

工业化含锌粉尘处理技术现状及分析

结合钢铁企业实际分析了锌的来源及危害，并对国内外现有工业化含锌粉尘处理技术进行了阐述，包括选矿法、湿法以及火法技术，重点介绍了Waelz回转窑、转底炉、Oxycup竖炉、DK小高炉等几种工艺的特点和发展现状，通过不同处理技术的对比和分析，对企业采用适宜的处置方式提出了建议。

钢铁企业在炼铁、炼钢以及轧钢等各工序会产生大量粉尘，约占到总钢产量的10%左右。随着近年来雾霾天气频发，保护环境成为全社会共识，国家针对工业粉尘排放的管控日趋严格，尤其重点涉及的钢铁企业压力加大，各工序除尘设施不断增加升级，使粉尘的数量也持续增加，这些粉尘往往含有大量铁和碳而具有很高的利用价值，传统方式一般将其作为配料返回烧结，实现企业内部回收。

但其中部分粉尘含有较高的锌等有害元素，直接回配将使锌不断循环富集，导致高炉锌负荷超标，对生产顺行和安全长寿造成危害，而另一方面由于含锌粉尘质量远不及传统炼锌原料，提锌价值有限，通常也无法直接给炼锌企业使用，因此如何有效处置含锌粉尘一直是业界的重要课题。目前国内外已有诸多工业化成熟技术，本文对相关工艺进行了阐述和分析，以期为企业采用适宜的处置方式提供参考。

1 钢铁生产系统中锌的来源

钢铁企业从高炉顺行及安全长寿考虑，应严格限制原燃料锌含量，通常要求高炉锌负荷不超过0.15kg/t(铁水)，但由于经营形势、原料条件或主观上不重视，很多企业的高炉锌负荷都超出以上标准。以鞍钢为例，鞍钢鲅鱼圈分公司4038m³高炉锌负荷曾达到1.5kg/t左右，通过进行高炉锌平衡分析发现，90%以上的锌都是由烧结矿带入，表1为进一步对烧结部分原料检验锌含量后的对比结果。

表1 含铁原料锌含量对比(质量百分数)

										%
高炉 干法灰	高炉 重力灰	炼钢 二次尘	烧结机头4 电场灰	转炉泥	烧结机头3 电场灰	烧结机头2 电场灰	矿槽 除尘灰	混匀矿	烧结机尾 除尘灰	高炉 返矿
16.900	4.120	3.000	1.060	1.020	0.980	0.440	0.250	0.180	0.160	0.150
烧结机头1 电场灰	轧钢 铁皮	精矿1	球团 除尘灰	精矿2	精矿3	精矿4	生石灰	镁石	石灰石	
0.120	0.029	0.009	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	

由表1可知，粉尘类物料的锌含量普遍较高，尤其高炉干法布袋灰含锌最高，而各精矿的锌含量都较低(均未超过0.01%)，因此含锌粉尘回配烧结是导致高炉锌负荷过高的直接原因，经过减少和暂停回配干法灰等高锌粉尘料后，高炉锌负荷随之明显降低。

钢铁生产系统中的锌初始主要来源于铁矿原料，虽然铁矿中伴生的锌含量都极低，但由于锌的循环富集特点使其在系统中会不断累积，而迫于成本压力使用低价料比例增大，入炉品位降低，也促使进入系统的锌量增加。另一方面，随着镀锌产品增长，炼钢中使用的含锌废钢也成为钢铁系统中锌的一大来源，含锌废钢的使用使转炉粉尘的锌含量明显提高，电炉炼钢粉尘的锌含量通常会更高。

在传统钢铁生产过程中，含锌粉尘回配烧结模式导致锌的循环几乎没有出口，从而造成系统中的锌量只增不减，尤其对高炉造成诸多危害影响，减少粉尘回配量或短期停用并不能从根本上解决问题，关键还是要脱除锌等有害元素，国外在此领域的研究较早，开发了众多的含锌粉尘处理工艺，尤其一些已工业化的成熟技术值得借鉴。

2 工业化含锌粉尘处理技术概况

2.1 选矿法处理技术

选矿法即采用常规选矿技术实现粉尘中Zn、C、Fe元素的分离和富集，根据锌具有富集在粒度较小和磁性较弱粒子上的特性，可利用水力旋流器使含锌高的较细粉尘溢流[1]，含锌低的较粗粉尘底流，进而通过重选浮选选碳、磁选选铁。选矿法相对工艺简单、运行成本低、易于实施，但脱锌率相对不高，能达到70%左右，从提锌考虑一般作为湿法或火法工艺的预处理工艺。

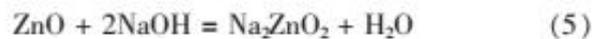
2.2湿法处理技术

湿法技术一般用于较高锌含量(>15%)的粉尘处理，主要有酸浸法和碱浸法。酸浸法主要是用硫酸、盐酸、醋酸等作浸出剂，粉尘中的锌化合物在酸中溶解，对浸出液过滤除杂后电积回收锌，部分化学反应如下：



采用强酸(硫酸、盐酸等)浸出工艺锌的浸出率较高，在常温常压下为80%以上，在高温、加压条件下可提高到90%以上，但大量铁及其他硅、铝等杂质也易被浸出，加重了后序净化负担，影响产品质量[2]。弱酸(碳酸、醋酸等)浸出工艺能耗较低，氧化锌产品质量较高，但锌浸出率低，特别是当其主要以铁酸锌形式存在时，锌浸出率更低。

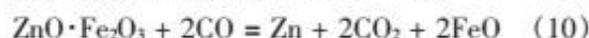
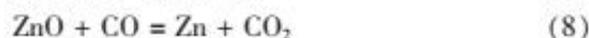
碱浸法主要是用氢氧化钠等强碱作浸出剂，还有用氨溶液或氨与铵盐的混合溶液作浸出剂，锌氧化物溶于碱中转入溶液，部分化学反应如下：



碱浸法相对选择性好，得到的浸出液更纯，可制取纯度较高的氧化锌产品，但锌浸出率相对较低，铁酸锌形式的锌难被浸出。总体而言，湿法工艺相对能耗小、设备投资少，但浸出剂消耗多，生产效率较低，除杂工艺步骤繁琐，而且普遍存在设备腐蚀严重、浸渣易造成二次污染等问题。由于湿法工艺更适用于较高锌含量的粉尘处理，通常国外用其处理电炉粉尘方面研究的较多。

2.3火法处理技术

目前钢铁企业普遍流行的处理方法仍是火法工艺，对相关设备和配套技术也更加熟悉。火法处理工艺的基本原理都是利用锌沸点较低、高温易挥发的性质，通过还原使粉尘中的锌挥发再富集回收。主要化学反应为：



火法工艺的典型工业化代表是回转窑、转底炉、竖炉和小高炉几种技术，此外还有一些利用微波、等离子等手段的新技术，下面对几种典型的火法脱锌工艺进行介绍。

2.3.1回转窑工艺

回转窑工艺脱锌率较高，普遍能达到90%以上，欧美HorseheadResourcesDevelopment、B.U.SAG、GlobalSteelDustLtd等，以及日本住友金属、中国台湾钢联等都广泛采用(表2)，处理能力从数万到数十万吨，大都用于处理含锌>15%的电炉粉尘，否则经济效益不佳，不过日本开发的回转窑倾向处理低锌粉尘。国内同类型回转窑多是Waelz工艺，大都是炼锌企业用来处理浸出渣，而处理钢铁粉尘的较少，文献介绍过的有云南红河锌联公司、昆钢等采用过其技术[4]。

回转窑工艺是用固体燃料作还原剂，以回转窑为反应器，能处理较广的原料，目前已发展出多种类型，有威尔兹法(Waelz)、川崎法、SL/RN法、SDR法等。其中以Waelz回转窑工艺应用最为广泛，该工艺是20世纪20年代德国克虏伯公司为处理锌精炼渣而开发，其基本流程见图1[3]。

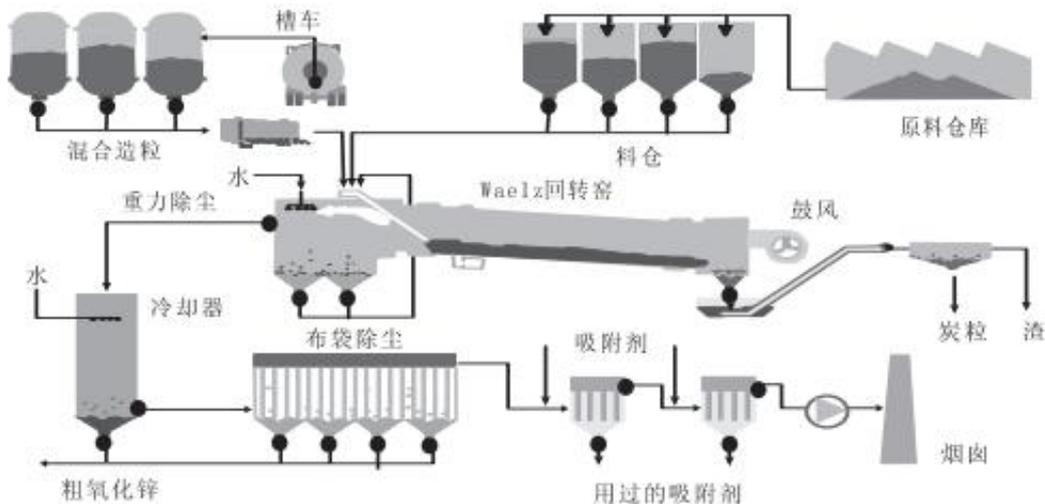


图1 Waelz 回转窑工艺流程

具体将含锌粉尘和还原剂(煤、焦粉或含碳粉尘)辅以石灰等，经配料、混合造球(也可不造球)送入回转窑，在1100~1300 高温处理，物料中的金属氧化物与碳质还原剂发生反应，还原的锌挥发进入烟气并二次氧化，烟气经冷却(或余热锅炉换热)后集尘，其中氧化锌含量约55%~60%，可作为锌冶炼厂粗氧化锌原料;还原后的窑渣经破碎、磁选等，金属化铁料可作为炼铁高炉或烧结原料，残留的炭粒也被回收。另外还设置有吸附过滤装置，用吸附剂(活性炭等)过滤氯化物及二噁英等污染物，使废气达到排放标准。

表2 部分回转窑工艺应用情况

应用企业	工艺类型	粉尘处理能力/($10^4 t \cdot a^{-1}$)	脱锌率
美国 HRDC	Waelz	100(美国、加拿大约7家工厂总计)	90%以上
德国 B.U.S	Waelz	50(德国、法国、意大利4家工厂总计)	
瑞士 GSD Global Steel Dust Ltd	Waelz	11 沙特工厂(泰国也计划建厂)	
台湾钢联 TSU	Waelz	18.9(1座 8.9 万 t、1座 10 万 t)	
韩国锌业有限公司	Waelz	20	
日本钢管福山厂	SL/RN	35	86%以上
川崎制铁水岛厂	川崎法	18	94%以上
川崎制铁千叶厂	川崎法	18	94%以上
住友金属和歌山厂	SDR 法	15.6	90%以上
住友金属鹿岛厂	SDR 法	12	90%以上

回转窑工艺具有工艺成熟、投资低、运行简单的显著优点，但处置低锌物料不太适宜，铁料金属化率也低，生产过程中常发生结圈现象，宝钢曾进行回转窑处理高铁含锌尘泥工业试验，发现窑内结圈相当严重，认为不可行。

2.3.2转底炉工艺

转底炉是目前钢铁企业应用最广泛的处理工艺，该技术最早可以追溯到1965年由MidlandRoss公司(Midrex公司前身)开发的Heat-Fast工艺，转底炉不仅仅局限于处理钢厂内含锌固废，后来也作为一项非高炉炼铁工艺得以不断改进和发展，至今已开发出多种类型，例如Fastmet、IN-METCO、ITmk3等工艺。

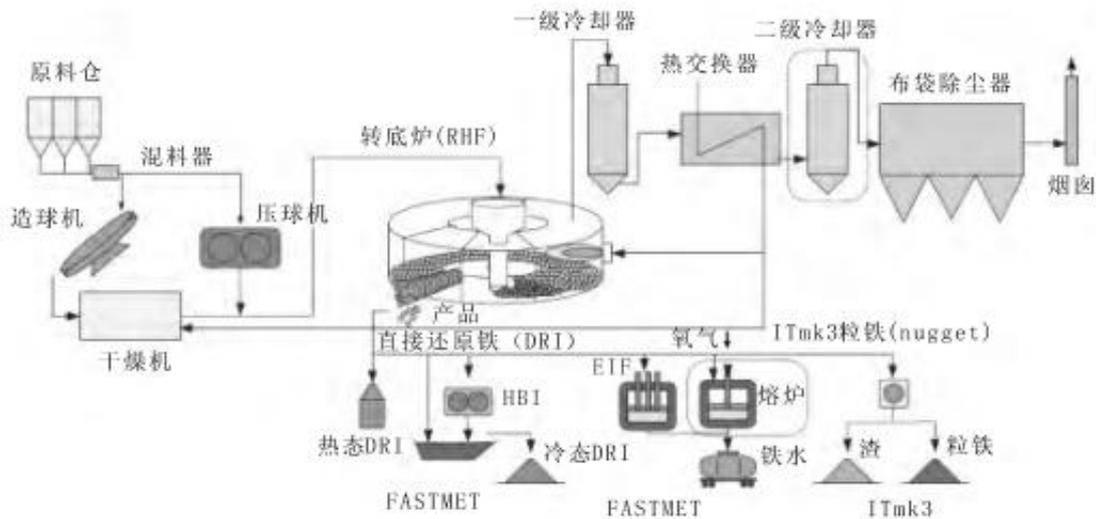


图2 转底炉工艺流程

比较典型的如Fastmet工艺(图2)[5]，其工艺过程主要是将含锌粉尘(或铁矿)与其它碳质还原剂混合造球(或压块)，干燥后送入转底炉，炉料随着炉底旋转1周约10~30min，料层高度约1~3层球团，在1250℃以上高温快速还原处理，锌等元素还原挥发进入烟气，普遍可实现脱锌90%以上，同时获得金属化率70%以上的金属化球团。

转底炉工艺很受日本钢铁企业青睐，新日铁、神户制钢等先后投产多座并对其展开深入研究，我国也有很多钢铁企业投产，如马钢、沙钢、日照、荣程、莱钢、台湾中钢等(表3)[6]，大都用于处理企业内部产生的炼铁及炼钢含锌粉尘固废，也有企业直接使用铁矿生产DRI或粒铁。

表 3 部分转底炉工艺应用情况

应用企业	工艺类型	投产时间	处理能力/(万 t·a ⁻¹)	产品
新日铁君津 1 号	Inmetco	2000 年 5 月	18	粗 ZnO 粉及 DRI
新日铁君津 2 号	DRylron	2002 年 12 月	13	粗 ZnO 粉及 DRI
新日铁君津 3 号	DRylron	2008 年 3 月	31	粗 ZnO 粉及 DRI
新日铁广畑 1 号	Fastmet	2000 年 4 月	19	粗 ZnO 粉及 DRI
新日铁广畑 2 号	Fastmet	2005 年 2 月	19	粗 ZnO 粉及 DRI
新日铁广畑 3 号	Fastmet	2008 年 12 月	19	粗 ZnO 粉及 DRI
新日铁广畑 4 号	Fastmet	2011 年 10 月	22	粗 ZnO 粉及 DRI
新日铁光厂	DRylron	2001 年 5 月	2.8	粗 ZnO 粉及 DRI
住金不锈钢	DRylron	2001 年 5 月	3.0	粗 ZnO 粉及 DRI
神户加古川厂	Fastmet	2001 年 4 月	1.4	粗 ZnO 粉及 DRI
JFE 西日本厂	Fastmet	2009 年 4 月	19	粗 ZnO 粉及 DRI
美国 ITmk3 厂	ITmk3	2010 年 1 月	50	粒铁
意大利 Lucchini Piombino	Inmetco	2010 年 4 月	6	粗 ZnO 粉及 DRI
韩国浦项	DRylron	2009 年 9 月	20	粗 ZnO 粉及 DRI
韩国光阳	DRylron	2009 年 12 月	20	粗 ZnO 粉及 DRI
中国台湾中钢	DRylron	2007 年 12 月	13×2	粗 ZnO 粉及 DRI
台湾烨联钢铁	Inmetco	2004 年	6	粗 ZnO 粉及 DRI
马钢	DRylron	2009 年 5 月	20	粗 ZnO 粉及 DRI
沙钢	神雾	2010 年 10 月	30	粗 ZnO 粉及 DRI
日照钢铁	钢研总院	2010 年 4 月	20×2	粗 ZnO 粉及 DRI
莱钢	莱钢、北科大	2011 年 3 月	30	DRI
山西翼城	北科大	2004 年	7	DRI
四川龙蟒	神雾	2007 年	7	DRI
天津荣程	神雾	2009 年	80	DRI
攀钢	神雾	2010 年	10	DRI

转底炉工艺经过多年发展已经很成熟，脱锌率普遍较高，与其它方法相比，转底炉的优点在于对原燃料的要求比较灵活，工艺设备简单易于制造，转底炉本体类似于轧钢环形加热炉，一些辅助设施也与传统球团厂相似，投资较低，污染也相对较小。缺点是由于转底炉主要依靠辐射传热，炉底只铺 1~3 层球团，普遍存在能耗高、生产率低的问题；另外由于处理的粉尘成分复杂，烟气中易凝结物质较多，使余热回收系统容易出现堵塞黏结；出料设备、耐材等损耗较快也需进一步优化。

2.3.3 富氧竖炉工艺

传统冲天炉用于熔炼铸造铁已有多年历史，炉料包括生铁、废钢等，燃料采用铸造焦和气体燃料等，德国 Kuttner 公司开发的 Oxycup 富氧竖炉工艺即源自传统冲天炉的改良技术。该工艺基本流程如图 3[7]。将烧结、高炉、转炉及轧钢等工序产生的各类粉尘配以焦粉等还原剂，以水泥为黏结剂，混合压制成大小约 100 ~ 150mm 的六棱柱型砖块，养护约 3 天即可入炉使用。Oxycup 炉为富氧热风竖炉，从炉顶装入型砖、废钢、渣钢、焦炭、砾石等炉料，从下部风口吹入富氧热风，炉料经过预热、还原、熔化、渣铁分离等冶金过程，最终生成铁水、炉渣和煤气。煤气净化后可预热热风或并入煤气管网，湿法除尘收集的富锌粉尘污泥外销给炼锌厂，脱锌率达到 95% 以上。

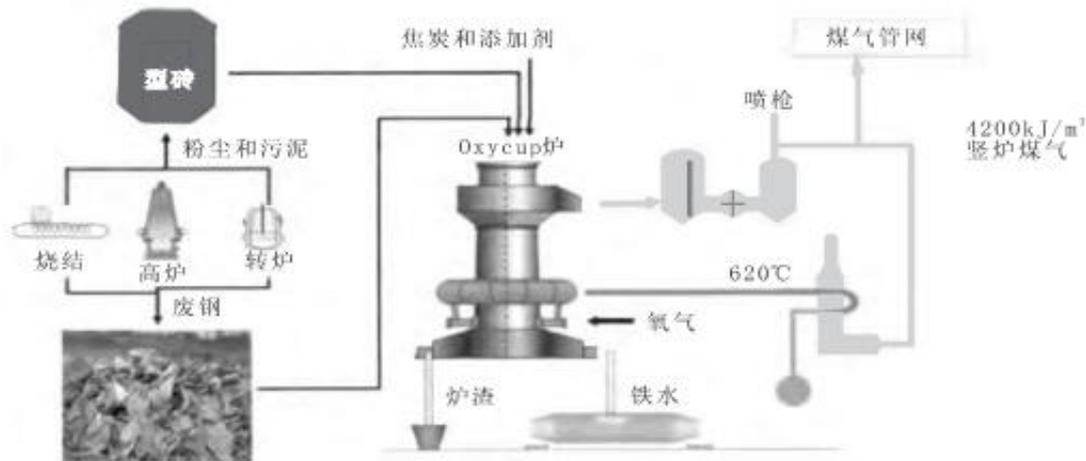


图3 Oxycup 富氧竖炉工艺流程

14 -

Oxycup工艺在墨西哥Sicartsa、德国TKS、日本新日铁、JFE和我国太钢都有采用，部分竖炉工艺应用情况见表4所示。

应用企业	处理能力/ (t·h ⁻¹)	所用原料	投产 时间
墨西哥 Sicartsa	80	压块型砖及废钢、HBI等	1998年
德国 TKS	25~50	压块型砖及废钢等	2004年
日本新日铁	60	含碳球团及废钢等	2005年
日本 JFE	80(双炉)	压块型砖及废钢等	2008年
中国太钢	50×2	碳钢及不锈钢固废 压块型砖	2011年

德国蒂森克虏

伯公司所用的竖炉高约10m，炉

缸直径2.6m，处理能力25~50t/h，其热风流量30000m³/h，温度约650℃，鼓风压力40kPa，同时喷入3500m³/h氧气，

焦比为200~350kg/t

。采取连续出铁制度，铁水产量15~

65t/h，渣量15~30t/h，炉顶煤气量约50000m³/h，热值约4200kJ/m³

，煤气除尘污泥可以压块回用，一般使含锌量富集到30%以上再外销。每6周左右要停炉维修一次，主要是修补耐材，检修需约6天时间。

Oxycup工艺具有传统冲天炉的优点，对炉料种类适应性广、炉料强度要求低、生产灵活，能够处理钢铁企业含锌粉尘以及渣钢类的大块废料。缺点是燃料比较高、设备运行周期短、维修量大，此外压块工序也投资较高、流程较复杂。

2.3.4小高炉工艺

德国DK公司专门利用580m³小高炉处理各类钢铁粉尘和废旧电池，每年处理欧洲各钢厂的45万t含锌粉尘，可回收28万t生铁和1.7万t富锌粉，同时处理废旧电池达到2000t/a左右。

工艺过程即传统高炉炼铁模式，配套60m²烧结机，烧结所用原料为转炉尘泥、高炉尘泥、轧钢铁皮、电池等固体废料及部分正常铁矿，高炉主要冶炼铸造铁，焦比为630kg/t，煤比为70kg/t，燃料比在700kg/t以上，煤气利用率约为30%，高炉风口12个，风量65000m³/h，日产铁量约1000t。

由于DK小高炉主要以各种固废为原料，入炉碱金属负荷约为8.5kg/t，锌负荷则达到38kg/t[8]，高炉煤气除尘可回收富锌粉尘，其锌含量高达65%~68%，具有很高市场价值。

DK小高炉工艺完全基于传统炼铁模式，各种设备及技术相当成熟，除了钢铁粉尘还能有效处理废旧电池。缺点是专门处理各类固废，高炉碱金属、锌等负荷极高，对长寿及顺行的危害影响也更严重。

3含锌粉尘处理工艺对比

表 5 含锌粉尘处理工艺对比

项目	选矿工艺	湿法工艺	火法工艺			
			回转窑	转底炉	富氧竖炉	小高炉
适用粉尘	高锌粉尘	中高锌粉尘	电炉粉尘	各类粉尘	各类粉尘	各类粉尘
脱锌率/%	70	80	>90	>90	>95	>95
原料处理工序	无	无	无/造球	造球/压球	压块型砖	烧结
年处理量/万t		10	15	30	40	45
作业率/%	较高	较高	70	90	80	95
优点	工艺简单 成本低	能耗小 成本低	工艺成熟、 运行简单	工艺较成熟 原料要求低	炉料要求低 生产灵活 处理大块废料	工艺成熟 处理废电池
缺点	脱锌率低	原料要求高 工艺繁琐 环境污染大	原料要求高 结圈严重 作业率低	生产率 换热器易 堵塞	作业率低 炉衬寿命短 制砖成本高	使用小高炉 有害元素影 响大

表5对钢铁含锌粉尘处理技术进行简要对比。综合来看，火法工艺相对更契合我国钢铁企业，其中回转窑较适于处理高锌的电炉粉尘，否则经济上可能不划算，小高炉虽是钢铁企业最熟悉的工艺，但目前国家限制其发展，这也使国内含锌粉尘的处理主要集中在转底炉与竖炉工艺上。需要注意的是，几种火法工艺在国外都取得了较好的经济和环境效益，这与其自身各方面条件以及国外严格的环保法规是分不开的。此外钢铁企业含锌粉尘具有循环累积的特点，随着开路处理会使系统循环的锌量减少，粉尘含锌量也会降低，脱锌意义下降，因此选择处理工艺还应综合其它功能，例如转底炉能生产金属化球团，富氧竖炉可以熔炼废钢铁等，各有特点，企业应结合自身需求慎重考虑。

4结语

随着入炉原燃料质量下降、含锌废钢用量增加，同时环保压力不断加大，含锌粉尘的有效处理已成为钢铁企业一项重要工作。由于传统工艺模式下无法避免锌的循环和危害，采用新的专门处置工艺成为可行措施之一，对比目前已工业化的几类处置技术，综合来看火法工艺更适合钢铁企业，Waelz回转窑、转底炉、Oxycup竖炉、DK小高炉等各具特点，都取得了比较成功的经验，目前国内投产转底炉较多，其次是富氧竖炉，经过多年生产实践已日趋成熟，企业可结合自身各方面条件选择适宜的工艺路线，或参考其运行经验，继续深入研究，探寻更高效、更经济的处理方法。

原文地址：<http://www.china-nengyuan.com/tech/124102.html>