

基于 ANSYS 的双金属复合铸造工艺数值模拟及验证

张健健 王振虎 于梦娜
(西部金属材料股份有限公司, 西安 710076)

摘 要 利用有限元软件 ANSYS 对使用复合铸造方法生产球墨铸铁-硬质合金复合辊环的残余应力进行数值模拟。根据数值模拟结果,采用球墨铸铁/硬质合金包覆面积比为 0.344:1、截面积比为 0.4:1,球墨铸铁浇注温度为 1 320 ℃、硬质合金预热温度为 800 ℃,成功制得扩散区宽达 6 mm 且无缺陷的复合辊环。
关键词 复合辊环;球墨铸铁;残余应力;数值模拟
中图分类号 TP311;TB331 **文献标志码** A **DOI**:10.15980/j.tzzz.2024.05.018

Numerical Simulation and Verification of Bimetal Compound Casting Process Based on ANSYS

Zhang Jianjian, Wang Zhenhu, Yu Mengna
(Western Metal Materials Co., Ltd., Xi'an 710076)

Abstract: The residual stress of ductile iron-cemented carbide compound roller ring produced by compound casting was simulated by ANSYS. According to the numerical simulation results, the process parameters were determined as follows: the coating area ratio of ductile iron to hard alloy of 0.344:1, the cross-sectional area ratio is 0.4:1, the casting temperature of ductile iron of 1 320 ℃, and the hard alloy preheating temperature of 800 ℃. The compound roller with diffusion zone width of 6 mm without macro and micro defects was successfully prepared.
Key Words: Compound Roller, Ductile Cast Iron, Residual Stress, Numerical Simulation

辊环是轧机上的关键部件,延长其使用寿命的研究一直受到材料工作者的重视。目前,国内外已开发了多种辊环材质,常用的有合金球铁、贝氏体球铁、高

铬铸铁、高钨铬合金铸铁、高钒铸铁、工具型钢以及硬质合金等,其中硬质合金辊环使用效果最好,但其生产成本高,一次性投资大^[1]。因此,双金属复合材料应运

收稿日期:2023-05-13;修订日期:2023-07-01
第一作者简介:张健健,男,1996年出生,助理工程师,E-mail:32042150@qq.com
引用格式:张健健,王振虎,于梦娜. 基于 ANSYS 的双金属复合铸造工艺数值模拟及验证[J]. 特种铸造及有色合金,2024,44(5):679-682.
ZHANG J J, WANG Z H, YU M N. Numerical simulation and verification of bimetal compound casting process based on ANSYS[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2024, 44(5): 679-682.

[2] 朱翔鹰,李宏宝,涂浩,等. Al-3P 和 Al-5Ti 复合变质共晶 Al-Si 合金的组织与性能[J]. 材料热处理学报, 2021, 42(6):52-58.

[3] WANG Z J, ZHANG M, ZHANG Q Y, et al. Strengthening mechanism of compositely refined and modified multi-component aluminum-silicon alloy[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2020, 49(10):3 402-3 411.

[4] 刘闪光,虞秀勇,毛郭灵,等. 钇在亚共晶 Al-Si 合金中的作用研究进展[J]. 材料导报, 2022, 36(15):101-107.

[5] 李林鑫,银强,陈显均,等. RE 对 Al-22Si-3Fe-0.045P-1.8Mn 组织和性能的影响[J]. 铸造, 2016, 65(7):608-610.

[6] 黄晓锋,冯凯,谢锐. Mg 及 Mn 元素对 Al-Si 合金显微组织和力学性能的影响[J]. 中国有色金属学报, 2012, 22(8): 2 196-2 204.

[7] 刘春海,李天,吴大勇,等. 稀土 Ce 对 Al-7Si-0.7Mg-0.2Fe 合金组织和性能的影响[J]. 铸造, 2019, 68(2):152-157.

[8] 李明峰,刘学,薛力强,等. Bi、Mn 变质对过共晶 Al-Si 合金组织的影响[J]. 辽宁工业大学学报(自然科学版), 2017, 37(2): 107-110.

[9] 范晓明,刘建方,文红艳. Mn 对高铁 Al-Si 合金中铁相形态和力学性能的影响[J]. 特种铸造及有色合金, 2008, 28(8):594-596.

[10] WAN H, SI N C, LIU G L, et al. Influence of strontium addition

on microstructure and mechanical properties of an Al-10Si-5Cu alloy [J]. Transactions of the Indian Institute of Metals, 2017, 70: 2 039-2 046.

[11] 李玉山,司乃潮,刘光磊,等. 热处理对铸造 Al-10Si-5Cu-0.75Mg 合金组织及性能的影响[J]. 材料热处理学报, 2017, 38(1):50-57.

[12] 刘光磊,李玉山,李超,等. T6 态 Al-10Si-5Cu-0.75 Mg 合金的干滑动摩擦磨损性能[J]. 稀有金属材料与工程, 2019 (2): 620-625.

[13] WEI C, LIU G L, WAN H, et al. Effect of heat treatment on microstructure and thermal fatigue properties of Al-Si-Cu-Mg alloys [J]. High Temperature Materials and Processes, 2018, 37 (4): 289-298.

[14] TAHAMTAN S, HALVAEE A, EMAMY M. The influences of interfacial characteristics and subsurface microstructural evolution on wear behavior of Al/A206-5 Pct alumina micro/nano-composites[J]. Metallurgical and Materials Transactions, 2015, B46: 1 115-1 124.

[15] 吴星宇,龙思远,刘欢,等. 锰、铈含量对铸造 Al-Si 合金铁相形貌和相组成的影响[J]. 机械工程材料, 2014, 38(11):50-53.

(编辑:栗万仲)

而生。其方法主要包括固-固复合法、液-液复合法、固-液复合铸造法等,但固-固复合界面结合强度低,液-液复合易出现铸造缺陷^[2-3]。

利用固-液复合铸造法生产的硬质合金复合辊环具有生产成本低、工艺简单、能耗低、复合界面结合强度高的特点,且对双金属材料的种类无要求。将某种液态金属直接与固态硬质合金接触,使液-固金属原子相互扩散,在界面处生成金属间化合物、新相等达到冶金结合,成功制备出硬质合金复合辊环^[4-5]。但固-液复合铸造法在制备复合辊环冷却过程中,存在由于异种金属材料热膨胀系数失配导致产生巨大的残余应力,使得硬质合金发生断裂。基于此,使用 ANSYS-Workbench 软件进行模拟分析,采用模拟与试验相结合的方式,进行硬质合金-球墨铸铁复合成形工艺试验,以期为复合辊环制备提供参考。

1 复合辊环数值模拟

1.1 凝固过程的简化原则及有限元模型建立

硬质合金复合辊环铸造凝固过程的温度场及热应力模拟中,考虑到实际影响热传递过程中因素较多,凝固过程属于瞬态非线性计算,计算难以收敛,有必要对模型进行合理简化,建立一个既能有利于有限元分析计算又能较真实地反映实际凝固的模型,简化原则为^[6]:①金属液瞬间充满型腔;②充型后液相无自然或强制流动;③球墨铸铁和硬质合金为线弹性材料;④建

模时不考虑浇道和冒口。

1.2 有限元模型的建立及网格划分

复合辊环外环材料为硬质合金,外径为 $\phi 340$ mm,内径为 $\phi 260$ mm,高度为 100 mm;内环材料为球墨铸铁,外径为 $\phi 310$ mm,内径为 $\phi 220$ mm,高为 500 mm。考虑模型的对称性,建立 1/8 模型。采用 Modeling/Volumes/Cylinder 功能生成几何模型,Mesh 功能生成网格模型,网格划分见图 1,选择六面体单元格类型(hex),网格尺寸为 2 mm,节点数量为 1 465 318,网格数量为 350 550。

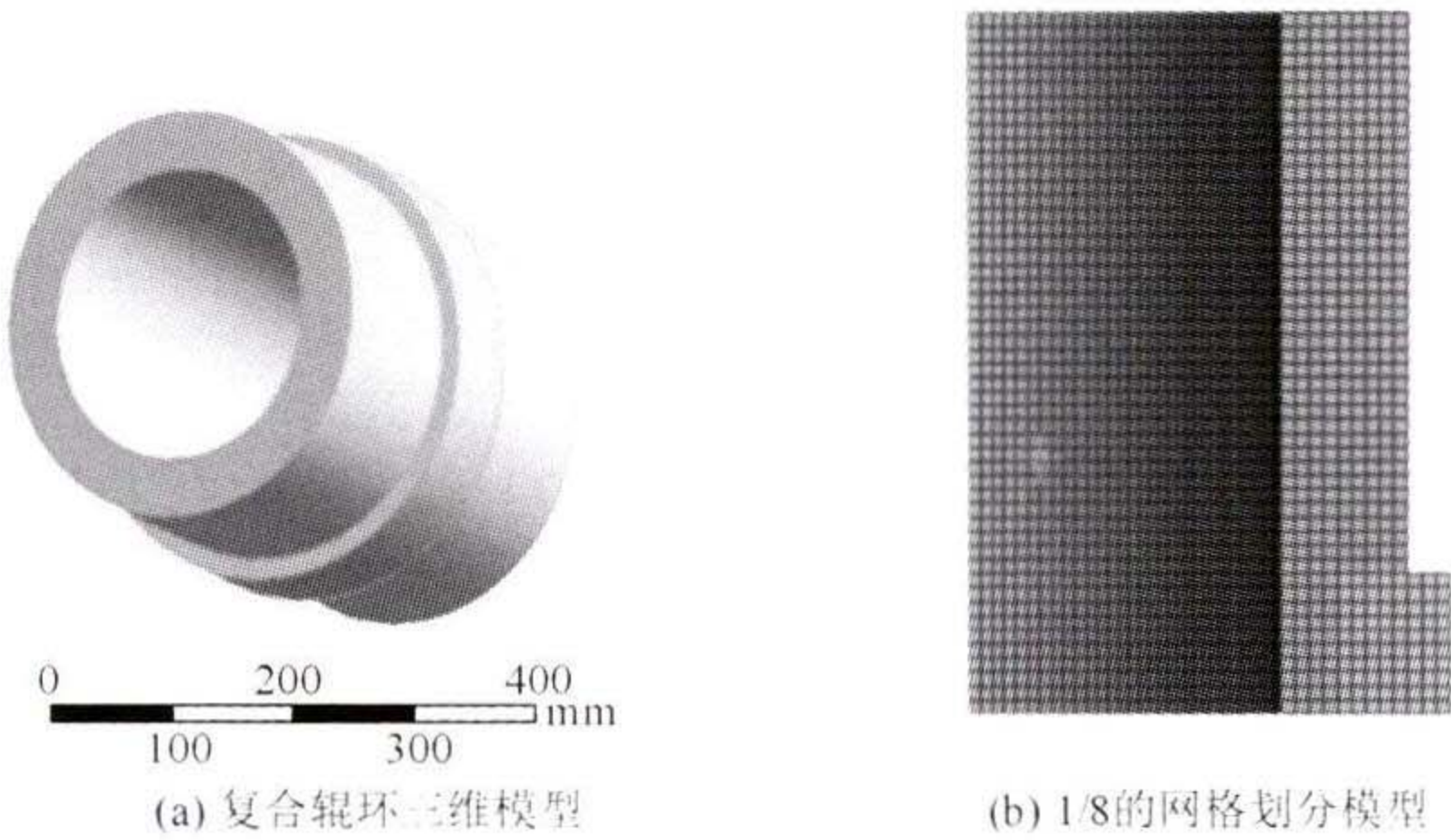


图 1 复合辊环三维模型和 1/8 的网格划分模型
Fig.1 3D model of compound roll and 1/8 grid division model

1.3 材料性能参数

模型中球墨铸铁、硬质合金的热物性参数均通过 JmatPro 软件计算得出^[7],见表 1。

表 1 球墨铸铁和硬质合金的热物性参数

Tab.1 Thermophysical parameters of cast iron and cemented carbide

材料	温度/℃	弹性模量/GPa	热膨胀系数/ (10 ⁻⁶ K)	泊松比	导热系数/ (W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)	比热容/ (J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹)	密度/ (kg·m ⁻³)	屈服强度/ MPa
球墨铸块	25	162.29	12.9	0.278	31.15	491.63	7 316	415
	200	154.31	13.5	0.283	30.27	539.74	7 264	
	400	142.70	14.29	0.289	29.97	612.82	7 200	
	600	126.43	15.14	0.295	28.87	912.30	7 130	
	800	109.16	15.58	0.315	26.85	673.32	7 060	
	1 000	95.17	18.68	0.328	28.71	757.27	6 937	
	1 100	91.24	18.54	0.343	30.13	864.20	6 920	
	1 180	0.15	17.01	0.495	29.67	2 024.40	6 925	
	1 280	-	19.17	-	31.36	763.8	6 840	
硬质合金	1 300	-	19.51	-	31.71	770.2	6 824	1 500
	1 320	-	19.84	-	32.05	776.6	6 809	
	25	338.52	7.31	0.276	19.39	252.35	13 305	
	200	334.32	7.55	0.282	21.83	281.25	13 252	
	400	329.71	7.85	0.289	24.62	307.50	13 188	
	600	323.44	8.13	0.296	27.40	327.35	13 121	
	800	317.46	8.40	0.318	30.18	344.20	13 049	
	1 000	310.20	8.66	0.329	32.96	359.95	12 976	

1.4 边界条件的设置

在复合辊环冷却过程中,设定球墨铸铁的凝固温

度(1 180℃)为零应力温度。铸型与空气的对流传热系数为 500 W/(m²·K),球墨铸铁内环与空气的对流传热系数为 150 W/(m²·K),球墨铸铁和硬质合金的对流传

热系数为 $2\,000\text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ 。球墨铸铁的初始温度为浇注温度,硬质合金的初始温度为预热温度,室温为 $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。为防止刚体移动,分别设置 $x=0, y=0$ 的平面垂直方向位移约束为0,复合辊环底面的 z 方向位移为0,选择 Z 轴负方向为重力方向。打开自动时间步长,设置计算终止时间,得出温度场计算结果,再将温度场计算结果作为载荷施加到结构场进行热应力计算。

2 数值模拟结果分析

2.1 有限元模拟路线

通过模拟不同包覆面积比、截面积比对复合辊环的残余应力的影响,最终确定较优的工艺指导试验。Workbench 中等效应力可直观地反映模型中的应力分布情况。球墨铸铁浇注温度为 $1\,320\text{ }^{\circ}\text{C}$,硬质合金预热温度为 $800\text{ }^{\circ}\text{C}$,球墨铸铁包覆硬质合金的包覆面积比为 $0.594:1$ 时,球墨铸铁与硬质合金截面积比为 $0.4:1$,硬质合金/球墨铸铁复合轧辊冷却到室温时的等效残余应力分布见图2。可以看出,球墨铸铁/硬质合金复合轧辊应力集中分布在界面结合区硬质合金一侧。因此,定义两个跨越球墨铸铁与硬质合金结合界面的路径,分析沿路径1、2的残余热应分布,见图3和图4。可以看出,应力集中位于界面结合区域的硬质合金侧。

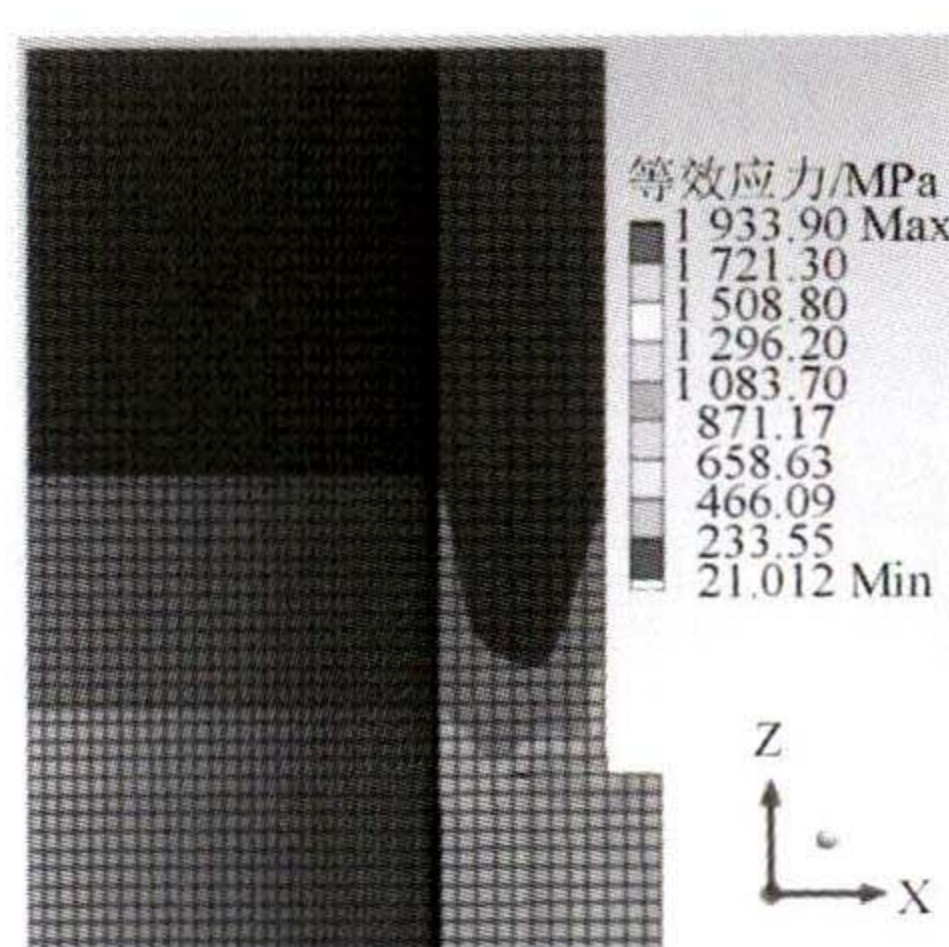


图2 室温时复合辊环等效应力分布图

Fig.2 Equivalent stress distribution of compound roller ring at room temperature

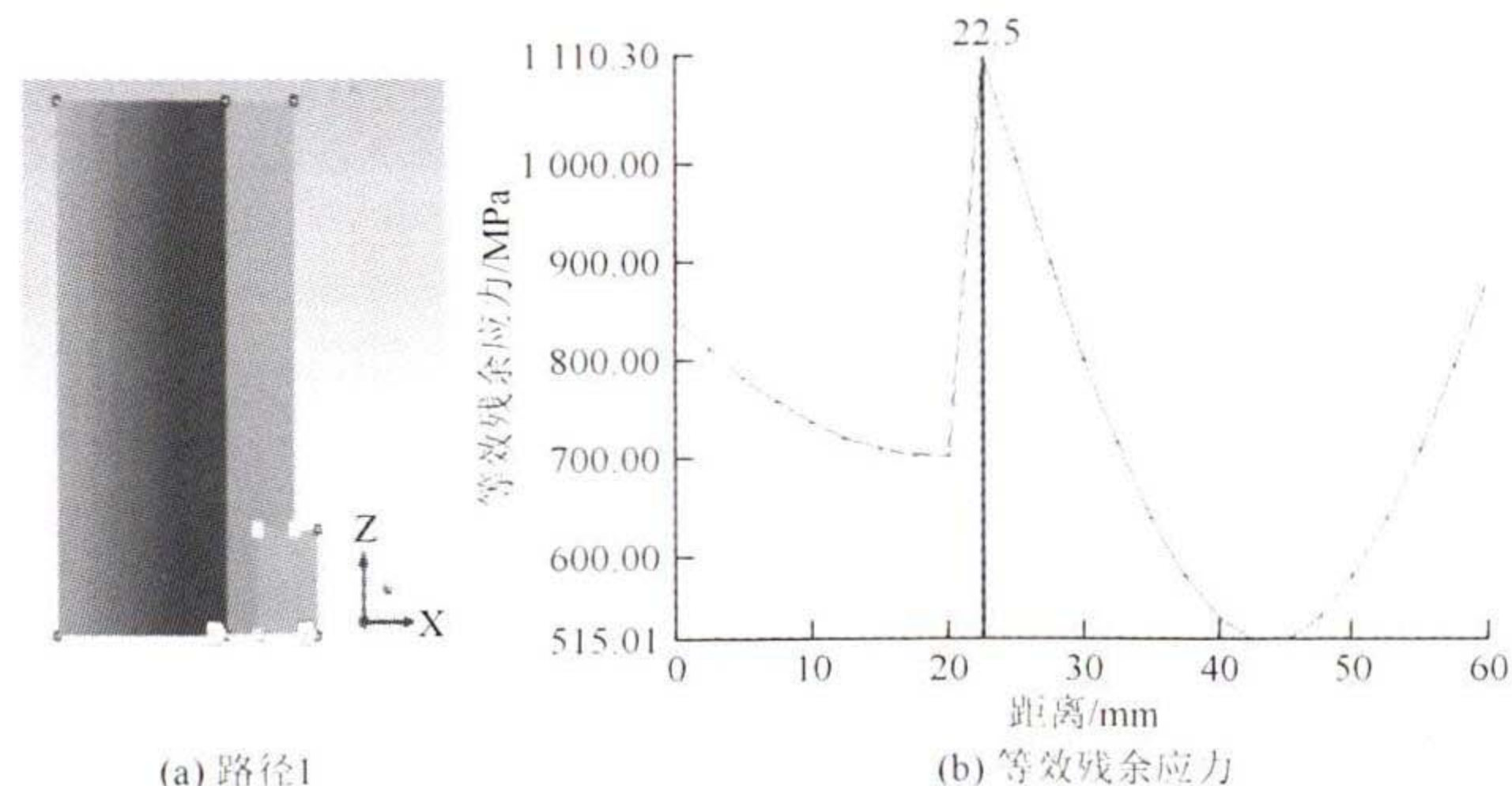


图3 路径1和沿路径1的等效残余应力

Fig.3 Path 1 and equivalent residual stress along path 1

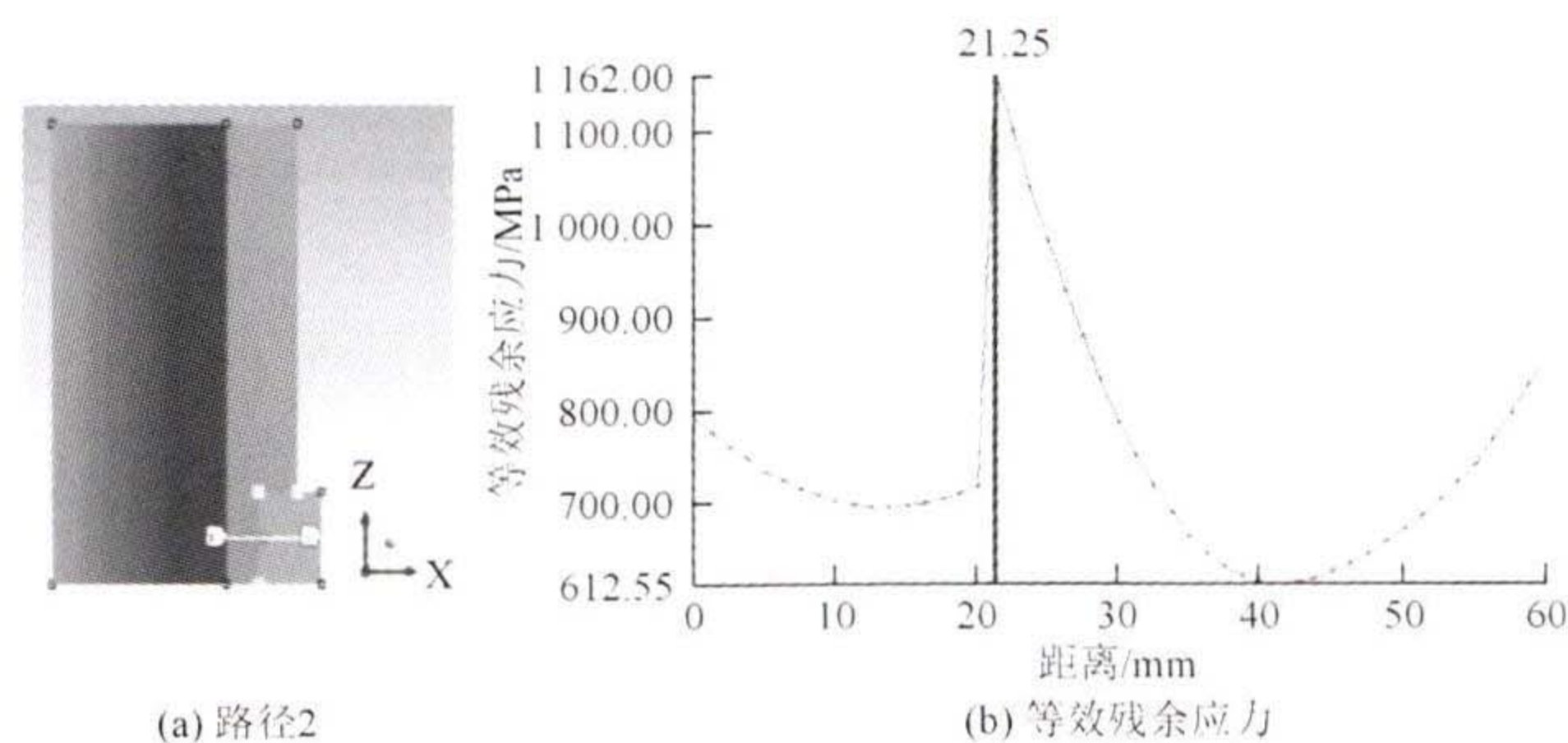


图4 路径2和沿路径2的等效残余应力

Fig.4 Path 2 and equivalent residual stress along path 2

2.2 包覆面积比对残余热应力的影响

包覆面积比是指垂直于辊环轴向球墨铸铁与硬质合金结合的截面与垂直于辊环轴向的硬质合金截面的面积之比,可通过改变球墨铸铁的外径来改变,见图5。

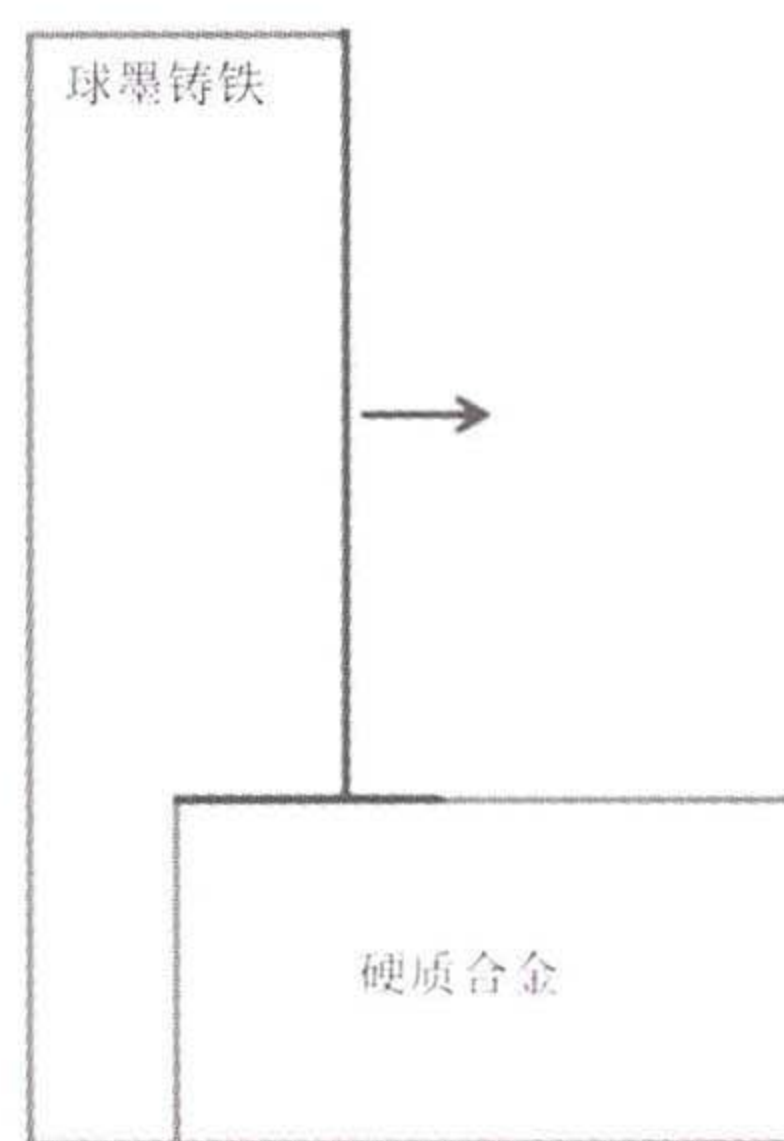


图5 球墨铸铁/硬质合金包覆面积比

Fig.5 Coating area ratio of ductile cast iron to hard alloy

图6为球墨铸铁包覆硬质合金不同面积比时,复合辊环冷却到室温时沿路径1、2的等效残余应力分布图。可以看出,在球墨铸铁不同程度包覆硬质合金时,复合辊环残余热应力最大值的位置仍然在结合区域的硬质合金一侧。

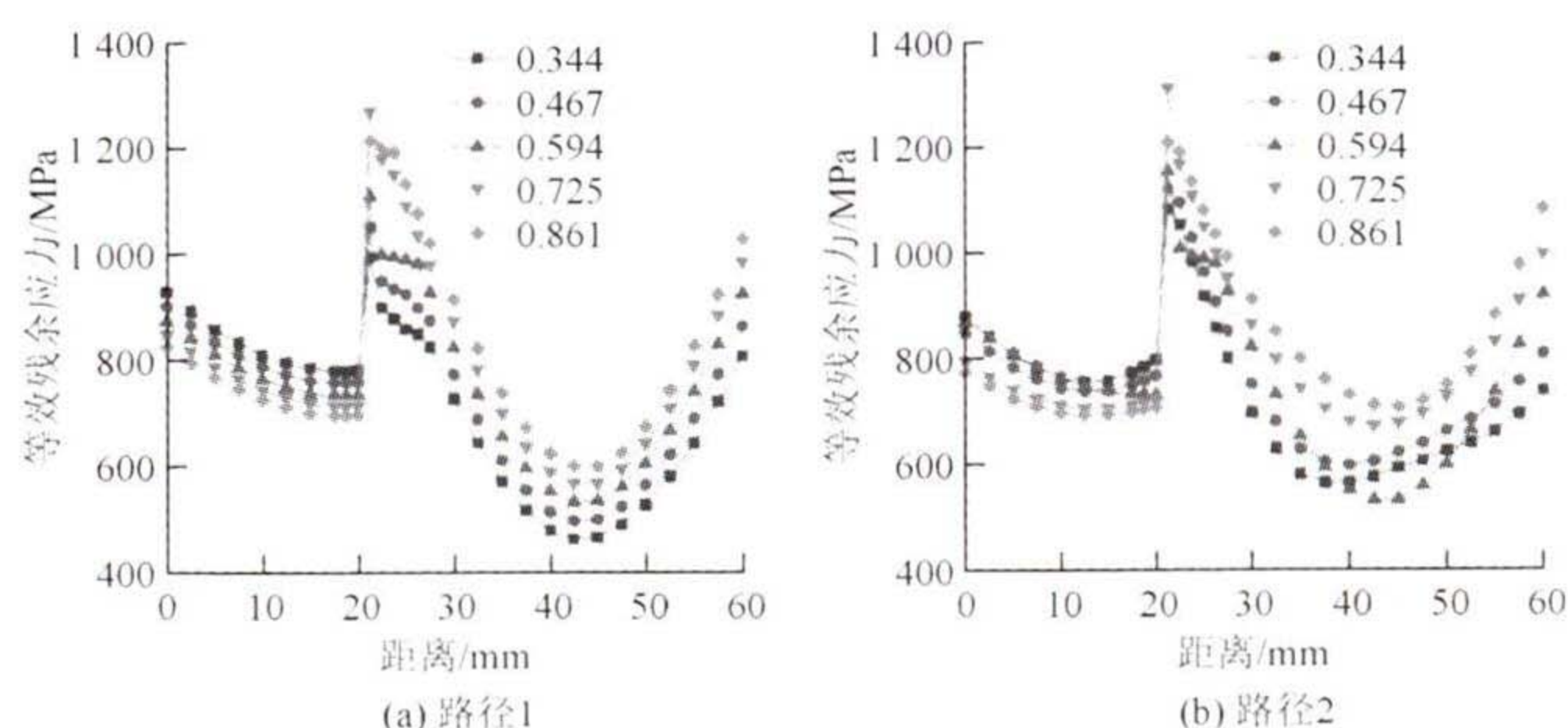


图6 不同包覆面积比时复合辊环沿不同路径的等效残余应力
Fig.6 Equivalent residual stress of compound roller along the path with different coating area ratios

表2为球墨铸铁包覆硬质合金不同面积比沿路径的最大等效残余热应力值。可以看出,随着包覆面积比的增大,热应力最大值先升高后降低。因此当球墨铸铁外径为 290 mm ,即球墨铸铁包覆硬质合金面积比为 $0.344:1$ 为较佳的包覆面积比。

表 2 不同包覆面积比时复合辊环沿路径的等效残余应力值

Tab.2 Equivalent residual stress values of compound rolls along the path with different coating area ratios

包覆面积比	包覆面积比对应球铁外径/mm	路径 1 等效应力最大值/MPa	路径 2 等效应力最大值/MPa
0.344:1	290	994.75	1 083.3
0.467:1	300	1 051.60	1 122.7
0.594:1	310	1 110.30	1 162.0
0.725:1	320	1 270.50	1 313.7
0.861:1	330	1 213.70	1 209.9

2.3 截面积比对硬质合金复合辊环热应力的影响

在确定球墨铸铁浇注温度为 1 320 ℃,包覆面积比为 0.344:1 的前提下,通过控制球墨铸铁内径的大小,改变球墨铸铁与硬质合金截面积之比(即面积 1/面积 2),见图 7,分析截面积比对复合辊环热应力的影响,见图 8。

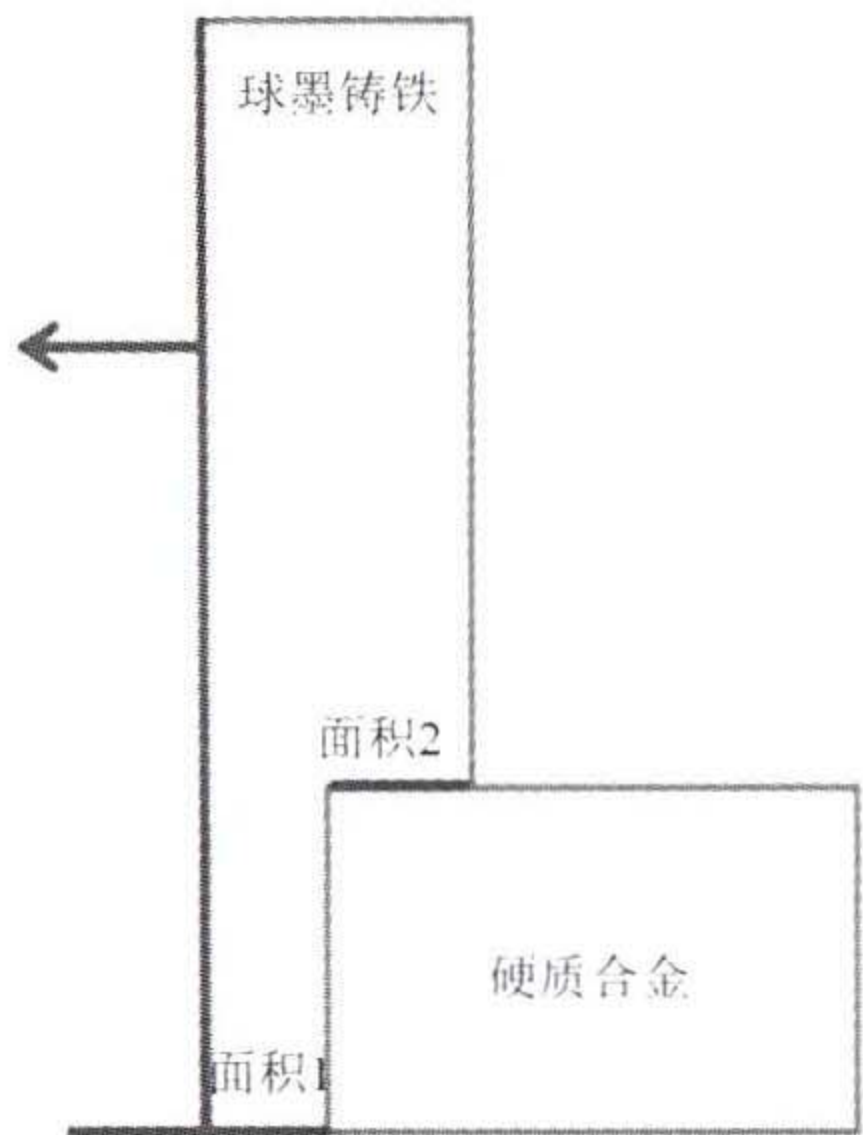


图 7 球墨铸铁/硬质合金截面积比

Fig.7 Cross-sectional area ratio of cast iron/hard alloy

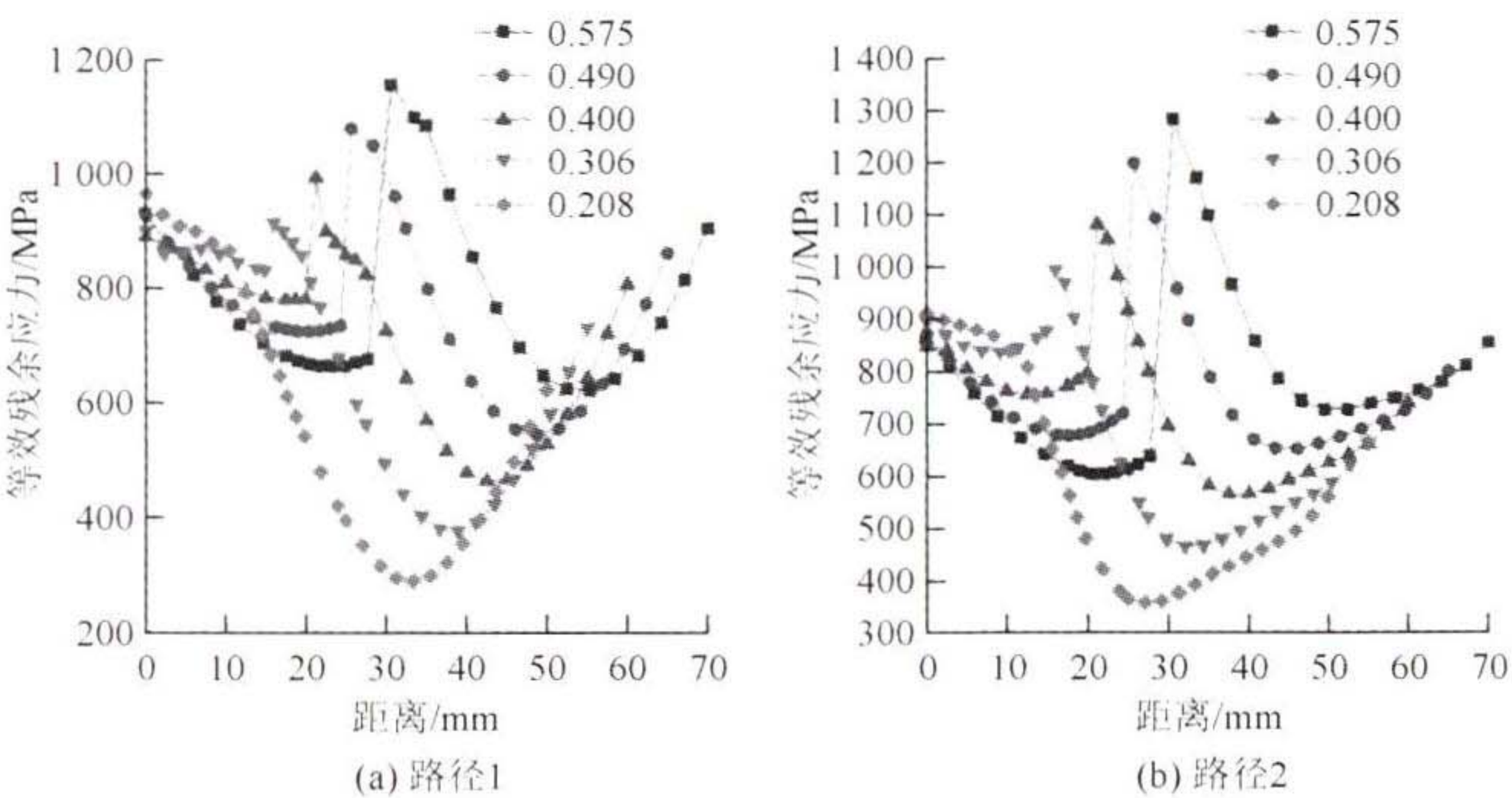


图 8 不同截面积比复合辊环沿不同路径的等效残余应力

Fig.8 Equivalent residual stress of compound roller ring along the path with different cross-sectional area ratios

表 3 为硬质合金截面积比沿路径的最大热应力值。可以看出,随着截面积比的减小,应力均呈现下降趋势,综合考虑热应力大小、应力集中区域以及成本等因素,得出当球墨铸铁内径为 220 mm,即球墨铸铁与硬质合金截面积比为 0.400:1 较为合适。

根据数值模拟得出较优的铸造工艺:浇注温度为 1 320 ℃,硬质合金预热 800 ℃,球墨铸铁包覆硬质合金面积比为 0.344:1,截面积比为 0.400:1。采用此工艺进行浇注试验,成功制得宏观结合区域扩散区宽度达 6 mm

的复合辊环,且结合区域无宏观、微观裂纹,见图 9。

表 3 不同截面积比时沿路径的等效残余应力最大值

Tab.3 Maximum value of equivalent residual stress along the path with different cross-sectional area ratios

包覆面积比	截面积比	截面积比对应球铁内径/mm	路径 1 等效应力最大值/MPa	路径 2 等效应力最大值/MPa
	0.575:1	200	1 156.30	1 285.30
	0.490:1	210	1 080.20	1 200.70
0.344:1	0.400:1	220	994.75	1 083.30
	0.306:1	230	915.86	996.69
	0.208:1	240	964.72	912.88

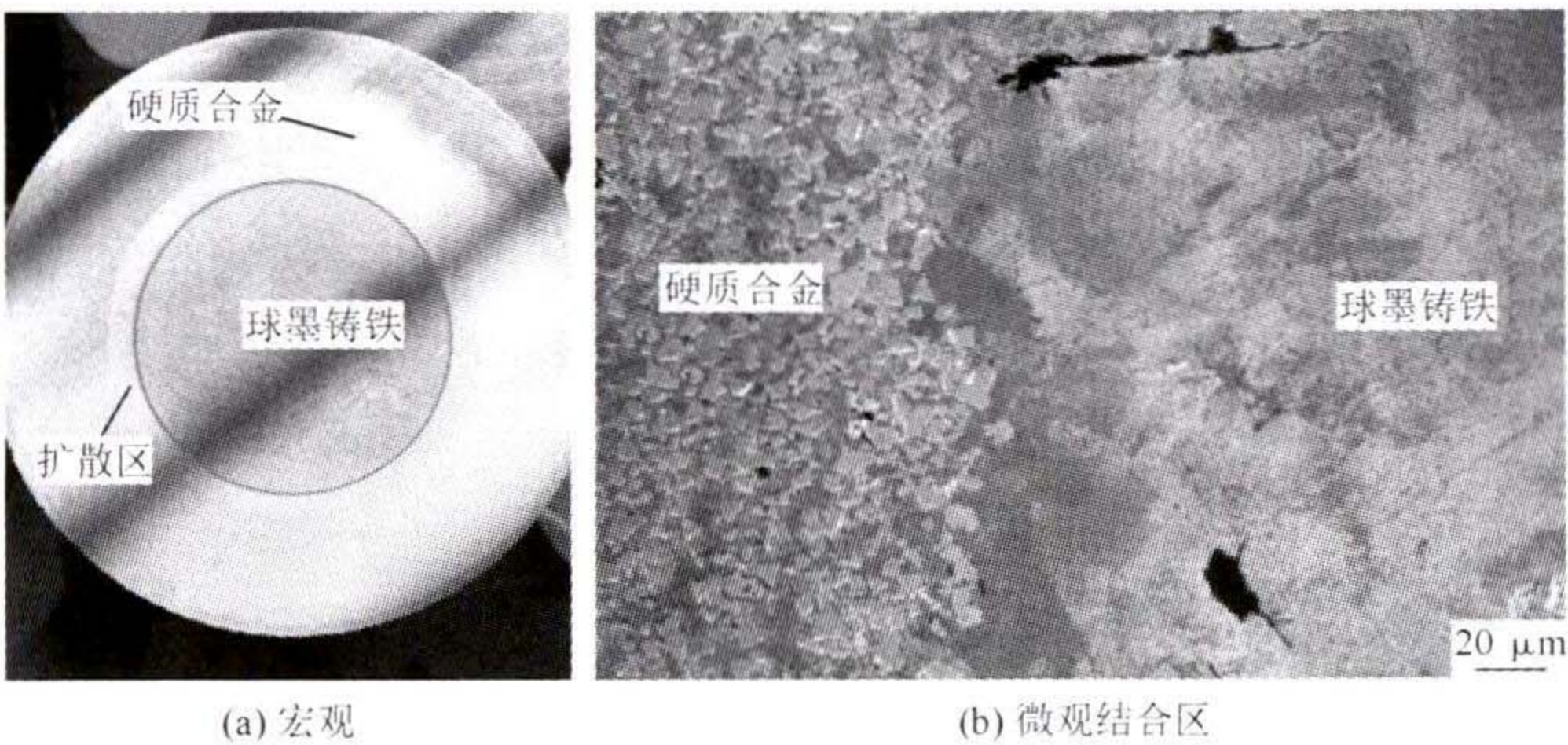


图 9 复合辊环图

Fig.9 Compound roller ring

3 结 论

(1)在球墨铸铁/硬质合金复合辊环的数值模拟的过程中,改变包覆面积比、截面积比,复合辊环的等效应力最大值均在硬质合金一侧,这与实际情况相符合。

(2)随着球墨铸铁包覆硬质合金面积增大,等效应力增大,综合考虑硬质合金外环与球墨铸铁内环的材料特性,选择球墨铸铁包覆硬质合金面积比为 0.344:1。

(3)随着球墨铸铁/硬质合金截面积比的减小,应力呈现下降趋势,综合考虑应力大小、应力位置以及成本等因素,选择球墨铸铁内径为 220 mm,即球墨铸铁与硬质合金截面积比为 0.400:1。

参 考 文 献

[1] 刘均贤,韩静涛,张永军.硬质合金轧辊材料的研究进展[J].中国钨业,2009,24(1):33-35.
[2] 蔡美,王双成,许云华,等.硬质合金/钢双金属复合材料的组织与性能研究[J].硬质合金,2008,25(4):203-207.
[3] 叶中飞,吕中宾,卢明,等.固-液复合铸造铝/铜双金属复合材料组织及性能研究[J].铸造技术,2022,43(3):176-179.
[4] 强劲熙,陈飞雄,贾佐诚,等.硬质合金复合辊环的试制[J].硬质合金,1996,13(4):213-215.
[5] 辜诚,程进,闻福林,等.固-液复合铸造制备双金属复合材料的研究进展[J].特种铸造及有色合金,2022,42(6):681-687.
[6] 刘娟娟.双金属固-液复合有限元模拟[D].沈阳:东北大学,2011.
[7] 钟流发,刘祚时,高秀琴,等.基于JMatPro与ANSYS联合仿真的变速器齿轮轴选材和热处理工艺改进设计[J].机械设计与研究,2020,36(5):84-88.

(编辑:彭瑾)