

· 试验研究 ·

GCr15 钢喷射成形沉积坯孔隙形成及致密度的分析

樊文军^{1,2} 张胤^{1,2} 韩翠珍¹

(内蒙古科技大学 1 稀土学院; 2 内蒙古自治区白云鄂博矿多金属资源综合利用重点实验室, 省部共建国家重点实验室培养基地, 包头 014010)

摘要 GCr15 钢(1.01% C、1.48% Cr)经 100 kg 中频感应炉熔化至 1 580 ℃,金属液流经炉底导液管喷嘴处被高压氮气流在雾化室雾化成微米级液滴,在基底形成沉积坯。通过使用金相显微镜、扫描电镜对 GCr15 钢喷射成形试样的孔隙分布、微观组织和密度进行比较分析。结果表明,沉积坯截面上有宏观孔隙,在整个截面上也存在一些形状不规则的孔隙;沉积坯整体平均相对致密度为 85.51%。

关键词 GCr15 钢 喷射成形 沉积坯 孔隙 致密度

An Analysis on Formation of Pore and Density of Spray forming Deposition Billet of Steel GCr15

Fan Wenjun^{1,2}, Zhang Yin^{1,2} and Han Cuizhen¹

(1 School of Rare Earth, 2 Inner Mongolia Key Lab for Utilization Baiyun Obo Multi-metallic Resources and Elected State Key Lab, Inner Mongolia University of Science and Technology, Baotou 014010)

Abstract As the steel GCr15 (1.01% C, 1.48% Cr) is melted in an 100 kg induction furnace up to 1 580 ℃, the metal liquid flows through furnace bottom liquid conduct nozzle and sprays in atomized chamber by high pressure nitrogen flow to atomize micron liquid drops and form deposition billet at bottom. The compared analysis on pore distribution, micro-structure and density of spraying formed steel GCr15 has been carried out by using optical microscope, scanning electron microscope. Results show that there are macro-pores at deposition billet cross section and irregular-shaped micro-pores distributed in whole deposition billet. The average relative density of whole deposited billet is 85.51%.

Material Index Steel GCr15, Spray Forming, Deposition Billet, Pore, Density

喷射成形研究始于 20 世纪 70 年代^[1],该技术又称金属喷射沉积、喷射沉积,有时也称为喷射凝铸、液体动态固结和可控喷射沉积,在商业上则通称为奥斯普瑞工艺^[2-4]。喷射成形的凝固过程既不同于常规铸造,也不同于其他快速凝固方法,而是由雾化和沉积两个过程组成并以等轴非枝晶形态为基本组织特征的凝固过程^[5]。然而,喷射过程可控参数多,参数间相互制约影响,选择优化喷射工艺参数过程复杂,制品的密度一般为理论密度的 85% ~ 90%,坯料中存在微孔^[6,7],熔滴之间、熔滴与层界面之间未达到完全的冶金结合。这些孔隙易引起强烈的应力集中,减小材料的有效承载面积,从而降低材料的力学性能^[8],成为该技术应用推广的瓶颈。

1 实验过程

将母合金料 GCr15 钢(表 1)放入喷射成形设备的中频感应炉(100 kg)中熔化,达到 1 580 ℃ 打开感应炉底部阀门,金属液流经导液管进入雾化室,在喷嘴处被高压氮气流雾化成微米级液滴。雾化液滴在飞行过程中大部分被沉积基底接收,逐渐长大形成

表 1 实验用 GCr15 钢化学成分 / %

Table 1 Chemical composition of test steel GCr15 / %

元素	C	Si	Mn	Cr	Ni	P	S
喷射成形	1.01	0.23	0.29	1.48	-	-	-
YB9-68	0.95 ~ 1.05	0.15 ~ 0.35	0.20 ~ 0.40	1.30 ~ 1.65	≤ 0.30	≤ 0.027	≤ 0.02

了喷射成形沉积坯。沉积坯截面轮廓呈现类似高斯分布,直径约为 318.94 mm,高约为 123.01 mm,中心厚度约为 110.25 mm。将试样沿轴向割开,把截面磨光、抛光,用硝酸酒精溶液腐蚀,然后在光学显微镜上和扫描电子显微镜上观察孔隙和组织的分布状况。将沉积坯沿中心轴切取截面的 1/2、厚度为 15 mm 的试样,并测定了沉积坯的密度。

2 实验结果及分析

2.1 宏观孔隙

喷射成形的试样呈圆饼状,截面轮廓呈现“M”型双峰分布,试样沿中心轴向截面如图 1。

在喷射沉积试样的截面上肉眼可以观察到孔隙(图 1)。由于喷嘴在即将喷完时部分组件被烧损,

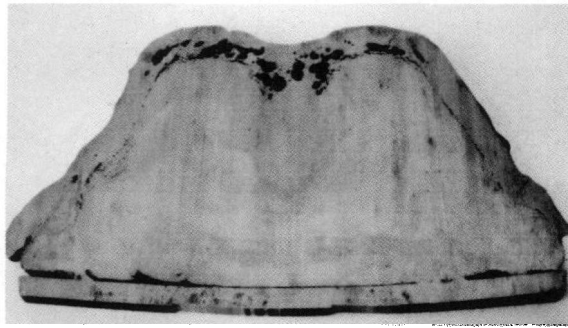


图 1 GCr15 钢沉积坯沿轴向的截面

Fig. 1 Cross section of spray deposition billet of steel GCr15 a-long axis

以致高温钢液流雾化不完全,形成过热的射流,射流在空中高速旋转后席卷了大量的气体杂质,沉积后形成大的孔洞,集聚在试样的上部约 15 mm 厚的表层,直径甚至可达到 6 mm 左右;另外,随着金属熔

滴的沉积,沉积坯的温度升高,沉积表面半固相的液态层扩大,坯件的最后凝固区域所含的液相分数增加,促进残留气体的析出并凝聚成长为直径 1 mm 左右的气孔,分布于表层与沉积坯的接触带。

在沉积坯的底部与沉积基体的接触带,也存在大量的空隙,主要是由于沉积时未对基底预热,沉积坯底部冷却速度很快,沉积坯的液相含量较低,雾化熔滴或颗粒在堆积形成沉积坯的过程中,相互覆盖出现的间隙缺少足够的液相填充,形成较多的孔隙。因此,在喷射沉积试样的截面上的宏观孔隙,可以通过预热沉积基底和保证喷嘴质量得到很好控制。

2.2 微观孔隙

喷射沉积 GCr15 钢中存在一些肉眼无法观察到的孔隙,大小不一,形状有不规则的,月牙形的、也有近球形的(图 2),这些孔隙遍布于沉积坯的边缘、

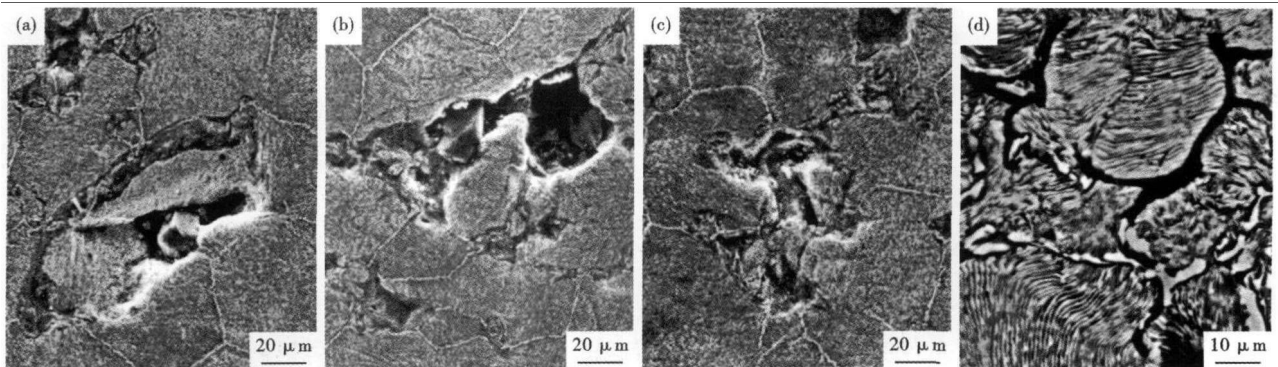


图 2 GCr15 钢沉积坯组织微观形貌:(a)孔洞;(b)空心熔滴形;(c)显微疏松;(d)网状空隙

Fig. 2 Morphology of microstructure of steel GCr15 deposition billet; (a) pore; (b) melted drop with cave; (c) micro porosity; (d) net pore

中心和底部。出现这些孔隙的主要原因为:

(1)将过喷粉末收集和统计,如图 3 所示,粉末的尺寸呈正态分布,喷射雾滴的尺寸分布范围较宽,小到 5 ~ 10 μm,大到 100 ~ 125 μm。由于熔滴尺寸的变化,造成气体雾化过程热流分析的复杂性。雾化熔滴到达沉积表面时的热和凝固状态强烈依赖于熔滴尺寸,包括熔滴和周围气体热交换和熔滴飞行过程中的加速和减速同尺寸的关系。由于熔滴尺寸的不同直接造成雾化熔滴到达沉积表面时存在热状态的差异。可以将雾化的颗粒分为 3 种:完全凝固颗粒、部分凝固的颗粒、液态颗粒。

尺寸很小的熔滴在沉积前已

经完全凝固,一方面,当这些熔滴又覆盖堆积,它们之间的缝隙就不容易被液相填充,这样就会产生形状不规则的孔隙如图 2 (a);另一方面,当固化的颗粒打在沉积表面,成为镶嵌在表面的一个硬质点,当

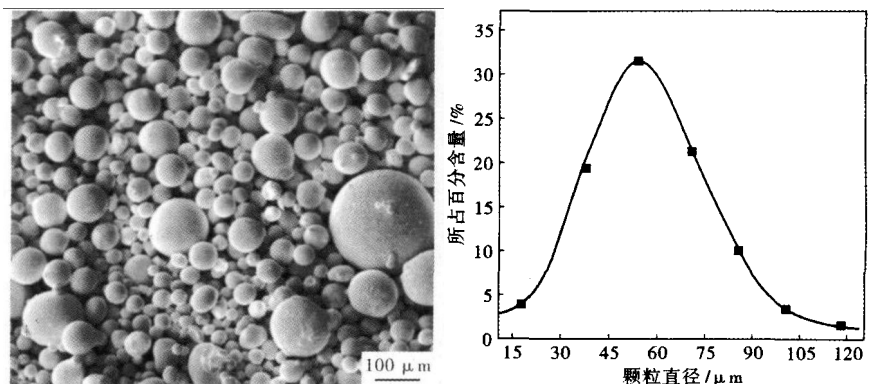


图 3 过喷粉末颗粒尺寸分布

Fig. 3 Distribution of size of over spray powder particles

其他半凝固态熔滴打在硬质点上时,将顺着硬质点周边流下,而硬质点一般较冷,故使熔滴很快冷却,不能充分填充硬质点四周,于是在硬质点周围便形成月牙形孔隙。尺寸较大熔滴沉积前液相成分居多,受高速气流冲击,在沉积表面产生扰动,可能带人气体,雾化沉积过程中,液相居多的大尺寸雾化熔滴以糊状沉积在沉积坯表面,大量气体卷入沉积层,并在一定程度上阻碍卷入气体的溢出,从而形成形状较圆整、内部光滑的气孔如图 2(b)所示。

(2)雾化熔滴形成过程:从喷嘴流出的金属熔体在雾化气流的作用下,首先在液态金属表面形成扰动波。随着时间的延长,波的振幅逐渐增大,当达临界振幅时,波峰与主流分离形成为带状的丝线(Ligaments)。然后,这些丝线又在表面张力的作用下迅速收缩、破碎成熔滴。当熔滴尺寸大于临界尺寸时,在喷嘴部形成后,在飞行过程中会发生进一步的剥离式破碎。

喷射雾滴的平均直径 d_m , Lubanska^[9] 提出如下经验公式:

$$\frac{d_m}{d_{Met\ str}} = K \sqrt{\frac{\mu_m}{\mu_g} \times \frac{1}{W_e} \times \left[1 + \frac{M}{A} \right]} \quad (1)$$

式中: d_m - 质量中值颗粒直径; $d_{Met\ str}$ - 金属液流直

径; μ_m 、 μ_g - 金属液和雾化气体的运动学粘度系数(运动粘度); M 、 A - 金属和雾化气体的质量流量; $W_e = \rho_m V^2 V_{Mer\ str} / \gamma$ 表示韦伯数(Weber)。其中: ρ_m - 液态金属的密度; V - 雾化气体冲击液态金属液流的速度; $V_{Mer\ str}$ - 液态金属液流冲击雾化气体的速度; γ - 表面张力; K - 经验常数。

由公式(1)可以看出,雾化液滴平均直径受到液态金属流速度与雾化气体流速度差异的影响。从能量角度分析,雾化过程是雾化气体的动能转化为液态金属的表面能、动能以及其他形式能量的过程;雾化气体的速度愈大,可供转化为液态金属的表面能量就愈大,则雾化液滴的直径就愈小。在雾化过程中,追求产生直径较小雾化液滴的同时,不可避免的出现雾化颗粒在飞行过程中加速度的差别,部分小颗粒打穿大颗粒并在粉末颗粒中留下孔洞,如图 4(a)所示,由于受到高速气流冲击而形成表面凸凹不平,附带有毛刺的雾化熔滴特征和空心的熔滴如图 4(b)所示,吸附于这些形貌特殊的熔滴表面少量雾化气体,会随熔滴一起进入沉积坯而形成孔隙。

(3)熔滴撞击基板或先沉积层,开始时形成薄的液相膜,并以高速向径向铺展,铺展充分后开始冷却、凝固。熔滴的铺展过程的初期主要机制是惯性

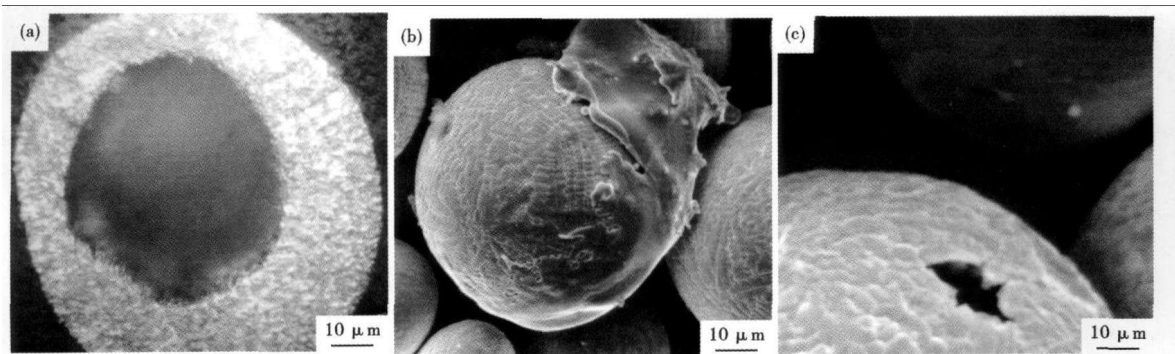


图 4 雾化过程中出现的熔滴形貌:(a)粉末中空洞;(b)带毛刺的熔滴;(c)显微疏松

Fig. 4 Morphology of liquid drops during atomized process: (a) hole in powder particle; (b) liquid drop with burr; (c) micro-porosity

效应,随后的铺展过程粘度效应开始起重要作用。

通过对热流、液体流动和凝固行为的研究分析结果^[10]表明,开始时熔滴的铺展过程被液体流动控制,熔滴撞击动能越大,克服粘滞力铺展越充分;当熔滴铺展到一定范围时,热交换成为主要控制因素,熔滴的铺展过程受凝固过程控制。由于熔滴撞击过程的控制较复杂,经常出现金属熔滴撞击基板或先期沉积层时,在充分铺展之前快速冷却、凝固形成麦

片层组织,片层间形成孔隙,若金属熔滴沉积之前已部分或全部凝固则孔隙率更高,沉积层内主要是这类孔隙。

大部分熔滴在沉积前是半凝固态,熔滴在非平面的起伏面上沉积时,将沿着沉积表面铺展开来,最终形成非平整的薄片,当表面起伏波长小于熔滴直径时,将阻碍熔滴的铺展过程;而当表面起伏波长大于熔滴直径时,铺展过程表现为加速周期性振荡行

为,直到发生液相破碎为止,然而一定的液相破碎会导致显微疏松(图 2c)。

(4)凝固收缩也可能造成孔隙的形成,这种孔隙一般不含雾化气体。由于熔滴向固态转变时,原子聚集度的变化而引起沉积坯微观组织产生孔隙如图 2(d)所示,孔隙尺寸偏大,应是堆积不致密的孔隙,这种孔隙在喷射沉积中很难避免。

2.3 喷射沉积坯密度分析

由图 5(a)可知,沉积坯整体致密度较低,统计其平均相对密度 85.51%;一方面,由于熔滴尺寸的分布范围较广,不同尺寸的雾滴在不同的加速度下飞行时,与周围气体产生的热交换也各异,当雾滴到达沉积坯表面具有的热量不可避免的存在一定的差异;另一方面,由于不断生长的沉积坯自身的传热能力会随着基底传热作用、熔滴到达沉积坯位置的不同而产生变化。因此,在沉积坯生长过程中,不可避免的会出现沉积坯表面的热量不平衡现象,继而导致沉积坯的致密度下降。

孔隙率的分布是不均匀的,一般在沉积坯的中心区偏上位置致密度较低(图 5a)。另外,在沉积坯的底部和边缘致密度也相对较低,由于表面获得的热量低于导出的热量,凝固速度很快,沉积坯的液相含量较低,雾化熔滴或颗粒在堆积形成沉积坯的过程中,未来得及充分铺展便开始凝固,以致熔滴间相互覆盖出现的间隙缺少足够的液相填充,形成较多的孔隙。但从图 5(a)可知,在沉积坯底部和边缘部位也出现相对密度值高于平均密度的情况,因此熔

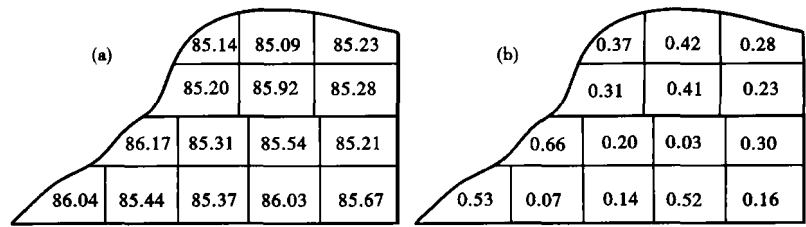


图 5 GCr15 钢沉积坯致密度(a)和偏差(b)的测定结果/%

Fig. 5 Measured results of density (a) and density deviation (b) of steel GCr15 deposition billet / %

滴到达沉积坯的位置对沉积坯致密度的影响是相对的。沉积坯各个部位的致密度虽有所差异,如图 5(b)所示,经统计其平均偏差为 0.31%,最高偏差为 0.66%,偏差甚微。

固有的工艺特点决定了喷射沉积制品具有一定的孔隙度,因此喷射沉积制品后续致密化加工工艺如轧制、锻压、热挤压和热等静压成为该技术今后的发展方向。

3 结论

(1)在喷射沉积试样的截面上肉眼可以观察到的宏观孔隙;也存在一些用肉眼无法观察到的大小不一的孔隙,形状有不规则的,月牙形的、也有近球形的,且这些孔隙遍布于整个沉积坯。

(2)喷射沉积坯整体致密度较低,其平均相对密度为 85.51%,熔滴到达沉积坯的位置对沉积坯致密度的影响是相对的,沉积坯各个部位的致密度虽有所差异,但偏差都甚微。

国家自然科学基金和上海宝钢集团公司联合资助项目(50474082)

参考文献

- 1 Singer ARE. The Principle of Spray Rolling of Metals. Metal and Mater, 1970, 31(4): 246
- 2 Mathur P, Applian D, Lawley A. Analysis of the Spay Deposition Process. Acta Metallurgy, 1989, 37(2): 429
- 3 Lawley A, Applian D. Spay Forming and Matrix Composition. Proc the Second International Conference on Spay Forming. UK: Neath, 1993: 267
- 4 Yang Y, Hannula S P. Soundness of Spray Formed Disc Shape Tools of Hot-work Steels. Materials Science and Engineering, 2004, 383A: 39
- 5 王爱敏,张胤,贺友多,等. 喷射成形沉积坯组织及机械性能分析. 炼钢, 2007, 23(5): 37
- 6 王永斌,张胤,张云松,等. 喷射成形 GCr15 钢的实验研究. 包头钢铁学院学报, 2006, 25(1): 37
- 7 王爱敏,李岩,张云松,等. 喷射成形沉积坯组织性能分析. 包头钢铁学院学报, 2005, 24(3): 233
- 8 Teng X, Mae H, Bai Y, et al. Pore Size and Fracture Ductility of Aluminum Low Pressure Die Casting. Engineering Fracture Mechanics, 2009, 76: 983
- 9 Lubanska H. Correlation of Spray Ring Data for Gas Atomization of Liquid Metals. Journal of Metals, 1970, 22(2): 45
- 10 Trapaga G, Matthys E E, Valencia J J, et al. Fluid Flow, Heat Transfer and Solidification of Molten Metal Droplets Impinging on Substrates: Comparison of Numerical and Experimental Results. Metall Trans B, 1992, 23B: 701

樊文军(1976-),男,硕士,讲师,从事冶金过程数值模拟研究。

收稿日期:2011-06-08