

冷却速率和保温时间对 42CrMo 离心铸造环坯高温性能的影响

武永红 齐会萍 李永堂
(太原科技大学金属材料成形理论与技术山西省重点实验室)

摘 要 针对环件铸轧连续成形高温出模环坯表面及边角易裂缺陷出现的原因,采用 Gleeble-3500 进行高温拉伸,研究高温出模立式离心铸造 42CrMo 环坯在不同冷却速率和保温时间下的力学性能。结果表明,冷却速率(1 ℃/s)和保温时间对材料强度影响较小,对塑性影响较大。在1 000 ℃以下缓慢冷却,塑性提高较多,在 1 200 ℃时冷却,塑性有较大降低;快速冷却(10 ℃/s)则相反,1 200 ℃时塑性提高明显。

关键词 42CrMo 合金;离心铸造;环坯;冷却速率;保温时间;力学性能

中图分类号 TG142;TG249.4 **文献标志码** A

DOI:10.15980/j.tzzz.2021.09.021 开放科学(资源服务)标识码(OSID): 

Effects of Cooling Rate and Holding Time on High Temperature Mechanical Properties of 42CrMo Ring Blank by Centrifugal Casting
Wu Yonghong, Qi Huiping, Li Yongtang
(Shanxi Key Laboratory of Metallic Materials Forming Theory and Technology, Taiyuan University of Science and Technology)

Abstract: In view of the causes of cracking on the surface and edges of high temperature ring blank in the mold ring blank casting-rolling continuous forming, the mechanical properties of 42CrMo ring blank by vertical centrifugal casting were investigated at high temperature under different cooling rates and holding time by Gleeble-3500 thermal test simulator. The results indicate that the cooling rate and holding time have less influence on the strength of the material, yet more on the plasticity. The plasticity of the material is increased with slowly cooling below 1 000 ℃, while decreased greatly at 1 200 ℃. Rapid cooling has the contrary law that plastic is increased significantly at 1 200 ℃.

Key Words: 42CrMo Alloy, Centrifugal Casting, Ring Blank, Cooling Rate, Holding Time, Mechanical Properties

环形零件是大型装备制造业的基础关键零部件,用量大,需求广。环件生产的短流程铸轧连续成形工艺^[1],是铸造+辗扩的复合连续工艺,与传统环件生产的锻辗复合成形工艺相比,可直接利用铸造环坯取代传统的锻造冲孔环坯,还可充分利用出模环坯的高温余热进行热辗扩,具有节能、节材和增效等特点,应用前景广阔。

该工艺中,环坯在高温出模后,温度分布不均匀,且与外界环境温差大,导致环坯各处冷却速率不同,从而影响热应力大小和自身的力学性能,进而影响裂纹发生趋势。试验表明,出模后环坯的常见缺陷是在刚出模的环坯表面和边角部易产生裂纹,为避免裂纹形成,同时

考虑到后续辗扩所需的最佳初始辗扩温度,需要对出模后环坯及时进行减小温差的补热及均热处理。因此研究高温铸造环坯空冷时冷却速率和保温时间下的力学性能对获得高品质无缺陷铸坯,确定辗扩的初始温度具有重要意义。

本课题以 42CrMo 轴承钢为研究对象,采用 Gleeble-3500 拉伸试验,通过改变拉伸热过程来模拟环坯在高温出模后的冷却和保温过程,用以评价高温出模离心铸造 42CrMo 合金环坯在不同冷却速率、保温温度及保温时间下的力学性能。可为制定合理的出模温度、优化均热工艺参数,避免铸造环坯高温裂纹的形成提供参考。

收稿日期:2021-07-20;修改稿收到日期:2021-08-25
第一作者简介:武永红,女,1973 年出生,副教授,太原(030024),E-mail:wyh1997@126.com
通信作者:李永堂,男,1957 年出生,教授,太原(030024),E-mail:liyongtang@tyust.edu.cn
引用格式:武永红,齐会萍,李永堂. 冷却速率和保温时间对 42CrMo 离心铸造环坯高温性能的影响[J]. 特种铸造及有色合金,2021,41(9):1 163-1 166.
WU Y H, QI H P, LI Y T. Effects of cooling rate and holding time on high temperature mechanical properties of 42CrMo ring blank by centrifugal casting[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2021, 41(9):1 163-1 166.

1 试验材料与方法

1.1 试样制备

试验选取立式离心铸造的 42CrMo 合金环坯,其外径为 $\phi 240$ mm、内径为 $\phi 120$ mm、高为 40 mm,主要化学成分(质量分数):C 为 0.44%,Mn 为 0.72%,Mo 为 0.22%,Cr 为 1.13%,Si 为 0.28%,S 为 0.007%,P 为 0.012%,余量为 Fe。采用中频感应炉熔炼,熔炼温度为 1 650~1 680 $^{\circ}\text{C}$,熔炼时间为 3.5~4.0 h,浇注温度为 1 520~1 560 $^{\circ}\text{C}$,浇注速度为 16.8~18.5 kg/s,铸型转速为 900 r/min,铸型预热温度为 150 $^{\circ}\text{C}$,铸件表面温度约为 1 050 $^{\circ}\text{C}$ 时出模。按照 GB/T2975-1998 制备标准力学性能试样。

1.2 冷却速率范围确定

采用 ProCAST 软件对出模前后的铸造环坯进行温度场模拟,预测高温出模环坯空冷时的冷却速率范围。假如使铸造环坯在接近辗扩的温度范围出模,即环坯内外表面温度为 900~1 250 $^{\circ}\text{C}$ 时出模,模拟得到出模后环坯在空冷时内外表面及边角点典型节点的冷却速率见图 1。模拟用铸造环坯的尺寸、节点位置、模拟过程及参数设置详见文献[2]。

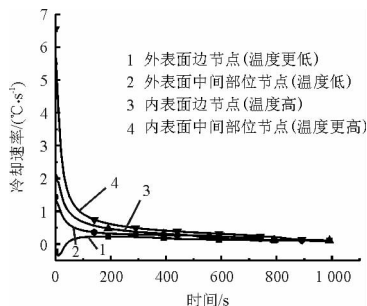


图 1 出模后环坯冷却速率曲线

Fig.1 The cooling rate curve of mold ring blank

由图 1 可见,环坯在高温出模后,大部分节点的冷却速率在 1~2 min 内快速降低,之后趋于 0~1 $^{\circ}\text{C}/\text{s}$ 的均匀冷却,且温度高的节点,出模后,由于与环境温差大,冷却速率大,速率降低更快,而温度低的外表面边节点,刚出模时冷却速率则显示为负,表明刚出模时该节点温度没有降低,反而升高,这是由于环坯自身的导热作用强于环境冷却作用所致。冷却速率的变化范围小于 10 $^{\circ}\text{C}/\text{s}$,小范围变化的冷却速率对材料性能的影响规律可以认为基本相同,因此,选取冷却速率为 1 $^{\circ}\text{C}/\text{s}$ 和 10 $^{\circ}\text{C}/\text{s}$,以研究冷却速率对材料力学性能的影响。

1.3 保温温度及保温时间确定

在铸辗连续工艺中,为了充分利用高温出模环坯的热能,应尽可能使环坯在适合辗扩的温度范围出模。出

模后环坯温度分布不均匀,一方面会产生较大的热应力,另一方面也不利于后续辗扩,因此需要在接近最佳辗扩温度范围进行均热处理。根据环件的铸辗复合成形工艺研究,42CrMo 铸造环坯适合辗扩的温度范围为 900~1 200 $^{\circ}\text{C}$,辗扩最佳初始温度为 1 100~1 150 $^{\circ}\text{C}$ [3]。因此,选取保温温度为 1 000、1 100 和 1 200 $^{\circ}\text{C}$ 进行试验。

为使组织均匀化,保温时间不能太长,时间太长,一方面会降低生产效率,更重要的是会造成奥氏体晶粒的长大,使得组织粗化,尤其是 1 200 $^{\circ}\text{C}$,奥氏体晶粒长大迅速。材料的塑性与晶粒直径有关,晶粒直径在 100 μm 以上时,粗大晶粒使得晶界长度变短,晶界面积增大,变形协调性变差,晶界强度降低,容易产生不均匀变形,导致应力集中,降低材料塑性[4]。通过对壁厚为 169 mm、均热温度为 1 200 $^{\circ}\text{C}$ 、内外表面温度为 900~1 250 $^{\circ}\text{C}$ 时出模的 42CrMo 环坯进行温度场模拟,发现环坯温度趋于均匀的时间仅需几 min[2]。表明高温出模后的环坯均热时间较短,同时为了避免长时间保温造成的组织粗大,选取保温时间为 1 min 和 6 min 进行研究。

1.4 试验方法

采用 Gleeble-3500 热力模拟机进行高温拉伸,固溶温度为 1 300 $^{\circ}\text{C}$,时间为 3 min,拉伸温度间隔为 100 $^{\circ}\text{C}$,拉伸速率为 0.01 s^{-1} ,试样被拉断后,为防止断口氧化,要迅速气冷。冷却速率和保温时间的热拉伸工艺见图 2 和图 3。

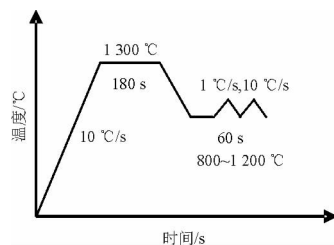


图 2 冷却速率加热工艺
Fig.2 Heating process for cooling rate

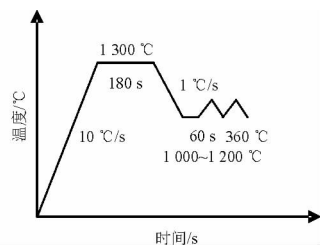


图 3 保温时间加热工艺
Fig.3 Heating process for holding time

2 试验结果及分析

根据裂纹产生的应力应变理论,出模后铸造环坯裂纹的形成是热应力或应变超出材料本身的强度极限或临界应变所致,因此,采用抗拉强度和断面收缩率评价材料的力学性能,以预测出模后环坯的裂纹发展趋势。

2.1 冷却速率对材料力学性能的影响

图 4 为不同冷却速率下,在 800~1 200 $^{\circ}\text{C}$ 内温度间隔为 100 $^{\circ}\text{C}$ 的 42CrMo 合金环坯的力学性能。

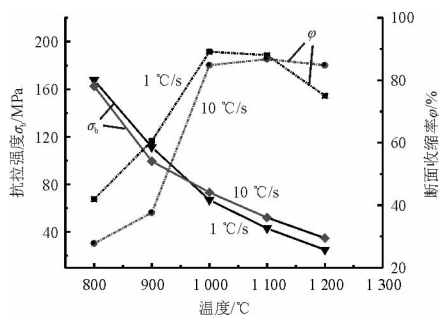


图4 不同冷却速率下材料的力学性能

Fig.4 Mechanical properties of 42CrMo alloy ring blank under various cooling rates

由图4可见,42CrMo钢的抗拉强度随温度升高而降低,塑性随温度升高先增大后减小,在1000℃以下,塑性相对较差,1000℃及以上时,塑性较好。冷却速率对材料强度的影响较小,对塑性影响较为显著。冷却速率为1℃/s时,在1000℃时塑性为最好,提高冷却速率到10℃/s,1100℃时塑性最好,这表明,随冷却速率增加,达到最佳塑性的温度更高。在1000℃以下,提高冷却速率,抗拉强度略微减小,塑性则大幅降低,1000℃及以上时,变化规律基本相反,即提高冷却速率,抗拉强度略微增加,塑性则是略微降低,之后随温度升高而提高。

温度 ≥ 1000 ℃时,强度随冷却速率增加,主要是由于42CrMo钢成分中,添加了Mn、Cr、Mo和Si,它们的原子半径分别为0.112、0.124、0.136、0.117nm,与Fe原子半径相近,可与Fe基体形成置换固溶体,固溶度随冷却速率的增加而增加^[5],固溶强化使得抗拉强度在增加冷却速率时有所增大。SUZUKI H G等^[6]指出,钢在900~1200℃,沿奥氏体晶界析出的氧化物、硫化物沉淀对晶界强度的削弱是导致该温度范围内材料塑性降低的主要原因。42CrMo钢在铸造过程会产生硫的偏析,继而产生硫化物沉淀,但在高温时,提高冷却速率,硫化物等夹杂物析出被抑制,从而在1200℃时材料塑性最佳。

随着温度降低,硫化物等夹杂物逐渐析出,提高冷却速率,抑制了析出物长大,析出物细化,增强了对奥氏体晶界的钉扎作用,阻碍了拉伸变形,降低了材料塑性。当环坯温度降至奥氏体化温度以下时,奥氏体发生相变,先共析铁素体逐渐沿奥氏体晶界呈网状析出。先共析铁素体优先在晶界形核,提高冷却速率,过冷度增大,形核率增加,沿奥氏体晶界析出的网状或薄膜状铁素体增加,铁素体与奥氏体相比,强度仅为奥氏体强度的1/4,晶界结合力降低,材料塑性变差,而较大的过冷度又使得残余奥氏体增加,从而降低了材料强度^[7]。

综上所述,在800~900℃的快速冷却造成了铸造

42CrMo钢材料的塑性急剧降低,从而增加了裂纹倾向,因而在铸辗连续成形工艺中,应避免出模后环坯边角点温度降至奥氏体相向铁素体相转变的相变温度。在1000~1200℃的高温段,不同冷却速率下的断面收缩率均在70%以上,断面收缩率大于40%时发生裂纹的可能性通常较小^[8],因而该温度范围内材料可以获得较好的塑性,有利于避免高温裂纹的形成。

2.2 保温时间对材料力学性能的影响

图5是保温温度为1000、1100和1200℃,保温时间为1min和6min时拉伸力学性能曲线。

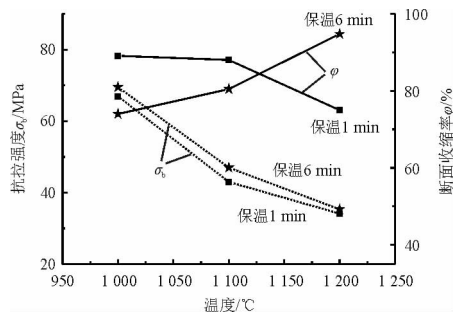


图5 保温时间对材料力学性能的影响

Fig.5 Effects of holding time on the mechanical properties of 42CrMo alloy ring blank

由图5可知,延长保温时间与加快冷却率对铸造42CrMo钢的力学性能有相似影响。延长保温时间,材料强度略微增加,且最大增幅为9.27%,断面收缩率则由原先随温度下降趋势转变为上升趋势,温度为1000℃时,塑性随保温时间延长而变差,温度为1100℃时,塑性略微降低,温度为1200℃时,塑性则得到了较好改善,断面收缩率提高为94.80%,与保温1min相比,提高了11.8%。

强度提高主要是因为延长保温时间增加了合金元素在奥氏体中的固溶度,固溶强化作用使得材料抗拉强度有所提高^[9]。在1000℃时,延长保温时间,塑性有较大降低,这主要与FeS与 γ -Fe沿奥氏体晶界形成的低熔点共晶体有关,延长保温时间,共晶体数量增加,共晶体局部熔化,在奥氏体晶界间形成液相薄膜,降低了晶界结合力,导致材料塑性降低。随着温度上升,硫在奥氏体中的固溶量增加,共晶体数量减少,对塑性的削弱作用减弱,当温度升至1200℃时,延长保温时间,材料中的S基本都固溶到了奥氏体基体中,晶界液化逐渐消失,材料塑性改善^[10]。同时,随着保温时间的短时延长,材料组织逐步趋于均匀。晶界析出物也逐渐粗化,当析出物尺寸达0.5~3 μ m时,低应变速率下将基本失去对奥氏体的钉扎作用^[11]。此时奥氏体动态再结晶及变形受析出物影响较小,进一步有利于材料塑性的改善。

为了确定出模后 42CrMo 铸造环坯在高温下的初始晶粒尺寸,冷却速率为 1 ℃/s,保温时间为 1 min,温度为 1 000~1 200 ℃,温度间隔为 100 ℃的试样,经粗磨、精磨、抛光、苦味酸腐蚀并清洗吹干后,通过 LEICA DMC 4500 莱卡显微镜进行了奥氏体晶粒尺寸的观察,见图 6。经测定,3 个温度下的平均晶粒尺寸均较大,分别为 771.92、813.72、857.26 μm。由图 6 可以看出,在 1 000 ℃和 1 100 ℃时奥氏体晶粒大小基本一致,组织较为均匀,1 200 ℃时组织均匀性相对差些,这也是保

温 1 min 比保温 6 min 塑性要差的原因之一。利用奥氏体晶粒长大公式^[12],得到保温 10、20 及 30 min 的奥氏体晶粒长大曲线见图 7。由图 7 可见,加热温度对奥氏体晶粒的长大作用大于保温时间对奥氏体晶粒的长大作用。在 1 000 ℃时,晶粒长大缓慢,但在 1 200 ℃时,晶粒迅速长大。因此对高温出模的铸造 42CrMo 钢环坯,在 1 200 ℃保温,只需在环坯整体温度达到均匀后保温几 min,使组织均匀即可,无需进一步延长保温时间。否则将使晶粒变得粗大,反而使材料性能下降。

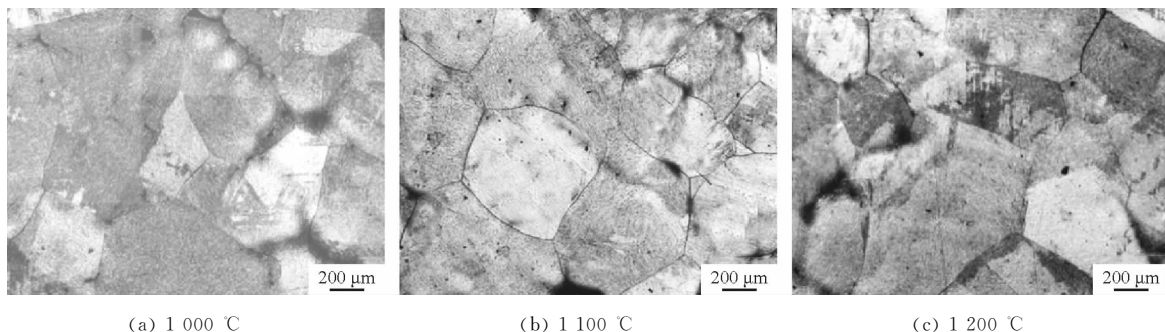


图 6 不同保温温度下铸造 42CrMo 钢奥氏体晶粒尺寸

Fig.6 The grain size of casting austenitic 42CrMo steel at different holding temperature

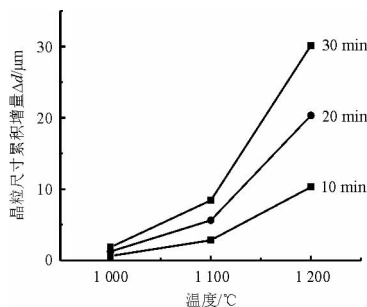


图 7 不同保温温度下铸造 42CrMo 钢奥氏体晶粒长大规律

Fig.7 The grain growth law of casting austenitic 42CrMo steel at different holding temperature

3 结 论

(1)在铸辗连续 42CrMo 钢成形时,为避免高温出模环坯边角部位形成裂纹,应控制出模时环坯边角部温度不低于 800 ℃,避免边角部处于铁素体和奥氏体两相共存组织,且应在 0~1 ℃/s 内缓慢冷却。

(2)42CrMo 钢铸辗连续成形后,在 1 000 ℃以下冷却时,提高冷却速率,抗拉强度略微降低;在不低于 1 000 ℃时,延长保温时间,抗拉强度略微增加;在 1 200 ℃时,塑性得到了显著改善,保温 6 min 的塑性远超保温 1 min 时的塑性。

参 考 文 献

[1] 李永堂,贾璐,齐会萍. 42CrMo 钢环件铸辗连续成形的工艺流程. 中国,0322895.1[P]. 2016-01-06.
[2] 武永红,李永堂,齐会萍,等.铸辗成形高温出模环形铸坯的热力耦

合模拟[J]. 特种铸造及有色合金,2016,36(2):200-204.

[3] 齐会萍.基于铸坯的环件热辗扩过程组织演变与工艺参数研究[D]. 太原:太原科技大学,2012.
[4] BERNHARD C, REITER J, PRESSLINGER H. A model for predicting the austenite grain size at the surface of continuously-cast slabs[J]. Metallurgical & Materials Transactions, 2008, B39(6): 885-895.
[5] 王佳夫,林清华,漆世泽,等.冷却速度对高强度低合金钢组织和性能的影响[J].钢铁研究学报,2004(5): 51-55.
[6] SUZUKI H G, NISHIMURA S, IMAMURA J, et al. Hot ductility in steels in the temperature range between 900 and 600 ℃ related to the transverse facial cracks in the continuously cast Slabs[J]. Tetsu-to-Hagane, 1981, 67: 1 180-1 189.
[7] 程巨强.奥氏体化保温时间对 ZG30CrMn2Si2MoNi 铸钢组织和力学性能的影响[J].铸造,2005(12): 109-111.
[8] MINTZ B. Importance of Ar3 temperature in controlling ductility and width of hot ductility trough in steels, and its relationship to transverse cracking[J]. Materials Science and Technology, 1996, 12(2): 132-138.
[9] 张新明,刘波,刘瑛,等.温度与保温时间对 2519A 铝合金高温力学性能的影响[J].中国有色金属学报,2007, 17(10): 1 561-1 566.
[10] 宗斌,王二平,魏建忠.工业纯铁锻造过程中“红脆”现象的相图分析[J].实验科学与技术,2008, 7(5): 25-28.
[11] MINTZ B. The influence of composition on the hot ductility of steels and to the problem of transverse cracking[J]. ISIJ International, 1999, 39(9): 833-855.
[12] WANG L, QIAN D, GUO J, et al. Austenite grain growth behavior of AISI 4140 alloy steel[J]. Advances in Mechanical Engineering, 2013, 50(1): 1-7.

(编辑:刘卫)