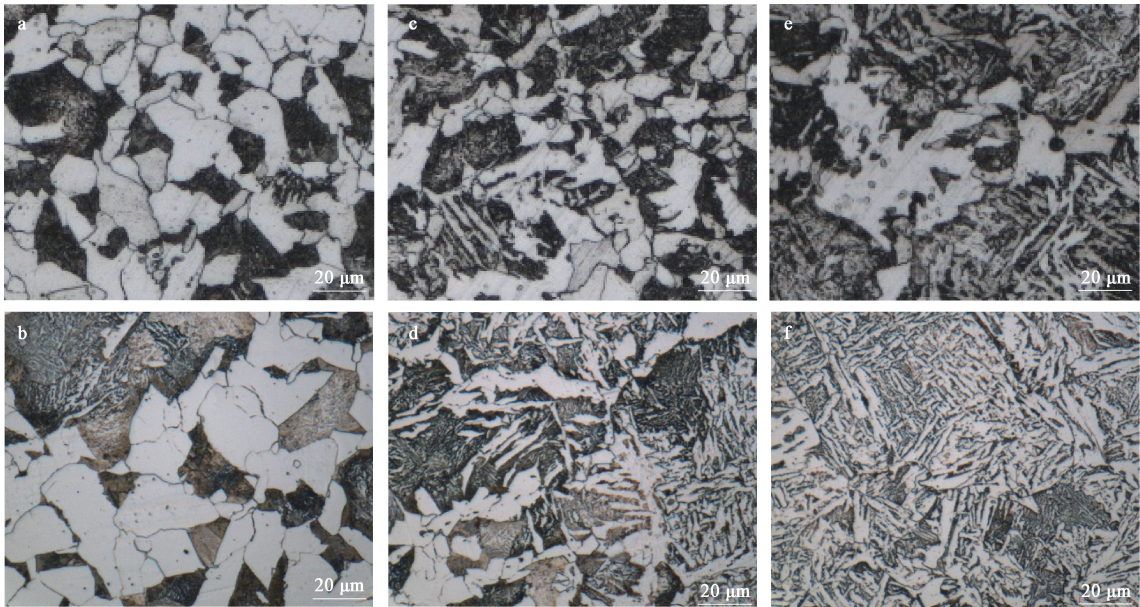
采集冷却过程样品的膨胀曲线以及实时温度等数据用于分析相变规律。并使用 Olympus-BX51 金相显微镜对热模拟样品组织进行观察和分析。

2 试验结果

2.1 Ce 对 1500HS 钢热模拟组织的影响

图 3 所示为冷却速率较低情况下,两组试样的热模拟组织。对比发现,0.5 ℃/s 的冷却条件下,

1500HS 试样组织以多边形铁素体和珠光体为主,而 1500HSCe 试样则存在微量贝氏体组织,如图 3b 所示。1 ℃/s 冷却速率条件下,1500HSCe 试样组织中贝氏体含量显著增加。1500HS 试样组织中存在大量的珠光体和铁素体,出现少量贝氏体组织,如图 3c 所示。随着冷却速率提高至 2 ℃/s,1500HSCe 试样以贝氏体组织为主,只存在少量仿晶型铁素体组织,但 1500HS 试样依然存在 32.5% 的铁素体组织,如图 3e 所示。



a:1500HS(0.5 ℃/s);b:1500HSCe(0.5 ℃/s);c:1500HS(1 ℃/s);d:1500HSCe(1 ℃/s);e:1500HS(2 ℃/s);f:1500HSCe(2 ℃/s)

图 3 低冷却速率条件下热成形钢组织

Fig. 3 Microstructures of press hardening steel under low cooling rate conditions

对比金相组织发现,Ce 具有推迟铁素体组织转变的作用,相同冷却条件下,添加 Ce 抑制铁素体生成,促进贝氏体组织转变,这与 Ce 在低碳钢中的研究结果一致^[9]。

图 4 为高冷却速率条件下,试验钢的热模拟组织。冷却速率 10 ℃/s 时,两试样铁素体组织均消失,1500HSCe 试样获得马氏体组织,而 1500HS 试样贝氏体形貌特征组织明显,如图 4a 所示。当冷却速率增加至 20 ℃/s 时,1500HS 试样组织局部依然可见贝氏体形貌特征,如图 4c 所示。

综合分析不同冷却条件热模拟组织发现,添加 Ce 可提高奥氏体稳定性,抑制高温组织转变,更有利于获得低温转变组织。

2.2 Ce 对 1500HS 钢相变的影响

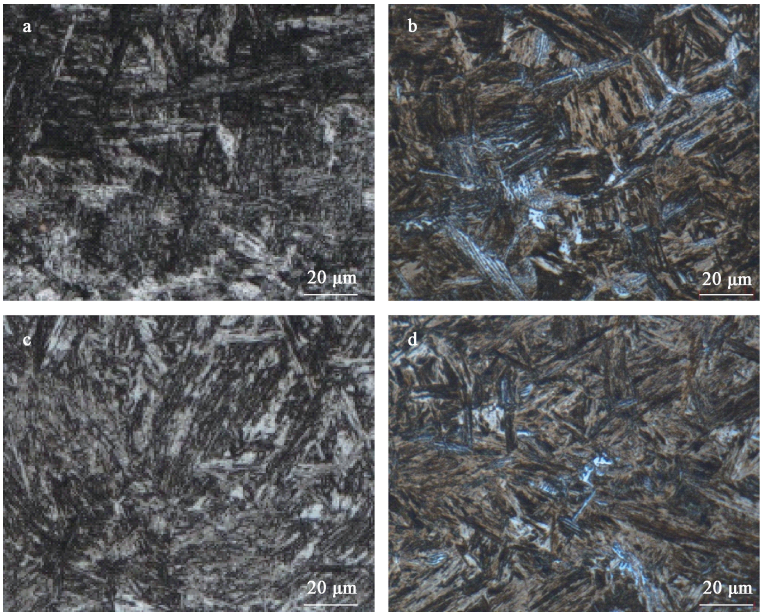
为了对比不同冷却速率条件下,Ce 对热成形钢相变和组织的影响,本研究选择组织差异较大的(冷却速率为 1 ℃/s 和 20 ℃/s)膨胀曲线进行对比分析,如图 5 所示。

对比发现,1 ℃/s 冷却条件下,1500HS 试样在 734 ℃ 开始发生相变,531 ℃ 完成相变。金相组织也显示,该条件下组织为铁素体、珠光体为主,有少

量贝氏体。而 1500HSCe 试样,相变温度推迟至 706 ℃,并且在 485 ℃完成相变。

冷却速率 20 ℃/s 情况下,对比结果如图 5b 所示。1500HS 试样在 562 ℃发生相变,在 261 ℃完成

相变,该区域为贝氏体和马氏体相变区间。而 1500HSCe 试样的膨胀曲线显示,其相变起始温度为 414 ℃,结束温度为 233 ℃,该温度区间为马氏体转变区间。



a;1500HS(10 ℃/s);b;1500HSCe(10 ℃/s);c;1500HS(20 ℃/s);d;1500HSCe(20 ℃/s)

图 4 高冷却速率条件下热成形钢组织

Fig.4 Microstructures of press hardening steel under high cooling rate conditions

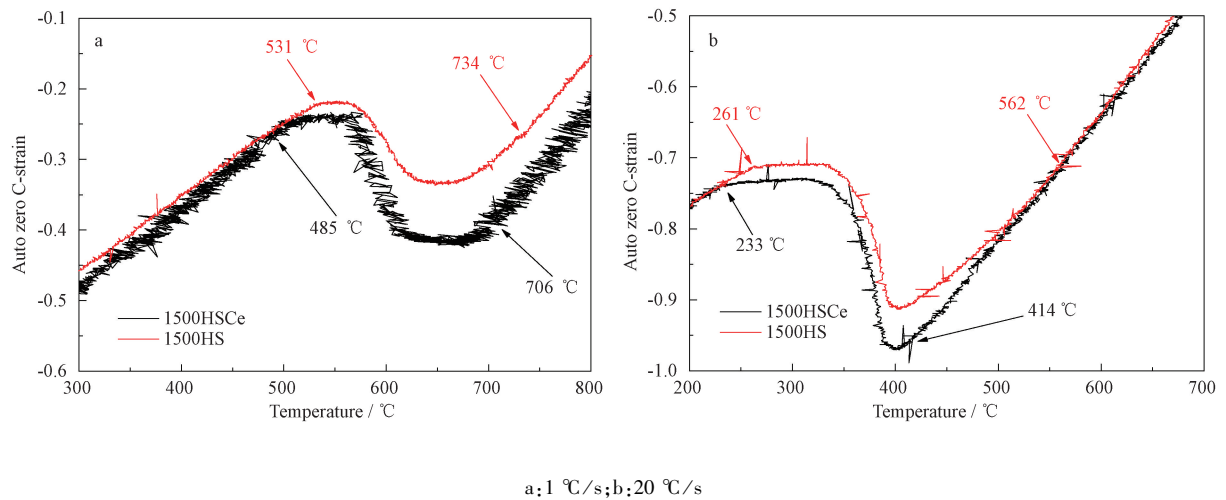


图 5 不同冷却速率条件下热成形钢膨胀曲线对比

Fig.5 Comparison of expansion curves of press hardening steel under different cooling rate conditions

通过不同冷却速率条件下典型膨胀曲线对比发现,热成形钢中添加 Ce 可显著推迟相变过程,对

铁素体和贝氏体有一定的抑制作用。该与 Ce 在低碳钢中对铁素体组织影响规律一致^[9]。

2.3 Ce 对 1500HS 钢 CCT 曲线的影响

经膨胀曲线测试,结合金相组织分析,绘制连续冷却转变曲线,如图 6 所示。不同冷却速率下,两组试样均可获得铁素体、珠光体、贝氏体和马氏体组织。

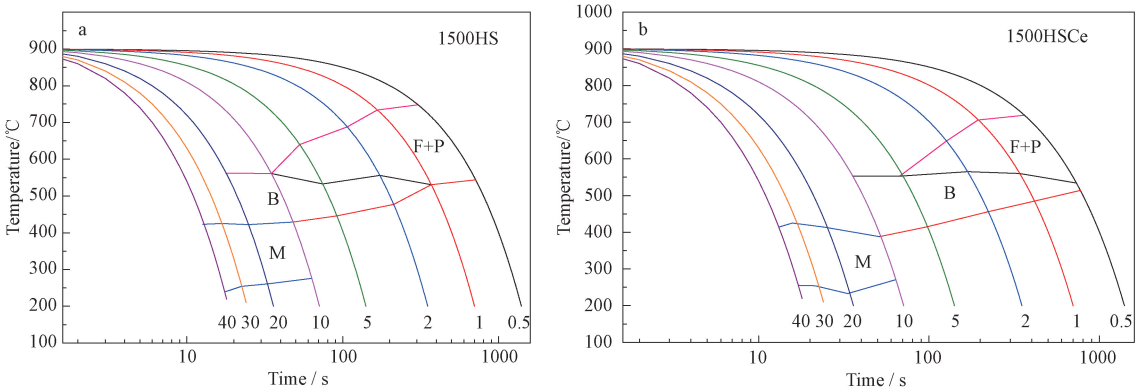


图 6 热成形钢的 CCT 曲线
Fig. 6 CCT curves of press hardening steel

此外,对比发现,Ce 对热成形钢贝氏体和马氏体转变温度影响不明显。但对临界冷却速率有显著影响,本试验条件下,马氏体临界冷却速率由 30 °C/s 降至为 20 °C/s。其他学者^[4]研究表明,1500HS 钢的临界冷却速率为 27 °C/s,本研究结果与文献报道结果接近。

3 分析与讨论

3.1 Ce 对热成形钢相变影响机理分析

Ce 对钢组织和相变的影响与 Ce 的分布状态及 Ce 与其他微合金相互作用有关^[11]。在本研究中,Ce 主要偏聚在界面附近,如图 7 所示。由于 Ce 原子的半径较大,在钢中扩散困难。因此,与 1500HS 试样相比,1500HSce 试样的铁素体形核需额外克服两个能量势垒。首先,Ce 很难进行有效扩散,若多边形铁素体在晶界形核,则偏聚晶界的稀土需固溶于铁素体晶粒内,这必然产生巨大的畸变能;其次,多边形铁素体在晶界形核将产生两个新界面,多边形铁素体生长即界面向残余奥氏体内移动也需要克服固溶晶粒内 Ce 原子的阻碍和拖曳作用。因此,热成形钢中添加 Ce 会导致奥氏体向铁素体转变的推迟,该结果与 Ce

但对比发现,1500HSce 试样相变温度降低,即奥氏体稳定性提高,铁素体转变区间缩小。一方面,铁素体转变温度降低 28 °C ~ 34 °C,另一方面,铁素体临界转变冷却速率由 10 °C/s 降低为 5 °C/s。

在低碳钢和管线钢中研究结果相似^[8,9]。

另一方面,高温和中温转变产物主要依赖于碳及其他合金扩散过程。研究结果表明^[12],钢中 Ce 和碳的活度相互作用系数为负数: $e_C^{Ce} = -0.030$,Ce 通过相互作用系数影响碳含量的扩散:

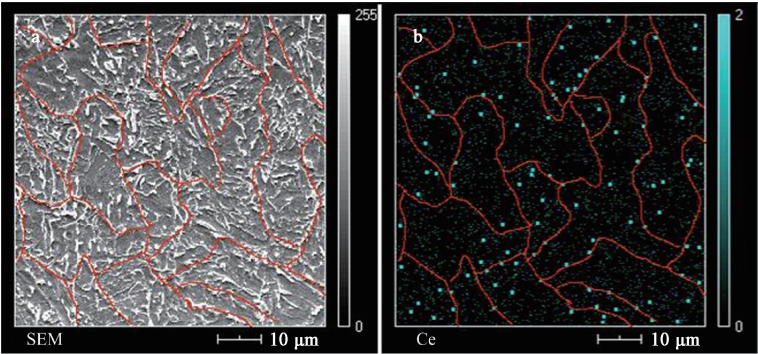
$$D_i = D_0 \exp(e_i^j x_j) \tag{1}$$

式中: D_0 为无 j 元素存在时 i 元素的扩散系数; x_j 为 j 元素的摩尔分数。

所以,Ce 降低了碳的扩散系数,抑制碳扩散。相变过程表现为推迟铁素体相变,促进马氏体转变。

3.2 Ce 对热成形工艺窗口的影响作用

热成形钢经加热后,钢板转移至模具过程中,钢板降温与环境温度和钢板厚度关系密切。环境温度较低时,降温速率加快。当环境温度一定时,钢板温度与厚度关系如图 8 所示。其中:钢板厚度小于 2.5 mm 为薄钢板;钢板厚度大于 4.0 mm 为厚钢板。有限元分析结果与实际测量结果均表明,随着钢板厚度减薄,在空气中温度降低更快。因此,薄规格 1500HS 热成形钢,在环境温度较低情况使用时,经常出现因冲压前发生相变情况而导致的冲压失效问题。



a:SEM 形貌;b:Ce 分布

图 7 Ce 在钢中的分布

a:SEM microstructure;b:Distribution of Ce

Fig. 7 Distribution of Ce in steel

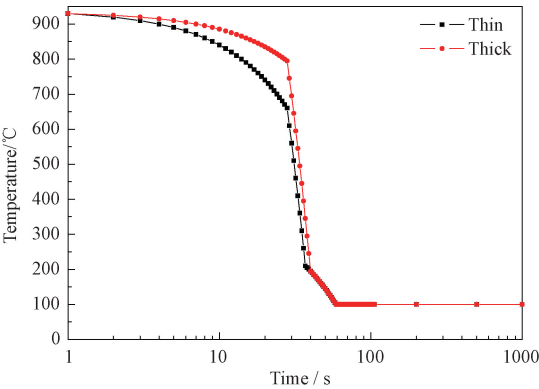


图 8 不同厚度材料热成形工艺温度变化

Fig. 8 Temperature variations in press hardening process of materials with different thicknesses

本研究将不同冷却速率条件下相变开始温度进行汇总分析,制备添加 Ce 和不添加 Ce 两种材料的冲压窗口,结果如图 9 所示,图中横线表示相变发生。为保证热成形钢板在冲压成形前未发生相变,钢板从加热炉转移至冲压模具时的空冷速率可按照 5 ℃/s 计算,即定义钢板相变温度以上 50 ℃ 为热成形合模窗口。由前文检测分析可知,在未发生铁素体相变时,1500HS 试样在 5 ℃/s 冷却速率条件下相变温度为 635 ℃,工业生产确定合模温度为大于 680 ℃;而 1500HSCe 试样在 5 ℃/s 冷却速率条件下相变温度为 553 ℃,理论合模温度应大于

610 ℃。因此,Ce 添加可将热成形钢的相变温度推迟,即与 1500HS 热成形合模窗口相比,1500HSCe 热成形合模窗口可降低冲压温度 70 ℃,这与其他学者研究结果相近^[13]。但根据图 6 中 1500HSCe 试样 CCT 曲线分析,5 ℃/s 为贝氏体和铁素体相变临界冷却速率,可能存在一定偏差。因此,综合冷却速度为 2 ℃/s~10 ℃/s 的相变温度差异,添加 Ce 可降低热成形钢冲压合模工艺窗口 45 ℃。即添加 Ce 热成形钢更有利于环境温度较低,或材料较薄情况下生产使用。本研究成果在实际生产中得到批量应用^[14,15]。

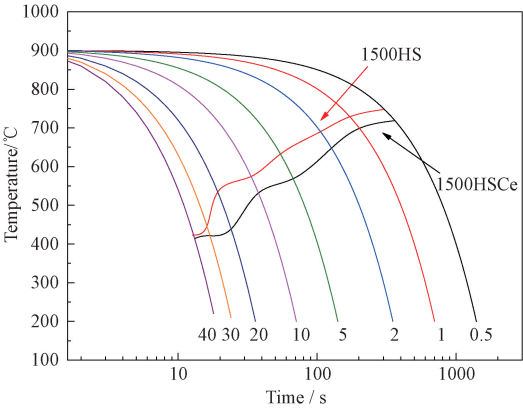


图 9 Ce 对热成形钢奥氏体稳定性的影响

Fig. 9 Effect of Ce on austenite stability of press hardening steel

4 结论

1. 本试验条件下,1500HS 冷却速度小于 $1\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{s}$ 时,组织主要以铁素体、珠光体为主。冷却速率 $10\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{s}$ 时,铁素体组织消失。冷却速度大于 $30\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{s}$ 时,获得马氏体组织。

2. 热成形钢中添加 Ce,具有推迟铁素体组织转变的作用。冷却速率为 $2\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{s}$,1500HSCe 以贝氏体组织为主,只存在少量仿晶型铁素体组织。冷却速率 $5\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{s}$ 时,铁素体组织消失。冷却速度大于 $20\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{s}$ 时,获得马氏体组织。

3. Ce 可提高热成形钢奥氏体稳定性。与 1500HS 相比,1500HSCe 铁素体转变区间缩小,Ce 促使铁素体转变温度降低 $28\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 34\text{ }^{\circ}\text{C}$,同时,临界转变冷却速率由 $10\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{s}$ 降低为 $5\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{s}$ 。

4. Ce 对热成形钢贝氏体和马氏体转变温度影响不明显,但对临界冷却速率有显著影响,本试验条件下,Ce 引起马氏体临界冷却速率由 $30\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{s}$ 降至为 $20\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{s}$ 。

5. 添加 Ce 因提高奥氏体稳定性作用,可有效扩大热成形冲压合模工艺窗口,综合 $2\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{s}\sim 10\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{s}$ 相变温度差异,1500HSCe 可降低热成形钢冲压合模工艺窗口 $45\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。有利于环境温度较低,或材料较薄情况下生产使用。

参考文献:

[1] 曹霞,邢泽宇,张路蓬. 政府规制下新能源汽车产业发展的演化博弈分析[J]. 管理评论, 2018, 30(9): 82-96.
Cao X, Xing Z Y, Zhang L P. An evolutionary game analysis of new energy vehicle industry development under government regulations [J]. Management Review, 2018, 30(9): 82-96.

[2] Sun Z F, Ma M T, Ma F W, et al. The test device for heat friction coefficient of high strength steel[J]. Engineering Sciences, 2012, 10(6): 75-78.

[3] 王利,杨雄飞,陆匠心. 汽车轻量化用高强度钢板的发展[J]. 钢铁, 2006, 41(9): 1-8.

Wang L, Yang X F, Lu J X. Development of high strength steel sheets for lightweight automobile[J]. Iron and Steel, 2006, 41(9): 1-8.

[4] Kolleck R, Pfanner S, Warnke E P. Development of cooled tools for press hardening of boron steel sheets[J]. Key Engineering Materials, 2007, 344: 225-232.

[5] 黄维,王志娟,鲁后国,等. 热成形技术在汽车轻量化中的应用[J]. 汽车工艺师, 2018, (5): 48-51.
Huang W, Wang Z J, Lu H G, et al. Application of thermal forming technology in automobile lightweight[J]. Auto Manufacturing Engineer, 2018, (5): 48-51.

[6] 杜林秀,高彩茹,张彩磊,等. 低碳钢应变诱导铁素体相变发生的温度条件[J]. 金属学报, 2002, 38(10): 1031-1036.
Du L X, Gao C R, Zhang C B, et al. Investigation on the conditions of strain-induced ferrite transformation of low carbon steel[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2002, 38(10): 1031-1036.

[7] 王良翌,段琳娜,贾书君,等. 高性能海底管线钢的铁素体相变规律[J]. 金属热处理, 2016, 41(4): 100-104.
Wang L S, Duan L N, Jia S J, et al. Ferrite transformation law of marine pipeline steel with high properties[J]. Heat Treatment of Metals, 2016, 41(4): 100-104.

[8] Liu H L, Liu C J, Jiang M F. Effect of rare earths on impact toughness of a low-carbon steel[J]. Materials & Design, 2012, 33: 306-312.

[9] Liu C J, Liu H L, Jiang M F. Effect of rare earth elements on transformation behavior and microstructure characteristics in X80 pipeline steels[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2011, 40(S3): 51-55.

[10] 刘宏亮,刘承军,姜茂发. 稀土微合金与轧制工艺对管线钢组织的影响[J]. 稀土, 2011, 32(3): 1-7.
Liu H L, Liu C J, Jiang M F. The influence of rare earth microalloying and rolling process on the microstructure of pipeline steel[J]. Chinese Rare Earths, 2011, 32(3): 1-7.

[11] 计云萍,任慧平,刘新华,等. 稀土对 20MnCrNi₂Mo 耐磨铸钢过冷奥氏体转变的影响及机理[J]. 稀有金属材料与工程, 2017, 46(4): 997-1002.

Ji Y P, Ren H P, Liu X H, et al. Effect of rare earth on super-cooled austenite transformation of 20MnCrNi₂Mo wear-resistant cast steel and its mechanism[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2017, 46(4): 997-1002.

[12] 杜挺. 稀土元素在铁基溶液中的热力学[J]. 钢铁研究学报, 1994, 6(3): 6-12.

Du T. Thermodynamics of rare earth elements in iron-base solutions[J]. Journal of Iron and Steel Research, 1994, 6(3): 6-12.

[13] 金晓春, 宋佳男, 张梅, 等. 22MnB5 钢制轿车后桥横梁热冲压成形的有限元模拟[J]. 机械工程材料, 2016, 40(4): 99-103.

Jin X C, Song J N, Zhang M, et al. Finite element simulation for hot stamping of car rear axle beam made of 22MnB5 steel[J]. Materials for Mechanical Engineering, 2016, 40(4): 99-103.

[14] 刘宏亮, 李龙泽, 陈宇, 等. 特厚规格热冲压材料与热冲压工艺的设计开发[C]. 第十三届中国钢铁年会. 北京, 2021.

Liu H L, Li L Z, Chen Y, et al. Design and development of thick specification hot stamping materials and hot stamping processes[C]. The 13th China Iron and Steel Annual Conference, Beijing, 2021.

[15] Liu H L, Chen Y, Li C C, et al. Design and analysis of hot forming parts with extra thick specification[J]. Materials Science Forum, 2021, 1026: 59-64.

Experimental Study on Developing Widely Applicable Rare Earth Press Hardening Steel
Based on Data Optimization

LIU Yan-chao¹, DU Wen-bin^{2,3*}, LIU Cheng-jun^{2,3}

(1. School of Information, Liaoning Institute of Science and Technology, Benxi 117004, China;
2. Key Laboratory for Ecological Metallurgy of Multimetallic Ores (Ministry of Education), Northeastern University, Shenyang 110819, China;
3. School of Metallurgy, Northeastern University, Shenyang 110819, China)

Abstract: In order to expand the process window of press hardening steel 1500HS, an experimental study was conducted on the addition of rare earth elements to this alloy, based on prior statistical analysis of literature regarding rare earth applications in steel. In this study, a vacuum induction furnace was used to melt hot-formed steels with and without a specific Ce content. Subsequently, phase transformations of the specimens were comparatively analyzed using a Gleeble-3800 thermomechanical simulator and metallographic analysis techniques. The results show that Ce can effectively improve the stability of austenite, inhibitive the ferrite transformation, and reduce the ferrite transformation temperature by 28 °C ~ 34 °C. The influence of Ce on the bainite and martensite transformation temperatures in press hardening steel is not significant. However, it reduces the martensite critical cooling rate from 30 °C/s to 20 °C/s. The addition of Ce can effectively increase the process window press hardening stamping process. Under the experimental conditions, the processing window for stamping and mold closure of press hardening steel can be reduced by 45 °C, which is beneficial for production in lower ambient temperatures or for thin-gauge products.

Key words: press hardening; rare earth; 1500HS; thermal simulation; microstructure